



Klimarisikoanalyse für Niedersachsen 2025



Niedersachsen. Klar.

Impressum

Herausgeber:

Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO)

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und
Klimaschutz

Archivstraße 2, 30169 Hannover

Tel.: 0511/120-3500

niko@mu.niedersachsen.de

www.niko-klima.de

Mitglieder der Arbeitsgruppe Klimarisikooanalyse des Klimakompetenznetzwerks

Cordula Berkenbrink	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
Jan Bug	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Jörg Elbracht	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Nicole Engel	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Katrin Flasche	Kommunale Umwelt-AktioN
Mithra-Christin Hajati	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Lena Hübsch	Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel
Henning Meesenburg	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Heike Neukum	Kommunale Umwelt-AktioN
Marc Overbeck	Niedersächsische Landesforsten
Uwe Petry	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Yvonne Saathoff	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Wiebke Schumacher	Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Unter Mitarbeit von

Helge Bormann	Jade Hochschule
Gian Christian Bremm	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
Gerald Burgdorf	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Bernhilde Deitermann	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Gabriele Ertl	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stefan Feichtinger	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Hendrik Hanekamp	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Katja Hille	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Nils Hintz	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Tobias Holt	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Kai-Hendrik Howind	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Krischan Hubert	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
Claudia Jopp	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Ulrike Junius-Walker	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Christiane Klier	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Heiko Knaack	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
Katharina Kohls	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Kerstin Maaser	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Gudrun Massmann	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Marc-Alexander Lieboldt	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Masyar Monazahian	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Patrick Nistahl	Harzwasserwerke GmbH
Margarethe Nowicki	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Dennis Oberrecht	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
Tammo Peters	Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Stefan Plötner	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Lena Rönn	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Natalie Sadowski	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Gregor Scheiffarth	Nationalparkverwaltung Niedersächsischer Wattenmeer
Malte Schilling	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Stephan Seibert	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Jan Spiekermann	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Johannes Sutmöller	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Lena Thissen	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Alexander Utecht	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Sonja Wolken	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Lisa Wandschneider	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Gunter Wriedt	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Sylvia Zaun	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

Zitierhinweis:

Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen (2025): Klimarisikoanalyse für Niedersachsen 2025, Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO), Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz.

Fachliche Leitung:

Mithra-Christin Hajati (LBEG), Lena Hübsch (NIKO)

Redaktion:

Jorid Meya (NIKO)

Abschlussdatum:

Dezember 2025

Bildquellen:

Seite 22+23: Adobe Stock

Seite 42+43: Denise Harders

Seite 44: Robin Stadtmann

Seite 58: Rudi Arlt/pixabay.com

Seite 82: Trutschel/Fotothek

Seite 88+89: Adobe Stock

Seite 90: Stefan Feichtinger

Seite 102: NLWKN

Seite 138: NLWKN

Seite 178+179: Enke Franck

Seite 196+197: Denise Harders

Vorwort des Ministers

Liebe Leserinnen und Leser,

die ersten Tage des Jahres über 25 Grad schon im April, der trockenste März seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, Hitzetage im Juni: Die Klimakrise ist längst angekommen in Niedersachsen, das konnten wir im Frühjahr und Sommer 2025 sehen und spüren. Um diesen Aufgaben zu begegnen, brauchen wir konsequenten Klimaschutz, aber auch Klimaanpassung – eine Aufgabe, die wir nur zusammen bewältigen können.

Die nun erschienene Klimarisikoanalyse für Niedersachsen bildet eine wichtige Grundlage, um Niedersachsen widerstandsfähig gegenüber weiteren Folgen der Klimakrise zu machen. Anhand von 42 Klimarisiken in den sieben Handlungsfeldern Boden, Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Fischerei, Küsten- und Meeresschutz, Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft sowie menschliche Gesundheit zeigt die Klimarisikoanalyse dringende Handlungserfordernisse auf. Sie ergänzt den 2023 erschienen Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen und ist Grundlage für die Fortschreibung der Niedersächsischen Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.

Die Klimarisikoanalyse und die mit den der Klimakrise einhergehenden ausgewerteten Risiken zeigen nachdrücklich, dass ein großer Handlungsbedarf im Bereich der Böden, der Landwirtschaft, der Waldwirtschaft, der Fischerei, des Küstenschutzes, der Wasserwirtschaft, der Gesundheit bereits besteht und sich weiter erhöhen kann. Wir brauchen Anpassungsmaßnahmen, um den Klimarisiken der Gegenwart, aber auch Mitte und Ende des Jahrhunderts begegnen zu können. Was angemessene Klimaanpassungsmaßnahmen sind, kann je nach Klimaregion, je nach Ort anders aussehen – deshalb möchten wir mit dieser Klimarisikoanalyse eine Datengrundlage für kommunale Klimarisikoanalysen bieten. Und: Klimaanpassungsmaßnahmen wie zum Beispiel Deicherhöhungen sind nicht unendlich wirksam. Um die Belastungen für Mensch und Umwelt so gering wie möglich zu bleiben halten, brauchen wir konsequenten Klimaschutz.



Mit der Klimarisikoanalyse ist unser Auftrag klar: Wir müssen das Klima schützen und uns zielgerecht anpassen – mithilfe konsequenter Klimaziele, dem Ausbau von Erneuerbaren Energien und indem wir Niedersachsens Landkreise, kreisfreien Städte und Gemeinde bei der Planung und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen unterstützen. Mit dem Niedersächsischen Klimagesetz machen wir genau das.

Die Klimarisikoanalyse wurde vom Klimakompetenznetzwerk Niedersachsens unter Koordinierung des Niedersächsischen Kompetenzzentrum Klimawandel, kurz NIKO, erstellt. Mein Dank gilt den Mitarbeiter:innen im NIKO, dem Landesamt für Bergbau Energie und Geologie, der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz mit der Forschungsstelle Küste, der Kommunalen Umwelt-AktioN und dem Niedersächsischen Landesgesundheitsamt.

Ich hoffe, die Lektüre liefert Ihnen neue Erkenntnisse und neues Wissen – und regt Sie vielleicht zum Nachdenken an, wie wir alle unser Klima noch besser schützen können.

Ihr Christian Meyer
Niedersächsischer Minister für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Ministers	7
Tabellenverzeichnis.....	11
Abbildungsverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	18
1 Glossar	20
2 Einleitung	23
2.1 Konzept und Methodik.....	25
2.2 Methoden zur Erstellung von Klima- und Klimawirkungsprojektionen	27
2.2.1 Klimaprojektionen für Niedersachsen	28
2.2.2 Bodenkundliche Projektionen für Niedersachsen	32
2.2.3 Projektionen für den Wald in Niedersachsen	34
2.2.4 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Niedersachsen.....	35
2.2.5 Hydro(geo)logische Projektionen für Niedersachsen	36
2.3 Räumliche Gliederungen Niedersachsens.....	38
2.3.1 Klimaregionen Niedersachsens.....	38
2.3.2 Flusseinzugsgebiete Niedersachsens.....	39
2.3.3 Hydrogeologische Räume Niedersachsens	40
2.3.4 Naturregionen Niedersachsens.....	41
3 Cluster Land.....	43
3.1 Handlungsfeld Boden	45
3.1.1 Wassermangel im Boden	46
3.1.2 Verminderte Retentionsleistung der Böden	49
3.1.3 Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser.....	52
3.1.4 Bodenerosion durch Wasser	54
3.1.5 Bodenerosion durch Wind	56
3.2 Handlungsfeld Landwirtschaft.....	59
3.2.1 Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren.....	61
3.2.2 Abiotischer Stress (Pflanzen)	65
3.2.3 Verschiebung von Anbaugebieten.....	68
3.2.4 Verschiebung von Vegetationsperioden.....	70
3.2.5 Stress durch Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen).....	73
3.2.6 Ertragsausfälle	76
3.2.7 Qualität der Ernteprodukte	80
3.3 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft.....	83
3.3.1 Trockenstressrisiko im Wald.....	84

4 Cluster Wasser	89
4.1 Handlungsfeld Fischerei	91
4.1.1 Kommerzielle Fischbestands-änderung in der südlichen Nordsee	93
4.1.2 Auswirkungen auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatusfischereilich genutzter Arten im Binnenland	97
4.1.3 Verknappung der Produktions-ressourcen für die Aquakultur	100
4.2 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz.....	103
4.2.1 Meeresspiegelanstieg.....	104
4.2.2 Sturmflut.....	107
4.2.3 Seegang	110
4.2.4 Küstennahe Strömungen	112
4.2.5 Entwicklung des Wattenmeers.....	114
4.2.6 Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer	118
4.2.7 Küstennahe Grundwasserversalzung.....	124
4.2.8 Geschützte Niederungsgebiete der Festlandsküste	128
4.2.9 Entwässerung der Küstenniederungen	131
4.2.10 Belastung auf den Insel- und Küstenschutz	135
4.3 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	139
4.3.1 Hochwasser	141
4.3.2 Starkregen.....	145
4.3.3 Vernässung durch Grundwasser.....	148
4.3.4 Grundwasserhochstand	151
4.3.5 Niedrigwasser	156
4.3.6 Grundwasserdürre	161
4.3.7 Grundwassertiefstand.....	165
4.3.8 Mangel an Bewässerungswasser	169
4.3.9 Talsperrenbewirtschaftung	173
4.3.10 Grundwasserqualität	176
5 Cluster Gesundheit	179
5.1 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit.....	180
5.1.1 Gesundheitsrisiken durch Hitzebelastung	181
5.1.2 Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung	182
5.1.3 Klimagerechtigkeit	184
5.1.4. Vektoren und Nagetiere: Übertragung klimasensibler Infektionskrankheiten.....	188
5.1.5 Vibrio vulnificus	191
5.1.6 Cyanobakterien (Blaualgen)	193

6 Integrierte Auswertung.....	197
6.1 Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne zukünftige Anpassung	198
6.1.1 Handlungsfeld Boden	199
6.1.2 Handlungsfeld Landwirtschaft.....	200
6.1.3 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft.....	201
6.1.4 Handlungsfeld Fischerei	202
6.1.5 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz	203
6.1.6 Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft	204
6.1.7 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit.....	205
6.2 Handlungsfeldübergreifende Auswertung	206
6.2.1 CO ₂ -Konzentration	206
6.2.2 Temperatur	206
6.2.3 Meeresspiegelanstieg.....	208
6.2.4 Niederschlag	208
6.2.5 Sonnenscheindauer / UV-Strahlung	209
6.2.6 Wind	209
6.3 Räumliche Risikofaktoren	210
6.3.1 Küstenregion	211
6.3.2 Flachland	213
6.4 Ausblick.....	216
6.4.1 Handlungserfordernisse	216
6.4.2 Forschungsbedarf	220
6.4.3 Fazit	223
7 Literatur	224
Anhang	250
A.1 Niedersächsische Klimakompetenz.....	250

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beteiligte Institutionen der Arbeitsgruppe „Klimarisikooanalyse des Klimakompetenznetzwerks Niedersachsen“ mit den jeweiligen Handlungsfeldern, die federführend bearbeitet wurden.....	25
Tabelle 2: Intensiv betrachtete Klimarisiken mit zugehörigen Klimamodellensembles, mit denen die Klimarisiken berechnet wurden.....	27
Tabelle 3: Klimatischer Einfluss (klimatische Änderungen) für Niedersachsen und die niedersächsischen Klimaregionen für den Bezugszeitraum (1971–2000), die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060 zu 1971–2000) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100 zu 1971–2000) für das „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP8.5). Definition der klimatischen Parameter findet sich in Hajati et al. (2022).....	30
Tabelle 4: Mittelwerte der Effektiven Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).....	47
Tabelle 5: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“	48
Tabelle 6: Mittelwerte der Retentionsleistung [dimensionslos] im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).....	50
Tabelle 7: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Verminderung der Retentionsleistung der Böden“	51
Tabelle 8: Mittelwerte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).....	53
Tabelle 9: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Stoffaustrag aus Böden“	53
Tabelle 10: Mittlerer jährlicher potenzieller Bodenabtrag im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).....	55
Tabelle 11: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“	55
Tabelle 12: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“	57
Tabelle 13: THI-Werte für Milchkühe (Brügemann et al., 2012) und für Schweine und Geflügel (Sake et al., 2024; Wegner et al., 2016; 2014).....	61
Tabelle 14: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren“	64
Tabelle 15: Ertragsabweichung des aktuellen Jahres vom Mittelwert des vorherigen 5-Jahreszeitraums in dt/ha (LSN, 2024b).....	66
Tabelle 16: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“	67
Tabelle 17: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Verschiebung von Anbaugebieten“	69
Tabelle 18: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“	72
Tabelle 19: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen)“	75
Tabelle 20: Errechnete mittlere rel. Ertragsveränderung gegenüber 2020; nach Söder et al. (2022).....	77
Tabelle 21: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Ertragsausfälle“	79
Tabelle 22: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Qualität der Ernteprodukte“	81
Tabelle 23: Mittelwerte der Standortwasserbilanz im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).....	85
Tabelle 24: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Standortwasserbilanz“	86
Tabelle 25: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Kleine Hochsee- & Küstenfischerei: Entwicklung der Verbreitung kommerziell nutzbarer Arten in der südlichen Nordsee“	96
Tabelle 26: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Binnenfischerei & Aquakultur: Auswirkung des Klimawandels auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland“	99
Tabelle 27: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Binnenfischerei & Aquakultur: Qualitative- und quantitative Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur“	101

Tabelle 28: Mittlere Wasserstände (MTmw bezogen auf NHN) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (SSP5-8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für Borkum und Cuxhaven.....	106
Tabelle 29: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Meeresspiegelanstieg“.....	106
Tabelle 30: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Sturmflut“.....	109
Tabelle 31: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Seegang“.....	111
Tabelle 32: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Küstennahe Strömungen“.....	113
Tabelle 33: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Entwicklung des Wattenmeers“.....	117
Tabelle 34: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Wasserqualität“.....	123
Tabelle 35: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserversalzung“.....	127
Tabelle 36: Das Klimarisiko für die „Geschützten Niederungsgebiete der Festlandsküste“.....	130
Tabelle 37: Simulierte klimawandelbedingte Veränderungen der Abflussbildung (ΔQ) in den betrachteten Verbandsgebieten für 2071–2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum. Quelle: Spiekermann et al. (2023).....	132
Tabelle 38: Abnahme der potenziellen Sielzeiten im Winterhalbjahr unter Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von 110 cm bis zum Jahr 2100 (entsprechend dem 95. Perzentil des Szenarios RCP8.5) an den betrachteten Mündungsbauwerken (Bormann et al., 2023).....	133
Tabelle 39: Veränderungen der Entwässerungskapazitäten der betrachteten Mündungsbauwerke bezogen auf Normaltidebedingungen und Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5-Szenario, 95. Perzentil). Quelle: Bormann et al., 2023.....	134
Tabelle 40: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Entwässerung der Küstenniederungen“.....	134
Tabelle 41: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Belastung auf den Küstenschutz“ unter Berücksichtigung der laufenden Anpassungsmaßnahmen.....	137
Tabelle 42: Summe der Hochwasserereignisse (mit Abflussscheitel > MHQ) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).....	142
Tabelle 43: Summe der Hochwasserereignisse (mit Abflussscheitel > MHQ) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).....	143
Tabelle 44: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hochwasser“.....	144
Tabelle 45: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Überflutung durch Starkregen“.....	147
Tabelle 46: Anteil Flächen mit im Mittel hochanstehendem Grundwasser ($m_{hgw} \leq 1$ m), 90er Perzentil der Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen der Häufigkeit des Ereignisses unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene hydrogeologische Räume (KAPITEL 2.3.3).....	150
Tabelle 47: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vernässung durch Grundwasser“.....	147
Tabelle 48: Mittlere Grundwasserhochstände im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).....	153
Tabelle 49: Summe der Monate mit Grundwasserhochstand im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).....	154
Tabelle 50: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserhochstände“.....	155
Tabelle 51: Mittlerer Niedrigwasserabfluss (NM7Q) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).....	158
Tabelle 52: Anzahl der Niedrigwassertage (mit Abfluss < MNQ) pro Jahr im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).....	159
Tabelle 53: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Niedrigwasser“.....	160

Tabelle 54: Maximale Dauer der Grundwasserdürre im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.1).....	163
Tabelle 55: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserdürre“	164
Tabelle 56: Mittlere Grundwassertiefstände im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).....	166
Tabelle 57: Summe der Monate mit Grundwassertiefstand im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).....	167
Tabelle 58: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwassertiefstände“	168
Tabelle 59: Anteil der Ackerfläche, Differenz Grundwasserneubildung und Zusatzwasserbedarf im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene hydrogeologische Räume (KAPITEL 2.3.3).....	171
Tabelle 60: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Mangel an Bewässerungswasser“	172
Tabelle 61: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Talsperrenbewirtschaftung“	175
Tabelle 62: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserqualität“	177
Tabelle 63: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Cyanobakterien“	181
Tabelle 64: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vibrio vulnificus“	183
Tabelle 65: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hitzebelastung“	187
Tabelle 66: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „UV-Strahlung“	190
Tabelle 67: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Klimagerechtigkeit“	192
Tabelle 68: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vektoren und Nagetiere“	195
Tabelle 69: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Boden“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	199
Tabelle 70: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	200
Tabelle 71: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	201
Tabelle 72: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Fischerei“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	202
Tabelle 73: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	203
Tabelle 74: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	204
Tabelle 75: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „menschliche Gesundheit“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).....	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Methodik der KRANI 2025, angelehnt an die KWRA 2021.....	26
Abbildung 2:	Veränderung der mittleren Lufttemperatur in Niedersachsen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 mit LOESS-Trend in der Vergangenheit und den Treibhausgasszenarien „Klimaschutz“ (RCP2.6) und „Kein Klimaschutz“ (RCP8.5) für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100).....	28
Abbildung 3:	Veränderung des Winterniederschlags (A) und des Sommerniederschlags (B) in Niedersachsen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 mit loess Trend in der Vergangenheit und den Treibhausgasszenarien „Klimaschutz“ (RCP 2.6) und „Kein Klimaschutz“ (RCP8.5) für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100).....	29
Abbildung 4:	Klimaregionen Niedersachsens.....	38
Abbildung 5:	Flusseinzugsgebiete als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Hochwasser und Niedrigwasser sowie die jeweils zugehörigen Referenzpegel.....	39
Abbildung 6:	Hydrogeologische Räume Niedersachsens als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Grundwasserdürre, Vernässung durch Grundwasser und Mangel an Bewässerungswasser.....	40
Abbildung 7:	Naturregionen als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Grundwasserhochstand und Grundwassertiefstand sowie die zugehörigen Referenzmessstellen.....	41
Abbildung 8:	Effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	47
Abbildung 9:	Retentionsleistung der Böden [dimensionslos] in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	49
Abbildung 10:	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	52
Abbildung 11:	Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	54
Abbildung 12:	Potenzielle oder Standortabhängige Bodenerosionsgefährdung durch Wind für vegetationsfreie, landwirtschaftlich genutzte Böden nach DIN 19706 (Periode 1981–2000).....	56
Abbildung 13:	Darstellung der Anbauflächenverteilung in vier verschiedenen Regionen Niedersachsens (InVeKoS, 2023).....	68
Abbildung 14:	Untersuchungen zur Anbaueignung von Sojabohnen in Deutschland (Ausschnitt) (Roßberg & Recknagel, 2017).....	69
Abbildung 15:	Korrigierte Grünland-Temperatursumme (Methodik nach Ernst & Loeper (NIKO, 2023b)) in den Jahren 2002–2022 für verschiedene Wetterstationen (NDS=Niedersachsen; BB = Brandenburg, BY = Bayern; SH = Schleswig-Holstein; NRW= Nordrhein-Westfalen) des Deutschen Wetterdienstes.....	71
Abbildung 16:	Ertragsentwicklungen Winterweizen [dt/ha] der Jahre 1952–2022; verändert nach Daten des Landesamtes für Statistik Niedersachsen (LSN, 2024a).....	76
Abbildung 17:	Variationskoeffizient von Winterweizen seit 1950, verändert nach den Daten des Landesamtes für Statistik Niedersachsen (LSN, 2024a).....	76
Abbildung 18:	Ertragsdifferenzen in Niedersachsen im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2020 für unterschiedliche Kulturen, eigene Darstellung nach Söder et al. (2022).....	78

Abbildung 19: Ertragsdifferenzen in Niedersachsen im Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 für unterschiedliche Kulturen, eigene Darstellung nach Söder et al. (2022).....	79
Abbildung 20: Zuckergehalt und Rübenertrag im Mittel der neu zugelassenen Sorten. Wertprüfungen des Bundessortenamtes 1976–2017. Darstellung: IfZ (2018).....	80
Abbildung 21: Grenzwerte der Standortwasserbilanz für das Trockenstressrisiko der wichtigsten Baumarten in Niedersachsen (Böckmann et al., 2019).....	84
Abbildung 22: Standortwasserbilanz in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	85
Abbildung 23: Produktionskennzahlen Binnenfischerei u. Aquakultur Niedersachsen 2022 Quelle: Brämick, 2023.....	92
Abbildung 24: Anlandungen der Hochsee- und Küstenfischerei in Deutschland nach Fischart, ohne Muscheln (Edebohls et al., 2022).....	93
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Sauerstoffkonzentration und des Sauerstoffbedarfs, Quelle: Eigene Darstellung der LWK.....	98
Abbildung 26: Gemessene und prognostizierte Trendentwicklungen der Wasserstände für den Küstenstandort Cuxhaven. (Messdaten – Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (GDWS), Prognosedaten – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH)).....	105
Abbildung 27: Anzahl der Sturmfluten auf Norderney von 1916 bis 2023, Quelle: NLWKN.....	107
Abbildung 28: Gegenüberstellung gemessener Strömungsgeschwindigkeiten über einen Tidezyklus (schwarz) im Wattenmeer. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Rinne (blau) liegen deutlich über den Strömungsgeschwindigkeiten auf der Wattfläche (rot) (Kaiser & Niemeyer, 1996).....	112
Abbildung 29: Langzeitmessreihe der Station Norderney W2 von 1985 bis 2023 für die durchschnittliche Wassertemperatur (blau) und den durchschnittlichen pH-Wert (rot) des Wassers. Die aufgezeichnete lineare Trendlinie für die Temperatur steigt in diesem Zeitraum leicht an, während die lineare Trendlinie für pH leicht abfällt. Quelle: NLWKN.....	120
Abbildung 30: Überblick verschiedener Effekte der Versauerung für wichtige taxonomischer Gruppen, für die Aspekte Überleben, Kalzifizierung, Wachstum, Photosynthese, Abundanz und Entwicklung, Quelle: Kroecker et al. 2013.....	121
Abbildung 31: Veränderte Süßwasservolumina im SALTSA-Modellgebiet zwischen Ems und Weser für verschiedene Modellvarianten (verändert nach Seibert et al., 2024). Abgebildet sind die Differenzen zwischen der jeweiligen Variante und der Basis-Modellvariante (MBC), bei der sich die aktuellen Randbedingungen wie z. B. der Meeresspiegel, nicht weiter verändern. Gelb-rote Farben bedeuten also eine Abnahme der Süßwasservolumina, während blaue Farben eine Zunahme anzeigen. Die Zahlen in der oberen rechten Ecke zeigen an, wie stark Meeresspiegel (SLR), das Drainageniveau DRN(+) und DRN(-) sowie Landabsenkung (SUB) in der Modellvariante jeweils bis 2100 verändert wurden. Die Werte jeweils unten links nennen die jeweils absolute Änderung der Süßwasservolumina [km ³] im gesamten Modelgebiet (T), in der Marsch (M) sowie in der Geest (G) im Vergleich von 2100 zu 2020.....	125
Abbildung 32: Relative Veränderungen der 30-Jahre-Mittel von Süßwasserlinsenvolumen und -tiefe sowie der Mächtigkeit der Übergangszone zwischen der Referenzperiode 1971–2000 und 2071–2100 für die RCP8.5 Szenarien und unterschiedliche Inselbreiten. Negative Werte bedeuten eine Abnahme, positive Werte eine Zunahme des Parameters. Meeresspiegelprojektionen aus den Modellen HadGEM2 und MPI-ESM wurden mit verschiedenen Grundwasserneubildungsmodellen kombiniert, Ergebnisse der jeweils 6 Modelle sind als Boxplots dargestellt (verändert nach Thissen et al. (2024)).....	126
Abbildung 33: Das bereits heute vor Sturmfluten geschützte Gebiet (grün) und Erweiterung der Fläche für einen steigenden Meeresspiegel (Niemeyer et al. 2018).....	129
Abbildung 34: Modellbasierte Abschätzung der Veränderung der mittleren monatlichen Abflussbildung im Verbandsgebiet des 1. EV Emden für 2071–2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum. Quelle: Spiekermann et al., 2023.....	132

Abbildung 35: Projektion der potenziellen Sielzeiten bis Ende des Jahrhunderts für beispielhafte Mündungsbauwerke in Ostfriesland: Knock und Moormerland/Petkum. Quelle: Bormann et al.,(2023).....	133
Abbildung 36: Veränderungen der Entwässerungskapazitäten der Mündungsbauwerke Knock und Moormerland bezogen auf Normaltidebedingungen (grüne Linie) und Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide; blaue Linie) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 22100 (RCP8.5-Szenario, 95. Perzentil). Quelle: Bormann et al., 2023.....	134
Abbildung 37: Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	142
Abbildung 38: Summe der Hochwasserereignisse (mit Abflussscheitel > MHQ (1971–2000)) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	143
Abbildung 39: Jährliche Abweichung des Winterniederschlags zur Referenzperiode 1961-1990 in Niedersachsen. Eine lineare und eine LOESS Regression identifizieren die Trendentwicklung.....	148
Abbildung 40: 90er-Perzentil der Grundwasserneubildung in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	149
Abbildung 41: Mittlere Grundwasserhochstände in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	153
Abbildung 42: Summe der Monate mit Grundwasserhochstand in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	154
Abbildung 43: Mittlere Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	158
Abbildung 44: Anzahl der Niedrigwassertage NWT (mit Abfluss < MNQ (1971–2000)) pro Jahr in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	159
Abbildung 45: Jährliche Abweichung der Grundwasserneubildung relativ zum Bezugszeitraum 1971–2000 in Niedersachsen berechnet mit mGROWA22 (Ertl et al., 2024). Die rote Linie zeigt das 25er-Langzeitperzentil (1961–2020). Je länger die Grundwasserneubildung unterhalb des Langzeitperzentils ist, desto höher ist das Risiko einer Grundwasserdürre.....	161
Abbildung 46: Maximale Dauer der Grundwasserdürre in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	162
Abbildung 47: Mittlere Grundwassertiefststände in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	166

Abbildung 48: Summe der Monate mit Grundwassertiefstand in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	167
Abbildung 49: Jährliche Abweichung der Klimatischen Wasserbilanz zum Bezugszeitraum 1971–2000 in Niedersachsen. Eine LOESS Regression identifiziert die Trendentwicklung für die Vergangenheit und die Balken in der Mitte und dem Ende des Jahrhunderts die Ergebnisbandbreite der Klimamodelle für zwei Zukunftsszenarien.....	169
Abbildung 50: Differenz Grundwasserneubildung und Zusatzwasserbedarf in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).....	170
Abbildung 51: Große Talsperren mit Einzugsgebieten im Westharz.....	173
Abbildung 52: Jahresniederschläge der Station Clausthal im Westharz seit 1859 aufgeteilt nach Winterhalbjahr (links, blau) und Sommerhalbjahr (rechts, gelb).....	174
Abbildung 53: Mittlere Grundwassertemperatur pro Quartal in Niedersachsen von 1990 bis 2014 in einer Tiefe von 2 –20 m.....	176
Abbildung 54: Anzahl der von den Gesundheitsämtern in Niedersachsen ausgesprochenen Badeverbote und Warnungen wegen der Massenvermehrung von Cyanobakterien in EU-Badegewässern (Datengrundlage: NLGA, 2024).....	181
Abbildung 55: Anteil der Proben, in denen <i>Vibrio vulnificus</i> nachgewiesen wurde (Datengrundlage: NLGA, 2024).....	183
Abbildung 56: Anomalie der Hitzetag ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) (NIKO, 2024).....	183
Abbildung 57: Inzidenz Bösartiges Melanom der Haut (ohne DCO) (Datengrundlage: NLGA/EKN, 2024).....	191
Abbildung 58: Inzidenz Sonstige bösartige Neubildungen der Haut (Datengrundlage: NLGA/EKN, 2024).....	193
Abbildung 59: Dargestellt ist das Relief des Meeresbodens und des Festlands von Niedersachsen mit Gewässern, Flussläufen und Städten.....	210

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
AH	Jährliche mittlere Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
AR5	5. Sachstandsbericht des IPCC
AR5-NI	Klimamodellensemble für Niedersachsen auf der Basis der Modelle des 5. Sachstandsberichts des IPCC
BK50	Bodenkarte von Niedersachsen im Maßstab 1 : 50.000
BSH	Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrografie
COSMO	Consortium for Small Scale Modelling
COSMO-CLM	COSMO model in CLimate Mode
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
GOK	Geländeoberkante
GWMS	Grundwassermessstellen
IPCC	International Panel on Climate Change (Weltklimarat)
KAB	Berechnungswirksamer kapillaren Aufstieg
KAnG	Bundes-Klimaanpassungsgesetz
KRANI	Klimarisikoanalyse Niedersachsen
KWB	Klimatische Wasserbilanz
KWBb	berechnungswirksame klimatische Wasserbilanz
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LF	landwirtschaftlich genutzte Fläche
LK	Luftkapazität
LOESS	Locally estimated scatterplot smoothing
LWK	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
mBm	mittlere Berechnungsmenge
MeMaS	Methodenmanagement System
mhgw	mittlerer Grundwasserhochstand
MSC	Marine Stewardship Council
MQ	Mittlerer Abfluss
mZWpot	Potenzieller mittlerer Zusatzwasserbedarf
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKWe	nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
NIKO	Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel

NLGA	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NLWKN-FSK	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste
NSE	Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
PKD	proliferative Nierenerkrankung
PTF	Pedotransferfunktion
RCP	Representative Concentration Pathways (Repräsentative Konzentrationspfade)
SLA	Servicezentrum Landentwicklung und Agrarförderung
SSP	Sozioökonomische Entwicklungspfade
SWB	Standortwasserbilanz
THI	Temperature-Humidity-Index
UAN	Kommunale Umwelt-Aktion
UBA	Umweltbundesamt
Vpgfao	potenzielle Verdunstung über Gras
WBeff	Effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode
We	effektive Durchwurzelungstiefe
Wpflb	beregnungswirksames pflanzenverfügbares Wasser
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V.

1 Glossar

Das Glossar orientiert sich an den Worterläuterungen der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (2021) in leicht angepasster und ergänzender Form.

Begriff	Erläuterung
Bewertung des Klimarisikos	Die Bewertung des Klimarisikos zeigt auf, welche gesellschaftlichen und ökologischen Folgen sich aus einer geminderten Funktionsfähigkeit eines betrachteten Systems ergeben. Die Bewertung erfolgte standardisiert mit einer dreistufigen Skala („gering“, „mittel“, „hoch“). Diese Bewertung erfolgte in Form qualitativer Expert:innenurteile (d. h., es wurden keine Schwellenwerte festgelegt), wobei aktuell laufende/umgesetzte Anpassungsmaßnahmen mitberücksichtigt wurden.
Bezugszeitraum	Der Zeitraum von 1971 bis 2000.
Downscaling	Erhöhung der Auflösung von Klimaprojektionsdaten/-Modellen. „Downscaling“ bezieht sich in der Klimatologie meist auf die räumliche Skala. Dabei wird die Information physikalisch konsistent von einer groben auf eine höher aufgelöste Skala übertragen.
Ende des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2071 bis 2100.
Expert:innenwissen	Narrative Informationen sowie Einschätzungen von der Arbeitsgruppe und mitwirkenden Fachleuten; wird im Rahmen von Textbeiträgen, Workshops, Telefongesprächen, Interviews, Abfragen etc. erhoben.
Extensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch textliches Zusammenfassen vorhandener Informationen, Literaturrecherche und Expert:innenwissen.
Flurabstand	Höhenunterschied zwischen der Geländeoberfläche und einer Grundwasseroberfläche
Gewissheit	Qualitative Einschätzung der Verlässlichkeit der Bewertungsergebnisse, basierend auf dem Vorhandensein von Daten, der Zuverlässigkeit der verwendeten Daten, Kenntnissen über Wirkzusammenhänge, der Genauigkeit und Plausibilität von Modellannahmen und der Eindeutigkeit von Trends.
Gradtage	Auch bekannt als Wachstumsgradtage (WGT) oder Wärmesummen, sind ein Maß, das verwendet wird, um das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen über die Zeit zu quantifizieren, basierend auf der Temperatur.
Grundwasserabhängige Landökosysteme	Landökosysteme, die direkt vom Grundwasser abhängig sind. Sie haben permanent oder zeitweise Anschluss an das Grundwasser und decken Teile oder ihren gesamten Wasserbedarf aus dem Grundwasser (nach Richardson et al., (2011)).
Grundwasserleiter	Ein Grundwasserleiter ist ein Gesteinskörper mit Hohlräumen, der zur Leitung von Grundwasser geeignet ist (DIN 4049-3, 1994)
Intensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch die Quantifizierung der Wirkung mittels Wirkmodellen anhand von Indikatoren sowie deren textlicher Beschreibung und ggf. kartographischer Darstellungen.
Klimarisiko	Das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Klimarisiko ohne Anpassung: Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld ohne Berücksichtigung von zukünftigen Anpassungsmaßnahmen dar (vorhandene Anpassungen z. B. im Küstenschutz sind berücksichtigt).
Klimatischer Einfluss	Ein sich ändernder Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst.
Klimawirkung	Die potenziellen oder realisierten Folgen von Klimarisiken auf natürliche und menschengemachte Systeme. Klimawirkungen beziehen sich im Allgemeinen auf Auswirkungen auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, Ökosysteme und Arten, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemleistungen) und Infrastruktur. Sie können als Folgen oder Ergebnisse bezeichnet werden und nachteilig oder vorteilhaft sein.

Konvektionserlaubende Klimasimulation	Die Ergebnisse von Klimasimulationen werden realitätsnäher, wenn das Simulationsgitter hochaufgelöst ist (< 4 km) und damit die Parametrisierungen im regionalen Klimamodell teilweise abgeschaltet werden können. Das Modell berechnet dann beispielsweise explizit den konvektiven Niederschlag aus großen Gewittersystemen („hochreichende Konvektion“). Sehr kleinräumige Schauerzellen werden jedoch weiterhin parametrisiert („flache Konvektion“) (DWD Wetterlexikon). Durch konvektionserlaubende Klimasimulationen erfolgt eine explizite Beschreibung kleinräumiger Konvektion mit einer deutlich besseren Abbildung konvektiver sommerlicher Niederschlagsextreme.
LOESS Regression	Locally estimated scatterplot smoothing. Stellt den Trend einer Zeitreihen auf Basis eines gleitenden, gewichteten vieljährigen Mittels der Einzelwerte dar.
Mitte des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2031 bis 2060.
Optimistischer Fall	Pfad zukünftiger Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden weniger negativen Klimawirkung verbunden ist und mit geringeren Risiken oder höheren Chancen im Vergleich zum pessimistischen Fall.
Pathosystem	Im Pflanzenbau wird damit das Zusammenspiel zwischen einer Pflanze, einem Krankheitserreger (wie Bakterien, Pilzen, Viren oder anderen Schaderregern) und den Umweltfaktoren, die diese Interaktion beeinflussen, bezeichnet.
Pessimistischer Fall	Pfad zukünftiger Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden stärker negativen Klimawirkung verbunden ist und mit höheren Risiken oder niedrigeren Chancen im Vergleich zum optimistischen Fall.
Projektion	Möglicher zukünftiger Zustand einer oder mehrerer Größen, üblicherweise erstellt mit einem Klima- oder Wirkmodell basierend auf einem Szenario.
Public Health	Public Health, oder öffentliche Gesundheit, ist die Wissenschaft und Praxis, die sich mit der Prävention von Krankheiten, der Gesunderhaltung und der Förderung von Gesundheit in der gesamten Bevölkerung befasst.
Radardaten	Erfassung von Flächenniederschlägen über Reflexion der von einem Radar (Radio Detecting And Ranging) aktiv ausgesendeten Mikrowellen an Niederschlagsteilchen (www.spektrum.de/lexikon/).
Räumliche Exposition	Vorhandensein von Systemen wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten, Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastrukturen, ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gebieten, die von Risiken betroffen sein könnten. Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur.
Retentionsraum / -fläche	Ein Gebiet, in dem zeitweise (z. B. bei Hochwasser) ein Rückhalt von Wasser durch natürliche Gegebenheiten (z. B. Auen an Fließgewässern) oder künstliche Strukturen (z. B. Rückhaltebecken) erfolgt.
Sensitivität	Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird. Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel Baumartenzusammensetzung oder Altersstruktur der Bevölkerung.
Starkregenindex	Eine Skala von eins bis zwölf, anhand der die Stärke eines Starkregenereignisses (ähnlich der Windstärke) in Abhängigkeit der Regendauer und Regenmenge eingeordnet und benannt werden kann. Zudem werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Starkregenereignisse anhand von Schaubildern verdeutlicht und Starkregenereignisse und Wiederkehrzeiten zugeordnet (Schmitt, 2016).
Stationsdaten	Daten aus Messstationen, die z. B. meteorologische Daten aufzeichnen. Es wird unterschieden zwischen konventionellen und automatisierten Messstationen.
System	Eine in sich geschlossene Einheit aus Elementen/Komponenten, die miteinander in einer funktionalen Beziehung/Wechselwirkung stehen. Dadurch kann das System als gemeinsames Ganzes betrachtet werden und grenzt sich von seiner Umgebung ab.
Szenario	Beschreibung einer möglichen Zukunft auf Basis von Annahmen durch Text und/oder die zeitliche Entwicklung von Kennzahlen.
Trend	Der Trend einer Klimazeitreihe beschreibt das langfristige Verhalten einer oder mehrerer Komponenten des Klimasystems, dient also der Kennzeichnung einer möglichen Klimaänderung.
Vektor	Lebewesen, die Krankheiten übertragen können, wie beispielsweise Mücken
Wirkmodell	Ein numerisches Modell, das die Folgen des Klimawandels unter bestimmten Fragestellungen simuliert (z. B. Wasserhaushaltsmodell).
Wirkungskette	Um das Klimarisiko zu bewerten, werden Auswertungen zu den Wirkungsketten genutzt. Diese zeigen, wie die Systeme miteinander verbunden sind auf die eine Klimaänderung wirkt (Klimawirkung). Dazu gehören neben den klimatischen Wirkungen (Hitze führt zu gesundheitlichen Problemen, Niederschlagsausfall zu Dürre) auch weitere Faktoren (zum Beispiel Altersstruktur der Bevölkerung, Vorhandensein von Frischluftschneisen, Bevölkerungsdichte) nach Kahlenborn et al. (2021).



2 Einleitung

2.1 Konzept und Methodik

2.2 Methoden zur Erstellung von Klima- und Klimawirkungsprojektionen

- 2.2.1 Klimaprojektionen für Niedersachsen
- 2.2.2 Bodenkundliche Projektionen für Niedersachsen
- 2.2.3 Projektionen für den Wald in Niedersachsen
- 2.2.4 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Niedersachsen
- 2.2.5 Hydro(geo)logische Projektionen für Niedersachsen

2.3 Räumliche Gliederungen Niedersachsens

- 2.3.1 Klimaregionen Niedersachsens
- 2.3.2 Flusseinzugsgebiete Niedersachsens
- 2.3.3 Hydrogeologische Räume Niedersachsens
- 2.3.4 Naturregionen Niedersachsens



2 Einleitung

Die vorliegende **Klimarisikoanalyse Niedersachsen 2025** (KRANI 2025) bildet eine ergänzende und wichtige Grundlage, um Niedersachsen resilient gegenüber zukünftigen Klimaänderungen zu machen. Durch die Ausweisung der Klimarisiken in sieben Handlungsfeldern werden dringende Handlungserfordernisse sichtbar. Zudem ist es der Anspruch der KRANI 2025, eine Informations- und Datengrundlage für Klimarisikoanalysen auf kommunaler Ebene zu schaffen. Gleichzeitig erfüllt Niedersachsen mit der Veröffentlichung der KRANI 2025 die Anforderungen des **Bundes-Klimaanpassungsgesetzes** (KAnG, 2023), indem diese fachübergreifende und integrierte Auswertung der Klimarisiken den **Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023** (NIKO, 2023b) ergänzt. Auf Basis des **Klimafolgenmonitoringberichts für Niedersachsen 2023** und der KRANI 2025 soll im nächsten Schritt die **Niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels** (MU, 2022b) fortgeschrieben werden.

Die KRANI 2025 aktualisiert und ergänzt die **Klimawirkungsstudie Niedersachsen** (2019), in der die beiden Handlungsfelder Wasserwirtschaft und Boden behandelt wurden. Diese beiden Handlungsfelder werden in der vorliegenden Studie durch fünf weitere Handlungsfelder (Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, menschliche Gesundheit, Fischerei und Küsten- und Meeresschutz) ergänzt. Insgesamt werden 42 Klimarisiken betrachtet und bewertet.

Die KRANI 2025 ist stark an die **Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland** (KWRA 2021) angelehnt (Kahlenborn et al., 2021), jedoch grenzt sie sich durch regionales Wissen von Expert:innen in Fachbehörden, der kommunalen Daseinsvorsorge und durch regio-

nale Forschungsergebnisse ab. Im Gegensatz zur KWRA 2021 weist die KRANI 2025 keine Anpassungskapazität aus.

Bearbeitet wurde die KRANI 2025 von der Arbeitsgruppe „Klimarisikoanalyse“ des **Klimakompetenznetzwerks Niedersachsen** (siehe <https://niko-klima.de/forschung/>). Die Arbeitsgruppe traf sich in regelmäßigen Abständen und wies gemeinsam die Klimarisiken fachübergreifend und integriert aus. Tabelle 1 listet die sieben Institutionen der Arbeitsgruppe auf, welche die KRANI 2025 federführend erarbeitet haben. Neben der aktiven Arbeitsgruppe wurden weitere Expert:innen aus der Praxis und der Forschung beteiligt.

Mit der vorliegenden Klimarisikoanalyse wurde eine methodische Grundlage entwickelt, die künftig um weitere Klimarisiken ergänzt werden kann – beispielsweise sind die Bereiche Biodiversität und Ökosysteme, Infrastruktur (mit Bauwesen, Energiewirtschaft und Verkehr) sowie Wirtschaft (mit Industrie und Tourismus) bisher nicht betrachtet. Die Klimarisikoanalyse soll deshalb als „lebendes Dokument“ verstanden werden, das entsprechend der einmal etablierten Methodik auch für weitere Handlungsfelder weiterentwickelt werden kann.

Adressaten der KRANI 2025 sind die Landesverwaltung Niedersachsens, die auf der Basis der Analyse die Anpassungsstrategie fortschreibt, und die Kommunen, denen eine wichtige Informations- und Datengrundlage bereitgestellt wird. Für beide Adressaten wurde die verwendete Datengrundlage im Anhang veröffentlicht. Ferner bietet die Studie der Öffentlichkeit eine Informationsgrundlage zu den Risiken, die der Klimawandel den Menschen in Niedersachsen bringt.

Cluster	Handlungsfeld	Federführende Institution(en)
Land	Boden	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)
	Landwirtschaft	Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK)
	Wald- und Forstwirtschaft	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Wasser	Fischerei	Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK)
	Küsten- und Meeresschutz	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Forschungsstelle Küste (NLWKN-FSK)
Gesundheit	Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Kommunale Umwelt-Aktion (UAN)
	Menschliche Gesundheit	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA)

Tabelle 1: Beteiligte Institutionen der Arbeitsgruppe „Klimarisikoanalyse des Klimakompetenznetzwerks Niedersachsen“ mit den jeweiligen Handlungsfeldern, die federführend bearbeitet wurden

2.1 Konzept und Methodik

In der KRANI 2025 wird das Klimarisiko anhand von Wirkungsketten, räumlicher Exposition und Sensitivität für die Gegenwart, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts auf Basis einer Literaturrecherche, von Interviews mit Expert:innen und mittels Modellierungen bewertet und ausgewiesen. Die Definitionen und die Methodik, nach der die einzelnen Klimarisiken dieser Studie ausgewertet wurden, finden sich im Folgenden.

Das **Klimarisiko** wurde entsprechend der Methodik der KWRA 2021 definiert und bewertet: „Ein Klimarisiko bezeichnet das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Zu den relevanten nachteiligen Folgen gehören solche für Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte und Investitionen, Infrastruktur, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemleistungen), Ökosysteme und Arten. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Risiken aus dynamischen Wechselwirkungen zwischen klimatischen Einflüssen und der räumlichen Exposition sowie der Sensitivität und Anpassungskapazität des betroffenen menschengemachten oder natürlichen Systems. Alle diese Komponenten können jeweils Unsicherheiten in Bezug auf das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterliegen und können sich im Laufe der Zeit und des räumlichen Bezugs aufgrund von sozioökonomischen Veränderungen und menschlichen Entscheidungen

ändern“ (Kahlenborn et al., 2021). Im Gegensatz zur KWRA 2021 wird das Klimarisiko ohne zukünftige Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel ausgewiesen. Die ausgewiesenen Klimarisiken können herangezogen werden, um in der Niedersächsischen Anpassungsstrategie Maßnahmen zu entwerfen.

Bei der Analyse der Klimarisiken wird zwischen einer intensiven und einer extensiven Betrachtung der Klimawirkung unterschieden. Bei einer extensiven Betrachtung wird eine qualitative Analyse der Klimawirkung durch Zusammenfassen vorhandener Informationen und Expert:innenwissen vorgenommen. Eine intensive Betrachtung erweitert diese Analyse um eine Wirkmodellierung für Niedersachsen auf Basis der Klimamodelldaten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (KAPITEL 2.2). Dies ermöglicht eine kartographische Darstellung und eine quantitative Bewertung einer Klimawirkung, die zur Beurteilung des Risikos herangezogen wird.

Das Klimarisiko wird für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) ausgewiesen. Bei der Gegenwart handelt es sich bei intensiv betrachteten Klimawirkungen um den Bezugszeitraum 1971–2000. Bei extensiven Betrachtungen kann davon abgewichen werden, wenn entsprechende Daten bzw. Informationen für diesen konkreten Zeitraum schwer einschätzbar sind. Änderungen des Klimarisikos in den zukünftigen Zeiträumen beziehen sich immer auf den Vergleich mit dem Bezugszeitraum 1971–2000 (und nicht wie bei dem 1,5°C-Ziel auf den vorindustriellen Zeitraum 1850–1900).

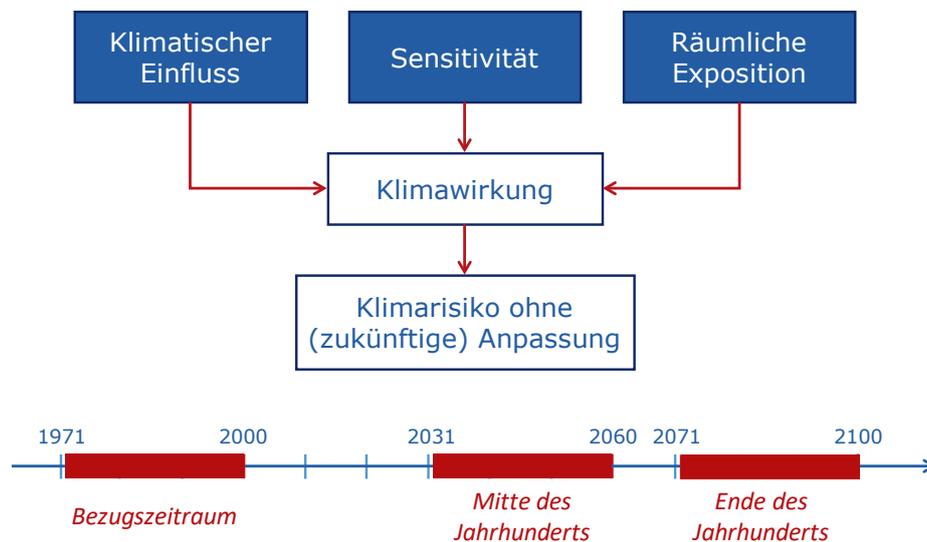


Abbildung 1: Methodik der KRANI 2025, angelehnt an die KWRA 2021.

Die KRANI 2025 weist das Klimarisiko prinzipiell ohne zukünftig mögliche Anpassungen an den Klimawandel aus. Gleichwohl werden bereits laufende Bemühungen zur Anpassung an den Meeresspiegelanstieg im Küstenschutz mitberücksichtigt. Daher beruht das Klimarisiko der Gegenwart auf einer Einschätzung, welche die Umsetzung der jetzigen Maßnahmen beinhaltet, und die Klimarisiken der Zukunft werden unter Berücksichtigung der derzeit umgesetzten oder bereits veranlassenen Maßnahmen betrachtet.

Für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts wird das „Kein-Klimaschutz-Szenario“, bzw. das „Hochemissions-szenario“ RCP8.5 verwendet (Moss et al., 2010). Die derzeitigen Entwicklungen und der Vorsorgegedanke lassen nach Meinung des bearbeitenden Netzwerks keine andere Betrachtung zu (KAPITEL 2.2). Um das Klimarisiko zu bewerten, werden eine Vielzahl von Klimamodellergebnissen, sog. Klimaprojektionen, verwendet, die eine Bandbreite an Ergebnissen bilden. Die möglichen Änderungsbandbreiten werden berücksichtigt, indem das Klimarisiko für einen **optimistischen Fall** (schwacher Klimawandel mit positiver, bzw. weniger negativer Veränderung zur Gegenwart) und einen **pessimistischen Fall** (starker Klimawandel mit deutlich negativer Veränderung zur Gegenwart) eingeschätzt wird.

Das **Klimarisiko** für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts leitet sich aus dem **klimatischen Einfluss**, der **Sensitivität** und der **räumlichen Exposition** ab (Abbildung 1). Der klimatische Einfluss beschreibt einen sich ändernden Aspekt des Klimasystems (es wird z. B. wärmer oder trockener), der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst. Je stärker der klimatische Einfluss ausgeprägt ist, desto stärker fällt tendenziell auch die **Klimawirkung** aus (Hitze führt zu

gesundheitlichen Problemen, Niederschlagsausfall zu Dürre). Die Wirkung des Klimawandels ergibt sich aus der Differenz der Klimawirkungen zwischen Bezugszeitraum und zukünftigem Zeitraum. Einflussfaktoren einer Klimawirkung sind neben dem klimatischen Einfluss auch die Sensitivität und die räumliche Exposition. Die Sensitivität (Anfälligkeit oder Empfindlichkeit) beschreibt das Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor oder nachteilig beeinflusst wird. Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel die Baumartenzusammensetzung oder die Altersstruktur der Bevölkerung. Je höher die Sensitivität ist, umso stärker ist tendenziell die Klimawirkung ausgeprägt. Die räumliche Exposition beschreibt das Vorhandensein von Systemen, wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten beziehungsweise Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten. Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel die Einwohner:innendichte oder das Vorkommen kritischer Infrastruktur. Je höher die räumliche Exposition ist, desto stärker ist tendenziell die Klimawirkung (Kahlenborn et al., 2021). beeinflusst wird. Faktoren für Sensitivität sind zum I., 2021).

Neben dem Klimarisiko wird auch die Gewissheit des Risikos für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts ausgegeben. Für den klimatischen Einfluss ist dabei zum Beispiel die Robustheit, also die Richtungskonformität der Klimamodelle und die Signifikanz der Klimamodellergebnisse, relevant. Dabei ist der Niederschlag weniger robust, als die Temperatur, da die Klimamodelle sich über die Richtung der Änderung nicht einig sind und die Änderung kleiner ist als die natürliche Schwankung.

2.2 Methoden zur Erstellung von Klima- und Klimawirkungsprojektionen

Der Klimawandel ist in Niedersachsen angekommen und hat das Klima bereits verändert. Wie und in welchem Ausmaß sich diese Klimaänderungen darstellen und sich auf die Gesundheit, den Wasserhaushalt, das Land auswirken, ist im **Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023** (NIKO, 2023b) dokumentiert. Um abzuschätzen, wie sich diese Änderungen in der Zukunft weiterentwickeln, werden die Ergebnisse aus Klimamodellen auf Basis von Klimaszenarien, sog. Klimaprojektionen, genutzt. Diese gehen dann wiederum in Wirkmodelle, z. B. Wasserhaushaltsmodelle, ein, um die Klimawirkungen auf unterschiedliche Handlungsfelder zu bilanzieren.

Um das Klima der Zukunft zu projizieren, werden die Ergebnisse einer Vielzahl von Klimamodellen ausgewertet. Diese bilden ein Klimamodellensemble, für das eine

Ergebnisbandbreite ermittelt wird. Die Klimawirkungen auf Boden, Wald, Meeresspiegelanstieg und Wasserhaushalt werden in der KRANI 2025 auf der Basis von Klimamodellensembles bestimmt, wobei im Wesentlichen das niedersächsische Klimamodellensemble (AR5-NI) genutzt wird, welches ausführlich in Hajati et al. (2022) beschrieben ist (Tabelle 2). Die entsprechenden Ergebnisse aller intensiv betrachteten Klimarisiken stehen für Klimarisikoplanalysen auf z. B. kommunaler Ebene zur Verfügung.

Im Folgenden werden die in der KRANI 2025 verwendeten Klimaprojektionen (Ergebnisse des AR5-NI Version 2.1) vorgestellt. Dabei werden einzelne Klimaänderungen für Niedersachsen und deren Auswirkungen mittels Wirkmodellierung auf die Klimarisiken in den Handlungsfeldern dargestellt.

Intensiv betrachtete Klimarisiken	Klimamodellensembles
Wassermangel im Boden	AR5-NI Version 2.1
Verminderte Retentionsleistung der Böden	AR5-NI Version 2.1
Stoffaustrag aus dem Boden	AR5-NI Version 2.1
Bodenerosion durch Wasser	MIROC5 mit COSMO-CLM5-0-16
Bodenerosion durch Wind	AR5-NI Version 2.1
Trockenstress im Wald	Kernensemble nach Hübener et al. (2017)
Meeresspiegelanstieg	EURO-CORDEX
Hochwasser	AR5-NI Version 2.1
Vernässung durch Grundwasser	AR5-NI Version 2.1
Grundwasserhochstand	AR5-NI Version 2.0
Niedrigwasser	AR5-NI Version 2.1
Grundwasserdürre	AR5-NI Version 2.1
Grundwassertiefstand	AR5-NI Version 2.0
Mangel an Bewässerungswasser	AR5-NI Version 2.1

Tabelle 2: Intensiv betrachtete Klimarisiken mit zugehörigen Klimamodellensembles, mit denen die Klimarisiken berechnet wurden.

2.2.1 Klimaprojektionen für Niedersachsen

Die Klimaprojektionen für Niedersachsen werden vom NIKO aufbereitet, frei zur Verfügung gestellt und gepflegt. Grundlage bilden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) veröffentlichten herunterskalierten und Biaskorrigierten EURO-CORDEX und ReKliEs-DE Klimaprojektionen (Krähenmann et al., 2021). Die Auswahl und die Auswertungsmethodik der Klimaprojektionen entspricht den Anforderungen und Leitlinien des Bund-/Länder Fachgesprächs „Klimamodell Daten“ (Linke et al., 2024).

Um das Klima in die Zukunft zu projizieren, bedarf es Annahmen, sog. Szenarien, wie sich die Treibhausgasemissionen verändern werden. Mit diesen Emissionen werden dann verschiedene Klimamodelle angetrieben, die zusammen sog. Klimamodellensembles bilden können. Im Resultat ergeben sich daraus für jede Projektion innerhalb eines Ensembles verschiedene Klimagrößen, z. B. Temperatur, Niederschlag oder Luftfeuchte.

Die in der KRANI 2025 verwendeten Klimaprojektionen repräsentieren zum einen das Treibhausgasszenario RCP2.6, ein Szenario, das eine deutliche Reduktion von Treibhausgasemissionen und Ansätze zur Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre (sog. negative Emissionen) umfasst (Niedrigemissionsszenario), und zum anderen das Treibhausgasszenario RCP8.5, das keine Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen und deshalb keine Reduktion von Treibhausgasemissionen annimmt (Hochemissionsszenario). Die Vielzahl der verwendeten Klimaprojektionen ergibt für jedes Treibhausgasszenario eine Ergebnisbandbreite.

Die Klimaprojektionen für das AR5-NI v2.1 zeigen eine Zunahme der mittleren Temperatur im Vergleich zur Bezugsperiode (1971–2000) für das Ende des Jahrhunderts im Niedrigemissionsszenario (RCP2.6) von 0,6 bis 1,4 °C

und im Hochemissionsszenario (RCP8.5) von 2,5 bis 4,7 °C. Aktuell findet bereits seit den 1960er-Jahren eine sich kontinuierlich beschleunigende Erwärmung statt. Die aktuelle Erwärmung in der Vergleichsperiode 1991–2020 beträgt bereits 0,7 °C gegenüber der Bezugsperiode (Abbildung 2). Es wird deutlich, dass sich die niedersächsische Temperaturentwicklung derzeit auf dem Kurs des Hochemissionsszenarios RCP8.5 befindet. Daher und aufgrund des Vorsorgegedankens wurde festgelegt, dass die Klimarisiken für das Hochemissionsszenario (RCP8.5) bewertet werden (KAPITEL 2.1).

Im Folgenden wird der klimatische Einfluss auf Niedersachsen in der Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und am Ende des Jahrhunderts (2071–2100) relativ zur Bezugsperiode (1971–2000) für das Hochemissionsszenario RCP8.5 in Kürze beschrieben (für weitergehende Details siehe Tabelle 3). Die beschriebenen Klimaänderungen sind maßgeblich für die Ausweisung aller Klimarisiken.

Die Zunahme der mittleren Lufttemperatur, der Sommer- und insbesondere der Hitzetage, führt zu einer Belastung für den Menschen und speziell zur Belastung von vulnerablen Gruppen wie Kindern, Schwangeren oder älteren Menschen. So kann die Anzahl der Sommertage von 25 Tage/Jahr (1971–2000) bis zum Ende des Jahrhunderts im optimistischen Fall um 16 Tage/Jahr und im pessimistischen Fall um 59,4 Tage/Jahr zunehmen und die Anzahl der Hitzetage von 4,2 Tage/Jahr (1971–2000) bis zum Ende des Jahrhunderts im optimistischen Fall um 9,2 und im pessimistischen Fall um 32,1 Tage/Jahr zunehmen. Gleichzeitig wird die Häufigkeit von Hitzeperioden zunehmen und länger andauern (siehe maximale Hitzeperiode und Hitzeperioden > 5 und > 2 Tage in Tabelle 3). Wie sich diese Änderung auf die menschliche Gesundheit auswirkt, wird im CLUSTER GESUNDHEIT beschrieben.

Mittlere Lufttemperatur im Kalenderjahr; Veränderungen zu 1971–2000 (9,0 °C) in Niedersachsen

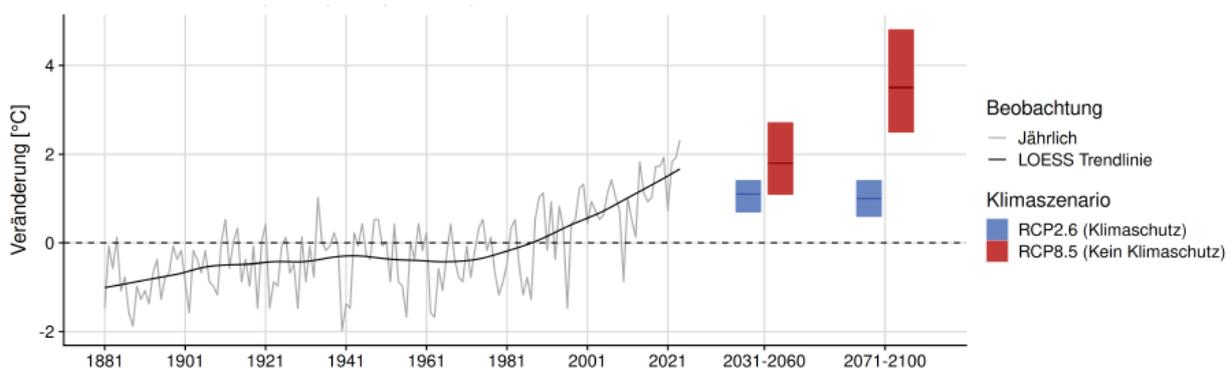


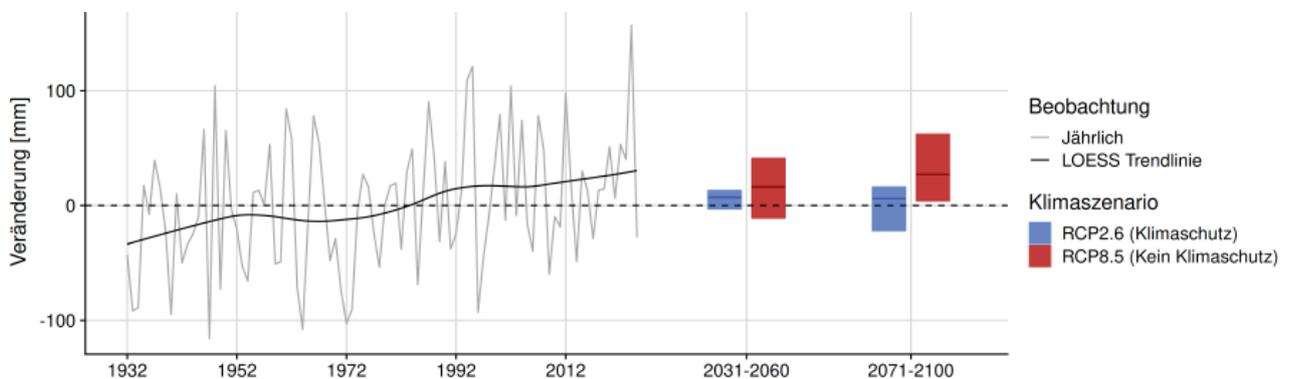
Abbildung 2: Veränderung der mittleren Lufttemperatur in Niedersachsen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 mit LOESS-Trend in der Vergangenheit und den Treibhausgasszenarien „Klimaschutz“ (RCP2.6) und „Kein Klimaschutz“ (RCP8.5) für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100).

Neben der Temperaturänderung erhöhen die Veränderungen im saisonalen und jährlichen Gesamtniederschlag Klimarisiken in fast allen Handlungsfeldern der KRANI 2025. Mit jedem Grad Erwärmung kann die Luft in etwa 7 % mehr Wasserdampf aufnehmen. Dadurch steigt der Gesamtniederschlag und das ist auch jetzt schon in Niedersachsen messbar: Die jährliche Gesamtniederschlagsmenge hat sich in 1991–2020 im Vergleich zum Bezugszeitraum bereits um 3 % erhöht. Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnten sich Änderungen von 4 % bis +13 % ergeben. Für viele Klimawirkungen sind jedoch saisonale Änderungen relevant: So bildet sich das Grundwasser maßgeblich im Winter neu (KAPITEL 4.3.4 und 4.3.5). Das gleicht die Zehrung durch die erhöhte Verdunstung im Sommer aus und sorgt so für eine sich erneuernde Süßwasserressource für den Menschen und die Umwelt. Gleichzeitig sind sowohl die Land- und Forstwirtschaft als auch viele Ökosysteme durch die Pflanzenwachstumsphasen im Frühling und Sommer auf eine ausreichende Niederschlagsmenge angewiesen (KAPITEL 3.1.1, 3.2.6 und 3.3.1). Durch die Verlagerung des Sommerniederschlags (-28 % bis +8 %) in den Winter (+2 % bis +36 %) bis

zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 3, Tabelle 3), kann sich das Risiko in diversen Handlungsfeldern insbesondere im pessimistischen Fall erhöhen.

Auch niederschlagsbedingte Extreme, wie beispielsweise Starkregenereignisse, nehmen bis zum Ende des Jahrhunderts zu. So steigt die jährliche Anzahl an Tagen mit mindestens 20 mm Niederschlag von 2,9 Tage/Jahr im optimistischen Fall auf 3,3 Tage/Jahr (+0,4 Tage/Jahr) und im pessimistischen Fall sogar auf 5,6 Tage/Jahr (+2,7 Tage/Jahr). Diese Veränderung des klimatischen Einflusses kann die Auswirkungen von Extremereignissen wie HOCHWASSER und STARKREGEN, aber auch VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER oder BODENEROSION DURCH WASSER verstärken. Gleichzeitig deutet die Veränderung der Trockentage (von 230,8 Tage/Jahr im Bezugszeitraum um -4,0 bis +21,6 Tage/Jahr) und der Andauer an Tagen, an denen kein Niederschlag fällt (von 20,4 um -2,6 bis +4,4 Tage/Jahr) bis zum Ende des Jahrhunderts tendenziell eine Zunahme an Extremjahren mit „zu wenig Wasser“ können die Risiken von zum Beispiel NIEDRIGWASSER, GRUNDWASSERDÜRRE, ERTRAGSAUSFÄLLEN oder VERMINDERTE RETENTIONSLEISTUNG DER BÖDEN erhöhen.

A: Niederschlag im Winter (Dezember–Februar);
Veränderungen zu 1971–2000 (180 mm) in Niedersachsen



B: Niederschlag im Sommer (Juni–August);
Veränderungen zu 1971–2000 (211 mm) in Niedersachsen

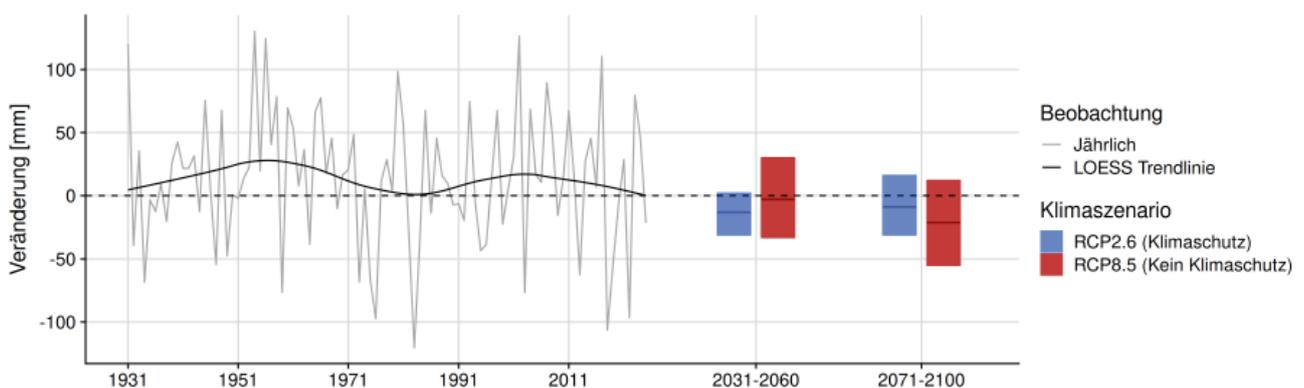


Abbildung 3: Veränderung des Winterniederschlags (A) und des Sommerniederschlags (B) in Niedersachsen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 mit loess Trend in der Vergangenheit und den Treibhausgasszenarien „Klimaschutz“ (RCP 2.6) und „Kein Klimaschutz“ (RCP8.5) für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100).

Klimatischer Parameter	Einheit	Niedersachsen			Maritim		
		1971–2000	2031–2060	2071–2100	1971–2000	2031–2060	2071–2100
Temperatur; Kalenderjahr	°C	9,0	+1,1 - +2,7	+2,5 - +4,7	9,0	+1,1 - +2,5	+2,4 - +4,5
Temperatur; Winter	°C	1,8	+1,0 - +3,0	+2,9 - +5,3	2,1	+1,0 - +2,9	+2,8 - +5,1
Temperatur; Frühling	°C	8,3	+1,0 - +2,7	+1,9 - +4,8	8,2	+1,0 - +2,5	+1,9 - +4,5
Temperatur; Sommer	°C	16,5	+0,9 - +2,9	+2,3 - +5,2	16,3	+0,9 - +2,6	+2,1 - +4,9
Temperatur; Herbst	°C	9,2	+1,3 - +2,6	+2,7 - +4,9	9,5	+1,3 - +2,6	+2,6 - +4,7
Max. Tagestemperatur	°C	23,3	+0,8 - +3,6	+1,1 - +6,0	22,3	+0,6 - +3,4	+1,3 - +5,8
Min. Tagestemperatur	°C	-2,5	+1,1 - +3,0	+1,0 - +4,9	-2,0	+1,0 - +2,8	+1,0 - +4,8
Frosttage	Tage / Jahr	68,6	-38,5 - -16,3	-58,5 - -35,6	61,4	-35,6 - -14,7	-54 - -32,1
Spätfrosttage	Tage / Jahr	2,4	-2,4 - -1,9	-2,4 - -2,3	2,1	-2,1 - -1,5	-2,1 - -1,8
Max. Frostperiode	Tage / Jahr	16,5	-11,4 - -3,2	-14,8 - -7,3	15,4	-10,3 - -6,5	-13,0 - -6,5
Eistage	Tage / Jahr	16,4	-13,3 - -4,1	-17,2 - -9,8	14,2	-12,3 - -3,5	-15,1 - -8,0
Sommertage	Tage / Jahr	25,0	+5,3 - +34,0	16,0 - +59,4	19,5	+4,4 - +29,4	+13,5 - +54,7
Hitzetage	Tage / Jahr	4,2	+2,9 - +13,0	+9,2 - +32,1	2,8	+2,3 - +9,4	+6,2 - +24,8
Max. Hitzeperiode	Tage / Jahr	2,1	+0,7 - +3,0	+2,3 - +6,0	1,5	+0,6 - +2,7	+2,0 - +4,6
Hitzeperioden > 5 Tage	Anzahl	0,1	0,0 - +0,5	+0,3 - +1,6	0,0	0,0 - +0,3	+0,1 - +0,9
Hitzeperioden > 2 Tage	Anzahl	0,4	+0,2 - +1,9	+0,9 - +4,4	0,2	+0,2 - +1,2	+0,6 - +3,5
Schwüle Tage	Tage / Jahr	4,2	-0,5 - +18,6	+19,9 - +47,2	5,1	+0,5 - +20,6	+20,9 - +52,2
Vegetationstage	Tage / Jahr	257,8	+24,2 - +43,6	+48,7 - +74,3	262,5	+24,1 - +43,3	+49,0 - +73,7
Niederschlag; Kalenderjahr	mm	742,	-53,0 - +84,0	-30,0 - +97,0	785,0	-48,0 - +90,0	-25,0 - +96,0
Niederschlag; hydr. Sommerhalbjahr	mm	391,0	-50,0 - +42,0	-55,0 - +40,0	421,0	-54,0 - +38,0	-58,0 - +28,0
Niederschlag; hydr. Winterhalbjahr	mm	352,0	-9,0 - +51,0	+5,0 - +88,0	364,0	-2,0 - +55,0	+14,0 - +101,0
Niederschlag; Winter	mm	180,0	-11,0 - +44,0	+3,0 - +64,0	183,0	-7,0 - +53,0	+6,0 - +78,0
Niederschlag; Frühling	mm	161,0	-7,0 - +26,0	-11,0 - +49,0	160,0	-9,0 - +24,0	-13,0 - +48,0
Niederschlag; Sommer	mm	211,0	-35,0 - +33,0	-59,0 - +17,0	222,0	-38,0 - +31,0	-62,0 - +9,0
Niederschlag; Herbst	mm	189,0	-25,0 - +26,0	-20,0 - +45,0	218,0	-20,0 - +31,0	-13,0 - +56,0
Niederschlag >20mm/Tag	Tage / Jahr	2,9	-0,2 - +1,9	+0,4 - +2,7	2,9	-0,2 - +2,2	+0,5 - +3,0
Trockentage	Tage / Jahr	230,8	-5,2 - +19,3	-4,0 - +21,6	224,9	-5,0 - +18,6	-3,9 - +22,2
Max. Trockenperiode	Tage / Jahr	20,4	-2,5 - +5,8	-2,6 - +4,4	20,4	-2,8 - +5,6	-3,5 - +4,7
Abflussrelevanter Niederschlag	mm	710,0	-58,0 - +86,0	-32,0 - +100,0	753,0	-55,0 - +92,0	-29,0 - +99,0
Max. 1-Tagesniederschlagsmenge	mm	30,0	-2,0 - +11,0	+1,0 - +16,0	30,0	-3,0 - +8,0	0,0 - +15,0
Max. 3-Tagesniederschlagsmenge	mm	46,0	-2,0 - +12,0	+1,0 - +17,0	47,0	-2,0 - +11,0	+1,0 - +17,0
Max. 5-Tagesniederschlagsmenge	mm	56,0	-2,0 - +12,0	+1,0 - +18	59,0	-2,0 - +11,0	0,0 - +17
Niederschlagsperiodendauer	Tage / Jahr	9,8	-1,8 - +1,1	-2,3 - +1,2	10,4	-1,9 - +1,2	-2,5 - +1,1

Tabelle 3: Klimatischer Einfluss (klimatische Änderungen) für Niedersachsen und die niedersächsischen Klimaregionen für den Bezugszeitraum (1971–2000), die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060 zu 1971–2000) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100 zu 1971–2000) für das „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP8.5). Definition der klimatischen Parameter findet sich in Hajati et al. (2022).

Maritim-Subkontinental			Subkontinental			Montan		
1971–2000	2031–2060	2071–2100	1971–2000	2031–2060	2071–2100	1971–2000	2031–2060	2071–2100
9,1	+1,1 - +2,7	+2,5 - +4,8	8,5	+1,1 - +2,8	+2,6 - +4,9	6,5	+1,2 - +3,0	+2,7 - +5,2
2,0	+1,0 - +3,0	+2,8 - +5,2	1,1	+1,0 - +3,1	+3,1 - +5,4	-0,8	+1,1 - +3,2	+3,2 - +5,4
8,5	+1,0 - +2,7	+1,9 - +4,8	8,0	+1,0 - +2,8	+1,9 - +5,0	5,7	+1,0 - +3,1	+2,0 - +5,2
16,6	+0,9 - +2,9	+2,3 - +5,2	16,2	+1,0 - +3,1	+2,5 - +5,4	14,2	+1,1 - +3,4	+2,6 - +5,8
9,3	+1,3 - +2,6	+2,7 - +4,8	8,7	+1,3 - +2,5	+2,8 - +5,0	6,8	+1,3 - +2,6	+2,9 - +4,9
23,5	+0,7 - +3,7	+1,4 - +6,0	23,9	+0,8 - +3,7	+1,4 - +6,1	20,9	+1,2 - +3,8	+1,3 - +6,1
-2,4	+1,0 - +2,9	+0,9 - +4,9	-2,7	+1,1 - +3,1	+1,0 - +5,0	-5,1	+1,3 - +3,8	+1,1 - +5,9
67,3	-37,6 - -15,8	-57,8 - -35,4	70,5	-38,8 - -17,1	60,3 - -37,0	117,6	-58,5 - -26,8	-92,2 - -54,7
2,4	-2,4 - -2,0	-2,4 - -2,4	2,4	-2,4 - -1,9	-2,4 - -2,3	6,7	-6,7 - -3,8	-6,7 - -4,5
15,7	-10,9 - -2,9	-13,8 - -7,1	16,8	-11,8 - -3,5	-15,7 - -7,5	19,4	-18,8 - -6,1	-19,9 - -14,6
15,1	-12,6 - -3,7	-16,1 - -9,1	17,3	-13,9 - -4,3	-18,3 - -10,6	37,5	-26,7 - -11,4	-37,3 - -23,3
26,0	+4,8 - +34,9	+15,8 - +60,6	29,5	+5,8 - +38,0	+17,4 - +62,6	11,2	+6,4 - +29,0	+18,2 - +56,8
4,6	+3,2 - +14,2	+9,7 - +34,3	5,4	+3,2 - +16,4	+11,4 - +38,5	0,7	+0,9 - +5,8	+4,2 - +19,3
2,3	+0,8 - +3,3	+2,5 - +6,3	2,5	+0,9 - +3,2	+2,5 - +7,0	0,5	0,3 - +2,0	+1,5 - +6,2
0,1	0,0 - +0,6	+0,3 - +1,9	0,1	+0,1 - +0,7	+0,4 - +2,2	0,0	0,0 - +0,2	0,0 - +0,9
0,4	+0,3 - +2,1	+1,0 - +4,6	0,5	+0,2 - +2,3	+1,2 - +5,4	0,0	+0,1 - +0,8	+0,4 - +2,6
4,5	-1,4 - +18,8	+20,6 - +47,5	3,8	-1,1 - +18,2	+20,1 - +45,1	0,7	-0,3 - +6,2	+0,8 - +25,4
260,8	+24,2 - +43,5	+48,1 - +73,1	257,7	+24,5 - +43,3	+48,3 - +73,9	206,5	+19,5 - +48,5	+48,3 - +85,6
752,0	-56,0 - +81,0	-25,0 - +94,0	647,0	-46,0 - +80,0	-28,0 - +95,0	1255,0	-111,0 - +108,0	-123,0 - +108,0
391,0	-53,0 - +40,0	-56,0 - +36,0	347,0	-38,0 - +42,0	-45,0 - +49,0	587,0	-92,0 - +70,0	-106,0 - +64,0
362,0	-8,0 - +50,0	+9,0 - +93,0	301,0	-10,0 - +44,0	-1,0 - +74,0	670,0	-45,0 - +87,0	-50,0 - +97,0
188,0	-13,0 - +46,0	+6,0 - +68,0	153,0	-10,0 - +38,0	0,0 - +49	351,0	-39,0 - +94,0	-31,0 - +66,0
162,0	-7,0 - +24,0	-13,0 - +47,0	146,0	-3,0 - +37,0	-7,0 - +46,0	279,0	-16,0 - +40,0	-29,0 - +82,0
211,0	-36,0 - +30,0	-57,0 - +11,0	194,0	-28,0 - +33,0	-53,0 - +24,0	311,0	-64,0 - +47,0	-91,0 - +26,0
191,0	-25,0 - +25,0	-22,0 - +43,0	153,0	-26,0 - +24,0	-18,0 - +41,0	313,0	-41,0 - +40,0	-54,0 - +43,0
2,7	-0,3 - +1,8	0,4 - +2,6	2,3	-0,2 - +1,6	0,2 - +2,3	11,2	-0,5 - +2,8	+0,4 - +3,2
228,9	-4,4 - +20,3	-5,3 - +21,9	240,7	-6,0 - +18,3	-4,8 - +19,4	46,0	-7,3 - +7,1	-3,0 - +7,7
20,3	-2,3 - +5,1	-2,5 - +4,0	20,9	-2,6 - +6,3	-2,1 - +4,4	17,2	-2,1 - +6,2	-1,7 - +4,6
721,0	-62,0 - +82,0	-27,0 - +97,0	614,0	-50,0 - +83,0	-28,0 - +97,0	1228	-113,0 - +111,0	-120,0 - +110,0
31,0	-2,0 - +10,0	+1,0 - +14,0	29,0	-3,0 - +12,0	+1,0 - +17,0	47,0	-1,0 - +17	0,0 - +22,0
48,0	-2,0 - +10,0	+1,0 - +15,0	44,0	-3,0 - +12,0	+1,0 - +19,0	79,0	-3,0 - +18,0	-1,0 - +25,0
57,0	-2,0 - +11,0	+1,0 - +16,0	53,0	-3,0 - +12,0	+1,0 - +19,0	99,0	-3,0 - +19,0	-3,0 - +21,0
10,0	-1,9 - +1,0	-2,1 - 1,1	8,9	-1,5 - +1,0	-1,8 - +1,2	12,9	-3,0 - +1,1	-5,0 - +1,2

2.2.2 Bodenkundliche Projektionen für Niedersachsen

Zur Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld Boden werden unterschiedliche Methoden, sogenannte Pedotransferfunktionen (PTF), genutzt. Das Konzept ist in Bug et al. (2020) beschrieben. Aus standardmäßig vorhandenen Bodendaten (Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50)) werden Informationen zum Standort abgeleitet und mit Landnutzungs-, Relief- und Klimadaten kombiniert, um eine Einstufung eines Klimarisikos zu erhalten. Die Berechnung erfolgt im LBEG mit dem Methodenmanagement System (MeMaS®), das Teil des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®) ist. Die Vorgehensweise bei den einzelnen Indikatoren wird im Folgenden beschrieben.

Wassermangel im Boden

Um den Bodenwasserhaushalt mit all seinen Komponenten bilanzieren zu können, bietet sich die Methode „Effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode“ (WBeff Mai-August) an. Diese wurde im Rahmen des Müncheberger Soil Quality Ratings entwickelt, für Bodenkarten operationalisiert (DWA-M 920-4, 2018) und wird dort als Indikator für die Trockenheitsgefährdung genutzt. Die Methode kombiniert die wichtigen Einflussfaktoren Niederschlag, kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser und Boden als Wasserspeicher über den Kennwert nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum mit der potenziellen Verdunstung jeweils für den Zeitraum Mai bis August. Sie wurde ebenfalls in der bundesweiten Klimarisikoanalyse des UBA (Kahlenborn et al., 2021) als Indikator für Wassermangel im Boden genutzt. Für die Berechnung für Niedersachsen wurde die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50) (Gehrt et al., 2021) ausgewertet sowie Klimabeobachtungsdaten (Niederschlag REGNIE, Verdunstung vpgfao) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und Klimaprojektionsdaten des Ensembles AR5-NI v2.1 (Hajati et al., 2022) verwendet.

Verminderte Retentionsleistung der Böden

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Retention, also die Wasseraufnahme und den Rückhalt der Böden beurteilen zu können, wird der Kennwert „Retentionsleistung der Böden“ (Bug et al., 2022) genutzt. Dazu wird in einem ersten Schritt die Retentionskapazität der Böden auf Basis der Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50, Gehrt et al., 2021) bestimmt. Diese setzt sich aus der nutzbaren Feldkapazität (nFK) und der Luftkapazität (LK) im ersten Bodenmeter zusammen. Die Retentionsleistung wird durch die Bildung des Quotienten aus Retentionskapazität und dem korrigierten Niederschlag (REGNIE bzw. AR5-NI v2.1 in Hajati et al. (2022)) im Winterhalbjahr (Oktober – März) gebildet. Die Verdunstung kann in den Wintermonaten vernachlässigt werden. Dies gilt auch unter Klimawandelbedingungen. Die Retentionsleistung wird als groß bezeichnet, wenn die Retentionskapazität größer ist als der Niederschlag, die Leistung also einen Wert größer eins aufweist.

Austauschhäufigkeit des Bodenwassers

Um das Verlagerungsrisiko von nichtsorbierbaren Stoffen aus dem Boden am Standort abschätzen zu können, kann die jährliche Austauschhäufigkeit des Bodenwassers (AH) nach DIN 19732 (2011) bestimmt werden. Sie gibt an, wie häufig das Sickerwasser innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens (betrachtet wird hierbei die effektive Durchwurzelungstiefe (We)) austauscht. Je höher die Sickerwasserrate und je geringer das Wasserspeicher- und Rückhaltevermögen eines Bodens sind, desto größer ist seine Austauschhäufigkeit. Für die Berechnung wurde die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50) (Gehrt et al., 2021) ausgewertet sowie Klimabeobachtungsdaten (korrigierter Niederschlag REGNIE, Verdunstung vpgfao) des DWD und Klimaprojektionsdaten des Ensembles AR5-NI v2.1 (Hajati et al., 2022) verwendet. Die Methodik wird genauer in Bug & Harders (2024a) beschrieben.

Bodenerosion durch Wasser

Die Erosionsgefährdung durch Wasser wird mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) nach DIN 19708 (2022) bewertet. Der Kennwert potenzieller bzw. natürlicher Bodenabtrag wird in Tonnen pro Hektar und Jahr für die Ackerflächen bestimmt und beschreibt den mittleren jährlichen Bodenabtrag unter der Annahme einer fehlenden Bodenbedeckung durch Pflanzen. Der aktuelle Bodenabtrag ist um ein Vielfaches geringer, da die Anbaukulturen über lange Zeiträume im Jahr den Boden vor Abtrag schützen. Die landwirtschaftliche Nutzfläche wird auf Grundlage der Felblockdaten des Servicezentrum Landentwicklung und Agrarförderung (SLA) von 2024 erfasst. Der K-Faktor, der die Erodierbarkeit der Böden bewertet, wird nach Steinhoff-Knopp & Bug (2019) bzw. Bug et al. (2020) auf Basis der Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50, Gehrt et al., 2021) ermittelt. Die Hangneigung (S-Faktor) wird mit Hilfe des bereinigten DGM5, das aus dem DGM1 des LGLN abgeleitet wurde, bestimmt. Die Hanglänge (L-Faktor) wird durch den Hanglängenfaktor 2 berücksichtigt, der einen Standardhang von ca. 100 m abbildet (LBEG, 2024). Die Daten zur Erosivität der Niederschläge (R-Faktor) wurden von Uber et al. (2024) veröffentlicht und dem LBEG bereitgestellt. Die Methodik wird genauer in Bug et al. (2025) beschrieben. Im Gegensatz zu anderen Indikatoren wurde die Erosivität nur für ein Klimamodell (Globalmodell MIROC5) gekoppelt mit dem Regionalmodell COSMO-CLM berechnet. Aus diesem Grund muss beim Indikator Bodenerosion durch Wasser auf eine Betrachtung eines optimistischen und pessimistischen Falles verzichtet werden. Die Gewissheit der Aussage ist daher als gering zu bewerten.

Bodenerosion durch Wind

Die Erosionsgefährdung durch Wind wird mit der DIN 19706 (2013) bewertet. Es wird dabei ein ordinal skaliertes Kennwert abgeleitet, der die natürliche sowie die aktuelle Gefährdung durch Bodenabtrag durch Wind abschätzt. Bei der vorliegenden Auswertung werden nur die Erodierbarkeit des Bodens und die Erosivität des Windes, abgeleitet aus der mittleren langjährigen jährlichen Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, für die Ackerflächen in Niedersachsen berücksichtigt (standortabhängige Erosionsgefährdung). Die Erodierbarkeit der Böden wird auf Basis der Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50, Gehrt et al., 2021) bestimmt. Die Ackerfläche stammt aus den Felblockdaten des Servicezentrum Landentwicklung und Agrarförderung von 2024. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt nur für die Periode 1981–2000 vor und wurde vom DWD bereitgestellt. Klimaprojektionsdaten zu diesem Thema wurden aufgrund der geringen Aussagekraft der Klimamodelle beim Parameter Windgeschwindigkeit bei der Auswertung nicht berücksichtigt (Kahlenborn et al., 2021). Zudem ist die Methodik durch die Verwendung von mittleren jährlichen Daten wenig sensibel gegenüber der Änderung der Häufigkeit von extremen Einzelereignissen, wie z. B. erosiven Starkwindereignissen.

Zusatzwasserbedarf

Der potenzielle mittlere Zusatzwasserbedarf (mZWpot) beschreibt die Wassermenge, die im Mittel innerhalb der Vegetationsperiode (April-September) zusätzlich zum natürlichen Wasserangebot auf den Boden ausgebracht werden muss, um einen Bodenwassergehalt von mindestens 40 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) permanent aufrechtzuerhalten. Die Methode mZWpot (ehemals mBm nach Bug et al. (2020)) wurde von Renger & Strebel (1983) entwickelt und wird seitdem zur Beratung verwendet (Müller et al., 2012). Die Methodik wird genauer in Bug & Harders (2024b) beschrieben. Eingangsgrößen sind die berechnungswirksame Klimatische Wasserbilanz (KWb) für Normaljahre bzw. Trockenjahre. Diese wird mit Hilfe der Klimabeobachtungsdaten (korrigierter Niederschlag REGNIE, Verdunstung vpgfao) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und Klimaprojektionsdaten des Ensemble AR5-NI v2.1 (Hajati et al., 2022) abgeleitet. Ferner wird das berechnungswirksame pflanzenverfügbare Wasser (Wpflb) benötigt. Wpflb ist die Summe aus der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und – bei Standorten mit Anschluss an das Grundwasser – dem berechnungswirksamen kapillaren Aufstieg (KAb). Diese Kennwerte werden auf Basis der Bodenkarte 1 : 50.000 von Niedersachsen (BK50) (Gehrt et al., 2021) ermittelt.

2.2.3 Projektionen für den Wald in Niedersachsen

Die Standortwasserbilanz (SWB) beschreibt das potenzielle Wasserangebot für Waldbestände in der Vegetationsperiode (Spellmann et al., 2007) und wird als Summe der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) berechnet: $SWB = KWB + nFK$. Die KWB ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung für eine einheitliche Grasbedeckung nach Schulla (2024). Die KWB wurde als 30-jähriger Mittelwert für die Vegetationsperiode ermittelt. Der Beginn der Vegetationsperiode wurde nach Menzel (1997) für die Fichte, das Ende der Vegetationszeit in Anlehnung an von Wilpert (1990) nach Albert et al. (2017) getrennt für die Bilanzierungsperioden berechnet, so dass eine mögliche Verlängerung der Vegetationszeit bei der KWB berücksichtigt wurde. Die nFK wird als Differenz zwischen dem Wassergehalt bei Feldkapazität und dem Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt bestimmt. Unterhalb dieses Wassergehaltes kann das Bodenwasser nicht mehr durch die Pflanzen genutzt werden. Die nFK wurde einheitlich bis ein Meter Bodentiefe berechnet. Standorte mit Grundwasseranschluss für die Baumwurzeln werden nicht gesondert betrachtet (KAPITEL 4.3).

Für die Bestimmung der nFK wird auf die PTF nach Dehner et al. (2015) zurückgegriffen. Diese stellt einen Zusammenhang zwischen der nFK und den im Feld leicht zu erhebenden Variablen Bodenart (aus der Kombination von Ton-, Schluff- und Sandgehalt) und Dichte des Bodens dar. Für Waldböden wird auch der Anteil der organischen Substanz, die Entwicklungstiefe der Böden und der Steingehalt (> 2 mm) berücksichtigt. Als Datengrundlage

für die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität wurde die forstliche Standortskartierung (Stand 2023), ergänzt durch die Bodenkarte 1 : 50.000 von Niedersachsen (BK50) (Gehrt et al., 2021) verwendet.

Die KWB wurde abweichend zu den Projektionen der KRANI 2025 mit anderen regionalen Klimamodellen berechnet. Die Modellsimulationen wurden im Rahmen des ReKliEs-De-Projektvorhabens (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) zur Verfügung gestellt (Hübener et al., 2017). Aus dem Gesamtensemble wurde ein sogenanntes Kern-Ensemble ausgewählt, das nach vorgegebenen Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (Dalelane et al., 2018). Die Ergebnisse des RCP8.5-Ensembles werden herangezogen, da dieses „Weiter-wie-bisher-Szenario“ die maximalen Anpassungserfordernisse für die forstliche Planung bedingt. Die Klimadaten der Regionalmodelle liegen mit einer räumlichen Auflösung von 0,11° (ca. 12 km) vor und umfassen sowohl die Vergangenheit (ab 1951) als auch mögliche Klimaverläufe bis zum Jahr 2100. Die Modellauflösung ist für forstliche Planungen allerdings nicht ausreichend, so dass mithilfe des Quantile Mapping-Verfahrens die Modellergebnisse an ausgewählte Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) angepasst wurden (Feigenwinter et al., 2018; Suttmöller et al., 2021).

Da alle Klimamodelle gleich wahrscheinlich sind, muss die enorme Bandbreite der geschätzten Standortwasserbilanzen für die Planung eines klimastabilen Waldes der Zukunft berücksichtigt werden. Als Planungsgrundlage für die Baumartenempfehlungen werden zur Abschätzung des Trockenstressrisikos die berechneten Standortwasserbilanzen der Klimaperiode 2071–2100 für das RCP8.5-Klimaszenario empfohlen.

2.2.4 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Niedersachsen

Für die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs wurden abweichend zu den anderen Klimarisiken die CMIP6-Projektionen aus dem 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC, 2023b) verwendet. Die Grundlage der Simulationen bilden weiterhin globale Zirkulationsmodelle der Atmosphäre und des Ozeans. Die angesetzten Szenarien weichen jedoch von den repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs) ab. Die bislang auf verschiedenen Verläufen der Treibhausgaskonzentration basierenden Szenarien wurden um eine sozioökonomische Begründung ergänzt und bilden nun die sozioökonomischen Entwicklungspfade (SSPs) (Kreienkamp et al., 2022). Auch wenn die Szenarien eng miteinander verknüpft wurden, können sich andere Ergebnisse aus den Projektionen ergeben, da hier eine neue Generation von methodisch weiterentwickelten Modellen die Basis für die Projektionen bilden.

Außerdem ist die räumliche Auflösung der Zirkulationsmodelle deutlich erhöht (von 200 km Maschenweite des Gitternetzes auf 50 km), wodurch kleinräumigere

Prozesse deutlich besser erfasst werden können. So wird beispielsweise die auf das Wetter Nordeuropas wirkende Golfstromzirkulation besser von dem Modell erfasst.

Wesentlicher Grund für die Verwendung der Daten des 6. Sachstandsberichtes war die Verfügbarkeit regionalisierter Meeresspiegelanstiegsprojektionen durch die DAS-Basisdienste der Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH). Analog zum Vorgehen der anderen Handlungsfelder wurde das Hochemissionsszenario (SSP5-8.5 – Der fossile Weg) ausgewertet (Kreienkamp et al., 2022).

Das BSH verwendet für die Regionalisierung das numerische Ozeanmodell HIROMB-BOOS (HBM) des Dänischen Meteorologischen Instituts (Berg & Poulsen, 2012). Das dreidimensionale Ozeanmodell hat eine räumliche Auflösung in der Deutschen Bucht von ca. 1,8 km mit 24 Schichten in die Wassertiefe und simuliert unter anderem Wasserstände, Strömungen, Wassertemperatur, Salzgehalt und Meereis.

2.2.5 Hydro(geo)logische Projektionen für Niedersachsen

Im Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft kommen drei Modelle zur Anwendung, die von niedersächsischen Institutionen betreut und gepflegt werden, um die Klimarisiken zu betrachten. Um die regionalen Unterschiede auszuwerten, werden drei unterschiedliche räumliche Gliederungen genutzt, die in Kapitel 2.3.2 erklärt werden.

Das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI

PANTA RHEI ist ein deterministisches, semidistributives Modell mit einer räumlichen Disaggregation in drei Ebenen: Gesamteinzugsgebiet, Teileinzugsgebiete und Hydrotöpfe. Hydrotöpfe stellen die kleinsten Recheneinheiten dar. Innerhalb eines Teileinzugsgebiets weisen sie gleichartige hydrologische Eigenschaften auf und werden aus der Verschneidung von Teileinzugsgebiets-, Boden- und Landnutzungsdaten generiert. Neben den natürlichen Gegebenheiten eines Einzugsgebiets können in PANTA RHEI auch wasserwirtschaftliche Anlagen berücksichtigt werden. Hierzu zählen beispielsweise Talsperren, Retentionsräume, Düker oder Verzweigungen. Für die Bauwerke werden die Betriebsregeln im Modell hinterlegt. Zur Ausweisung der Klimarisiken werden die Flusseinzugsgebiete Niedersachsens verwendet (KAPITEL 2.3.2).

Für die Modellierung mit Fokus auf Hochwasser wird der abflusswirksame Niederschlag abgeschätzt mit Hilfe des SCS-Ansatzes (Mockus, 1972; Riedel, 2004). Hier wird der abflusswirksame Teil des Niederschlags in fünf virtuelle Speicher beziehungsweise Teilströme aufgeteilt. In Abhängigkeit von Bodenart, Landnutzung, Wassergehalt des Bodens und Niederschlagsintensität wird zunächst eine Aufteilung in Direktabfluss und Perkolation vorgenommen. Der Direktabfluss setzt sich aus dem Oberflächenabfluss und dem Zwischenabfluss (Interflow) zusammen, der perkolierte Teil des abflusswirksamen Niederschlags teilt sich langfristig auf in Grundwasser- und Basisabfluss, wobei sich diese beiden Teilströme unterscheiden durch die unterschiedliche Entleerungsdauer der virtuellen Speicher. Bei urbanen versiegelten Flächen wird ein weiterer Teilstrom separat berechnet. Die Abflusskonzentration beschreibt die zeitliche Entleerung der virtuellen Speicher in den Hydrotöpfen eines Einzugsgebietes. Diese werden in PANTA RHEI durch mathematisch beschreibbare Einzellinearer Speicher abgebildet und durch Überlagerung in den Abfluss aus jedem Teileinzugsgebiet in das Gewässer umgewandelt.

Für die Modellierung mit Fokus auf NIEDRIGWASSER wird der Bodenwasserhaushalt mit dem Modul DYVESOM (Dynamic Vegetation Soil Model) (Kreye, 2017) simuliert.

Der vertikale Wasseraustausch in der ungesättigten Zone mit den Prozessen Infiltration, Perkolation, kapillarem Aufstieg und Grundwasserneubildung wird u. a. durch die Verwendung der matrixpotenzialabhängigen Darcy-Buckingham Beziehung realisiert (Jury & Horton, 2004). Es werden drei horizontale Bodenspeicher unterschieden, wobei der Zustand der obersten Bodenschicht ausschlaggebend für die Infiltrationsrate ist. Die Parametrisierung des Bodenmodells erfolgt nicht durch einen „effektiven“ Parametersatz, sondern berücksichtigt die natürliche räumliche Subgrid-Variabilität durch mehrere parallel rechnende Bodenmodelle mit unterschiedlichen Parametersets (Kreye & Meon, 2016). In Abhängigkeit der Matrixpotenzialgehalte der einzelnen Bodenschichten wird der abflusswirksame Teil des Niederschlags berechnet.

Weitere Details zu dem angewendeten Modellsystem werden in den Publikationen des NLWKN (2019a, 2021a) aufgeführt.

Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA

Die Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell mGROWA wurde in der derzeitigen Version mGROWA22 für die Ausweisung von drei Klimarisiken verwendet (Ertl et al., 2024; Hajati et al., 2024). Die Grundwasserneubildung ist dabei eine relevante Größe, die im räumlich und zeitlich hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodell mGROWA in zwei Schritten berechnet wird: (1) Simulation der Abflussbildung in Tagesschritten und (2) Abflussseparation in Monatsschritten. Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA ist ausführlich beschrieben im Geobericht 36 (Ertl et al., 2019). Es handelt sich um ein deterministisches, flächendifferenziertes, hydrogeologisches Bilanzmodell (Rasterzellen sind horizontal nicht verbunden). Die Evaluierung fand an Pegeln von 57 Einzugsgebieten statt. Dabei kann die Grundwasserneubildung im langjährigen Mittel dem Basisabfluss gleichgesetzt werden und wird für den Zeitraum 1971–2000 evaluiert. Des Weiteren wird der mittlere Gesamtabfluss an den MQ-Werten evaluiert und die Vorhersagefähigkeit mittels Nash-Sutcliffe Koeffizient (NSE) bewertet (Grundwasserneubildung beträgt 0,53 und Gesamtabfluss 0,58). Zur Ausweisung der Klimarisiken werden die Hydrogeologische Räume Niedersachsens verwendet.

Um das Klimarisiko Grundwasserdürre zu bewerten, wurde die maximale Dauer ermittelt, in der die jährliche Grundwasserneubildung unterhalb des 25er-Perzentils des Zeitraums 1961 bis 2020 lag. Es wurde der maximale Zeitraum mit verfügbaren Daten gewählt, und nicht der Bezugszeitraum 1971–2000, da das bei Extremwertbetrachtungen vorzuziehen ist. Im Folgenden wurde für jedes Klimamodell

das 25er-Perzentil des historischen Modellzeitraums (1971 bis 2005) ermittelt und es wurde berechnet, wie lange dieser Wert in 2021 bis 2070 (repräsentiert Mitte des Jahrhunderts) und in 2061 bis 2100 (repräsentiert Ende des Jahrhunderts) maximal unterschritten wird. Auch hier wurden längere Zeiträume gewählt, da dies bei Extremwertbetrachtungen zu empfehlen ist, weil diese naturgemäß selten sind und weil eine Dürre schon vor dem Start des 30-jährigen Zeitraums beginnen kann, bzw. nach dem 30-jährigen Zeitraum enden kann und diesem Zeitraum noch zugezählt werden sollte. Dies wurde für jede Rasterzelle berechnet und dann auf die hydrogeologischen Räume aggregiert.

Um das Klimarisiko **MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER** zu bewerten, wurde von der mittleren Grundwasserneubildung der Mitte und des Endes des Jahrhunderts der entsprechende Zusatzwasserbedarf (KAPITEL 2.2.2) abgezogen, also die Menge Wasser, die zusätzlich aufgebracht werden müsste, um eine gute Bodenwasserversorgung der Kulturpflanze aufrecht zu erhalten. Berücksichtigt wurde die Grundwasserneubildung Niedersachsens und der Zusatzwasserbedarf nur für die Flächen, auf denen Ackerbau betrieben wird. Die Rechnung wurde auf Basis von Grundwasserkörpern (LBEG, 2021) aggregiert, da diese ein hydrogeologisches System darstellen. So konnte gezeigt werden, in welchem Grundwasserkörper zukünftig mehr oder weniger Wasserbedarf für die Bewässerung vorliegt als natürlich Grundwasser gebildet wird. Diese Betrachtung ist überschlägig und daher isoliert von den wasserrechtlichen Vorgaben nach WRRL zum guten mengenmäßigen Zustand zu betrachten.

Um das Klimarisiko **VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER** zu bewerten, wurden zunächst die Flächen ermittelt, die hochanstehendes Grundwasser haben. Das sind die Rasterzellen der Bodenkarten von Niedersachsen 1 : 50 000 (BK50), deren mittlerer Grundwasserhochstand (mhgw) maximal 100 cm unter Geländeoberkante (GOK) beträgt. Um das Risiko der Vernässung zu betrachten, wird die Grundwasserneubildung mit dem Drainageabfluss addiert, weil dieser während einer Vernässung nicht abfließen kann. Eine extrem hohe Grundwasserneubildung wird definiert als das 90er-Perzentil des Bezugszeitraums. Berechnet wurde zum einen das 90er-Perzentil der Grundwasserneubildung für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts und wie häufig das 90er-Perzentil der Grundwasserneubildung in der Zukunft im optimistischen und pessimistischen Fall überschritten ist. Da das Risiko stark von den hydrogeologischen Eigenschaften abhängig ist, wurde dieses auch auf Basis der hydrogeologischen Räume ausgewertet.

Das Zeitreihenmodell zur Modellierung der Grundwasserstandsdynamik

Mithilfe eines Zeitreihenmodells (NLWKN, 2023a) wird eine Projektion der Grundwasserstandsentwicklung in die Zukunft durchgeführt. Genutzt werden die Ergebnisse für die Klimarisiken **GRUNDWASSERHOCHSTAND** und **GRUNDWASSERTIEFSTAND**. Die Grundwasserstandsdynamik wird über ein Speichermodell abgebildet, das aus den Klimaparametern Niederschlag und Verdunstung eine Zeitreihe der Grundwasserstandsentwicklung („klimatische Ganglinie“) generiert, die über einen Optimierungsalgorithmus an einen standörtlich beobachteten Ganglinienverlauf angepasst werden kann. Analog zur Vorgehensweise bei Anwendung von Filtermodellen wie dem Wiener-Mehrkanalfilter (Bucher, 1999; Grossmann & Skowronek, 2005) soll es dadurch möglich werden, die Grundwasserstandsdynamik hinsichtlich Übereinstimmung mit und Abweichungen von der natürlichen, witterungsbedingten Dynamik zu beurteilen. Der Modellansatz besteht aus drei Modellkomponenten, welche in einfacher Form die Grundwasserneubildung, den Transport durch die ungesättigte Zone und das Speicherverhalten des Grundwasserleiters abbilden.

Weitere Details zu dem angewendeten Modellsystem werden in in den Publikationen des NLWKN (2019a, 2021a) aufgeführt.

2.3 Räumliche Gliederungen Niedersachsens

2.3.1 Klimaregionen Niedersachsens

Niedersachsen lässt sich in fünf Klimazonen unterteilen, die sich durch eine jeweils ähnliche klimatische Charakteristik in der Gegenwart abgrenzen lassen und deren klimatische Änderungen räumlich gezielter ausgewertet werden können. Diese Klimaregionen werden in der KRANI 2025 genutzt, um die Regionalität der Klimarisiken in den Handlungsfeldern Boden sowie Wald- und Forstwirtschaft zu beschreiben. Konkret handelt es sich um die intensiv betrachteten Klimarisiken **STOFFAUSTRAG AUS DEM BODEN IN DAS GRUNDWASSER, VERMINDERTE RETENTIONSLEISTUNG DER BÖDEN, BODEN-EROSION DURCH WASSER, UND TROCKENSTRESSRISIKO IM WALD.**

Die Klimaregionen Niedersachsens wurden mittels einer Clusteranalyse unter Berücksichtigung der Klimadaten von 1991–2020 neu ausgewiesen (Hajati et al., 2023). Sie unterscheiden sich sowohl von der vorherigen Version, die in der Klimawirkungsstudie 2019 (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019) und dem Klimafolgenmonitoringbericht (NIKO, 2023) verwendet wurden, als auch von den bundesweiten Klimaregionen in der KWRA 2021 (Kahlenborn et al., 2021). Niedersachsen lässt sich in fünf Zonen unterteilen: die maritime, die maritim-subkontinentale, die subkontinentale, die submontane und die montane Klimaregion (Abbildung 4).

Während die maritime Klimaregion saisonal die geringsten Unterschiede der Niederschläge (Sommer: 222 mm, Winter: 183 mm) und Temperaturen (Sommer: 16,5 °C, Winter: 2,1 °C) aufweist, ist die subkontinentale Region diejenige mit der geringsten Jahressumme mittleren Niederschlags (647 mm) und die montane Klimaregion, die dem Harz entspricht, die niederschlagreichste (1255 mm) und kühlfste (Jahresdurchschnittstemperatur 6,5 °C) Klimaregion in Niedersachsen.

Der Klimawandel trifft die Klimaregionen unterschiedlich stark. So führt die Zunahme der mittleren Lufttemperatur insbesondere in der maritimen Klimaregion zu einer Zunahme der schwülen Tage (bis zum Ende des Jahrhunderts kann in einem optimistischen Fall die Zunahme 20,9 Tage/Jahr und in einem pessimistischen Fall 52,2 Tage/Jahr betragen). Die höchste Zunahme an Hitzetagen (von 5,4 um 11,4 Tage/Jahr im optimistischen Fall und um 38,5 Tage/Jahr im pessimistischen Fall bis Ende des Jahrhunderts) und Sommertagen (von 29,5 um 17,4 Tage/Jahr im optimistischen Fall und um 62,6 Tage/Jahr im pessimistischen Fall bis Ende des Jahrhunderts) ist in der subkontinentalen Klimaregion zu erwarten, eine Region, die die trockenste Region Niedersachsens ist und auch zukünftig sein wird.

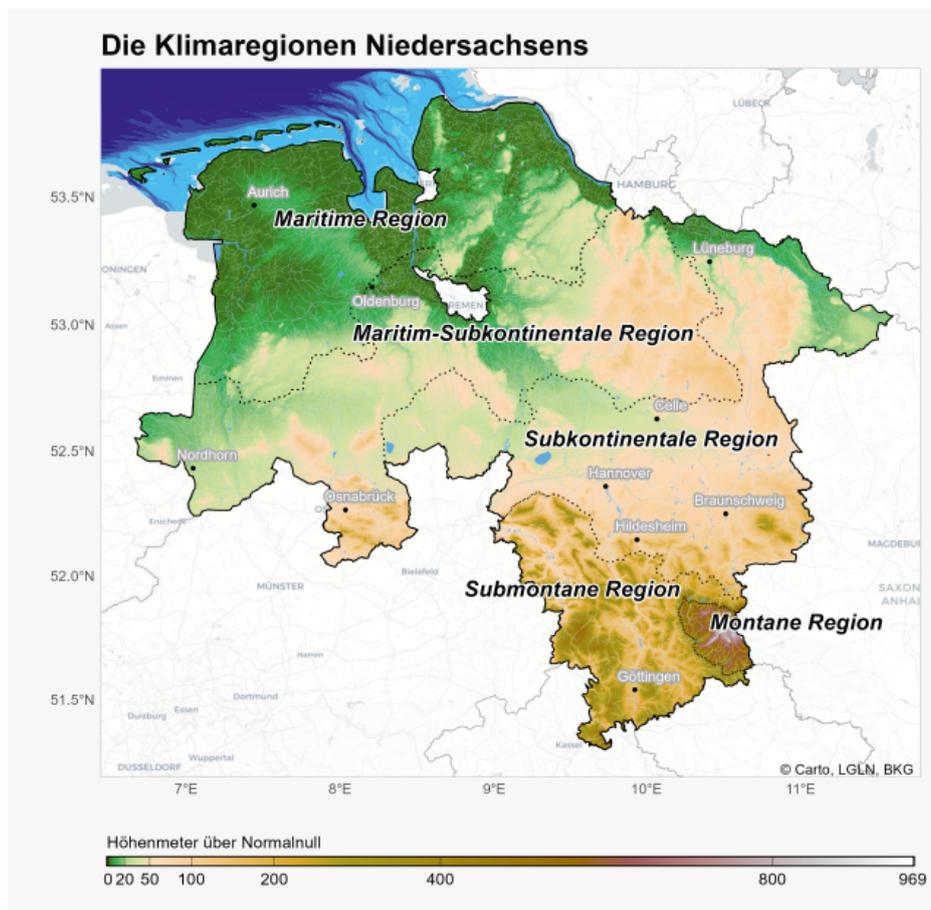


Abbildung 4: Klimaregionen Niedersachsens

2.3.2 Flusseinzugsgebiete Niedersachsens

Für die Klimawirkungen Hochwasser und Niedrigwasser erfolgt die räumliche Aggregation der Ergebnisse in Niedersachsen auf Basis der oberirdischen Flusseinzugsgebiete (Abbildung 5). Diese umfassen die Flächen, von denen der Niederschlag dem jeweiligen Fließgewässersystem oberirdisch zufließt. Hierbei werden die unmittelbaren Einzugsgebiete der großen Ströme Ems, Weser und Elbe nicht berücksichtigt, da dem NLWKN für diese Gebiete keine Modelle zur Simulation des Wasserhaushaltes anhand von Klimaprojektionen vorliegen. Entsprechende Analysen wurden bereits im Zuge der Klimawirkungs- und -risikoanalyse für Deutschland im Cluster Wasser durchgeführt (Fritsch et al., 2021). Weiterhin unberücksichtigt bleiben der von den Gezeiten beeinflusste Tidebereich sowie Teile der nördlichen, küstennahen Geest.

Die abgegrenzten Gebiete basieren auf der Hydrographischen Karte für Niedersachsen (Umweltkarten Niedersachsen, 2024). Sie umfassen folgende Fließgewässer (von der Mündung in die o. g. Hauptströme bis zum Quellgebiet): Aller, Leine, Große Aue, Hase, Hunte, Vechte und Wümme. Die jeweils gewählten Teileinzugsgebiete fassen die Gebietscharakteristika der entsprechenden Fließgewässer (wie z. B. geographische Lage, Topographie) mit den jeweils zugehörigen hydrometeorologischen Verhältnissen (z. B. Niederschlag, Abflussregime) zu einer Einheit zusammen. Hieraus ergeben sich die gebiets-typischen Abflussverhältnisse.

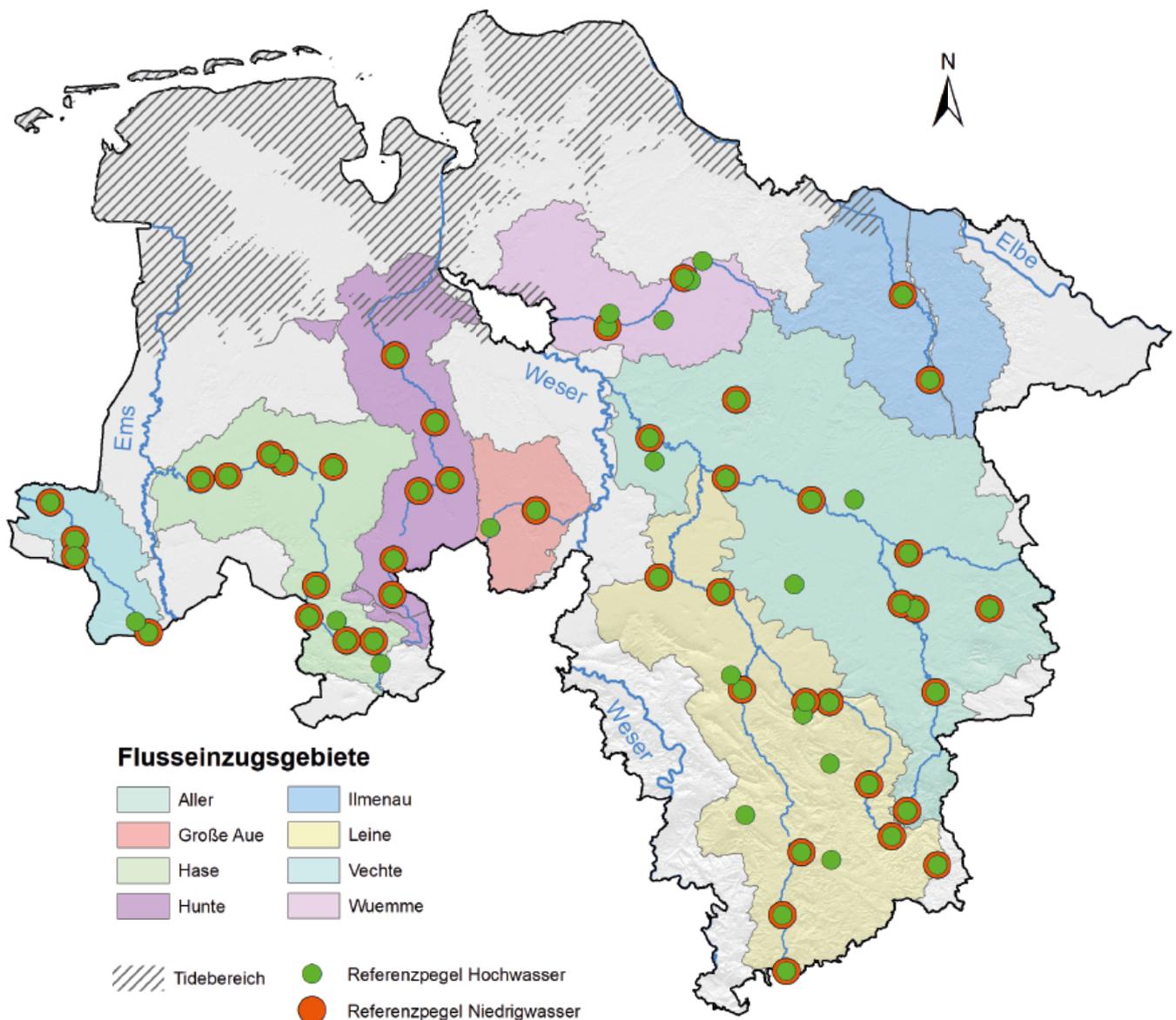


Abbildung 5: Flusseinzugsgebiete als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Hochwasser und Niedrigwasser sowie die jeweils zugehörigen Referenzpegel.

2.3.3 Hydrogeologische Räume Niedersachsens

Die hydrogeologischen Räume werden verwendet, um die Klimarisiken GRUNDWASSERDÜRRE, VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER und MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER räumlich einzuordnen. Die hydrogeologischen Räume weisen Gebiete mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften aus, wozu auch geomorphologische und geologische Merkmale gehören. Diese beeinflussen das Grundwassersystem durch unterschiedliche Eigenschaften der Grundwasserleiter und auch unterschiedliche Bedingungen für die Grundwasserneubildung.

Im norddeutschen Flachland bestimmen maßgeblich die Durchlässigkeit der Bodenschichten und der Flurabstand die Neubildungsrate. Hier befinden sich auch die **Nordseeinseln**, deren Süßwasserlinsen auf eine entsprechend hohe Grundwasserneubildung durch durchlässige sandige

Böden angewiesen sind. Dagegen zeichnen sich insbesondere die **Marschen** aber auch die **Niederungen** durch bindige Deckschichten und geringe Grundwasserneubildungsraten bei gleichzeitig geringen Flurabständen aus. Das ist möglich, da die **Geest** (auch Nord- und mitteldeutsches Mittelpleistozän) die Grundwasserleiter dieser Räume speist. Durch weitverbreitete hoch durchlässige Schmelzwasserablagerungen sind die Grundwasserneubildungsraten in der Geest in der Regel deutlich höher. Das Mitteldeutsche Bruchschollenland, das größtenteils das **Nordwestdeutsche Bergland**, aber auch das **Sandmünsterland**, die **Subherzyne Senke** und die **Thüringische Senke** beinhaltet, zeichnet sich durch eine komplexe bzw. heterogene Hydrogeologie und Grundwasserneubildung aus. Das mitteldeutsche Grundgebirge bzw. der Harz ist klimatisch durch hohe Niederschläge begünstigt und hat trotz weitverbreiteter Grundwasserleiter und wenig ergiebiger Quellen eine relative hohe Grundwasserneubildung (Elbracht et al., 2016).

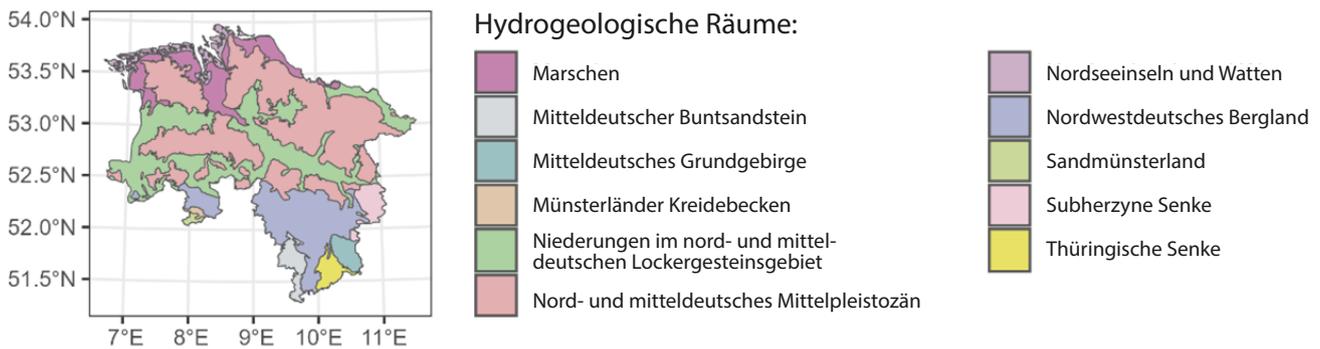


Abbildung 6: Hydrogeologische Räume Niedersachsens als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Grundwasserdürre, Vernässung durch Grundwasser und Mangel an Bewässerungswasser.

2.3.4 Naturregionen Niedersachsens

Für die Klimawirkungen GRUNDWASSERHOCHSTAND und GRUNDWASSERTIEFSTAND erfolgt die räumliche Aggregation der Ergebnisse in Niedersachsen auf Basis von Naturregionen (Abbildung 7). Diese orientieren sich zunächst an den in Niedersachsen seit den 1980er-Jahren geltenden Naturräumlichen Regionen mit Ausnahme des Wattenmeeres (Drachenfels, 2010), deren Abgrenzung auf Grundlage von Bodenkarten und weiteren Informationen erfolgte.

Die resultierenden Regionen lauten: Bergland, Börden, Geest, Inseln, Marschen und Niederungen. Durch diese hydrogeologisch orientierte Differenzierung soll u. a. eine Abgrenzung von Gebieten mit ähnlicher Grundwasserdynamik erreicht werden. Die betrachteten Messstellen zeigen eine möglichst natürliche, witterungs- und klimatisch bedingte Grundwasserstands-dynamik an (Holt et al., 2022).

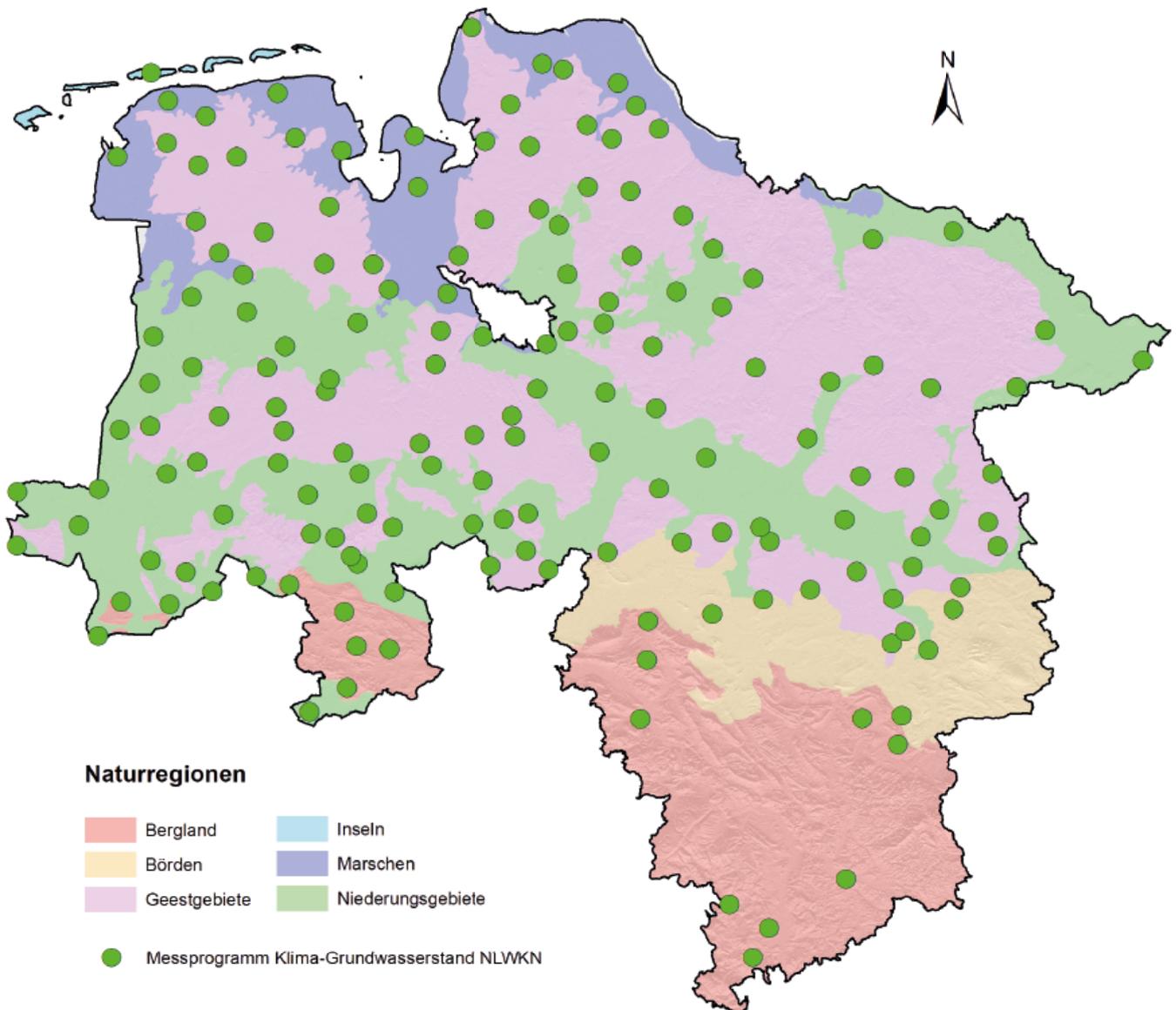


Abbildung 7: Naturregionen als räumliche Einheiten der Aggregation für die Klimawirkungen Grundwasserhochstand und Grundwassertiefstand sowie die zugehörigen Referenzmessstellen.



3 Cluster Land

- 
- 3.1 Handlungsfeld Boden**
 - 3.1.1 Wassermangel im Boden
 - 3.1.2 Verminderte Retentionsleistung der Böden
 - 3.1.3 Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser
 - 3.1.4 Bodenerosion durch Wasser
 - 3.1.5 Bodenerosion durch Wind

 - 3.2 Handlungsfeld Landwirtschaft**
 - 3.2.1 Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren
 - 3.2.2 Abiotischer Stress (Pflanzen)
 - 3.2.3 Verschiebung von Anbaugebieten
 - 3.2.4 Verschiebung von Vegetationsperioden
 - 3.2.5 Stress durch Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen)
 - 3.2.6 Ertragsausfälle
 - 3.2.7 Qualität der Ernteprodukte

 - 3.3 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft**
 - 3.3.1 Trockenstressrisiko im Wald



BODEN

3.1 Handlungsfeld Boden

Böden sind ein Schlüsselement von Ökosystemen und daher zentral bei der Betrachtung der Auswirkung des Klimawandels. Sie erfüllen wichtige und zum Teil äußerst komplexe Funktionen für Mensch und Umwelt. Darunter fallen beispielsweise die natürlichen Bodenfunktionen, die Nutzungsfunktion sowie die diesen Funktionen zugrundeliegenden, im Boden ablaufenden Stoffumsetzungs- und Verlagerungsprozesse. Böden fungieren als Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen und sind der artenreichste Lebensraum unseres Planeten (Anthony et al., 2023) – sehr viele Lebewesen verbringen zumindest einen Teil ihres Lebens im Boden. Als Regulatoren im Energie-, Wasser- und Stoffhaushalt der Landökosysteme wirken Böden ausgleichend und als Zwischenspeicher, zum Beispiel für Niederschlagswasser. Sie dokumentieren und archivieren Zeugnisse der Natur- und Kulturgeschichte und sind eine wichtige Lebensgrundlage des Menschen, der sie in vielfältiger Weise nutzt. Böden dienen beispielsweise als Anbaufläche für Nahrungsmittel, Futtermittel sowie pflanzliche Rohstoffe.

Aus den genannten Funktionen ergeben sich daher enge Beziehungen, insbesondere zum **HANDLUNGSFELD LANDWIRTSCHAFT**, zum **HANDLUNGSFELD WALD- UND FORSTWIRTSCHAFT** und zum **HANDLUNGSFELD WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT**. Zudem sind Böden auch Erholungsraum und wirken kühlend in Städten (KAPITEL 6.1). Als Kohlenstoffspeicher, als Standort für die Erzeugung und Weiterleitung (Trassen) von regenerativen Energien (Wind und Sonne), sowie als Anbaugrund für Substrate für die Biogasproduktion sind Böden auch zentral beim Klimaschutz. Jedoch werden Böden auch als Standort für Verkehrswege, Industrieanlagen und Gebäude genutzt, wodurch sie die wichtigen ökologischen Funktionen ganz oder teilweise verlieren. Böden sind nicht vermehrbar und kaum erneuerbar. Daher dürfen sie nur nach dem Prinzip der Vorsorge genutzt und müssen geschützt werden.

Im Boden überschneiden sich die Sphären des Planeten: die Litho-, Hydro-, Bio- und auch die Atmosphäre. Veränderungen im Zustand einer dieser Sphären, wie der Atmosphäre im Zuge des Klimawandels, führen daher auch zu Veränderungen im Boden selbst. Der Klimawandel bedeutet eine kontinuierliche Veränderung der Rahmenbedingungen für die Böden und ihre Funktionen. Nahezu

alle im Boden ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse werden durch die Temperatur und durch die Feuchtigkeit gesteuert. Als zentrale Veränderungen im Zuge des Klimawandels, die Einfluss auf den Boden haben, nennen Engel et al. (2024) den Temperaturanstieg, die Abnahme der Frühjahrsniederschläge, die Zunahme der Winterniederschläge, die Zunahme extremer Niederschläge (KAPITEL 4.3.2), die Abnahme der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode, die Zunahme von Trockenperioden und die Zunahme von Stürmen.

Die Eigenschaften des Bodens und damit auch die Funktionserfüllung reagieren unterschiedlich schnell auf diese Veränderungen und müssen daher differenziert bewertet werden. Viele, aber nicht alle, bodenspezifischen Parameter verändern sich nur langsam. Während z. B. Bodenwassergehalte über verhältnismäßig kurze Zeiträume große Amplituden aufweisen, können der Gehalt an organischer Substanz oder die Kationenaustauschkapazität auch längerfristig stabil sein. Daher stehen sich kurzfristig ändernde Bodenparameter, wie etwa die Bodenfeuchte, im Fokus der Betrachtungen.

Die Empfindlichkeit der Böden in Niedersachsen gegenüber Klimarisiken ist aufgrund der verschiedenen Standortbedingungen und je nach betrachteter Klimawirkung sehr unterschiedlich. Die vorhandenen Landschaftsräume umfassen vom Harz bis zur Nordsee ein äußerst umfangreiches und diverses bodentypologisches Inventar. Dieses reicht von den durch den Gezeitenrhythmus beeinflussten Böden der Küste über die in den eiszeitlichen Ablagerungen der Geest entwickelten Böden hin zu den fruchtbaren Böden der Flusslandschaften und der Lössböden, sowie den Verwitterungsböden des Berglandes. Darüber hinaus sind niedersachsenweit auch Niedermoore, Hochmoore sowie durch den Menschen deutlich geprägte Böden (z. B. Tiefumbruchböden und Plaggenesche) anzutreffen (Gehrt et al., 2021). Deshalb ist eine räumlich differenzierte Auswertung der Klimarisiken erforderlich. Darunter fallen die Risiken der **BODENEROSION DURCH WASSER**, **BODENEROSION DURCH WIND**, das **RISIKO VON WASSERMANGEL IM BODEN**, die **VERMINDERTE RETENTIONSLEISTUNG DER BÖDEN** und das **Risiko eines erhöhten STOFFAUSTRAG AUS DEM BODEN IN DAS GRUNDWASSER**.

INFO

- Böden sind der artenreichste Lebensraum unseres Planeten.
- Böden sind nicht vermehr- und kaum erneuerbar und müssen geschützt werden.
- Wie empfindlich die Böden in Niedersachsen auf Klimarisiken reagieren, hängt vom Standort ab.

3.1.1 Wassermangel im Boden

Böden speichern in ihren Poren, den Räumen zwischen den festen Partikeln, Wasser und sind damit ein elementar wichtiger Bestandteil des Landschaftswasserhaushaltes. Sie halten Wasser auch in Phasen ohne Niederschlag pflanzenverfügbar bereit und sind damit essentieller Standortfaktor für das Wachstum von Pflanzen. Wenn ein Mangel an Wasser im Boden in der Vegetationszeit auftritt, schränkt die Vegetation ihre Verdunstung ein, wodurch sich die Erträge in der Landwirtschaft und der Zuwachs in den Wäldern reduzieren (KAPITEL 3.2.2). Bei länger anhaltenden Perioden mit Wassermangel kann es auch zum Absterben von Kulturen oder Bäumen kommen. In den Wintermonaten bedeutet ein Wassermangel im Boden eine geringere Sickerwassermenge und damit eine Verringerung der Grundwasserneubildung (KAPITEL 4.3.6). Die Verfügbarkeit von Wasser im Boden ist ein wesentlicher Standortfaktor für die Bewertung der Ertragsfunktion. Sie ist abhängig von der Wassermenge, die in den Boden gelangt (Niederschlag, kapillarer Aufstieg) und der Menge, die den Boden verlässt (Verdunstung, Sickerwasser) sowie von der Wasserspeicherfähigkeit der Böden. Diese ist räumlich variabel und maßgeblich von den Bodeneigenschaften, wie dem Substrat oder dem Humusgehalt, aber auch der Nutzung beeinflusst.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Der Wasserhaushalt des Bodens wird durch Niederschläge und kapillaren Aufstieg aus dem oberflächennah anstehenden Grundwasser gespeist. Durch die Verdunstung an der Bodenoberfläche und durch die Pflanzen wird dem Boden Wasser entzogen. Der Klimawandel führt zu höheren Temperaturen und damit auch zu einer erhöhten Verdunstung. Zudem verlagern sich zum Teil Niederschläge aus den Frühjahrs- und Sommermonaten in den Winter. Ferner kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Grundwasserstände in der Hauptvegetationsperiode direkt durch den Klimawandel und indirekt durch zu erwartende höhere Bedarfe bei der Trink-, Brauch-, Kühlungs- und Bewässerungwassergewinnung absinken, so dass es zur Minderung oder zum Abbruch des kapillaren Aufstiegs in den Wurzelraum des Bodens kommt. Der Bodenwasserhaushalt in der Vegetationsperiode kann dementsprechend im Klimawandel durch mehrere Faktoren negativ beeinflusst werden, was die Wahrscheinlichkeit von Wassermangelsituationen größer werden lässt. Böden mit Grundwasseranschluss und Böden mit besonders hoher nutzbarer Feldkapazität (z. B. Lössböden) können Wassermangelsituationen besser kompensieren als geringmä-

tige und / oder sandige (sogenannte „leichte“) Böden. Ein Teil der Klimamodelle projizieren im Gegensatz zu der beschriebenen Wirkungskette aber auch höhere Niederschläge in der Hauptvegetationsperiode, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Wassermangel geringer werden würde. Jedoch zeigen die Klimamodelle, dass Intensität und Regenmenge von Niederschlagsereignissen zukünftig zunehmen können. Dies geht mit einem höheren Anteil an Oberflächenabfluss einher, so dass wiederum weniger Wasser in die Böden gelangen könnte.

Das Risiko für Wassermangel im Boden variiert räumlich. Niedersachsen ist im Vergleich zu anderen Bundesländern auf den ersten Blick durch das eher maritime Klima weniger stark von Wassermangelsituationen betroffen.

Für die Marschböden an der Küste (maritime Region), die zudem Grundwasseranschluss haben, ist das Risiko gering. Doch gerade in der nördlichen Hälfte des Landes weisen die sandigen Böden nur geringe Wasserspeicherfähigkeiten auf, so dass bei ausbleibenden Niederschlägen zum Teil recht schnell Wassermangel einsetzen kann. In Abbildung 8 zeigt sich dies aufgrund des nach Osten kontinentaler werdenden Klimas vor allem im Nord-Osten von Niedersachsen. In der subkontinentalen Region sind aufgrund der höheren Kontinentalität des Klimas die Einflüsse des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt deutlicher. Im Bereich der Lössbörde (südlicher Teil der kontinentalen Region) werden die klimatischen Einflüsse durch die hohe Wasserspeicherfähigkeit der Lössböden abgemildert. In den höheren Lagen der submontanen und montanen Region sind die Niederschläge höher und die Verdunstung geringer, so dass Wassermangel seltener und nur bei sehr geringmächtigen Verwitterungsböden auftritt.

Der Kennwert **Effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode** (WB_{eff}) wird im Folgenden als Indikator zur Ausweisung des Klimarisikos Wassermangel im Boden genutzt. Nach DWA Merkblatt 920-4 (2018) ist mit einer Einschränkung der Erträge durch Wassermangel ab einem WB_{eff}-Wert < 50 mm zu rechnen. Aktuell (1971–2000) weisen die Flächen der Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50) für ganz Niedersachsen im Mittel einen Wert von 91 mm auf. Knapp 30 % der Flächen wurde ein Wert < 50 mm zugewiesen. Daraus lässt sich für Niedersachsen ein mittleres, regional jedoch hohes Klimarisiko für Wassermangel im Boden ableiten.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Infolge des Klimawandels wird sich der Bodenwasserhaushalt verändern, wobei die Modelle keine einheitliche Richtung vorgeben. Im Niedersachsenmittel kann für die Mitte des Jahrhunderts der Kennwert sowohl um 45 mm ansteigen als auch um den gleichen Betrag abnehmen. Für das Ende des Jahrhunderts wird im pessimistischsten Fall eine Abnahme um 85 mm ermittelt. Das würde bedeuten, dass auf etwa 67 % der Fläche Niedersachsens von einer Einschränkung der Erträge aufgrund von Wassermangel im Boden ausgegangen werden muss, da der Kennwert KWBeff auf diesen Flächen den Schwellenwert von 50 mm unterschreitet. Das würde eine Verdopplung des Anteils dieser Flächen im Vergleich zur Referenz bedeuten.

Tabelle 4 stellt die Ergebnisse gruppiert für die Klimaregionen Niedersachsens dar. Die subkontinentale Region mit der Lüneburger Heide ist innerhalb des Bezugszeitraums die Region mit den meisten Flächen die bereits Wassermangel aufweisen. Dies kann sich im Zuge des Klimawandels weiter ausweiten. Besonders betroffen von einem verstärkten Wassermangel sind die Böden in der montanen und submontanen Region. Hier können extreme Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes auftreten. In der maritimen Region fallen im Vergleich der Regionen im pessimistischen Fall die projizierten Wassermangelsituationen am geringsten aus.

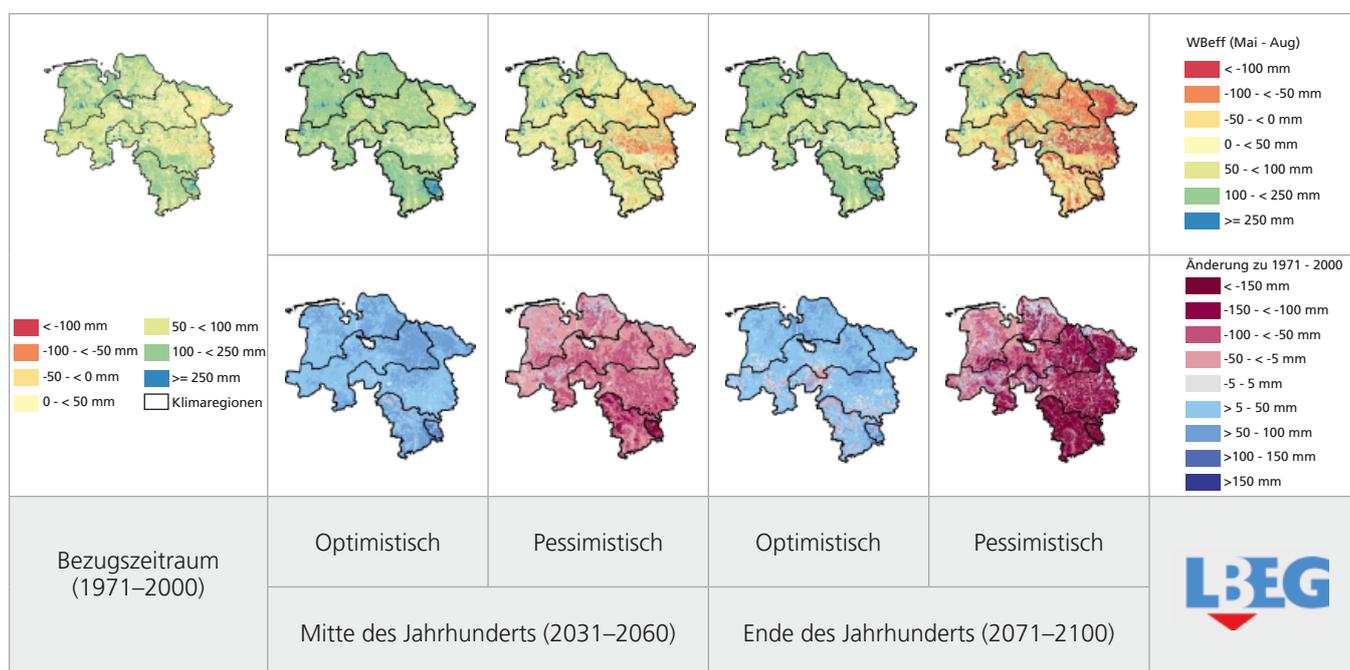


Abbildung 8: Effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5)

Klimaregion	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Montane Region	180 mm	+73 mm	-140 mm	+43 mm	-211 mm
Submontane Region	118 mm	+48 mm	-71 mm	+24 mm	-138 mm
Subkontinentale Region	74 mm	+40 mm	-47 mm	+29 mm	-90 mm
Maritim-Subkontinentale Region	84 mm	+45 mm	-41 mm	+28 mm	-75 mm
Maritime Region	99 mm	+46 mm	-32 mm	+36 mm	-53 mm
Niedersachsen	91 mm	+45 mm	-46 mm	+30 mm	-85 mm

Tabelle 4: Mittelwerte der Effektiven Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).

INFO

- Für Marschböden ist das Wassermangelrisiko gering, in der subkontinentalen Region kann bei Sandböden recht schnell Wassermangel auftreten.
- Infolge des Klimawandels wird sich der Bodenwasserhaushalt verändern. Das Risiko für Wassermangel wird zunehmen.

Bewertung des Klimarisikos

Auf Basis der Ergebnisse der Modellierungen lässt sich das Risiko für Wassermangel im Boden mit Hilfe von Tabelle 5 charakterisieren. Aufgrund der beobachteten und projizierten weiteren Zunahme der Temperaturen wird die Verdunstung in den Sommermonaten ansteigen. Durch erhöhte Niederschläge kann dies nur in optimistischen Szenarien zum Teil kompensiert werden. In der Mitte des Jahrhunderts könnte sich die Situation gegenüber den

heutigen Verhältnissen verbessern oder verschlechtern, d. h. das Wassermangelrisiko kann im besten Fall sogar abnehmen, sich im pessimistischen Fall aber deutlich verschlechtern. Zum Ende des Jahrhunderts nimmt das Wassermangelrisiko zu, bzw. ist deutlicher ausgeprägt. Das Klimarisiko ist im Vergleich zu heute im optimistischen Fall daher gleichbleibend (mittel), im pessimistischen Fall aber deutlich erhöht.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Gering	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 5: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“.

3.1.2 Verminderte Retentionsleistung der Böden

Unversiegelte Böden sind als Speicher und Rückhalt für Wasser in Überschussphasen ein wichtiger Faktor bei der Verminderung des Risikos von HOCHWASSER und Überschwemmungen. Nur intakte Böden können Wasser aufnehmen, dieses halten und ggf. in größere Tiefen weiterleiten (UBA, 2016). Dabei ist die Aufnahmefähigkeit der Böden durch ihre Retentionskapazität, also den maximalen freien Porenraum (Bug et al., 2022), begrenzt. Wenn mehr Niederschlag fällt, als die Böden aufnehmen können, bleibt das Wasser auf den Flächen stehen oder fließt oberflächlich ab. Im Sommer passiert dies häufig aufgrund von STARKREGEN, also bei Niederschlägen mit hoher Intensität in kurzer Zeit, im Winter vor allem durch Dauerregen mit großen Niederschlagsmengen über einen längeren Zeitraum. Beides kann zu Bodenabtrag durch Wasser (KAPITEL 3.1.4) führen.

Das hier vorgestellte Klimarisiko bezieht sich auf den Wasserrückhalt im Winterhalbjahr (Oktober–März). Die Böden nehmen das Niederschlagswasser so lange auf, bis ihre Kapazität erschöpft ist. Bei Überschreitung der Retentionskapazität kommt es zur Bildung von Pfützen an der Bodenoberfläche, zum Abfluss des Wassers und mittelbar zu Überschwemmungen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Der Klimawandel führt in Niedersachsen zu einer Zunahme der Niederschlagssumme im Winter (Engel et al., 2024). Diese bereits zu beobachtende Tendenz wird sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft fortsetzen. Durch die weiter steigenden Temperaturen kann die Luft zunehmend mehr Wasserdampf aufnehmen, wodurch mehr Niederschlag fallen kann. Da gleichzeitig im Winter die Verdunstung gering ist, nimmt die Bedeutung der Retentionskapazität der Böden zu. Gerade wenn hohe Niederschläge andauernd über einen langen Zeitraum fallen, wie im Winter 2023/24, kann die Retentionskapazität der Böden an ihre Grenzen stoßen. Folgen sind die Bildung von oberflächlich stehendem oder abfließendem Wasser. Das überschüssige Wasser kann durch die Vorflut nicht komplett abgeleitet werden, wodurch Hochwasserereignisse und Überschwemmungen entstehen, welche zu großen wirtschaftlichen Schäden führen können.

Die Retentionskapazität der Böden in Niedersachsen variiert räumlich. Die Sandböden der Geest und die Lössböden der Börde weisen eine hohe Kapazität auf, während die geringmächtigen Böden im Bergland eher über eine geringe Retentionskapazität verfügen. An den Küsten in den Marschböden wird die Retentionskapazität durch das hoch anstehende Grundwasser begrenzt (Bug et al., 2022)

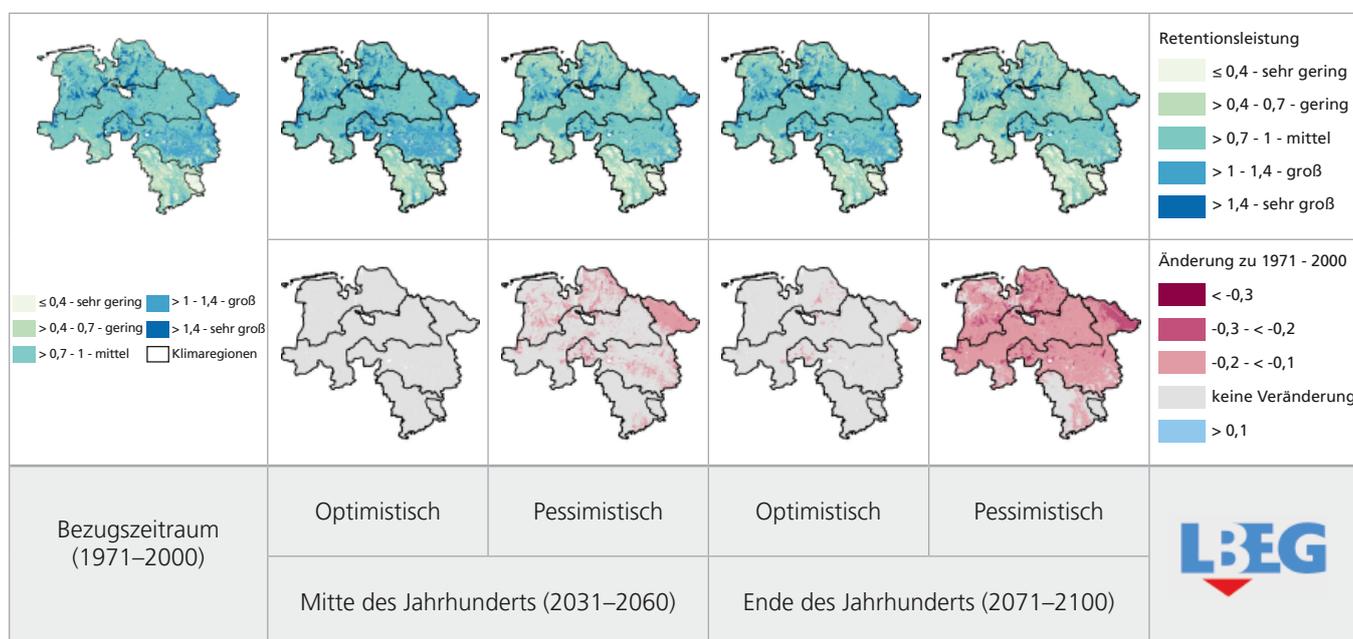


Abbildung 9: Retentionsleistung der Böden [dimensionslos] in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Um die Veränderung der Wasseraufnahme in Zukunft zu beschreiben wird der Parameter Retentionsleistung bewertet, der die Retentionskapazität in Relation zum mittleren Winterniederschlag setzt. Die mittlere Retentionsleistung der Böden von Niedersachsen erreicht aktuell (1971–2000) einen Wert von 0,9, und ist als „mittel“ zu charakterisieren. Vor allem im nord-östlichen Niedersachsen weisen die Sandböden eine große bis sehr große Retentionsleistung auf. Als Böden mit geringer Retentionsleistung sind die geringmächtigen oder stark tonreichen Böden im südlichen Niedersachsen und im Harz zu nennen.

Zur Mitte des Jahrhunderts nimmt die Retentionsleistung im pessimistischen Fall ab. Die Winterniederschläge nehmen sowohl insgesamt als auch in Hinblick auf die Dauer von einzelnen Regenereignissen und den dabei erreichten Regenmengen zu. In der Folge kann das Wasser unter Umständen nicht mehr in der Fläche zurückgehalten werden. Niedersachsenweit beträgt die Abnahme der Retentionsleistung im pessimistischen Fall 0,1 Einheiten. Im optimistischen Fall ist in der Mitte des Jahrhunderts keine Veränderung zu erwarten. Ende des Jahrhunderts zeigt sich, dass auch im optimistischen Fall eine, wenn auch geringe, Verminderung der Retentionsleistung zu

erwartet ist. Im pessimistischen Fall fällt die Verminderung größer aus, so dass hier mit verstärktem Auftreten von HOCHWASSEREREIGNISSEN zu rechnen ist (Abbildung 9).

Unbeachtet bleibt, dass aufgrund der Zunahme von versiegelten Flächen (Basedow et al., 2021) die Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen und starkregenbedingten Überflutungen noch stärker ansteigen könnte, da die Fläche mit intakten Böden, die einen Beitrag zur Retention von Wasser leisten können, abnimmt.

Tabelle 6 stellt die Ergebnisse gruppiert für die Klimaregionen Niedersachsens dar, um die regionale Vulnerabilität zu beschreiben. Im Bezugszeitraum zeigt sich, dass die Böden der montanen Region die mit Abstand geringste Retentionsleistung aufweisen, gefolgt von den Böden der submontanen Region. Die anderen drei beobachteten Regionen weisen Werte im Niedersachsendurchschnitt auf. Diese Rangfolge verändert sich auch bei Betrachtung der Projektionen nicht. Es ist keine Region auszumachen, die als Schwerpunkt für eine Veränderung der Retentionsleistung heraussticht. Die Karten legen aber nahe, dass insbesondere im äußersten Nordosten des Landes (subkontinentale Region) die Retentionsleistung am stärksten vermindert wird und damit hier das Klimarisiko am größten ist (Abbildung 9).

Klimaregion	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Montane Region	0,3	-	-	-	-0,1
Submontane Region	0,6	-	-0,1	-	-0,1
Subkontinentale Region	1,0	+0,1	-0,1	-	-0,1
Maritim-Subkontinentale Region	0,9	-	-0,1	-0,1	-0,2
Maritime Region	0,9	-	-0,1	-	-0,1
Niedersachsen	0,9	-	-0,1	-0,1	-0,2

Tabelle 6: Mittelwerte der Retentionsleistung [dimensionslos] im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1)

INFO

- Nur intakte Böden können Wasser aufnehmen und somit Wasser in der Landschaft zurückhalten.
- Am Ende des Jahrhunderts kommt es zu einer Verminderung der Retentionsleistung.
- Es ist mit einem Anstieg von Hochwasserereignissen zu rechnen.
- Im Bezugszeitraum und in der Zukunft weisen die Böden der montanen Region die geringste Retentionsleistung auf.

Bewertung des Klimarisikos

Auf Basis der Ergebnisse der Modellierungen lässt sich das Risiko für eine Verminderung der Retention von Böden mit Hilfe der folgenden Tabelle (Tabelle 7) charakterisieren. Aufgrund der beobachteten und weiter projizierten Zunahme der Winterniederschläge wird die Retentionsleistung der Böden sich im optimistischen Fall nicht verändern und auf einem mittleren Niveau stabil bleiben. Im pessimistischen Fall ist von einem steigenden Klimarisiko aus-

zugehen, da die Wahrscheinlichkeit von feuchten (und wärmeren) Winter ansteigt. Durch die höheren Temperaturen fällt zudem auch die Zwischenspeicherung von Wasser in der Schneedecke aus, so dass das Wasser direkt in die Flüsse gelangen kann. Auf der anderen Seite macht dies jedoch Hochwasserwellen infolge von Schneeschmelze im Frühjahr unwahrscheinlicher. Dieser Aspekt wird in der Bewertung des Klimarisikos aber nicht betrachtet.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 7: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Verminderung der Retentionsleistung der Böden“. Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser

3.1.3 Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser

Der Boden reguliert als Speicher sowohl den Nährstoff- als auch den Wasserhaushalt. Mit dem Sickerwasser, also dem zum Grundwasser gerichteten Wasserstrom aus dem Boden, können im Boden befindliche Nähr- und Schadstoffe in tiefere Schichten und letztendlich bis ins Grundwasser verlagert werden. Insbesondere nicht sorbierbare Stoffe, wie z. B. das Anion Nitrat, aber auch manche Schadstoffe, werden mit dem Sickerwasser verlagert. Der Austrag von Stoffen, wie Nitrat, kann zur Verschlechterung der Grundwasserqualität führen, was wiederum Kosten bei der Aufbereitung von Grund- zu Trinkwasser und eine Zielverfehlung der EU-Wasserrahmenrichtlinie bedeutet. Die Höhe des Stoffaustrags hängt von der Menge der gelösten Stoffe, der Wasserspeicherkapazität des Bodens und der Menge an Wasser ab, das den Wurzelraum der Pflanzen verlässt.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Im Zuge des Klimawandels wird eine Verschiebung der Niederschläge aus dem Frühjahr und Sommer hin zum Winter erwartet (Engel et al., 2024). Da die Sickerwasserbildung in Niedersachsen überwiegend im Winterhalbjahr erfolgt, kann es durch diese Verschiebung zukünftig zu einem erhöhten Austrag von Stoffen mit dem Sickerwasser kommen. Durch Trockenperioden im Frühjahr (KAPITEL 3.1.1) kann es zu einer verringerten Aufnahme der Düngemittel durch die Pflanze kommen, so dass mehr Stoffe im Boden verbleiben und ausgetragen werden

können. Falls die Menge an Sickerwasser ansteigt, würde sich aber auch die Stoffkonzentration verringern, so dass eine abschließende Bewertung zur Veränderung der tatsächlichen Stoffausträge schwerfällt.

Die Belastung der Grundwasserkörper mit Stoffen durch Austräge aus dem Boden hängt vom Gehalt des Stoffes im (nicht Bestandteil der hier vorgenommenen Wirkmodellierung) Boden und (bei nicht sorbierbaren Stoffen) von der Sickerwassermenge bzw. der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers ab. Sie gibt an, wie häufig das Sickerwasser innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens (betrachtet wird hierbei die effektive Durchwurzelungstiefe (We)) austauscht. Je höher die Sickerwasserrate und je geringer das Wasserspeicher- und Rückhaltevermögen eines Bodens sind, desto größer ist seine Austauschhäufigkeit. Am Beispiel Nitrat kann ein deutlicher Zusammenhang zwischen Belastung der Grundwasserkörper in den Geestregionen Niedersachsens (ML, 2020, 2023) mit dem Auftreten von großen Austauschhäufigkeiten des Bodenwassers (Bug & Harders, 2024a) hergestellt werden. In den Küstenbereichen (Marschböden), der Börde und der submontanen Region sind geringere Risiken durch Stoffausträge zu verzeichnen. Eine Sonderstellung nimmt der Harz (montane Region) ein. Hier ist die Austauschhäufigkeit sehr hoch, jedoch ist die Stoffbelastung der Böden meist gering, so dass das potenzielle Austragsrisiko zwar hoch ist, jedoch der reale Austrag aufgrund geringer Stoffkonzentrationen im Sickerwasser gering ausfällt (Abbildung 10).

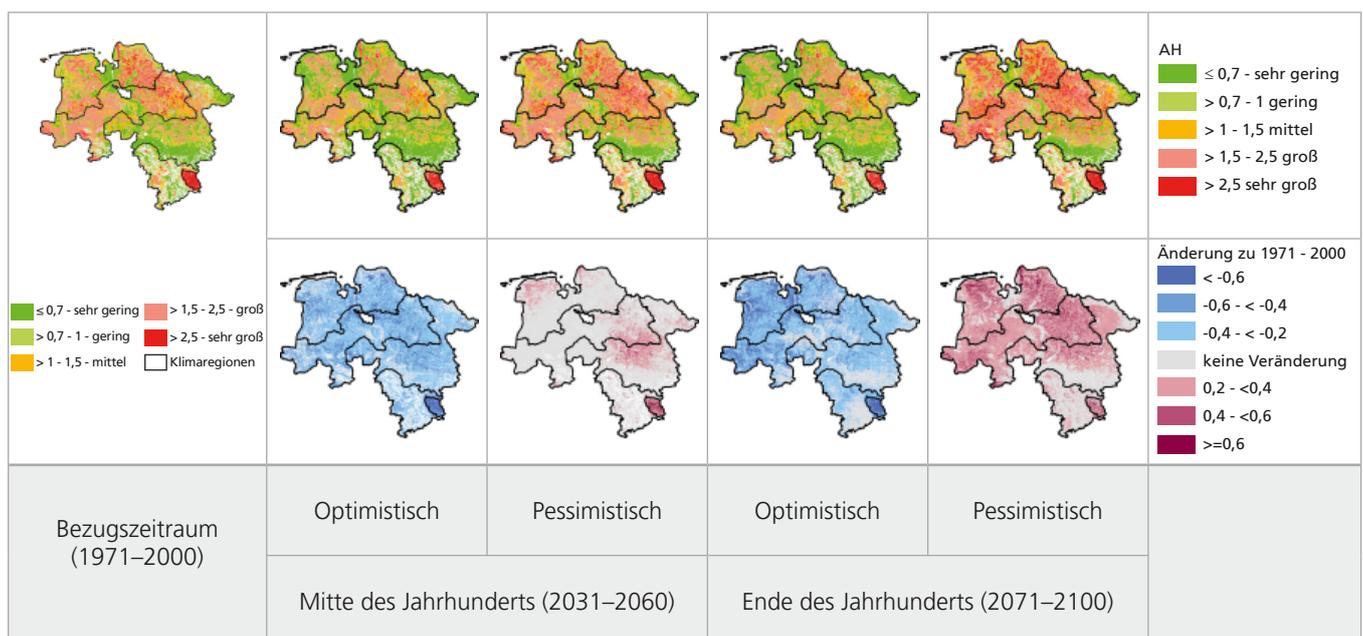


Abbildung 10: Austauschhäufigkeit des Bodenwassers in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5). Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Austauschhäufigkeit beschreibt das mittlere Verlagerungsrisiko über einen 30-jährigen Zeitraum. Sie stellt jedoch nicht den tatsächlichen Eintrag von den betrachteten Stoffen in das Grundwasser dar, da die Konzentration nicht bekannt ist bzw. sogar von der Sickerwassermenge abhängt und damit nicht bewertet werden kann. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass insbesondere in den Sandböden der Geest und in den geringmächtigen Böden der submontanen und montanen Region ein hohes Verlagerungsrisiko vorliegt. Das Risiko für Stoffausträge kann nach dem pessimistischen Szenario bis zur Mitte des Jahrhunderts leicht ansteigen, wenn die

Winterniederschläge und damit die Sickerwasserraten zunehmen. Im optimistischen Szenario kann sich das Risiko jedoch auch verringern. Eine eindeutige Tendenz ist nicht erkennbar. Das gleiche Bild zeigt sich auch zum Ende des Jahrhunderts, wobei der Anstieg des Austragsrisikos im pessimistischen Fall größer wird als im vergleichbaren Fall in der Mitte des Jahrhunderts.

Die Veränderungen weisen räumlich deutlich Unterschiede aber keinen deutlichen Schwerpunkt auf. In der montanen Region sind die absoluten Änderungen am größten, das Austragsrisiko ist jedoch in jedem Szenario mit „sehr groß“ zu bewerten. Tabelle 8 stellt die Ergebnisse gruppiert für die Klimaregionen Niedersachsens dar.

Klimaregion	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Montane Region	5,6 a-1	-1,0 a-1	+0,6 a-1	-1,1 a-1	+0,5 a-1
Submontane Region	1,3 a-1	-0,3 a-1	+0,2 a-1	-0,2 a-1	+0,2 a-1
Subkontinentale Region	0,9 a-1	-0,3 a-1	+0,2 a-1	-0,3 a-1	+0,2 a-1
Maritim-Subkontinentale Region	1,6 a-1	-0,3 a-1	+0,2 a-1	-0,4 a-1	+0,4 a-1
Maritime Region	1,7 a-1	-0,4 a-1	+0,1 a-1	-0,5 a-1	+0,4 a-1
Niedersachsen	1,5 a-1	-0,4 a-1	+0,1 a-1	-0,4 a-1	+0,3 a-1

Tabelle 8: Mittelwerte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).

INFO

- Stoffausträge, insbesondere der Austrag von Nitrat, sind aktuell in Niedersachsen ein Problem.
- Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers ist ein Indikator für das Risiko von Stoffausträgen.
- Eine eindeutige Tendenz bei den Stoffausträgen ist für die Zukunft nicht erkennbar.

Bewertung des Klimarisikos

Auf Basis der Ergebnisse der Modellierungen lässt sich das Risiko von Stoffausträgen aus dem Boden mit Hilfe der Tabelle 8 charakterisieren. Aufgrund der großen Austauschhäufigkeiten im Bezugszeitraum und aufgrund der Tatsache, dass in Niedersachsen ca. 30 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche als nitratsensibles Gebiet ausge-

wiesen ist (ML 2023), muss aktuell von einem hohen Stoffaustragsrisiko ausgegangen werden. Durch den Klimawandel kann das Risiko entweder abnehmen (optimistischer Fall) oder auf hohem Niveau stagnieren, bzw. sogar noch zunehmen (pessimistischer Fall). Dabei muss auf deutliche regionale Unterschiede hingewiesen werden.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 9: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Stoffaustrag aus Böden“.

3.1.4 Bodenerosion durch Wasser

Bodenerosion durch Wasser führt zum Abtrag von fruchtbarem Oberboden und damit auch zum Verlust einer wichtigen Grundlage für die Landwirtschaft (Onsite-Schäden). Im Akkumulationsbereich können Pflanzen teilweise mit Bodenmaterial überdeckt werden oder Infrastruktur (Gräben, Straßen etc.) durch abgelagertes Bodenmaterial beeinträchtigt werden. Mit dem transportierten Material können außerdem Nähr- und Schadstoffe in benachbarte sensible Ökosysteme eingetragen werden (Offsite-Schäden).

Bodenerosion durch Wasser ist eine Gefährdung für Böden, Gewässer und die Infrastruktur. Durch den Abtrag des fruchtbaren Oberbodens durch die Energie der Regentropfen und die Kraft des abfließenden Wassers werden insbesondere natürliche Bodenfunktionen sowie land- und forstwirtschaftliche Nutzungsfunktionen beeinträchtigt (LAWA & LABO, 2021).

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Ob es durch den Klimawandel zu einer Veränderung der mittleren Jahresniederschläge kommt, ist nach den Projektionen unklar. Jedoch sind sich die Klimamodelle einig, dass die Intensität der einzelnen Niederschlagsereignisse, die dabei fallende Regenmenge und damit auch ihre Erosivität zunehmen werden. Zudem steigt die Anzahl

dieser Starkniederschlagsereignisse. Durch hochintensive Niederschläge kann es häufiger und schneller dazu kommen, dass der Boden den Niederschlag nicht aufnehmen und so Oberflächenabfluss entstehen kann (KAPITEL 4.3.2). Wenn die Bodenbedeckung gering und eine Hangneigung gegeben ist, führt der Oberflächenabfluss zur Mobilisierung und zum Transport von Feinmaterial.

Insbesondere Ackerflächen mit erosionsanfälligen schluff- und feinstsandreichen Böden in reliefierten Regionen sind von Bodenerosion durch Wasser betroffen. Dies trifft in Niedersachsen auf vielen Böden der submontanen Region (nach Hajati et al. (2023)) zu. Aber auch Sandlössböden in der subkontinentalen und maritimen Region weisen zum Teil eine erhöhte Gefährdung auf.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser in Niedersachsen ist sehr unterschiedlich verteilt. In der nördlichen Hälfte des Bundeslandes (maritime, maritime-subkontinentale und große Teile der subkontinentalen Region) ist bis auf wenige Hot-Spots (Sandlöss) keine, eine sehr geringe oder eine geringe potenzielle Erosionsgefährdung ($<10 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$) verbreitet. Dahingegen ist die Erosionsgefährdung in der submontanen und montanen Klimaregion deutlich größer – dort sind also höhere Bodenabträge zu erwarten (Abbildung 11).

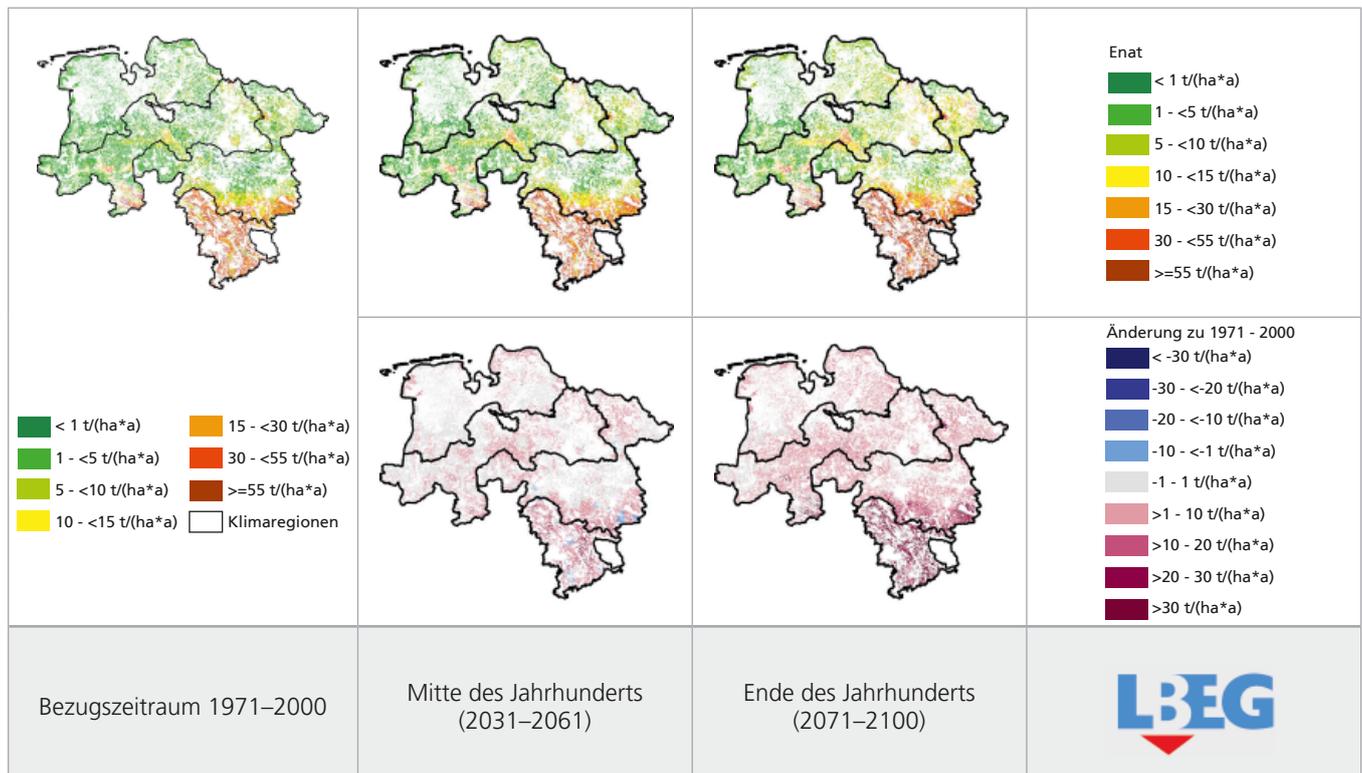


Abbildung 11: Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Bis zur Mitte des Jahrhunderts können die Bodenabträge zunehmen. Der Anstieg ist in allen Regionen zu erwarten, wobei er etwa 10–30 % ($1 - 23 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$) beträgt. Für Niedersachsen wird ein mittlerer Anstieg von $4 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ projiziert, was etwa ein Plus von 22 % bedeutet. Die potenzielle Erosionsgefährdung würde im Mittel weiterhin als „hoch“ eingestuft werden.

Zum Ende des Jahrhunderts wird ein wesentlich stärkerer Anstieg erwartet. Die mittleren Bodenabträge in Niedersachsen verdoppeln sich nahezu auf einen Wert von $35 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$, was einer Bewertung von „sehr hoher Erosionsgefährdung“ nach Bug et al. (2020) im Gewässerschutz und natürlich für die Bodennutzung. Der Gesetzgeber schützt die Funktionen des Bodens durch das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998, NBodSchG 1999) entspricht.

Regional entsprechen die Anstiege dem niedersachsenweiten Trend. Absolut sind die höchsten Anstiege in der montanen Klimaregion (die landwirtschaftliche Fläche hier beträgt nur 150 ha und ist in Abbildung 11 daher kaum erkennbar) zu verzeichnen, gefolgt von der submontanen Region (Bug et al., 2025).

Tabelle 10 stellt die Ergebnisse gruppiert für die Klimaregionen Niedersachsens dar. Besonders gefährdet erscheinen die Böden in der montanen und submontanen Klimaregion, wobei es in der montanen Klimaregion kaum Ackerflächen gibt. In der maritimen und subkontinental-maritimen Klimaregion sind die Gefährdungen und auch die Anstiege am geringsten.

Klimaregion	1971–2000	2031–2060	2071–2100
Montane Region	231 t/(ha*a)	+23 t/(ha*a)	+172 t/(ha*a)
Submontane Region	76 t/(ha*a)	+16 t/(ha*a)	+77 t/(ha*a)
Subkontinentale Region	12 t/(ha*a)	+2 t/(ha*a)	+10 t/(ha*a)
Maritim-Subkontinentale Region	9 t/(ha*a)	+3 t/(ha*a)	+8 t/(ha*a)
Maritime Region	3 t/(ha*a)	+1 t/(ha*a)	+3 t/(ha*a)
Niedersachsen	18 t/(ha*a)	+4 t/(ha*a)	+17 t/(ha*a)

Tabelle 10: Mittlerer jährlicher potenzieller Bodenabtrag im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).

— INFO —

- Infolge des Klimawandels wird die Erosionsgefährdung durch Wasser steigen.
- Die potenzielle Erosionsgefährdung ist in Niedersachsen sehr unterschiedlich verteilt.
- Niedersachsenweit ist für die Zukunft eine Verstärkung des Abtragsrisikos zu erwarten.
- Durch steigende Häufigkeit und Intensität der Niederschläge steigt auch das Risiko für Bodenerosion stark an.

Bewertung des Klimarisikos

Auf Basis der Ergebnisse der Modellierungen lässt sich das Risiko für die Bodenerosion durch Wasser mit Hilfe der Tabelle 11 charakterisieren. Aufgrund der beobachteten und weiter projizierten Zunahme der Erosivität steigt das Risiko für Bodenerosion durch Wasser stark an und erreicht ein hohes Niveau. Im besten Fall könnte davon ausgegangen werden, dass die erosiven Niederschläge sich vor allem in Jahreszeiten mit hoher Bodenbedeckung konzentrieren und dadurch keine Anstiege der tatsächlichen Bodenabträge zu verzeichnen sind. Auswertungen

der niedersächsischen Bodenerosionsdauerbeobachtung zeigen für die letzten 20 Jahre keinen Anstieg der Bodenabträge (Steinhoff-Knopp, 2021), obwohl die Intensität der Niederschläge bereits zugenommen hat. Dies kann aber aufgrund der relativ kurzen Messreihe auch täuschen, da Bodenerosion ein diskontinuierlicher Prozess ist. Auf viele Jahre ohne oder mit wenig Bodenabtrag kann ein Jahr mit äußerst hohem Bodenabtrag folgen, das den Mittelwert stark ansteigen lässt. Zudem sind die Wassererosionsereignisse häufig lokal begrenzt; Gewitterzellen verweilen länger an einem Standort.

	Gegenwart	2031–2060	2071–2100
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering	Gering

Tabelle 11: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“.

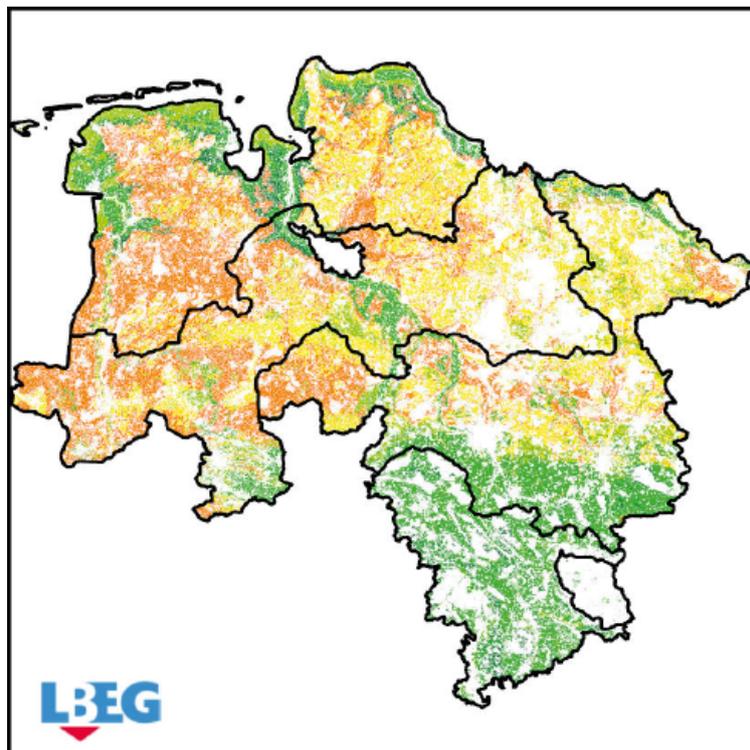
3.1.5 Bodenerosion durch Wind

Bodenerosion durch Wind führt zum Abtrag von fruchtbarem Oberboden und damit auch zum Verlust einer wichtigen Grundlage für die Landwirtschaft. Die Kraft des Windes führt bei nicht oder wenig bedeckten Böden zum Abtrag und Transport und bei wieder abnehmender Windgeschwindigkeit zur Deposition von Feinmaterial. Dabei gehen innerhalb der Erosionsfläche Feinboden und Humus verloren und Pflanzen können durch Windschliff verletzt werden (Onsite-Schäden). Im Akkumulationsbereich können Pflanzen teilweise mit Bodenmaterial überdeckt werden (Übersandung) oder Infrastruktur (Gräben, Straßen etc.) beeinträchtigt werden. Mit dem transportierten Material können außerdem Nähr- und Schadstoffe in benachbarte sensible Ökosysteme eingetragen werden (Offsite-Schäden). Während eines Windereignisses kann die Sichtweite stark abnehmen, so dass es zu Behinderungen im Verkehr und schweren Unfällen kommen kann.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1981–2000)

Die Bewertung des Klimarisikos Bodenerosion durch Wind erfolgt für einen abweichenden Bezugszeitraum, da die mittlere Windgeschwindigkeit, die vom DWD bereitgestellt wurde, nur für die Periode 1981–2000 vorliegt.

In Niedersachsen weisen große Teile der Agrarlandschaft in der nördlichen Hälfte des Bundeslandes eine mittlere bis sehr hohe Winderosionsgefährdung auf (Abbildung 12). Die Sandböden der Niedersächsischen Geest und die Moor- und Anmoorböden gelten als besonders gefährdet. Die Böden der Marsch, der Börde, des Berglandes sowie des Harzes sind aufgrund der erhöhten Tongehalte gering bis sehr gering durch Winderosion gefährdet. Aufgrund der geringeren Geländerauigkeit (Relief) im flacheren Norden sind zudem die meisten Flächen stärker gegenüber Stürmen exponiert. Im nördlichen Teil des Bundeslandes sind daher auch die mittleren Windgeschwindigkeiten höher als im südlichen Teil.



Bezugszeitraum 1981 - 2000

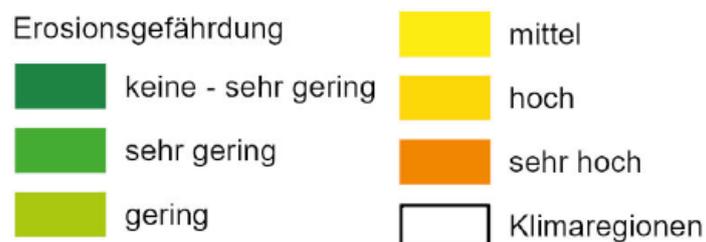


Abbildung 12: Potenzielle oder Standortabhängige Bodenerosionsgefährdung durch Wind für vegetationsfreie, landwirtschaftlich genutzte Böden nach DIN 19706 (Periode 1981–2000).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Der Klimawandel könnte in Niedersachsen zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von Extremwetterlagen führen (Engel et al., 2024). Insbesondere zu Zeiten geringer Bodenbedeckung durch Kulturen im Frühjahr in Kombination mit sehr trockenen Oberböden (KAPITEL 3.1.1) können Wind und insbesondere Stürme zu hohen Bodenabträgen führen. In Folge des Klimawandels können die Gefährdungen nach Wurbs & Steininger (2017) nicht nur durch eine erhöhte Häufigkeit von erosiven Winden, sondern auch durch die Abnahme der Frühjahrsniederschläge und das damit einhergehende verstärkte Auftreten von trockenen Bodenoberflächen steigen. Durch die erhöhten Temperaturen (Engel et al., 2024) erfolgt im Frühjahr auch die Bodenerwärmung schneller, so dass sich ggf. auch Saatzeitpunkte für z. B. Mais und Zuckerrüben nach vorne verlagern. Dies zusammen mit einem insgesamt früheren Einsetzen des Pflanzenwachstums kann der zunehmenden Gefährdung durch Winderosion entgegenwirken. Die

Klimaszenarien liefern bisher keine verlässlichen Daten, wie sich der Wind in Zukunft entwickeln könnte (KWRA 2021), weswegen auf eine genauere Modellierung der Entwicklungen für Niedersachsen verzichtet wird.

Bewertung des Klimarisikos

Niedersachsen ist im bundesweiten Vergleich eines der Bundesländer mit den meisten Flächen, die aktuell durch Winderosion gefährdet sind (Wurbs & Steininger, 2017). Durch die Veränderungen des Klimas steigt möglicherweise das Risiko von Winderosion noch weiter an. Durch die nicht auszuschließende Zunahme von erosiven Windereignissen mit erhöhten Geschwindigkeiten und die erhöhte Wahrscheinlichkeit von trockenen Böden im Frühjahr steigt die Wahrscheinlichkeit des Abtrages. Im optimistischen Fall könnten einige dieser Tendenzen durch eine erhöhte Bodenbedeckung im Frühjahr kompensiert werden, so dass das Klimarisiko weiterhin als mittel einzustufen ist.

INFO

- Infolge des Klimawandels kann die Wahrscheinlichkeit von Stürmen und damit auch von Winderosionsereignissen zunehmen.
- Insbesondere im Norden sind die Sand- und Moorböden durch Winderosion gefährdet.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 12: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“.



LANDWIRTSCHAFT

3.2 Handlungsfeld Landwirtschaft

Die niedersächsische Landwirtschaft ist auf vielfältige Art und Weise von den Folgen des Klimawandels betroffen. Im Folgenden wird zunächst die Relevanz des Handlungsfeldes und neuere Entwicklungen dazu beschrieben. Zudem werden Wirkungsketten und die Auswahl der Klimawirkungen begründet.

Relevanz des Handlungsfeldes

Etwa 54 % der Gesamtfläche in Niedersachsen wird derzeit landwirtschaftlich genutzt, dies entspricht einer Fläche von ca. 2.571.000 ha. Davon werden ca. 148.000 ha ökologisch bewirtschaftet. 1.878.000 ha der landwirtschaftlich genutzten Gesamtfläche ist Ackerland, etwa 690.000 ha ist Grünland und 19.600 ha sind Dauerkulturen (ML, 2024b). Die Landwirtschaft hat demnach eine enorme Bedeutung in Bezug auf die Flächennutzung in Niedersachsen.

Niedersachsen ist geprägt durch unterschiedliche landwirtschaftliche Schwerpunktregionen. Ein Großteil des niedersächsischen Kartoffelanbaus liegt im Osten des Landes und umfasst ca. die Hälfte der gesamtdeutschen Anbaufläche (BMEL, 2018; ML, 2024b). Der Getreideanbau konzentriert sich vor allem in der Mitte und im Süden Niedersachsens (BMEL, 2018). Besonders der Anbau der Kulturen Weizen, Gerste und Roggen umfasst einen Großteil der Getreideanbaufläche (ML, 2024b). Der Maisanbau findet dahingegen vorwiegend im westlichen Teil Niedersachsens statt. Im Nordwesten, wo auch ein Großteil der Dauergrünlandflächen Niedersachsens liegen, werden vorwiegend Rinder gehalten, davon sind rund 799.000 Tiere Milchkühe und ca. 1,5 Mio. Tiere andere Rinder. Die Veredelung von Schweinen und Geflügel findet hauptsächlich im Westen des Landes statt (BMEL, 2018; ML, 2024b). Insgesamt werden rund 7 Mio. Schweine und etwa 80 Mio. Hühner in Niedersachsen gehalten. Im Rahmen der betrieblichen Fruchtfolge werden auch die anderen landwirtschaftlichen Kulturen grundsätzlich niedersachsenweit in unterschiedlicher Häufigkeit angebaut (ML, 2024b).

Die Produktivität der niedersächsischen Landwirtschaft ist in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen, dies zeigt sich bspw. in den Ernteerträgen. Der Winterweizen-

ertrag ist vom Jahr 1990 mit durchschnittlich 65 dt/ha auf ca. 80 dt/ha im Jahr 2023 angestiegen. Im Bereich der Tierhaltung werden, in Bezug auf die gesamte Produktion in Deutschland, fast 60 % des Geflügelfleisches und fast 40 % Eier in Niedersachsen erzeugt. Ein Fünftel der in Deutschland erzeugten Milch und ein Drittel des erzeugten Schweinefleisches kommen ebenfalls aus Niedersachsen (ML, 2024b).

Die gesamte pflanzliche Erzeugung in Niedersachsen kommt insgesamt auf einen Produktionswert von 4,96 Mrd. € im Jahr 2021. Die tierische Erzeugung lag bei 7,23 Mrd. € im gleichen Jahr. Diese Produktionswerte werden erreicht durch insgesamt ca. 135.000 Menschen, die in der Landwirtschaft tätig sind (ML, 2024b).

Neuere Entwicklungen

Seit Jahren schon müssen die landwirtschaftlichen Betriebe mit klimatischen Veränderungen umgehen und sich anpassen. Klimawandelfolgen, wie extrem trockene, heiße und auch nasse Witterungsperioden, Starkregenereignisse oder Hagelschläge kommen immer häufiger vor und wirken sich negativ auf die Produktion aus. Positiv auf das Pflanzenwachstum hingegen können sich eine Verlängerung der Vegetationsperiode und ein moderater Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auswirken. Die Verschiebung der agrophänologischen Phasen kann sich dagegen unterschiedlich auf die Pflanzenproduktion auswirken. Als eine Reaktion auf zunehmende Trockenheit und Hitze können hitzetolerante Sorten gewöhnt werden, soweit diese vorhanden sind. Auch der Anbau neuer Kulturen, wie z. B. Sorghumhirsen und die Sojabohne hat in Niedersachsen begonnen. (Renner et al., 2021). Bisher ist der Flächenumfang dieser Kulturen jedoch noch gering und hängt auch entscheidend von der Vermarktungssituation ab.

Die Zahl der bewirtschafteten Betriebe sowie die landwirtschaftliche Nutzfläche ist insgesamt in den letzten Jahren rückläufig (ML, 2024b). Auf der Betriebsebene steigen dahingegen die Anzahl an Tieren und die bewirtschaftete Fläche (Krampf, 2021). Dies deutet auf ein zunehmendes Wachstum der Betriebe hin.

Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Die Auswahl der hier betrachteten Klimawirkungen orientiert sich an denen der Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes im Handlungsfeld Landwirtschaft (Renner et al., 2021). Im Bereich der Tierhaltung beschränken sich die Klimawirkungen auf „Hitzestress bei Nutztieren“ und „Leistungen von Nutztieren“ infolge klimatischer Veränderungen, welche zu einem Indikator zusammengefasst wurden, da diese sehr eng miteinander verbunden sind und sich gegenseitig bedingen.

Der Großteil der Klimawirkungen wird im Bereich des Pflanzenbaus beschrieben. Hier liegen die Schwerpunkte auf der Pflanzengesundheit, der Agrophänologie und dem Ertrag sowie der Qualität der Ernteprodukte.

Alle Klimawirkungen werden von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen extensiv auf Basis von Literaturrecherchen und Expert:inneneinschätzungen bearbeitet. Zu beachten ist, dass aufgrund der vielfältigen Auswirkungen eines Indikators auf das landwirtschaftliche System teilweise nur beispielhaft Auswirkungen beschrieben werden können.

Die Landwirtschaft ist, wie schon beschrieben, in Niedersachsen divers aufgestellt. Der Standort, die klimatischen Bedingungen, die Witterung und die unterschiedlichen Produktionssysteme zur Herstellung von Lebensmitteln sind abhängig voneinander und machen den Landwirtschaftssektor zu einem komplexen System. Aus diesem Grund ist eine betriebsindividuelle Betrachtung und Beurteilung von Klimawandelfolgen besonders wichtig.

INFO

- Ein großer Teil der Fläche Niedersachsens wird landwirtschaftlich genutzt und bildet regional unterschiedliche Schwerpunktregionen.
- Hitze, Dürre, Starkregen und Hagel beeinflussen die landwirtschaftliche Produktion zunehmend negativ, längere Vegetationsperioden und ein moderater Anstieg der CO₂-Konzentration können das Pflanzenwachstum positiv beeinflussen.

3.2.1 Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren

Hitzestress beschreibt die durch Hitze bedingte Belastung des tierischen Organismus mit negativem Einfluss auf dessen Stoffwechsel, insbesondere auf den Wasserhaushalt und das Herz-Kreislaufsystem (UBA, 2024).

Hintergrund und Stand der Forschung

Im bundesdeutschen Vergleich ist Niedersachsen das Bundesland, in dem die meisten Hühner und Schweine sowie die zweitmeisten Rinder gehalten werden (ML, 2024b). Innerhalb Niedersachsens besitzt die Region Weser-Ems den mit Abstand größten Viehbestand, wie den Ergebnissen der Agrarstrukturerhebung Niedersachsen 2023 zu entnehmen ist (LSN, 2023). Als zentraler Wirtschaftszweig befindet sich die niedersächsische Tierhaltung in einem tiefgreifenden Strukturwandel, in dessen Zentrum die Anpassung an die wachsenden Anforderungen des Umwelt-, Klima- und Tierschutzes sowie an die Folgen des Klimawandels stehen.

Die wirtschaftlich bedeutsamsten Nutztierarten Rind, Schwein und Geflügel gehören zu den gleichwarmen Tieren, die eine weitgehend konstante Körpertemperatur zur Aufrechterhaltung ihrer Körperfunktionen benötigen. Ausgehend von ihrer Physiologie stellt jede Nutztierart eigene Ansprüche an eine optimale Umgebungstemperatur, in der sie ohne aktive Thermoregulation ihre Körpertemperatur konstant halten kann (sog. Thermoneutralzone). Dieser Bereich unterscheidet sich zwischen den Nutztierarten und hängt innerhalb dieser von verschiedenen Faktoren ab (u. a. Rasse, Alter, Leistungsniveau, Gesundheitsstatus). Umgebungstemperaturen oberhalb der Thermoneutralzone belasten den tierischen Organismus durch eine Erhöhung der Körpertemperatur unmittelbar und erfordern eine vermehrte Abgabe von Wärme an die Umgebung durch Stoffwechsel- und Verhaltensanpassungen. Die thermoregulatorischen Fähigkeiten von Nutztieren werden einerseits durch ihre Physiologie und andererseits durch die Beschaffenheit ihres Haltungssystems (z. B. Weidehaltung vs. Stallhaltung mit aktiver Lüftung und Kühlung) bestimmt (Gauly et al., 2013).

Die in Niedersachsen primär gehaltenen Rassen von Milchkühen, Zucht- und Mastschweinen sowie Lege- und Mastgeflügel gelten als sensitiv bis sehr sensitiv gegenüber hohen Umgebungstemperaturen, da ihre Wärmekompensationsfähigkeiten durch ihre hohen Stoffwechselleistungen bei der Milch-, Muskel- und Eibildung bereits eingeschränkt sind (Sake et al., 2024; Sejian et al., 2018). In Abhängigkeit von Tierart, Alter und Leistungsniveau beschreiben Studien den Beginn von Hitzestress bei Nutztieren z. T. sehr unterschiedlich. Hohe Umgebungstemperaturen wirken sich unmittelbar auf die Leistungsphysiologie und das Verhalten von Nutztieren und damit auf ihr Wohlbefinden sowie den betriebswirtschaftlichen Erfolg aus: Rückgang der Futteraufnahme, der Milch-, Lege- und Wachstumsleistung, der Produktqualität (z. B. Absinken des Milcheiweißgehaltes, der Eischalendicke, des Magerfleischanteils), Zunahme der Wasseraufnahme, des Gülleanfalls sowie der Krankheitsanfälligkeit durch Beeinträchtigung des Immunsystems, des Stoffwechsels und der Fruchtbarkeit (z. B. erhöhte embryonale Sterblichkeit), Verringerung des Sozialverhaltens bis hin zu Aggressivität und Zunahme der Mortalität (Sejian et al., 2018).

Die Charakterisierung von Hitzestress bei Rindern, Schweinen und Geflügel erfolgt primär anhand des Indikators Temperature-Humidity-Index (THI), der Temperatur und Feuchtigkeit der Außenluft berücksichtigt (Gauly et al., 2013; Sake et al., 2024; Wegner et al., 2016). Zwar gibt es leichte Unterschiede in den THI-Berechnungsformeln, deren Ergebnisse jedoch i. d. R. eng beieinanderliegen und sehr stark korrelieren (Thornton et al., 2021).

Die vorliegende Bewertung für Niedersachsen verwendet die umfassenden THI-Berechnungen der bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) 2021 (Renner et al., 2021), da sie zur Abbildung der niedersächsischen Klimaräume geeignet sind (Brügemann et al., 2012).

	Hitzestress		
	Mäßig	Stark	Extrem
Milchkühe	60–70 THI	> 70–80 THI	> 80 THI
Schweine und Geflügel	> 70–75 THI	> 75–81 THI	> 81 THI

Tabelle 13: THI-Werte für Milchkühe (Brügemann et al., 2012) und für Schweine und Geflügel (Sake et al., 2024; et al., 2016; 2014).

Wie in der KWRA 2021 beschrieben, kann Hitzestress bei hochleistenden Rindern und Sauen bereits bei Außentemperaturen ab 16 bis 18 °C auftreten, während Mast Schweine und Geflügel oftmals erst bei Außentemperaturen ab 25 °C hitzestressbezogene Veränderungen zeigen (Renner et al., 2021). Auf Basis des THI können in Bezug auf die thermoregulatorischen Anpassungsmechanismen von unterschiedlichen Nutztieren Schwellenwerte für geringen bis mäßigen, starken und extremen Hitzestress definiert werden. So können für Schweine und Geflügel aufgrund ihrer leicht höheren Thermoneutralzone höhere THI-Werte angenommen werden (Tabelle 13).

Auch wenn der THI weitere Hitzestress beeinflussende Faktoren wie Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung unberücksichtigt lässt, so handelt es sich beim THI um einen in der Praxis gut zu bestimmenden Parameter mit hinreichender Aussagekraft für Hitzestress bei Nutztieren.

Während des Referenzzeitraums traten in Niedersachsen mit regionalen Unterschieden bereits an 40 bis 80 Tagen pro Jahr regelmäßig klimatische Bedingungen auf (Renner et al., 2021), die zu geringem bis mäßigem Hitzestress und damit zu Beeinträchtigungen der Leistung, Gesundheit und Fruchtbarkeit in niedersächsischen Rinder-, Schwein- und Geflügelbeständen führten (Sake et al., 2024; Rieger et al., 2020; Wegner et al., 2016; Breves et al., 2014; Brügemann et al., 2012). In den Küstenregionen, in denen vor allem Milchvieh gehalten wird, traten diese Bedingungen um ca. 20 Tage pro Jahr weniger häufig auf als im niedersächsischen Binnenland. Tage mit starkem bzw. extremen Hitzestress kamen in Niedersachsen nur vereinzelt vor (Renner et al., 2021). Die Trendanalyse von Sake et al. (2024) zur THI-Entwicklung von 1973 bis 2022 in der Region Weser-Ems, in der eine große Anzahl an Schweinen und Geflügel gehalten werden (LSN, 2023), weist eine stetige Zunahme des durchschnittlichen THI sowie der Anzahl der Tage mit extremen Hitzestress von durchschnittlich zwei auf ca. zehn Tage pro Jahr nach.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Durch den Klimawandel wird für Niedersachsen sowohl in einem optimistischen als auch in einem pessimistischen Fall bis zur Mitte und insbesondere bis zum Ende des Jahrhunderts eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen Jahreslufttemperatur, der Anzahl Trocken- und Hitzetage sowie der Dauer von Hitzeperioden projiziert (KAPITEL 2.2.1). Diese Zunahme wird auch die THI-Werte und damit den Hitzestress für Nutztiere teilweise extrem erhöhen.

Im optimistischen Fall wird mit mittlerer Sicherheit bis zur Mitte des Jahrhunderts in Niedersachsen die Anzahl der Tage mit geringem bis mäßigem Hitzestress um 20 bis 30 pro Jahr auf 60 bis 80 Tage in den Küstenregionen und auf 80 bis 100 Tage im Binnenland steigen. Im pessimistischen Fall nimmt die Anzahl der Tage mit geringem bis mäßigem Hitzestress um bis zu 50 Tage zu und steigt auf 100 bis 126 Tage in den Regionen Hannover, Braunschweig und Grafschaft Bentheim sowie 80 bis 100 Tage an der Küste und im übrigen Binnenland. Die Zunahmen an der Küste fallen am stärksten aus.

Verglichen mit dem Referenzzeitraum nimmt starker Hitzestress bis zur Mitte des Jahrhunderts vor allem im pessimistischen Fall in Südwest- und Ost-Niedersachsen mit bis zu 15 bis 30 Tagen pro Jahr deutlich zu. Hingegen werden Tage mit Bedingungen für extremen Hitzestress weiterhin unüblich sein und niedersachsenweit höchstens vereinzelt im pessimistischen Fall auftreten. Allerdings muss beachtet werden, dass die Projektionen der KWRA 2021 auf THI-Tagesmittelwerten beruhen und keine Tageshöchstwerte abbilden. Das Erreichen extremer Tagestemperaturen, mit denen Nutztiere zu bestimmten Tageszeiten kurzfristig umgehen müssen, wird in diesen Projektionen nicht abgebildet. Gemäß der Studie von Sake et al. (2024), die für die Region Weser-Ems bereits im Referenzzeitraum bis zu 10 Tage pro Jahr mit extremen THI-Werten angibt, sind mehrere Tage pro Jahr mit extremem Hitzestress auch in Zukunft mit mittlerer Sicherheit in Niedersachsen zu erwarten.

Am Ende des Jahrhunderts wird im optimistischen Fall mit mittlerer Sicherheit die Anzahl der Tage mit geringem bis mäßigem Hitzestress um mindestens 30 pro Jahr an der Küste und um maximal 30 Tage pro Jahr im übrigen Niedersachsen auf jeweils 80 bis 100 Tage steigen. Im pessimistischen Fall häufen sich die klimatischen Bedingungen für geringen bis mäßigen Hitzestress, sodass diese niedersachsenweit an jedem dritten Tag vorherrschen werden. Diese Einschätzung, dass die Zahl jährlicher Hitzestressereignisse bei norddeutschen Milchkühen um bis zu 2000 und die durchschnittliche Dauer dieser Ereignisse um bis zu 22 Stunden gegenüber dem Referenzzeitraum zunehmen werden, bestätigen Hempel et al. (2019) für das Ende des Jahrhunderts.

Im Vergleich zum Referenzzeitraum wird starker Hitzestress im optimistischen Fall lokal um 10 bis 20 Tage, selten um bis zu 30 Tagen pro Jahr zunehmen und bei insgesamt

15 bis 30 Tagen pro Jahr liegen. Im pessimistischen Fall nimmt die Anzahl Tage mit starkem Hitzestress in den Küstenregionen um 20 bis 30 Tage und im übrigen Niedersachsen um 30 bis 40 Tage zu, wodurch landesweit an 30 bis 45 Tagen pro Jahr die Bedingungen für starken Hitzestress vorherrschen.

Tage mit extremem Hitzestress ($THI > 80$) werden im optimistischen Fall bis zum Ende des Jahrhunderts regional nur sehr vereinzelt auftreten. Im pessimistischen Fall ist davon auszugehen, dass extremer Hitzestress ebenfalls auf wenige Tage beschränkt bleibt. Allerdings können sich die Belastungseffekte auf die Tiere in diesem Szenario deutlich steigern, wenn die thermischen Extrembedingungen an mehreren Tagen in Folge auftreten und die Tiere diesen bei Freiland- oder Offenstallhaltung unmittelbar ausgesetzt sind.

INFO

- Die niedersächsische Tierhaltung steht in Bezug auf die Anpassung an die Folgen des Klimawandels vor wachsenden Anforderungen.
- Die klimatischen Bedingungen in den letzten Jahren führten schon regelmäßig zu Hitzestress und Leistungseinbußen bei den Tieren.
- Die Tage mit Hitzestress werden bis Mitte und insbesondere Ende des Jahrhunderts zunehmen.
- Die aktuell zu beobachtende und für die Zukunft projizierte Zunahme der Außentemperatur lässt ein erhöhtes Hitzestressrisiko für die Tierhaltung in den Sommermonaten sowie den Übergangsjahreszeiten erwarten.
- Hohe Umgebungstemperaturen wirken sich unmittelbar auf die Leistungsphysiologie und das Verhalten von Nutztieren aus und können zu Hitzestress führen.

Bewertung des Klimarisikos

In Niedersachsen kommen, primär in den Sommermonaten, bereits regelmäßig Tage mit hohen Umgebungstemperaturen vor, die bei Rindern, Schweinen und Geflügel mäßigen bis starken Hitzestress auslösen. Die unmittelbaren Auswirkungen hoher Umgebungstemperaturen fallen bei Nutztieren, die der Außenluft direkt ausgesetzt sind, i. d. R. deutlicher aus als bei solchen, die in ventilierten Ställen mit Möglichkeiten zur aktiven Kühlung gehalten werden. Das Risiko der Hitzestressbelastung bei Nutztieren muss tierabhängig und indikatorbasiert bewertet werden. Gemäß der dargestellten Studienlage besitzen die in Niedersachsen gehaltenen Nutzierrassen aufgrund ihres hohen Leistungsniveaus eine erhöhte Sensitivität gegenüber Hitzestress und können unter den gegebenen Sommerbedingungen bereits Beeinträchtigungen in ihrer Leistung und Gesundheit sowie in ihrem Wohlbefinden erfahren. Folglich stellt Hitzestress in Niedersachsen während der Sommermonate bereits ein mittelgradiges und relevantes Risiko für die Tierhaltung dar.

Der Klimawandel wird die gegenwärtige Hitzestresssituation in der niedersächsischen Nutztierhaltung durch steigende Umgebungstemperaturen sowie die zunehmende Dauer von Hitzeperioden kontinuierlich verschärfen. Im optimistischen Fall treten bis zur Mitte des Jahrhunderts nur leichte und schleichende Veränderungen ein. Die gegenwärtige Situation kann bei nur leichter Zunahme der Hitzestressstage weitgehend unverändert bleiben und weiterhin ein mittelgradiges Klimarisiko beschreiben. Mesterharm (2011) und Akamp und Schattke (2011) gehen in ihren Analysen ebenfalls von einer mittelgradigen negativen Beeinflussung der Milchvieh- und Schweinehaltung in Niedersachsen infolge des Klimawandels bis

zur Mitte des Jahrhunderts aus. Im pessimistischen Fall steigen die durchschnittliche Umgebungstemperatur und die Dauer der Hitzeperioden bis zur Mitte des Jahrhunderts allerdings so stark an, dass Hitzestress an jedem dritten Tag im Jahr auftritt, woraus sich ohne Anpassung ein hohes Klimarisiko für die niedersächsische Tierhaltung ableitet. Letzteres begründet sich auch im kumulativen Effekt der Hitzebelastung von Tieren, wenn diese über mehrere Tage keine Möglichkeit zur Wärmeentlastung, z. B. bei hohen Nachttemperaturen auf der Weide, haben. In diesen Situationen können bereits mehrtägige Belastungen bei mäßigem Hitzestress sehr belastend auf hochleistende Nutztiere wirken. Im Fall der Geflügelhaltung gehen Akamp und Schattke (2011) ebenfalls von einer hochgradig negativen Beeinflussung bis zur Mitte des Jahrhunderts infolge des Klimawandels aus. Zum Ende des Jahrhunderts ist durch die zunehmende Erderwärmung mit mittlerer Sicherheit sowohl im optimistischen als auch pessimistischen Fall von einem hohen Klimarisiko für die Tierhaltung durch die Zunahme von Hitzestresstagen auszugehen.

Die aktuell zu beobachtende und für die Zukunft projizierte Zunahme der Außentemperatur lässt ein erhöhtes Hitzestressrisiko in den Sommermonaten sowie den Übergangsjahreszeiten erwarten. Vor diesem Hintergrund sind in Niedersachsen Anstrengungen zum Schutz von Nutztieren zu ergreifen, um die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen dieser klimatischen Bedingungen auf sie abzumildern. Das Spektrum möglicher Maßnahmen ist sehr breit und reicht von der Zucht hitzetoleranterer Rassen, über die Management- und Haltungsoptimierung im Freiland und in Ställen bis hin zum energieeffizienten Stallbau.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 14: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren“

3.2.2 Abiotischer Stress (Pflanzen)

Unter abiotischen Schadursachen an Pflanzen werden Auswirkungen negativer Umwelteinflüsse auf die pflanzliche Entwicklung verstanden. Je nach Kultur und Anbausystem können diese Schädigungen den Umfang von biotischen Schadursachen deutlich überschreiten. Im Gegensatz zu den Auswirkungen lebender Schadorganismen (biotischer Stress) kann auf das Auftreten abiotischer Stressfaktoren meist nur in sehr begrenztem Maße durch den Menschen reagiert werden. Zu den bedeutendsten abiotischen Stressfaktoren zählen Witterungseinflüsse, Bodenbedingungen, Agrartechniken und Immissionen (Hallmann et al., 2009). Die Schädigungen können entweder direkt durch den Stressfaktor hervorgerufen werden oder dessen Auftreten führt zu einer Prädisposition der Pflanze für das Auftreten biotischer Schaderreger.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Witterung als der bedeutendste abiotische Stressfaktor für die pflanzliche Entwicklung kann in verschiedenen Bereichen und in verschiedenen Bewertungsmaßstäben betrachtet werden. So können Jahresmitteltemperaturen, aber auch jahreszeitspezifische Temperaturen, Temperatursummen oder Schwellenwerte betrachtet werden. Ebenso kann der Niederschlag auf Basis von Summen oder Grenzwertüberschreitungen untersucht werden. Bei letzterem kommt auch der Betrachtung der indirekten Auswirkungen, durch Blick auf die sich ergebenden Bodenfeuchtegehalte (KAPITEL 3.1.1), eine besondere Bedeutung zu (Söder et al., 2022).

Sowohl Hitze als auch Kälte können die Pflanze direkt schädigen, aber auch indirekt über die Entstehung ungünstiger Bodenbedingungen wie Staunässe oder Dürre zu Ertragsverlusten führen (KAPITEL 4.3.3 und 4.3.6). Die unsachgemäße Nutzung von Agrartechniken mit der Folge von Verdichtungen scheint zunächst nur in geringem Maße vom Klimawandel beeinflusst zu sein. Allerdings können Phasen mit häufigen Niederschlägen dazu führen, dass Ackerböden unter nicht optimalen Bodenbedingungen befahren werden müssen, z. B. zur Ernte. Somit kann eine unsachgemäße Nutzung von Agrartechniken mit der Folge von Verdichtungen dennoch vom Klimawandel beeinflusst sein. Zuletzt bleiben noch schädliche Immissionen von Spurengasen, deren Konzentrationen im ppt (parts per trillion= tausendstel ppb)-Bereich stark von geographischen, meteorologischen, jahres- und tageszeitlichen Bedingungen abhängen (DWD, 2024b). Hier ist

Ozon als schädlichstes Gas zu nennen, wobei insgesamt die Auswirkungen als vergleichsweise gering eingeschätzt werden (Hallmann et al., 2009).

Damit ein Stressereignis auch zu einer relevanten Schädigung der Pflanze führen kann, muss das Auftreten des Stressfaktors und das Vorliegen einer empfindlichen Wachstumsphase der Kulturpflanze zusammenkommen. Die Definition von Grenzwerten für Stressereignisse und für relevante empfindliche Entwicklungsphasen der Kulturpflanzen ist dabei je nach Studie unterschiedlich und führt zu teils deutlich unterschiedlichen Ergebnissen und Interpretationen. Besonders bedeutend ist, dass sich durch die projizierten klimatischen Veränderungen auch die Wachstumsphasen der Pflanzen verschieben werden, sodass eine Zunahme des Auftretens von Stressereignissen nicht in jedem Fall zu einer Zunahme von dadurch bedingten Ertragsverlusten führen muss (Söder et al., 2022).

Mit Blick auf abiotische Stressfaktoren in den zurückliegenden Jahren kommt für Niedersachsen besonders das Jahr 2018 mit einer in weiten Teilen des Landes ausgeprägten Dürre in den Sinn. Bei der Betrachtung der veröffentlichten mittleren Erträge des statistischen Landesamtes (LSN, 2024b) wird hierbei deutlich, dass dieses Stressereignis in vielen der Kulturen zu großen Ertragsverlusten im Vergleich zu den Vorjahren geführt hat (Tabelle 15).

Unterschiede in der Höhe der Abweichungen sind dabei den unterschiedlichen Ertragsniveaus der Kulturen zuzuschreiben und sollten nicht als Kriterium für eine unterschiedliche Resilienz der Kulturen gegenüber Hitze oder gar dem Klimawandel allgemein herangezogen werden.

Weitere Einschätzungen zur aktuellen Situation können dem Klimafolgenmonitoringbericht des Landes Niedersachsen entnommen werden (NIKO, 2023b). Es zeigen sich hier bei Betrachtung der letzten Jahrzehnte, je nach betrachtetem Indikator, teils regional sehr unterschiedliche Veränderungen. Überregionale Temperaturanstiege fallen demnach sowohl bei den Indikatoren „Jahresmitteltemperatur“ als auch „Zunahme von Sommer- und Hitzetagen“ sowie „Abnahme von Frost- und Eistagen“ sehr unterschiedlich aus. Beim Niederschlag kann ebenfalls ein ungleichmäßiges Bild mit einer statistischen Zunahme der Jahresniederschlagssummen, aber gleichzeitig einer Zunahme von Dürreereignissen und Trockentagen festgestellt werden.

Jahr	Winterweizen	Winterroggen	Wintergerste	Winterrap	Futtererbse	Ackerbohne	Kartoffel	Zuckerrübe	Silomais
Ertragsmittel (2000-2022)	81,26	60,88	68,99	36,37	36,98	42,73	439,5	684,7	452,4
2000	-6,6 %	-13,5 %	-7,7 %	-10,5 %	-6,8 %	0,2 %	11,1 %	3,0 %	5,6 %
2001	4,3 %	18,8 %	8,3 %	7,9 %	4,0 %	3,3 %	2,1 %	-3,8 %	1,5 %
2002	-17,6 %	-9,7 %	-15,8 %	-20,5 %	-19,6 %	-9,6 %	-9,4 %	-3,1 %	-1,0 %
2003	-10,8 %	-10,5 %	-14,9 %	-2,4 %	-5,1 %	-2,5 %	-16,2 %	4,9 %	-13,1 %
2004	4,8 %	11,5 %	14,5 %	25,6 %	1,2 %	2,4 %	13,5 %	5,9 %	2,6 %
2005	2,5 %	2,0 %	14,4 %	12,9 %	0,5 %	0,0 %	3,1 %	5,3 %	6,2 %
2006	-0,5 %	-8,2 %	0,0 %	10,0 %	-5,5 %	-6,7 %	-13,2 %	-3,7 %	-9,9 %
2007	-8,0 %	-30,6 %	-22,0 %	-10,4 %	-11,6 %	-5,1 %	5,4 %	10,3 %	12,7 %
2008	13,9 %	4,9 %	3,5 %	1,4 %	-8,6 %	-4,2 %	10,4 %	8,9 %	11,5 %
2009	3,8 %	9,7 %	5,9 %	19,4 %	-14,9 %	-20,0 %	6,8 %	15,8 %	-0,4 %
2010	-3,5 %	-14,8 %	2,4 %	6,6 %	-10,6 %	-18,1 %	-6,5 %	0,6 %	-11,8 %
2011	-4,9 %	-4,0 %	-9,3 %	-9,2 %	22,1 %	13,6 %	8,4 %	17,8 %	11,6 %
2012	-5,0 %	20,4 %	5,4 %	3,1 %	27,5 %	9,4 %	3,6 %	6,7 %	8,0 %
2013	7,0 %	24,5 %	11,1 %	5,3 %	14,5 %	25,5 %	-5,2 %	-5,6 %	-12,1 %
2014	10,6 %	17,1 %	17,7 %	7,0 %	33,1 %	47,1 %	7,2 %	20,8 %	7,3 %
2015	7,5 %	15,2 %	18,8 %	-0,7 %	1,9 %	1,6 %	7,2 %	8,8 %	5,1 %
2016	-0,5 %	-1,1 %	2,4 %	-5,5 %	-15,9 %	-8,5 %	0,9 %	8,0 %	-3,2 %
2017	-3,0 %	-9,5 %	-1,3 %	-19,1 %	-12,6 %	13,5 %	4,5 %	9,3 %	6,2 %
2018	-18,1 %	-26,9 %	-22,4 %	-22,9 %	-12,8 %	-20,1 %	-22,0 %	-10,5 %	-22,9 %
2019	-0,6 %	-8,2 %	-2,4 %	-5,5 %	-4,1 %	-13,5 %	-14,4 %	-5,8 %	-12,6 %
2020	-2,4 %	-2,3 %	-4,5 %	2,7 %	12,7 %	3,7 %	3,4 %	2,9 %	3,2 %
2021	-3,2 %	4,9 %	0,1 %	7,7 %	-2,2 %	5,9 %	2,0 %	5,7 %	12,0 %
2022	7,9 %	9,4 %	12,8 %	32,0 %	-4,9 %	-6,3 %	2,1 %	-3,7 %	-11,6 %

Tabelle 15: Ertragsabweichung des aktuellen Jahres vom Mittelwert des vorherigen 5-Jahreszeitraums in dt/ha (LSN, 2024b)

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Zukünftig ist bundesweit mit einer weiteren Zunahme von Hitzeereignissen zu rechnen, deren Auswirkung auf die Erträge sich jedoch aufgrund der sich gleichzeitig verschiebenden kritischen phänologischen Entwicklungen schwer projizieren lässt. Für Niedersachsen ist von einer Zunahme besonders kurzzeitiger Hitzeperioden und der Anzahl an Hitzetagen auszugehen. Für den Bereich der Trockentage bzw. Trockenperioden kann es für einige Regionen eine Abmilderung geben. In der Regel werden aber auch diese Tage zunehmen. Dies gilt insbesondere für das Ende des Jahrhunderts. Gleichzeitig wird bundesweit hingegen von einem Rückgang der Tage mit Trockenstress ausgegangen (Söder et al., 2022). Letzteres wird durch eine projizierte Zunahme der Winterniederschläge und einen Rückgang der in den letzten Jahren häufig beobachteten Phasen mit Frühjahrstrockenheit begründet. Diese Prognose wird für Niedersachsen ebenfalls nicht umfänglich bestätigt. Hierbei spielen regionale Unterschiede eine große Rolle, so dass besonders tiefgründige Lehmböden im südlichen Niedersachsen durch ihre gute Wasserspeicherfähigkeit von diesen Verschiebungen vergleichsweise profitieren könnten. Im Gegensatz dazu werden leichte Sandböden mit geringer natürlicher Wasserspeicherfähigkeit wie beispielsweise im Nordosten des Landes deutlich stärker negativ beeinflusst werden. Hitzeperioden beeinträchtigen insbesondere in der Blüte der Pflanzen die Ausprägung der Ertragsanlagen. Trockenheit oder Dürre beeinflusst hingegen die Pflanze grundsätzlich zu jeder Entwicklungsphase, wenn die nutzbare Feldkapazität

und damit das verfügbare Wasser unter einen bestimmten Bereich sinken. Ebenso verhält es sich mit Staunässe, da dadurch die Wurzelentwicklung gehemmt oder sogar rückläufig sein kann, wodurch die Nährstoff- aber auch Wasseraufnahme zu späterer Zeit gehemmt wird.

Für das Ende des Jahrhunderts ist flächendeckend in Niedersachsen mit mehr Hitzeperioden zu rechnen, die jedoch im Osten und Süden Deutschlands deutlicher auftreten werden als in Niedersachsen. Zudem wird die Niederschlagssumme zunehmen, wobei eine Verschiebung innerhalb eines Jahres vom Sommer zum Winter stattfinden wird. Bei Auftreten der Hitzeperioden zur Blüte ist mit Ertragseinbußen zu rechnen. Tritt gleichzeitig auch Wassermangel auf, ist insgesamt die Entwicklung der Pflanzen stark negativ beeinträchtigt, was erhebliche Ertragseinbußen zur Folge haben kann.

Bewertung des Klimarisikos

Für Niedersachsen wird bis Mitte des Jahrhunderts eine moderate Zunahme von Hitzeperioden projiziert, die jedoch bis zum Ende des Jahrhunderts gehäuft auftreten werden. Einen größeren Einfluss wird daher wahrscheinlich die Niederschlagsverteilung ausüben, die bei ausbleibendem Regen in der Vegetationsperiode und geringer Wasserspeicherkapazität der Böden zu Rückgängen in den Ernteerträgen führen wird. Aktuell liegt das Risiko in der mittleren Stufe, da regional unterschiedlich bereits oben beschriebene Folgen auftreten. Mit Ausnahme des Jahres 2018 ist dieses bisher jedoch nicht flächendeckend vorgekommen.

INFO

- Unter abiotischen Schadursachen an Pflanzen werden Auswirkungen negativer Umwelteinflüsse, wie z. B. Witterungseinflüsse oder Bodenbedingungen auf die pflanzliche Entwicklung verstanden.
- Sowohl Hitze als auch Kälte können die Pflanze direkt schädigen, aber auch indirekt über die Entstehung ungünstiger Bodenbedingungen, wie z. B. unter Staunässe oder Dürre können Schädigungen und Ertragsverluste auftreten.
- Dürre hat als abiotischer Stressfaktor schon in den letzten Jahren zu Ertragsverlusten geführt.
- Hitzeperioden beeinträchtigen insbesondere in der Blüte der Pflanzen die Anlage der Ertragsanlagen. Trockenheit oder Dürre beeinflussen die Pflanze zu jeder Entwicklungsphase, wenn die nutzbare Feldkapazität und damit das verfügbare Wasser unter einen bestimmten Bereich sinkt.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 16: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“.

3.2.3 Verschiebung von Anbaugebieten

Die Anbaumöglichkeit und letztendlich auch die Anbauwürdigkeit der einzelnen pflanzenbaulichen Kulturen richtet sich in erster Linie nach den klimatischen Bedingungen, die in den unterschiedlichen Boden-Klima-Räumen vorliegen (Roßberg et al., 2007). Die verschiedenen Kulturen, die in der landwirtschaftlichen Praxis Berücksichtigung finden, haben auch derzeit je nach Entwicklungsstadium schon unterschiedliche Ansprüche an Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung. Die Eigenschaften der Standorte werden dabei vor allem durch die sich ändernde Niederschlagsverteilung und die vorherrschenden Temperaturen bestimmt. Diese wiederum sind dann mit den Vorzügen der Kulturpflanzen in Einklang zu bringen, damit eine Beurteilung für die Anbauwürdigkeit in einem bestimmten Boden-Klima-Raum getroffen werden kann.

Hintergrund und Stand der Forschung

Grundsätzlich ist der Standort Niedersachsen derzeit ein Gunststandort für Ackerbau und Grünlandwirtschaft. Diese Beurteilung resultiert aus der Kombination der Faktoren Temperatur, Niederschlag bzw. Witterung und den Ansprüchen der Kultur an den Standort. Häufig ist dabei die Bodenart (Sand, Schluff, Ton, Lehm) als grundsätzlicher Parameter bestimmend. Für die Standortbedingungen sind auch weitere Bodeneigenschaften relevant, z. B. der Humusgehalt, die Gründigkeit und weitere. Wichtige Parameter sind z. B. die Bodenart, der Humusgehalt, die Gründigkeit und weitere. Diese bestimmen zum Beispiel die Wasserspeicherefähigkeit der Böden. Der Klimawandel kann die Häufigkeit von WASSERMANGEL IM BODEN verstärken. Je nach Bodeneigenschaften wirkt sich der Klimawandel unterschiedlich aus. Die vorherrschende

Bodenart wird dabei an ihrem Standort bleiben, kann aber zukünftig durch ihre Eigenschaft der Wasserspeicherung tendenziell mehr oder weniger geeignet erscheinen. Der mittlere Tageswasserverbrauch bzw. die tägliche potenzielle Transpiration landwirtschaftlicher Kulturen in der Hauptwachstumsphase ist dabei durchweg unter den aktuellen Bedingungen bekannt und liegt zwischen ca. 3–4,5 mm (Roth et al., 2005) und steigt allgemein mit steigenden Temperaturen an.

Durch eine Reduzierung oder auch Verschiebung der Niederschlagsmengen können, ebenso wie durch Temperaturänderungen, Anbauregionen für bestimmte Kulturen entfallen bzw. auch neue erschlossen werden. Anhand von fünf exemplarischen Anbauregionen in Niedersachsen wird deutlich, dass der Anteil einzelner landwirtschaftlicher Kulturen auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) zwischen den Regionen durchaus unterschiedlich ist (Abbildung 13). In erster Linie ist die Anbauwürdigkeit durch den Standort bzw. den Boden vorgegeben. Gepaart mit den oben genannten Parametern und zusätzlich den Vermarktungsmöglichkeiten ergibt sich für Niedersachsen für das exemplarische Jahr 2023 eine unterschiedliche Häufigkeit der Kulturen in den Regionen.

Am exemplarischen Beispiel der Sojabohne wird deutlich, dass diese aufgrund ihrer Temperaturansprüche in der Norddeutschen Region noch nicht überall angebaut werden kann (Abbildung 14). Aktuell wird die Region Norddeutschland noch als Grenzregion definiert, wo ein Anbau möglich, aber mit Risiken behaftet ist. Darüber hinaus gibt es aber auch im Bereich der Sortenzüchtung Fortschritte, um die Anbauwürdigkeit unter den jetzigen klimatischen Bedingungen zu ermöglichen.

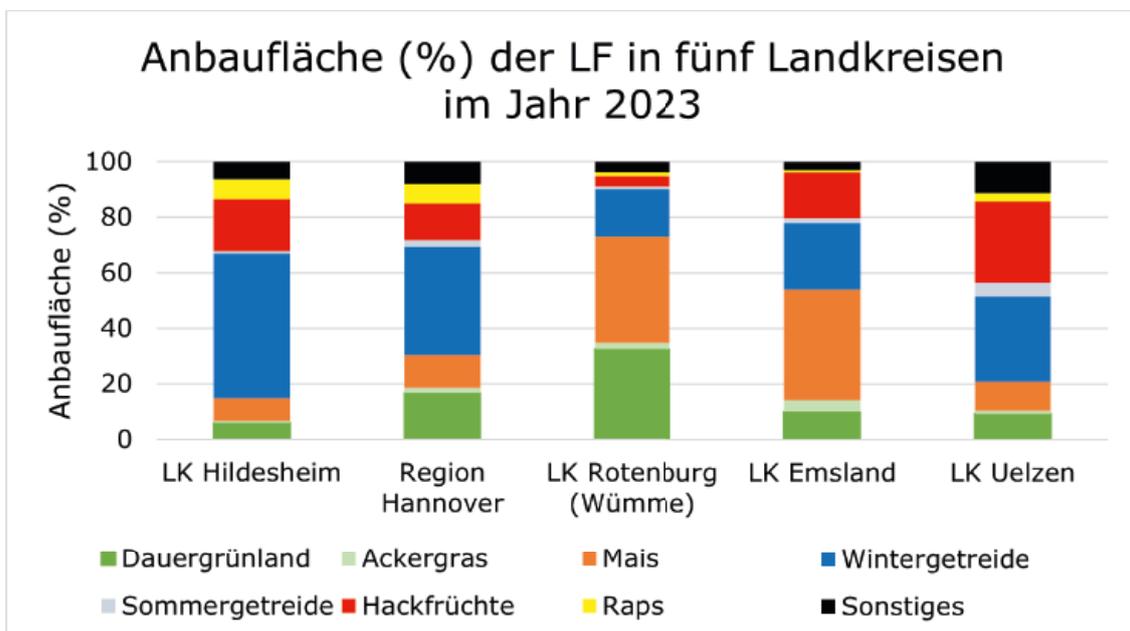


Abbildung 13: Darstellung der Anbauflächenverteilung in fünf verschiedenen Regionen Niedersachsens (InVeKoS, 2023).

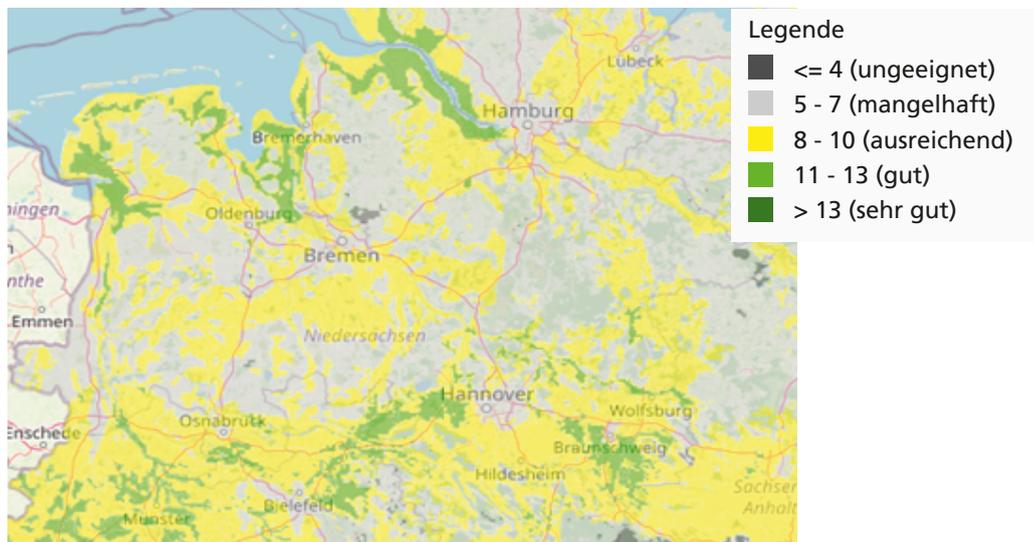


Abbildung 14: Untersuchungen zur Anbaueignung von Sojabohnen in Deutschland (Ausschnitt) (Roßberg & Recknagel, 2017).

Allgemein lässt sich schlussfolgern, dass bei Verschiebungen von Ausbreitungszonen verschiedener Pflanzen- und Tierarten auch immer eine Verschiebung von potenziellen Anbaubereichen für landwirtschaftliche Kulturen auftritt. Gleiches gilt auch im negativen Sinne, wenn Regionen ihre Anbauwürdigkeit für bestimmte Kulturen verlieren. Zusammenhänge zwischen regionalen Temperaturänderungen und beobachteten Veränderungen in physikalischen und biologischen Systemen sind in vielen aquatischen, terrestrischen und marinen Umgebungen dokumentiert (IPCC, 2023b).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Eine Verschiebung der Anbaubereiche für wärmeliebende Kulturen ist positiv zu sehen, solange etablierte Kulturen dadurch ersetzt bzw. ergänzt werden können. Ansonsten

hilft an dieser Stelle der Verweis auf das Kapitel zu Ertragsausfällen, da ein verändertes Ertragsniveau die Vorzüglichkeit der Kulturen widerspiegelt.

Bewertung des Klimarisikos

Die Verschiebung von Anbauregionen ist ein längerfristiger Prozess, dessen Risiko in der Gegenwart als gering beschrieben werden kann. Sie bringt dabei für die Landwirtschaft auch Chancen, bisher eher im südlichen Europa beheimatete Kulturen auch in Niedersachsen anzubauen. Dabei ist regions- bzw. betriebsindividuell zu entscheiden, wie unsicher der Anbau der aktuellen Kulturen wird und wie sicher neue Kulturen bereits etabliert, geerntet und vermarktet werden können. Die Ertragsentwicklung aktueller landwirtschaftlicher Kulturen kann im Kapitel zu Ertragsausfällen nachgelesen werden.

INFO

- Niedersachsen ist derzeit ein Gunststandort für Ackerbau und Grünlandwirtschaft. Ändert sich, wann und wie viel Niederschlag fällt, können Anbauregionen für bestimmte Kulturen entfallen bzw. neu erschlossen werden.
- Verschieben sich die Ausbreitungszonen verschiedener Pflanzen- und Tierarten, verschieben sich auch die potenziellen Anbaubereiche für landwirtschaftliche Kulturen. Besonders wärmeliebende Kulturen profitieren von der Verschiebung der Anbaubereiche.
- Das Risiko, das durch die Verschiebung von Anbauregionen entsteht, ist für die Gegenwart gering.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Gering	Mittel
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 17: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Verschiebung von Anbaubereichen“.

3.2.4 Verschiebung von Vegetationsperioden

Phänologie, also die periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen, ist definiert als die Betrachtung zyklischer und saisonaler Phänomene und deren Beziehung zu biotischen und abiotischen Umweltfaktoren (Lieth, 1974). Aufgrund der hohen Abhängigkeit von Witterungsparametern ist die phänologische Entwicklung ein guter Indikator für Klimaveränderungen.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die phänologischen Phasen der Pflanzen (z. B. Ergrünen, Blüte, Reife, Blattfall) werden sowohl von genetischen als auch von Umweltfaktoren wie Tageslänge, Temperatur, Boden- und Luftfeuchtigkeit beeinflusst. In Niedersachsen sind bei den meisten Kulturpflanzen die Tageslänge und Temperaturentwicklung in erster Linie ausschlaggebend für die Eintrittszeiten von beispielsweise Blüte und Frucht reife, die schließlich den optimalen Erntetermin und die Erträge und Qualitäten in hohem Maß beeinflussen (Lieth, 1974). Anhand von Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) werden jährlich physiologisch-biologische Jahreszeiten definiert, die auf phänologischen Beobachtungen von Zeigerpflanzen beruhen. Diese zeigen den eindeutigen Trend der Verschiebung der phänologischen Entwicklung, die mit einem klimawandelbedingten Temperaturanstieg und mildereren Wintertemperaturen einhergehen. Beispielsweise begann 2023 der Vorfrühling (Beginn Haselblüte) um 22 Tage früher, sowie der Winter (Blattfall Stieleiche) um 5 Tage später im Vergleich zum langjährigen Mittel (1992–2022) in Niedersachsen (DWD, 2024a).

Für landwirtschaftlich wichtige Kulturen wie Grünland und Mais sind die kumulierten Wachstumsgradtage vor allem außerhalb der typischen Wachstumsperioden von Oktober bis März in der nordwestdeutschen Tiefebene, die auch repräsentativ für große Teile Niedersachsens ist, deutlich angestiegen und führen zu einer zeitlichen Ausdehnung der Wachstumsperioden (Peters et al., 2021; Taube et al., 2020). Hierbei sind auch regionale und kleinräumige Unterschiede möglich. Am Beispiel des nordwestdeutschen Vegetationsbeginns im Grünland (DWD-Wetterstation in Emden; nach Ernst & Loeper (1976)) kann eine deutliche Verfrühung des Vegetationsbeginns von ca. 9 Tagen in den letzten 20 Jahren festgestellt werden (Abbildung 15) – ein Trend, der auch für weitere Kulturen eindeutig belegt ist (Chmielewski, 2016; Menzel et al., 2006).

Auf bestehende Pflanzenbausysteme kann die Verfrühung der phänologischen Phasen positive als auch negative Auswirkungen haben. Grundsätzlich positiv zu bewerten sind die verlängerten Vegetationsperioden und somit längere Wachstumsperioden, die (u. a. in Verbindung mit steigender CO₂-Konzentration in der Atmosphäre) zu gesteigerten Ertragsleistungen im Grünland, Acker-, Obst-, Wein- und Gartenbau führen können. Allerdings können phänologische Verschiebungen dazu führen, dass etablierte Wechselwirkungen beispielsweise zwischen Nutzpflanzen und deren Bestäubern oder in Räuber-Beute-Beziehungen negativ beeinflusst werden und Erträge gemindert werden. Weiterhin nehmen aufgrund des Klimawandels extreme Witterungsereignisse zu, die im Zusammenhang mit der Verschiebung der phänologischen Wachstumsphasen negative Effekte haben können. Dazu gehören zum Beispiel erhöhte Niederschläge im Herbst und Winter, zunehmende Trockenperioden bei gleichbleibenden Spätfrostereignissen im Frühjahr sowie Extremwetterereignisse in den Sommermonaten (NIKO, 2023b).

Am Beispiel des Dauergrünlands (27 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) Niedersachsens in 2023) kann die Verlängerung der Wachstumsperiode grundsätzlich als positiv bewertet werden, da die Möglichkeit der Erhöhung der Nutzungsfrequenz in Schnittnutzungssystemen oder einer Ausdehnung der Weidesaison eine ertragssteigernde Wirkung besteht. Jedoch können Extremwetterereignisse oder Staunässe im Winterhalbjahr eine Befahrung der Grünlandflächen und schließlich eine intensive Bewirtschaftung erschweren, sodass positive Effekte einer verlängerten Wachstumsperiode nicht ausgenutzt werden können. Da das Grünland im Kulturartenvergleich durch eine mehrmalige Beerntung im Jahr jedoch eine hohe Resilienz aufweist, können Ertrags- und Qualitätsverluste noch relativ gut kompensiert werden. In jährlich angebauten und geernteten Kulturen hingegen, wie Winterweizen (14 % der LF) können durch die Verfrühung ertragsensibler Entwicklungsstadien (Ährenbildung und Blüte) in Kombination mit zum Beispiel Spätfrösten oder Dürreperioden im Frühjahr deutliche Ertragsverluste eintreten (Plückhahn et al., 2023; Scheifinger et al., 2003). Genauso kann beim Mais (22 % der LF) die Verfrühung der Aussaat und das verfrühte Eintreten der ertragsdefinierenden Jugendentwicklung mit klimawandelbedingten Trockenperioden oder Spätfrösten zusammenfallen und somit zu Beeinträchtigungen in der Pflanzenentwicklung und schließlich zu Ertragseinbußen führen (Schmitt et al., 2022).

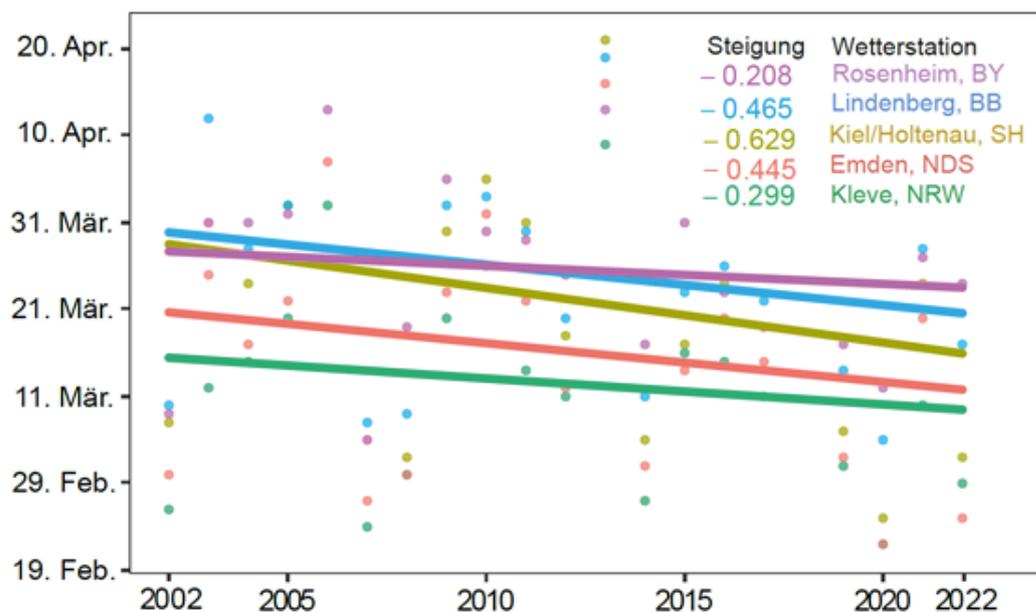


Abbildung 15: Korrigierte Grünland-Temperatursumme (Methodik nach Ernst & Loeper (NIKO, 2023b)) in den Jahren 2002-2022 für verschiedene Wetterstationen (NDS=Niedersachsen; BB = Brandenburg, BY = Bayern; SH = Schleswig-Holstein; NRW= Nordrhein-Westfalen) des Deutschen Wetterdienstes.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Verschiebung der phänologischen Phasen, insbesondere ein verfrühter Vegetationsbeginn ist auch für weit in die Zukunft projizierte Zeiträume valide (Schmidt et al., 2014; Schröder et al., 2010). Zusätzlich kann auch trotz grundsätzlich steigender Temperaturen nicht generell von einer Abnahme von Schadfrösten im Frühjahr ausgegangen werden (Plückhahn et al., 2023). Dies zeigt auch die Tabelle 3. Schließlich nimmt basierend auf Modellierungsstudien mit der Zunahme von Extremwetterereignissen in Verbindung mit der Verschiebung der phänologischen Phasen auch die Sensibilität von heutigen Pflanzenbausystemen zu und extreme Ertragsausfälle werden wahrscheinlicher, vor allem in Hohertragsregionen wie Niedersachsen (Söder et al., 2022).

Grundsätzlich ist also eine Anpassung der bestehenden Systeme notwendig, die bereits jetzt schon dringend kurzfristig vorgenommen werden sollten (Jägermeyr et al., 2021). Bei Anpassung der heutigen Pflanzenbausysteme können auch Vorteile aus den veränderten Umweltbedin-

gungen gezogen werden. Dazu gehören der Anbau klimaresilienter und gleichzeitig agronomisch wertvoller Pflanzenarten und der standortangepassten Sortenwahl hinsichtlich ihrer genetisch fixierten physiologischen Abreife (frühe oder späte Sorten). Am Beispiel des Weizens können Anpassungsoptionen wie Aussattermin, Bewässerung oder technischer Fortschritt sogar Vorteile für das Wachstum und die Erträge mit sich bringen (Challinor et al., 2014). Weiterhin kann die Arten- und Sortenwahl von Mais (Degener & Kappas, 2015; Southworth et al., 2000) und deren Anbau in diversifizierten Systemen (Dardonville et al., 2020) einen entscheidenden Einfluss darauf haben, wie sich die Erträge unter dem zukünftigen Klima entwickeln. Kulturen, die einen bestimmten Kältereiz im Winter (Vernalisation) benötigen, könnten aufgrund höherer Temperaturen regional nicht mehr sicher angebaut werden. Wärmeliebende Kulturen hingegen (z. B. Körnermais, Sorghum oder Sojabohne) können vermehrt in Niedersachsen angebaut werden und bei intelligenter Integration zu einer Diversifizierung und Resilienz von Anbausystemen beitragen.

INFO

- Zeigerpflanzen zeigen den eindeutigen Trend der Verschiebung der phänologischen Entwicklung.
- Am Beispiel des nordwestdeutschen Vegetationsbeginns im Grünland kann eine deutliche Verfrüfung des Vegetationsbeginns von ca. 9 Tagen in den letzten 20 Jahren festgestellt werden.
- Es gibt positive und negative Auswirkungen durch die Verfrüfung der phänologischen Phasen auf das Pflanzenwachstum.
- Ein verfrühter Vegetationsbeginn wird auch zukünftig erwartet. In Verbindung mit Spätfrösten in ertragssensiblen und weit entwickelten Wachstumsstadien im Frühjahr nimmt dadurch die Wahrscheinlichkeit von Ertragsdepressionen zu.
- Ein Temperaturanstieg führt zu einer verlängerten Vegetationsperiode, was für das Pflanzenwachstum als positiv zu bewerten ist. Extremwetterereignisse können diesen Effekt jedoch wieder ausgleichen.

Bewertung des Klimarisikos

Basierend auf oben genannten Studien kann davon ausgegangen werden, dass es mit dem beschriebenen Anstieg der Temperaturen, sowohl in einem optimistischen als auch pessimistischen Fall, zu einer weiteren zeitlichen Ausdehnung der Vegetationsperiode kommt, die für das Pflanzenwachstum grundsätzlich als positiv zu bewerten ist. Dieser positive Effekt kann jedoch kulturartspezifisch durch zunehmende, das Pflanzenwachstum beeinträchtigende Extremwetterereignisse in negativem Sinne kompensiert werden. Bei Anpassung an die veränderten Wachstumsperioden, das heißt pflanzenbaulicher Maß-

nahmen sowie grundsätzliche Änderungen der Landschaftsnutzungssysteme (z. B. Resilienz durch Diversifizierung) können vor allem mit zunehmender (extremer) Witterungsvariabilität negative Effekte abgepuffert und Vorteile aus der verlängerten Vegetationsperiode gewonnen werden (Egli et al., 2021; Lüscher et al., 2022) Ohne eine Anpassung ist jedoch langfristig das Risiko als hoch einzustufen (Tabelle 18). Die mittlere Gewissheit dieser Einstufung reflektiert die Quantität und Qualität der vorhandenen Studien, die die angegebenen Zeiträume betrachten.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 18: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“.

3.2.5 Stress durch Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Mit knapp 90 % Anteil an der Ackerfläche konzentrierte sich der Ackerbau in Niedersachsen im Jahr 2023 auf die Kulturen Mais, Getreide (Weizen, Gerste, Roggen, Triticale), Raps, Kartoffeln und Zuckerrüben in absteigender Reihenfolge. Niedersachsen ist regional durch starke Unterschiede in Bezug auf die Standortfaktoren Boden und Wasser geprägt. Die Küstenregion ist durch schwere Marschböden, hohe Niederschlagsmengen und intensiven Weizenanbau in engen Fruchtfolgen geprägt. Auf den leichteren Böden der Geeststandorte im Binnenland dominiert der intensive Mais- und Kartoffelanbau. Seit einigen Jahren häufen sich hier problematische Trocken- und Hitzephasen in den Frühsommermonaten. Auf den Lehmlandorten im Süden und Osten Niedersachsens dominiert eine intensive Weizen-Raps-Zuckerrüben-Fruchtfolge. Insbesondere im östlichen Niedersachsen ist Wasser immer häufiger der begrenzende Faktor.

Diese lokal sehr verschiedenen Bedingungen für Schädlinge und Krankheiten, geprägt durch einerseits dem Standort selbst und andererseits durch die regionalen Fruchtfolgen, machen eine einheitliche Aussage für ganz Niedersachsen bezüglich der Klimawirkung auf Schädling- und Krankheitsentwicklungen nicht möglich. Die komplexen Wechselwirkungen in den verschiedenen Pathosystemen zwischen Umweltfaktoren und biotischen Faktoren erschweren Verallgemeinerungen zudem. Forschungsprojekte zur Klimawirkung auf das Auftreten von und mögliche Ertragseffekte durch Krankheiten und Schädlinge zeigen, dass es eine Herausforderung darstellt, signifikante und kausale Zusammenhänge zu identifizieren und von anderen Einflussfaktoren des Anbaumanagements und der Bestandsführung zu trennen. Im Folgenden soll ein Teil des Forschungsstandes zu den wichtigsten Kulturarten in Niedersachsen skizziert werden.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Während einige Pathogene und Schädlinge von wärmeren Temperaturen profitieren könnten, werden andere möglicherweise an Bedeutung verlieren. Die Anpassung an diese Veränderungen erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, der Pflanzenzüchtung, angepasstes Anbaumanagement und innovative Pflanzenschutzstrategien kombiniert.

Sowohl für langfristige Simulationen für Krankheits- und Schädlingsauftreten als auch bei der Berechnung von Klimamodellen sind konkrete Annahmen als Grundlage eine Voraussetzung. Diese Annahmen sind jeweils mit unterschiedlich stark ausgeprägten Unsicherheiten behaftet. Deshalb müssen die hier getroffenen Aussagen immer mit entsprechender Vorsicht diskutiert werden (Juroszek & Tiedemann, 2013b). Zudem kann es durch veränderte klimatische Bedingungen zu Veränderungen in der Wirksamkeit vorbeugender Pflanzenschutzmaßnahmen kommen und es wird in Zukunft zu einem veränderten Spektrum an Pflanzenschutzmittelwirkstoffen kommen, sei es aus regulatorischen Gründen oder auf Grund von Resistenzentwicklungen. Auch diese Aspekte haben großen Einfluss auf eine Projektion für die Zukunft bzgl. der Bedeutung von Krankheiten und Schaderregern. Durch die Einbeziehung von Gradtagen im Zusammenhang von Pflanze-Schaderreger-Beziehungen, sind die Aussagen von Prognosemodellen bei jährlich stark schwankender Witterung präziser geworden, wodurch die Akzeptanz in der Praxis steigt (Racca et al. 2015).

Entsprechend ist weitere Forschung nötig, um die Wechselwirkungen zwischen Klima, Kulturpflanzen und Schaderregern besser zu verstehen und zuverlässigere Projektionen für die Zukunft zu ermöglichen. Im Rahmen des derzeitigen Wissensstandes werden im Folgenden isoliert die zukünftigen Klimawirkungen auf Mais, Weizen, Zuckerrübe, Kartoffel und Winterraps der vorhandenen Literatur vorgestellt.

Mais

Für die anbaustärkste Kultur Mais ergibt sich nach Jurosek und von Tiedemann (2013a) aus den Klimaprognosen ein erhöhtes Risiko für bestimmte Pilzkrankheiten insbesondere auf Grund höherer Temperaturen. Zu nennen sind hier der Erreger der Turcicum-Blattdürre (**Exserohilum turcicum**) und Brandpilze wie **Ustilago maydis** (Maisbeulenbrand) und **Sporisorium reilianum** (Kopfbrand). Insbesondere für den Kopfbrand werden seit etwa 2020 in lokal begrenzten Regionen Niedersachsens regelmäßig befallene Bestände beobachtet. Der Befall begrenzt sich bisher auf Flächen mit langjährigem intensivem Maisanbau in Selbstfolge.

Neben dem Kopfbrand würden einige Schadinsekten von einem Anstieg der mittleren Temperaturen profitieren. Der Maiszünsler (**Ostrinia nubilalis**) könnte sich weiter ausbreiten und eine bivoltine (zwei Generationen pro Jahr) Rasse entwickeln, wie bereits in Baden-Württemberg geschehen. Zudem könnte sich der Westliche Maiswurzelbohrer (**Diabrotica vergifera**) weiter ausbreiten und in engen Maisfruchtfolgen große Schäden verursachen. Diese Entwicklung wird aber ganz wesentlich von der Anbauintensität (Fruchtfolge) auf den Flächen beeinflusst (Bacanovic et al., 2014).

Weizen

Für die zweitwichtigste Kultur Weizen wurde eine Verkürzung der phänologischen Stadien um 0,14 Tage/Jahr in Niedersachsen auf Grund der kürzeren und milderen Winterperiode projiziert (Racca et al., 2015). Dieser Effekt ist in unterschiedlicher Ausprägung wahrscheinlich auch auf andere Getreidearten anwendbar, wobei in diesem Merkmal vorbeugende Maßnahmen wie der Aussaatzeitpunkt und die Sortenwahl einen enormen Einfluss haben. Solche Verschiebungen können erhebliche Auswirkungen auf das Zusammentreffen von anfälligen Stadien der Kulturpflanze und infektiösen Stadien von Krankheitserregern oder Schädlingen haben und somit neben den direkten Auswirkungen des Klimawandels auf Krankheiten zu einer Abnahme, Zunahme oder Gleichgewichtsverschiebung der Bedeutung einzelner Krankheitserreger führen (Krengel-Horney et al., 2021). Durch die Verschiebung der phänologischen Stadien im Weizen wird es voraussichtlich zu früherem Auftreten verschiedener Blattkrankheiten insbesondere in der frühen Schossphase kommen.

Für die Krankheiten Echter Mehltau (**Blumeria graminis**), Braun- und Gelbrost (**Puccinia triticana** und **Puccinia striiformis**) sowie Septoria Blattdürre (**Zymoseptoria tritici**) ist ein früheres Auftreten projiziert. Das frühere Auftreten muss aber nicht zwangsläufig mit einer stärkeren Epidemie verbunden sein. Denn die Wetterbedingungen

während und nach dem Schossen haben einen entscheidenden Einfluss auf die weitere Ausbreitung im Bestand. Insbesondere bei Septoria bremsen Hitze- und Trockenperioden in den Frühsommermonaten während der Schossphase eine mögliche Epidemie in den letzten Jahren häufig aus, da notwendige Infektionsbedingungen wie eine bestimmte Blattnässedauer nicht erfüllt sind.

Bei einigen Krankheiten sind nur geringfügige Veränderungen oder gar eine Verminderung zu erwarten, wie bei Mehltau (**B. graminis**) oder Halmbruch (**Oculimacula yallundae**) und eingeschränkt auch beim Ährenfusarium-Risiko zur Blüte des Weizens. Die Veränderungen sind abhängig von regionalen Gegebenheiten (Küste vs. Binnenland) und werden zudem stark durch den Aussaattermin beeinflusst. Der Einsatz resistenter Sorten könnte den Effekt des frühen Auftretens ausgleichen, insbesondere wenn die Resistenz im Jugendalter der Pflanzen ausgeprägt ist. Der Weizen-Schwarzrost (**Puccinia graminis**), der bisher noch nicht weit in Deutschland verbreitet ist, ist besser als andere Rostarten an hohe Temperaturen und geringe Luftfeuchtigkeit angepasst und stellt damit auch für den Weizenanbau in Niedersachsen zukünftig ein Risiko dar. Es gibt zudem aktuell kaum Resistenzen gegen Schwarzrost in relevanten Weizensorten (Krengel-Horney et al., 2021).

Blattläuse profitieren grundsätzlich von einer Erwärmung, aber Wetterextreme wie Hitze und Trockenheit können ihre Populationsdynamik im Sommer beeinträchtigen. Die Behandlungswürdigkeit von Blattläusen im Herbst dürfte zukünftig aber steigen (Bacanovic et al., 2014). Die durch den Klimawandel verursachten Krankheitsprobleme des Weizens werden sich also wahrscheinlich nicht durchgängig verschlimmern, denn je nach Standort können die klimatischen Veränderungen auch zu einer Verbesserung der Gesundheitssituation des Weizens führen (Jurosek & von Tiedemann, 2013).

Zuckerrübe und Kartoffel

Für die Zuckerrübe wird eine Verkürzung der phänologischen Stadien von 0,13 Tagen/Jahr projiziert. Bezüglich des Auftretens von Blattkrankheiten könnte es langfristig zu einem um ca. zwei bis vier Wochen früheren Erstauftreten kommen. Hier sind insbesondere **Cercopsora beticola** und **Ramularia beticola** zu nennen (Racca et al., 2015; Saxony et al., 2011). Die Rübenzystennematode **Heterodera schachtii** könnte sich auf Grund der höheren Bodentemperaturen schneller entwickeln und mehr Generationen pro Jahr hervorbringen (Bacanovic et al., 2014). Sowohl für den Zuckerrüben- als auch für den Kartoffelanbau besteht das Risiko, dass sich wärme-liebende Insekten wie bspw. die Glasflügelzikaden (**Pentastiridius leporinus**, **Hyalesthes obsoletus**) nach

Norden ausbreiten und dort etablieren. Bei den Zikadenarten ist vor allem deren Rolle als Vektor für neue Krankheiten in der Zuckerrübe und der Kartoffel von Bedeutung (Krengel-Horney et al., 2021).

Winterraps

Für Winterraps wird ein erhöhtes Risiko im Herbst für die Schaderreger Kohlflyge und Rapserdflor erwartet, da sich die Entwicklung der Erreger durch mildere Temperaturen beschleunigt (Bacanovic et al., 2014). Zudem wird eine Verkürzung der phäologischen Stadien um 0,44 Tage/Jahr durch kürzere und mildere Winter projiziert (Racca et al., 2015). Die dadurch früher einsetzende Blühphase als Risikophase für *Sklerotinia* korrespondiert mit einer ebenfalls verkürzten Entwicklung des Erregers der Weißstängeligkeit (*Sclerotinia sclerotiorum*) durch warme Bodentemperaturen (Siebold & Tiedemann, 2012). Da für die Infektion in der Blühphase über mehrere Stunden Nässe vorhanden sein muss, wird für *Sklerotinia* aber ein tendenziell abnehmendes Risiko beschrieben. Die Besiedlung der Rapspflanzen mit *Verticillium longisporum* könnte in Zukunft erhöht sein, was zu höheren Inokulumdichten (Sporenbesatz im Boden) nach der Ernte und einer größeren wirtschaftlichen Bedeutung dieses Erregers bei einer künftigen Erwärmung führen könnte (Siebold & Tiedemann, 2012).

Bewertung des Klimarisikos

Die Bewertung des Klimarisikos in die Kategorien gering, mittel und hoch für die gesamte Gruppe der Pflanzen mit Bezug auf das Schädigungspotenzial durch Schädlinge und Krankheiten ist nur sehr begrenzt und eingeschränkt möglich. Aus den sehr heterogenen Anforderungen der verschiedenen Krankheitserreger und Schädlinge an die Umweltbedingungen ergeben sich unterschiedliche abzuleitende Risiken. So wird bspw. im Weizen das Risiko einiger Pilzkrankheiten eher abnehmen und anderer zunehmen. Ähnliche Szenarien sind in jeder Kulturart zu beobachten. Um dieser Vielzahl an Faktoren zu begegnen, bedarf es spezifischer Forschung im Bereich Nutzpflanzen-Pathogen/Schädlinge-Interaktion vor dem Hintergrund verschiedener Klimaszenarien. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor für die Bewertung des Risikos ist die unvorhersehbare Verfügbarkeit wirksamer Pflanzenschutzmittel und die grundsätzliche Wirkung bei unterschiedlichen Klimaszenarien. Die dargestellten Klimarisiken stellen demnach lediglich eine sehr oberflächliche Expert:inneneinschätzung dar und müssen mit entsprechender Vorsicht diskutiert werden.

INFO

- Die jeweiligen Standorte und ihre regionalen Fruchtfolgen sorgen lokal für sehr verschiedene Bedingungen in Bezug auf das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten.
- Während einige Pathogene und Schädlinge von wärmeren Temperaturen profitieren könnten, werden andere möglicherweise an Bedeutung verlieren.
- Für Mais ergibt sich durch höhere Temperaturen ein erhöhtes Risiko für bestimmte Pilzkrankheiten, auch manche Schadinsekten profitieren von steigenden Temperaturen.
- Für die Krankheiten Echter Mehltau, Braun- und Gelbrost und Septoria Blattdürre wird ein früheres Auftreten projiziert, was aber nicht unbedingt mit einer stärkeren Epidemie verbunden sein muss.
- Im Winterraps wird für die Schaderreger Kohlflyge und Rapserdflor ein höheres Risiko im Herbst erwartet.
- Für Zuckerrüben- und Kartoffelanbau besteht das Risiko, dass sich wärmeliebende Insekten nach Norden ausbreiten und dort etablieren.
- Aus den sehr heterogenen Anforderungen der verschiedenen Krankheitserreger und Schädlinge an die Umweltbedingungen ergeben sich unterschiedliche abzuleitende Risiken.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 19: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen)“.

3.2.6 Ertragsausfälle

Der Ertrag und die Auswirkungen der zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf selbigen, stellen aus Sicht der landwirtschaftlichen Praxis den bedeutendsten Punkt bei der Klimafolgenabschätzung dar. Dabei sind die Ertragsauswirkungen als Ergebnis der verschiedenen Einflussfaktoren wie biotischer und Abiotischer Stress (Pflanzen), der VERSCHIEBUNG VON VEGETATIONSZEITEN und vielem mehr zu sehen (KAPITEL 3.1.4 und 3.2.4). Bei allen folgenden Ertragsbetrachtungen wird immer der reine physische Ertrag einer Kultur, ausgedrückt als Masse (bei einem gegebenen Trockenmassegehalt) je Flächeneinheit als Bezugsgröße betrachtet. Andere Einheiten wie der Proteinergehalt im Getreide, der Ölgehalt im Raps, der Zuckergehalt bei Zuckerrüben oder die Energieausbeute beim Ackerfütterbau sind im Klimarisiko QUALITÄT DER ERNTEPRODUKTE betrachtet.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Ertragsentwicklung verschiedener Kulturen ist ebenso wie die Ertragsbildung an sich das Ergebnis des Zusammenspiels verschiedener Faktoren. So wirken nicht nur klimatische Veränderungen, sondern auch züchterischer Fortschritt, veränderte Anbaumethoden hinsichtlich Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz oder eine Ausweitung des Anbaus auf unproduktivere Standorte, auf die Ertragsentwicklung einer Kultur ein. Mit Bezug zum Klima und dessen Veränderungen wirken sich verändernde Niederschlagsmengen und -verteilungen, steigende Temperaturen, verlängerte Wachstumsperioden aber auch steigende CO₂-Gehalte in der Atmosphäre auf die pflanzlichen Erträge aus.

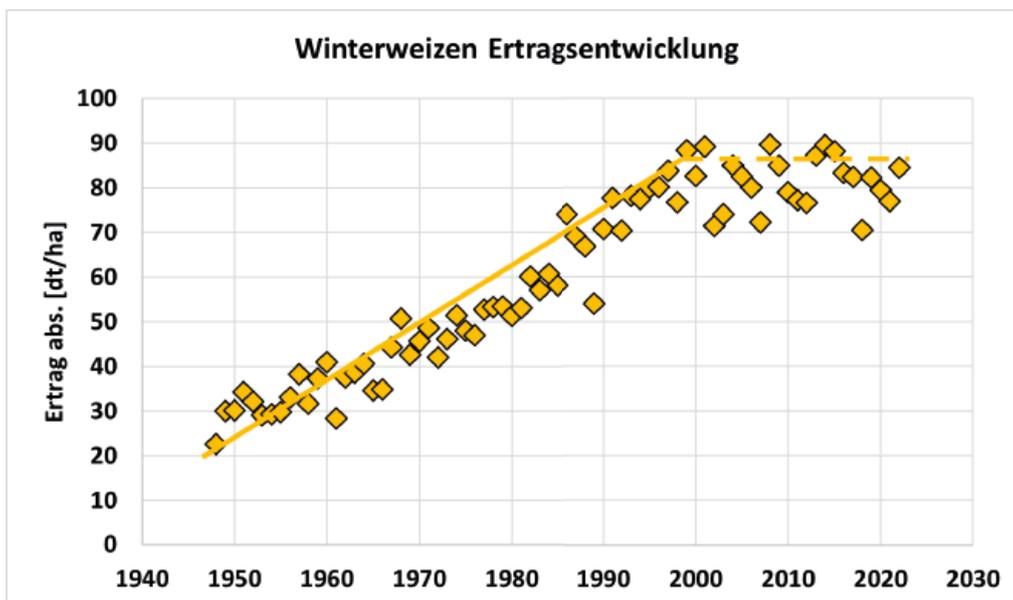


Abbildung 16: Ertragsentwicklungen Winterweizen [dt/ha] der Jahre 1952–2022; verändert nach Daten des Landesamtes für Statistik Niedersachsen (LSN, 2024a).

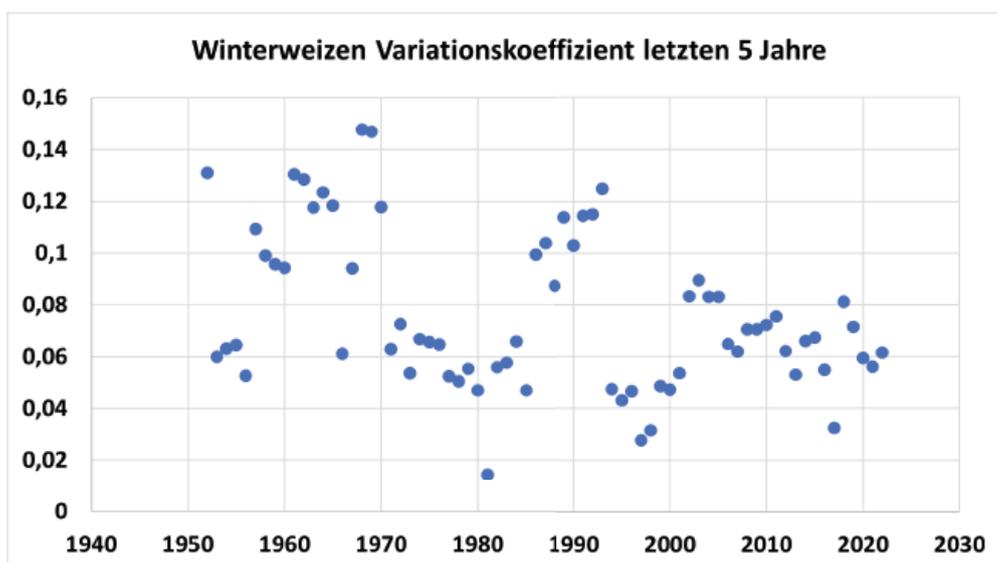


Abbildung 17: Variationskoeffizient von Winterweizen seit 1950, verändert nach den Daten des Landesamtes für Statistik Niedersachsen (LSN, 2024a).

Anhand der Daten des Landesamts für Statistik Niedersachsen lassen sich die teils sehr unterschiedlichen Entwicklungen der verschiedenen Kulturen in Niedersachsen über die letzten 70 Jahre nachvollziehen. Am Beispiel des Winterweizens zeigt sich bei Betrachtung der Ertragsreihe seit den 1950er-Jahren ein deutlicher Anstieg, der durch eine lineare Steigung gut beschrieben wird (Abbildung 16). Werden allerdings die letzten 20 Jahre etwas genauer betrachtet, so wird deutlich, dass sich die Erträge weniger positiv entwickelt haben und eher stagnieren. Ähnliche Beobachtungen sind für andere Getreidearten wie Winterroggen oder Wintergerste, aber auch für Winterraps und Silomais zu beschreiben. Lediglich bei der Zuckerrübe ist nach wie vor ein linearer Ertragszuwachs, auch in den letzten Jahren, zu beobachten (Abbildung 20).

Die oftmals getätigte Vermutung über zunehmende Ertragsschwankungen in Folge von zunehmenden Extremwetterereignissen im Rahmen des Klimawandels lässt sich anhand der Zahlen des statistischen Landesamtes nicht belegen. Der Variationskoeffizient oder auch die relative Standardabweichung der ermittelten Erträge der jeweils letzten fünf Jahre zeigt keine eindeutige Veränderung im zeitlichen Verlauf, so dass nicht auf eine Zunahme von Ertragsschwankungen geschlossen werden kann (Abbildung 17).

In Bezug auf die klimatischen Veränderungen wird in diversen Studien darauf verwiesen, dass es durch die steigenden Kohlenstoffdioxidgehalte in der Atmosphäre zu Ertragssteigerungen kommen wird. Da die Pflanzen das CO₂ für ihre Assimilation benötigen, stellt eine Erhöhung des limitierten Angebotes in einem gewissen Rahmen eine Verbesserung der Produktivität durch eine Erhöhung der Strahlungs- und Wassernutzungseffizienz dar (Diepenbrock et al., 2016; Lobell & Burke, 2010). Die ver-

schiedenen Pflanzenarten reagieren dabei in unterschiedlichem Maße auf einen gesteigerten CO₂-Gehalt in der Luft: So reagieren Pflanzen mit einem C3-Stoffwechsel, wie die meisten unserer heimischen Arten, deutlich positiver darauf als sogenannte C4-Pflanzen, wie z. B. Mais. Letztere haben physiologisch bereits ein deutlich effizienteres CO₂-Aufnahmesystem als C3-Pflanzen, wodurch eine weitere Erhöhung des Gehaltes in der Luft nicht zu weiteren großen Produktivitätssteigerungen führt (Diepenbrock et al., 2016; Drake et al., 1997; Lobell & Burke, 2010). Diese Entwicklungen werden durch sogenannte FACE Versuche (Free-Air CO₂ Enrichment) bestätigt, bei denen unter sonst gleichen äußeren Bedingungen die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen in der Luft geprüft werden.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Durch den Effekt der steigenden CO₂-Konzentration in der Luft werden in vielen Studien insgesamt für Europa und Deutschland steigende Erträge projiziert, jedoch mit großen Unterschieden zwischen verschiedenen Regionen und Kulturarten. Abzuwägen ist dabei jedoch der Einfluss weiterer Einflussgrößen, wie die Wasserversorgung, die einen größeren Effekt auf die Erträge ausüben können (IPCC, 2019a). Anhand der Ertragsprojektionen des Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V. (ZALF) im Rahmen des KlimErtrags Projektes wurden explizit nur die niedersächsischen Projektionen berechnet und die erwarteten relativen Ertragsveränderungen modellhaft in den Jahren 2050 und 2100 im Vergleich zu 2020 dargestellt (Tabelle 20).

Das europäische Projekt PREAR (Pocock, 2020) zeigt in den Prognosen teils abweichende, teils vergleichbare Entwicklungen für die Erträge in Niedersachsen.

Kultur/Jahr	2050 (Mitte des Jahrhunderts)	2100 (Ende des Jahrhunderts)
Winterweizen	-1,2	+0,5
Wintergerste	+9,3	+5,8
Winterroggen	-12,4	-6,5
Sommergerste	+11,9	+20,8
Winterraps	+11,1	+16,7
Silomais	-13,0	-1,4
Kartoffel	-7,6	+7,9
Zuckerrübe	+13,5	+20,5

Tabelle 20: Errechnete mittlere rel. Ertragsveränderung gegenüber 2020; nach Söder et al. (2022).

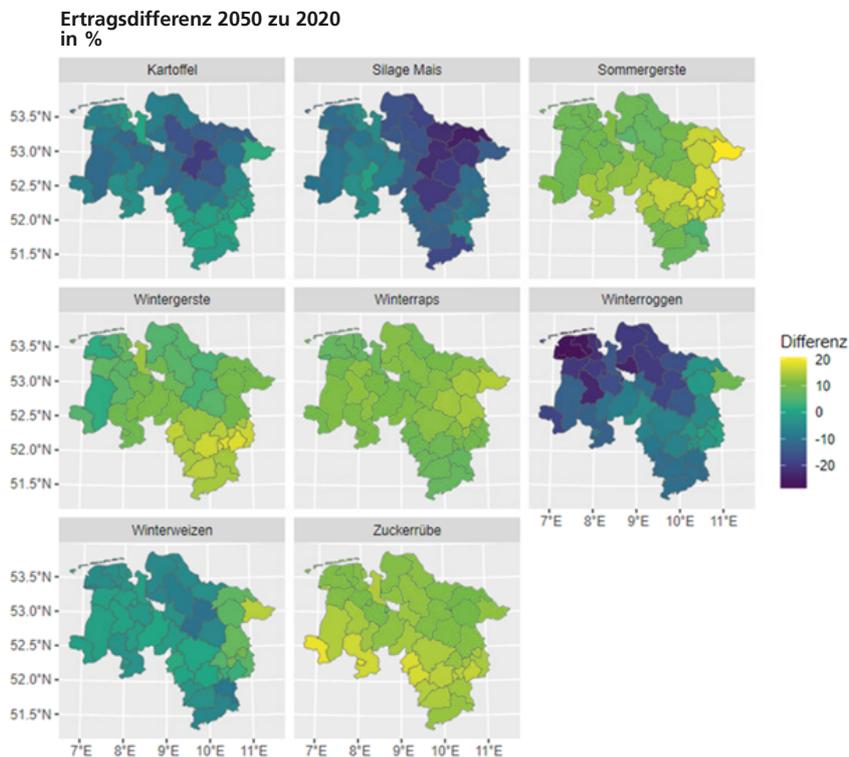


Abbildung 18: Ertragsdifferenzen in Niedersachsen im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2020 für unterschiedliche Kulturen, eigene Darstellung nach Söder et al. (2022).

Im Vergleich zu den bundesweiten Ergebnissen der Studie des ZALF wird deutlich, dass Niedersachsen eher negativ vom Klimawandel betroffen sein wird. So werden bundesweit bis Mitte des Jahrhunderts beim Winterweizen Ertragsfortschritte von bis zu 10 % und mehr projiziert, während in einigen Regionen besonders in Ostdeutschland sogar bis zu 25 % Ertragssteigerungen vorhergesagt werden. In Niedersachsen hingegen werden für Mitte des Jahrhunderts durchschnittlich leichte Ertragsrückgänge projiziert, wobei sich eine sehr unterschiedliche regionale Betroffenheit auch innerhalb Niedersachsens erwarten lässt (Abbildung 18, Abbildung 19). Die Gründe für diese unterdurchschnittliche Entwicklung werden vor allem in den veränderten Niederschlagsverteilungen in Verbindung mit den örtlichen Bodeneigenschaften gesehen. So werden allgemein höhere Niederschlagsmengen über die Wintermonate projiziert. Auf schweren, tiefgründigen Böden,

wie sie in einigen Bereichen Ostdeutschlands vorliegen, sorgt dies für eine Auffüllung der Bodenwasservorräte, was aktuell nicht in jedem Jahr gesichert ist.

Von diesen höheren Vorräten können die Pflanzen dann während der Vegetation auch in Trockenphasen lange zehren. Auf leichteren Standorten wie sie in weiten Teilen Niedersachsens vorherrschen, können die gesteigerten Niederschlagsmengen im Winter hingegen nicht zusätzlich im Boden gespeichert werden und bringen somit keinen zusätzlichen Vorteil. Dadurch leiden die Pflanzen schneller unter Wassermangel und können den Vorteil gesteigerter CO_2 -Gehalte weniger gut in Ertragssteigerungen umsetzen. Auch hierbei wird es aber innerhalb Niedersachsens große Unterschiede geben, abhängig von der Bodengüte und den genau zu erwartenden Veränderungen bei der Niederschlagsverteilung.

INFO

- Neben klimatischen Änderungen haben züchterischer Fortschritt, veränderte Anbaumethoden, Düngung und Pflanzenschutz Einfluss auf die Ertragsentwicklung einer Kultur.
- In den letzten 20 Jahren stagnieren die Erträge bei Getreide, Winterraps und Silomais. Lediglich bei der Zuckerrübe ist ein linearer Ertragszuwachs zu beobachten.
- Die Vermutung über steigende Ertragsschwankungen durch Extremwetterereignisse lässt sich anhand von LSN-Zahlen nicht belegen.
- Durch den Effekt der steigenden CO_2 -Konzentration in der Luft werden in vielen Studien insgesamt für Europa und Deutschland steigende Erträge prognostiziert.
- Besonders hervorzuheben ist, dass für Kartoffeln und Silomais in Niedersachsen deutlich negative Ertragsentwicklungen zu erwarten sind.

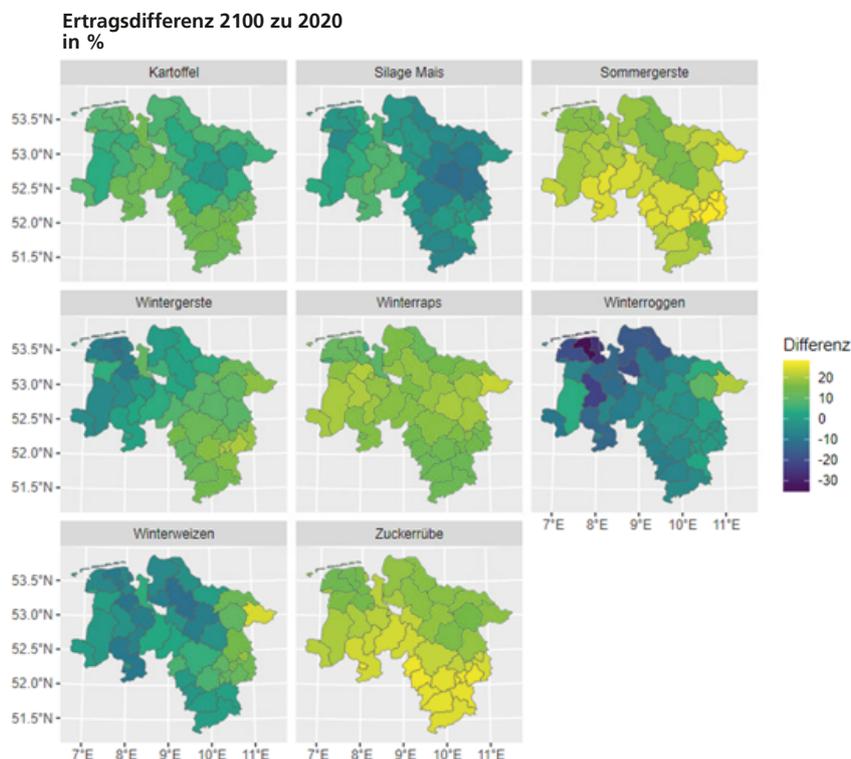


Abbildung 19: Ertragsdifferenzen in Niedersachsen im Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 für unterschiedliche Kulturen, eigene Darstellung nach Söder et al. (2022).

Bewertung des Klimarisikos

Bei den betrachteten Kulturen, wie Winter- und Sommergerste sowie Winterraps und Zuckerrüben werden für Niedersachsen ähnliche Ertragssteigerungen projiziert wie im Bundesdurchschnitt. Winterroggen, Kartoffeln und Silomais hingegen zeigen für Niedersachsen deutlich negative Ertragsentwicklungen, während diese im Bundesdurchschnitt neutral bis schwach positiv ausfallen. Betrachtet man die große Anbaubedeutung besonders von Mais und Kartoffeln in Niedersachsen, ist diese Prognose besonders hervorzuheben.

Bemerkenswert ist, dass bei allen Kulturen mit Ausnahme der Wintergerste für das Ende des Jahrhunderts teils deutlich positivere Ertragsentwicklungen vorhergesagt

werden als zur Mitte des Jahrhunderts. Eine Erklärung für diese Beobachtung lässt sich anhand der verfügbaren Daten der Studie nicht zweifelsfrei geben und bedürfte weiteren Untersuchungen.

Weitere Studien wie beispielsweise das europäische Projekt PREAR (Pocock, 2020) zeigen in den Prognosen teils abweichende, teils vergleichbare Entwicklungen für die Erträge in Niedersachsen. Dies verdeutlicht die große Unsicherheit, mit denen Ertragsprojektionen nach wie vor verbunden sind, da die Wechselwirkungen der verschiedenen sich verändernden positiven und negativen Einflussfaktoren noch nicht zweifelsfrei vorhergesagt werden können.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 21: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Ertragsausfälle“.

3.2.7 Qualität der Ernteprodukte

Je nach Kulturart sind verschiedene Parameter für die Qualitätsbewertung der Ernteprodukte relevant. Während bei Obst und Gemüse, die hier nicht betrachtet werden, auch der äußeren Beschaffenheit und Unversehrtheit eine große Bedeutung zukommt, sind bei den klassischen Marktfrüchten im Ackerbau zumeist die Gehalte verschiedener Inhaltsstoffe qualitätsbestimmend. Darüber hinaus können Kontaminationen mit unerwünschten Inhaltsstoffen beispielsweise in Folge von Pilzinfektionen (Mutterkorn oder Fusarium) die Qualitäten mindern (Hallmann et al., 2009).

Hintergrund und Stand der Forschung

Die wertgebenden Inhaltsstoffe und deren Reaktion auf klimawandelbedingte Veränderungen ist in großem Maße abhängig von der betrachteten Kulturart und Verwertungsrichtung. Während beim Getreide zumeist der Proteingehalt betrachtet wird, ist es bei Ölfrüchten entsprechend der Ölgehalt, bei der Zuckerrübe der Zuckergehalt und bei Kartoffeln je nach Verwertungsrichtung der Stärkegehalt oder hier vermehrt die äußere und innere Beschaffenheit. Beim Mais ist je nach Verwertungsrichtung (Silo- oder Körnermais, Tierernährung oder Energieerzeugung) neben dem Protein- auch der Stärkegehalt entscheidend (Diepenbrock et al., 2016). Darüber hinaus gibt es bei allen genannten Kulturen noch viele weitere Qualitätsmerkmale, wie in Zuckerrüben die Gehalte unerwünschter Melassebilder oder im Weizen die Aktivität der Alpha-Amylase. Im Folgenden soll sich in Bezug auf die klimawandelbedingten Auswirkungen auf die zuvor beschriebenen Hauptqualitätsmerkmale fokussiert werden.

Die Gehalte qualitätsrelevanter Inhaltsstoffe sind das Resultat verschiedener Einflussfaktoren, nicht zuletzt auch des Züchtungsfortschrittes, sodass eine isolierte Wirkungsbetrachtung einzelner Faktoren schwierig ist. Bei einer Beeinträchtigung der physiologischen Entwicklung durch die beschriebenen Klimabedingungen kann auch die Einlagerung von Inhaltsstoffen bzw. die Umsetzung innerhalb der Pflanzen gehemmt sein.

Am Beispiel der Zuckerrübe lässt sich anhand der Auswertungen des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ) darstellen, dass innerhalb der letzten 40 bis 50 Jahre zwar große Fortschritte beim Rübenenertrag erreicht wurden, die Zuckergehalte über die Jahre bei den neu zugelassenen Sorten aber konstant geblieben sind (Abbildung 20).

Als Qualitätsmerkmal im Getreide gilt der Proteingehalt. Hier muss neben den oben allgemein beschriebenen multifaktoriellen Zusammenhängen noch ein weiterer Punkt berücksichtigt werden. Da die Proteinkonzentration im Erntegut wesentlich von dem der Pflanze zur Verfügung stehenden Stickstoffangebot abhängig ist, kommt hierbei der Stickstoffdüngung eine entscheidende Bedeutung zu (Diepenbrock et al., 2016). Die Stickstoffdüngung stand in den letzten Jahren immer stärker im Fokus umweltpolitischer Diskussionen. Aus diesem Grund haben sich hier umfangreiche Veränderungen bei gesetzlichen Vorgaben und somit der Düngungspraxis ergeben. Durch die vorgegebenen Begrenzungen der Stickstoffdüngung wird bereits heute in der Praxis intensiv diskutiert, ob hiermit besonders beim Weizen die geforderten Proteingehalte erreicht werden können.

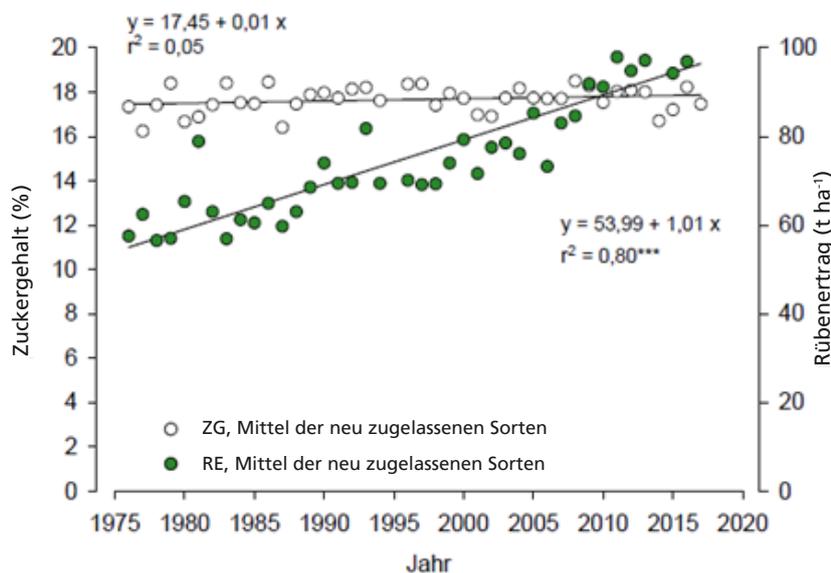


Abbildung 20: Zuckergehalt und Rübenenertrag im Mittel der neu zugelassenen Sorten. Wertprüfungen des Bundessortenamtes 1976–2017. Darstellung: IfZ (2018)

Der Weizen nimmt hierbei in mehrerlei Hinsicht eine besondere Position ein. Einerseits ist gerade beim Weizen der Proteingehalt mit entscheidend für die Backqualität, zum anderen benötigt Weizen für die Proteinbildung durch sein spezielles Aminosäuremuster besonders hohe Stickstoffmengen im Vergleich zu anderen Getreidearten (Diepenbrock et al., 2016).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Für die Zukunft wird die Herausforderung entsprechend vorgegebene Produktqualitäten zu erreichen, nach aktuellen Versuchsergebnissen und Projektionen noch größer. Durch Ertragssteigerungen in Folge der Klimaveränderungen (höhere CO₂-Konzentration und Temperaturen) wird bei gleichbleibender Stickstoffdüngung von einem Verdünnungseffekt in der Pflanze ausgegangen, der zu geringeren Proteingehalten im Erntegut führt (Lobell & Burke, 2010). Die global geschätzten Rückgänge in den Proteingehalten um -14 % erscheinen bei Berücksichtigung der für Niedersachsen projizierten marginalen Ertragsveränderungen beim Winterweizen zu hoch. Deshalb kann hier davon ausgegangen werden, dass Niedersachsen weniger stark von der Proteinverdünnung betroffen sein wird. Bei anderen Qualitätskriterien wie dem Öl- oder dem Zuckergehalt spielt die Stickstoffverdünnung eine deutlich geringere Rolle, da Stickstoff nicht Bestandteil der relevanten Speicherformen für Öl oder Zucker ist.

Neben den Effekten erhöhter CO₂-Gehalte spielen aber auch die weiteren sich verändernden Wachstumsbedingungen, wie insbesondere die Temperatur, eine wichtige Rolle bei der Qualitätsbetrachtung. So wird allgemein davon ausgegangen, dass steigende Temperaturen zu höheren Proteingehalten im Getreide, geringeren Ölgehalten im Raps und geringeren bereinigten Zuckergehalten bei Zuckerrüben führen werden (G. Brasseur et al., 2024). Darüber hinaus sinkt bei Wassermangel die äußere und innere Qualität der Kartoffeln und allgemein kann der Transport der Nährstoffe innerhalb der Pflanze nicht ausreichend aufrechterhalten werden.

Bewertung des Klimarisikos

Die Qualität der Ernteprodukte wird durch die Klimawirkungen sowohl negativ als auch positiv beeinflusst werden. Dabei ist es von Bedeutung, welche Kulturen betrachtet und welche Qualitätsparameter beurteilt werden. Unter einer pessimistischen Betrachtung treten für mehrere der hauptsächlich in Niedersachsen angebauten Kulturen negative Auswirkungen auf, wohingegen in der optimistischen Variante die Vorteile durch einen höheren CO₂-Gehalt und die projizierten Ertragssteigerungen überwiegen.

INFO

- Bei den klassischen Marktfrüchten im Ackerbau sind zumeist die Gehalte verschiedener Inhaltsstoffe, wie z. B. der Proteingehalt oder der Ölgehalt qualitätsbestimmend.
- Der Gehalt qualitätsrelevanter Inhaltsstoffe wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, u. a. dem Züchtungsfortschritt.
- Für die Zukunft wird die Herausforderung, vorgegebene Qualitätsstandards zu erreichen, noch größer werden.
- Je nach Kultur und entsprechend zu betrachtendem Qualitätsparameter können sich die Klimawirkungen positiv und negativ auf die Qualität der Produkte auswirken.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Gering	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 22: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Qualität der Ernteprodukte“.



WALD- UND FORSTWIRTSCHAFT

3.3 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Wälder stellen eine Vielzahl von Ökosystemleistungen bereit und sind daher von elementarer Bedeutung für die Menschen und die Umwelt in Niedersachsen. Darunter fallen u.a. die Erzeugung von Holz und anderen Produkten des Waldes, die Kohlenstoffspeicherung, die Funktion als Lebensraum für Pflanzen, Pilze und Tiere, die Bereitstellung von Arbeitsplätzen, aber auch die Filterung und Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Wasser sowie die Nutzung von Wäldern für die Erholung, den Tourismus und spirituelle Zwecke. Sie erfüllen wichtige Klimaschutzleistungen und sind gleichzeitig durch den Klimawandel in ihren Funktionen gefährdet.

Wälder bedecken etwa 1,2 Mio. ha und damit 25 % der Fläche Niedersachsens. Schwerpunkte der Waldflächen sind das niedersächsische Bergland mit Harz und Solling sowie das ostniedersächsische Tiefland, während das westniedersächsische Tiefland eher waldarm ist. Die wichtigsten Baumarten sind die Kiefer (29 %), die Buche (15 %), die Eiche (14 %) und die Fichte (12 %), die nur noch zu etwa einem Fünftel als Reinbestände stocken, meist aber in Mischung auch mit weiteren Baumarten vorkommen. Die überwiegenden Waldflächen sind im Privatbesitz (58 %), während der Landeswald (20 %), der Körperschaftswald (10 %) sowie der Bundeswald (4 %) geringere Flächenanteile einnehmen (ML, 2024a).

Der Klimawandel wirkt auf die Wälder insbesondere durch erhöhte Temperaturen und ein verändertes Niederschlagsregime. Hierbei kommt Extremereignissen wie langanhaltende Dürren, Stürme, Starkregen, Spätfröste oder Hitzeperioden eine besondere Bedeutung zu. Solche Extremereignisse werden sich zukünftig voraussichtlich in ihrer Häufigkeit und ihrem Ausmaß verstärken. Erhöhte Temperaturen bewirken in der Regel verbesserte Wachstumsbedingungen. Durch eine Verlängerung der Vegetations-

perioden können potenziell größere jährliche Wachstumsraten erzielt werden. Gleichzeitig steigt der Wasserbedarf für die Verdunstung, so dass das Risiko eingeschränkter Wasserverfügbarkeit besteht. Eine Verlagerung der Niederschlagsverteilung mit höheren Niederschlägen in der Nichtvegetationsperiode, aber geringeren Niederschlägen in der Vegetationsperiode kann ebenso zu einer eingeschränkten Wasserverfügbarkeit beitragen. Durch die höhere CO₂-Konzentration in der Atmosphäre kann jedoch die Wassernutzungseffizienz gesteigert werden und damit bei gleicher CO₂-Aufnahme der Bäume der Wasserverbrauch reduziert werden. In den vergangenen zehn Jahren (2012–2022) fiel der Zuwachs der Bäume in Niedersachsen deutlich geringer aus als in der davorliegenden Dekade. Das wird auf die Vitalitätsverluste des Waldes in Folge der Dürre- und Schadereignisse zurückgeführt (ML, 2024a).

Zu den wichtigsten Gefährdungen der Wälder in Niedersachsen gehören Dürren, Stürme, Massenvermehrungen von Insekten, sonstige Pathogene, Waldbrand sowie Frost- und Schneeeinwirkungen. Diese Risiken werden in der Regel alle direkt, indirekt oder über Interaktionen untereinander durch den Klimawandel verstärkt, während nur in Ausnahmefällen eine Abschwächung eintritt (Seidl et al. 2017). Hierbei kommt der Wasserverfügbarkeit für die Wälder eine Schlüsselrolle zu, da alle Vitalitätsfunktionen unmittelbar an eine ausreichende Wasserversorgung der Bäume gekoppelt sind. Dementsprechend ist die Wasserverfügbarkeit ein entscheidender Indikator für die Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen wie dem Anbau von klimastabilen Baumarten. Aus den Waldfunktionen und den von Wäldern bereitgestellten Ökosystemleistungen ergeben sich enge Beziehungen zu den Handlungsfeldern **HANDLUNGSFELD BODEN UND TROCKENSTRESSRISIKO IM WALD**.

INFO

- Wälder stellen eine Vielzahl an Ökosystemleistungen bereit – u. a. Lebensraum für Pflanzen, Pilze und Tiere und Kohlenstoffspeicherung.
- Der Klimawandel wirkt insbesondere durch höhere Temperaturen und veränderten Niederschlag auf die Wälder. Extremwetterereignisse wie Dürren oder Starkregen haben besonderen Einfluss.

3.3.1 Trockenstressrisiko im Wald

Für die Vitalität und das Wachstum der Waldbestände ist eine ausreichende Wasserversorgung in der Vegetationsperiode von ausschlaggebender Bedeutung (KAPITEL 3.1.1). Zeigen sich Veränderungen hin zu einem geringeren Wasserangebot, steigt das Risiko von Trockenstress. Die Standortwasserbilanz (SWB) als Summe der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser beschreibt das Wasserangebot und ist ein geeigneter Indikator für den langfristigen Trockenstress von Waldbeständen (Spellmann et al., 2007). Die Klimatische Wasserbilanz ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung für eine einheitliche Grasbedeckung (KAPITEL 2.2.3).

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Durch Trockenstress wird einerseits das Wachstum der Bäume und deren Vitalität reduziert, andererseits erhöht sich die Absterberate der Bäume (Spellmann, 2017; Suttmöller et al., 2017; Wagner et al., 2019). Eine aufgrund von Trockenheit geschwächte Vitalität kann auch eine auslösende Ursache für biotische Schädigungen der Bäume sein (Langer et al., 2020; Overbeck & Schmidt, 2012). Baumartenspezifisch beginnt ein Risiko für Trockenstress bei negativen Werten der SWB. Eine abnehmende Standortwasserbilanz kann ein Anlass sein, um ggf. Anpassungsmaßnahmen (z. B. Waldumbau oder Durchforstungsmaßnahmen) auszulösen.

Trockenstressrisiko	Fichte	Buche	Eiche/ Douglasie	Kiefer
gering	> 0 mm	> -50 mm	> -150 mm	> -200 mm
mittel	0 bis -80 mm	-50 bis -100 mm	-150 bis -350 mm	-200 bis -450 mm
hoch	< -80 mm	< -100 mm	< -350 mm	< -450 mm

<ul style="list-style-type: none"> - Roterle - Moorbirke 	<ul style="list-style-type: none"> - Weißtanne - Japanlärche - Bergulme - Schwarznuss 	<ul style="list-style-type: none"> - Roteiche - Ahornarten - Esche - Hainbuche - Linde - Europ. Lärche - Küstentanne 	<ul style="list-style-type: none"> - Sandbirke - Schwarzkiefer
--	---	---	--

Abbildung 21: Grenzwerte der Standortwasserbilanz für das Trockenstressrisiko der wichtigsten Baumarten in Niedersachsen (Böckmann et al., 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden die Temperaturen weiter ansteigen und damit die Verdunstungsleistung der Vegetation zunehmen. Im pessimistischen Fall werden die Klimatische Wasserbilanz und damit auch die SWB je nach Region um bis zu -175 mm niedriger im Vergleich zum Bezugszeitraum projiziert. Unter Annahme des optimistischen Falls sind nur leichte Veränderungen der SWB zu erwarten. Dies wird durch die Zunahme der Niederschläge in der Vegetationsperiode bei gleichzeitiger Erhöhung der Verdunstungsraten verursacht.

Am Ende des Jahrhunderts wird sich die SWB voraussichtlich weiter deutlich verschlechtern. Im Vergleich zum Bezugszeitraum wird sich die SWB im pessimistischen Fall

je nach Klimaregion um bis zu -250 mm verringern. Im optimistischen Fall würde die SWB dagegen nur leicht um bis zu rund -50 mm abnehmen.

Auch die Studie von Spellmann et al. (2017) in den Landkreisen Diepholz und Uelzen geht von einer geringfügigen Zunahme des Trockenstressrisikos bis Mitte des Jahrhunderts aus. Betroffen werden vorwiegend die Baumarten Fichte und Buche sein. Nach Suttmöller et al. (Suttmöller et al., 2021) wird die Produktivität von Waldbeständen mit Buche, Eiche und Kiefer bis Mitte des Jahrhunderts leicht und bis Ende des Jahrhunderts stärker abnehmen. Die waldbauliche Planung in Niedersachsen berücksichtigt bei den Baumartenempfehlungen schon jetzt die zu erwartende Entwicklung der SWB bis Ende des Jahrhunderts (Böckmann et al., 2019).

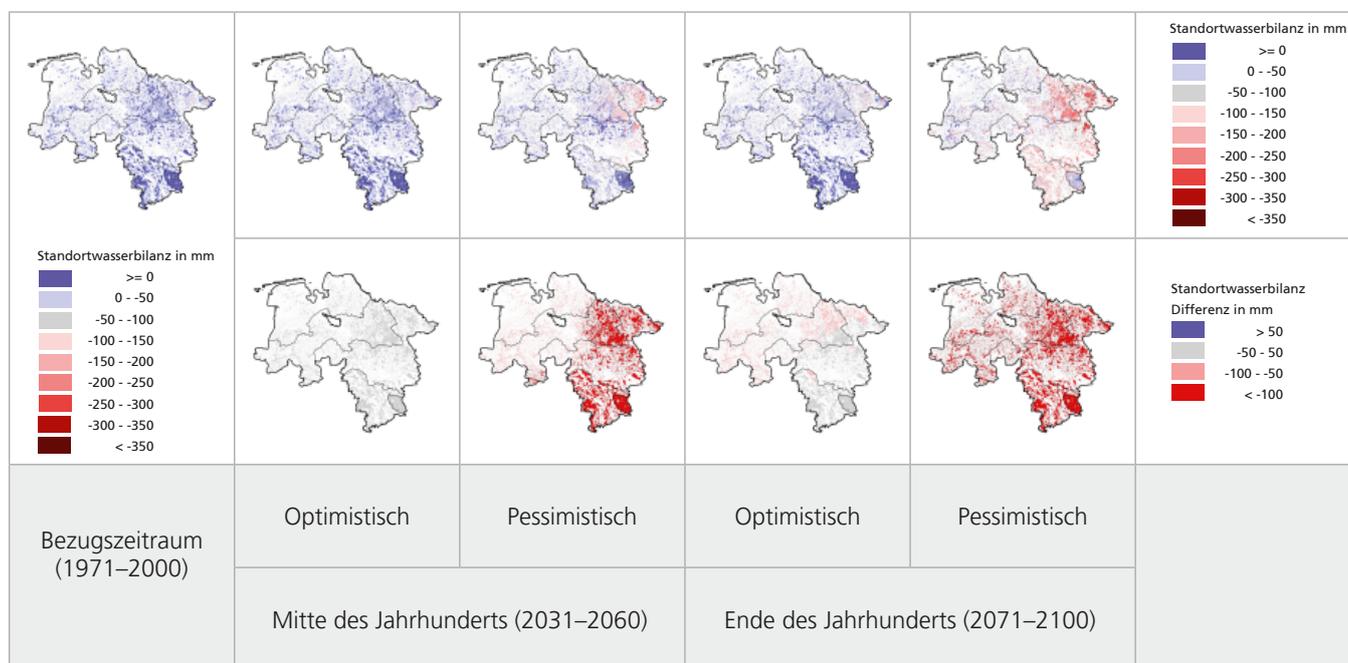


Abbildung 22: Standortwasserbilanz in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Klimaregion	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Maritim	164 mm	-18 mm	-73 mm	-68 mm	-175 mm
Maritim-Subkontinental	86 mm	-10 mm	-101 mm	-60 mm	-207 mm
Subkontinental	61 mm	+4 mm	-125 mm	-42 mm	-228 mm
Submontan	112 mm	+3 mm	-150 mm	-30 mm	-250 mm
Montan	219 mm	+17 mm	-175 mm	±0 mm	-272 mm

Tabelle 23: Mittelwerte der Standortwasserbilanz im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Klimaregionen (KAPITEL 2.3.1).

INFO

- Für die Vitalität und das Wachstum der Waldbestände ist eine ausreichende Wasserversorgung in der Vegetationsperiode elementar. Bei einem zu geringen Wasserangebot steigt das Risiko für Trockenstress.
- Schon unter aktuellen klimatischen Bedingungen sind die Werte der Standortwasserbilanz in einigen Regionen kritisch für trockenheitsempfindliche Baumarten.
- Ende des Jahrhunderts wird sich auch im optimistischen Fall die Standortwasserbilanz verschlechtern; im Mittel ist aber noch eine positive Bilanz zu erwarten.

Bewertung des Klimarisikos

Schon unter den aktuellen klimatischen Bedingungen sind in Niedersachsen in einigen Regionen Werte der Standortwasserbilanz zu verzeichnen, die als kritisch für trockenheitsempfindliche Baumarten wie Fichte und Buche einzuschätzen sind, während für trockenstressresistentere Baumarten wie Eiche und Kiefer in allen Regionen noch zuträgliche Wachstumsbedingungen zu verzeichnen sind. Daher wird für Niedersachsen in der Gegenwart von einem mittleren Klimarisiko ausgegangen.

In der Mitte des Jahrhunderts sind unter Berücksichtigung des optimistischen Falls nur geringfügige Änderungen der SWB zu erwarten, weshalb ein gleichbleibend mittleres Klimarisiko angenommen wird. Nach dem pessimistischen Klimamodell verschlechtert sich die SWB deutlich bis in Bereiche, die auch für weniger dürreempfindliche Baumarten ein mittleres bis hohes Risiko darstellen. Das Klima-

risiko wird für diesen Fall als hoch eingestuft. Die Qualität der Klimaprojektionen wird als relativ zuverlässig angenommen, während bei der Einschätzung der Baumarten hinsichtlich ihrer Dürreempfindlichkeit noch größere Unsicherheiten bestehen. Deshalb wird die Gewissheit dieser Annahmen insgesamt als mittel eingestuft.

Am Ende des Jahrhunderts wird sich auch im optimistischen Fall die SWB verschlechtern. Im Mittel ist aber für alle Klimaregionen in Niedersachsen noch eine positive SWB zu erwarten, weshalb weiter von einem mittleren Klimarisiko ausgegangen wird. Im pessimistischen Fall würde sich die SWB deutlich verschlechtern und in allen Klimaregionen im Mittel im negativen Bereich liegen. Damit wäre von einem hohen Klimarisiko auszugehen. Die Gewissheit dieser Annahmen ist aufgrund des längeren Projektionszeitraumes etwas unsicherer, wird aber insgesamt noch als mittel eingestuft.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 24: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Standortwasserbilanz“.



4 Cluster Wasser

4.1 Handlungsfeld Fischerei

- 4.1.1 Kommerzielle Fischbestandsänderung in der südlichen Nordsee
- 4.1.2 Auswirkungen auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland
- 4.1.3 Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur

4.2 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

- 4.2.1 Meeresspiegelanstieg
- 4.2.2 Sturmflut
- 4.2.3 Seegang
- 4.2.4 Küstennahe Strömungen
- 4.2.5 Entwicklung des Wattenmeers
- 4.2.6 Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer
- 4.2.7 Küstennahe Grundwasserversalzung
- 4.2.8 Geschützte Niederungsgebiete der Festlandsküste
- 4.2.9 Entwässerung der Küstenniederungen
- 4.2.10 Belastung auf den Insel- und Küstenschutz

4.3 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

- 4.3.1 Hochwasser
- 4.3.2 Starkregen
- 4.3.3 Vernässung durch Grundwasser
- 4.3.4 Grundwasserhochstand
- 4.3.5 Niedrigwasser
- 4.3.6 Grundwasserdürre
- 4.3.7 Grundwassertiefstand
- 4.3.8 Mangel an Bewässerungswasser
- 4.3.9 Talsperrenbewirtschaftung
- 4.3.10 Grundwasserqualität



FISCHEREI

4.1 Handlungsfeld Fischerei

Die Gesamtproduktion des deutschen Fischereisektors von 203.000 t (Stand 2023) setzt sich zusammen aus ca. 166.000 t Anlandungen der Hochsee- und Küstenfischerei, 35.184 t Aquakulturproduktion und 2.106 t aus der Binnenfischerei. Damit liegt der derzeitige Eigenversorgungsgrad bei ca. 19 % (FIZ, 2024). Die möglichen Entwicklungen der Fischerei in Niedersachsen werden im Folgenden für die Seefischerei (hier die Kleine Hochsee- und Küstenfischerei) und Binnenfischerei/Aquakultur eigenständig betrachtet und bewertet. Zumal die Auswirkungen des Klimawandels in marinen Ökosystemen nicht zwangsläufig vergleichbar sind mit denen in limnischen Ökosystemen bzw. in der Aquakultur. Weithin findet die niedersächsische Seefischerei nicht ausschließlich an der niedersächsischen Küste statt, daher sollte die Betrachtung der möglichen Klimafolgen nordseeweit und damit zumindest staatenübergreifend beurteilt werden.

Veränderungen im Klima, maßgeblich die Temperaturerhöhung, wirken sich auf die gesamte **Nordsee** aus, wobei die Auswirkungen auf Ökosysteme (küstenferne/küstennahe) jedoch räumlich stark variieren können. Das Wattenmeer zum Beispiel erwärmt sich, im Vergleich zu anderen Küstenregionen schneller (Buschbaum et al., 2024, KAPITEL 4.2.5). Dies hat vor allem einen Einfluss auf wechselwarme Organismen, wie Fische. Konkret beschäftigen sich jedoch nur wenige Fachartikel mit den Folgen des Klimawandels auf die deutsche Fischerei, eine gesonderte Betrachtung einzelner Bundesländer ist daher nicht möglich und sinnvoll. Eine verlässliche Abschätzung der klimabedingten Entwicklung der kommerziellen Fischerei ist immer mit hohen Unsicherheiten behaftet. Denn nicht nur die Betrachtung der Veränderungen von Meerestemperaturen, sondern deren Einfluss auf das Nahrungsnetz und weitere komplexe Strukturen, wie der Hydrodynamik sind notwendig. Die positive Entwicklung einer Fischart kann zum Beispiel erheblich negative Folgen auf die Fischerei haben, wenn diese Art als Räuber die kommerziell genutzten Bestände dezimiert.

Neben dem Klimawandel beeinflusst die **Kleine Hochsee- und Küstenfischerei** in Niedersachsen der fehlende Nachwuchs in den Fischereibetrieben, eine veraltete Flotte, vorrangig in der Krabbenfischerei und zunehmende Nutzungskonflikte durch Gebietssperrungen oder Veränderungen der marinen Lebensräume. Zusätzlich müssen mögliche Auswirkungen des Klimawandels nicht nur bei Fischarten direkt, sondern auch auf anderen Skalen betrachtet werden. Durch die Erwärmung kommt es zu einem Anstieg des Meeresspiegels, wodurch sich die Küstenmorphologie verändern kann, was zu einer Veränderung wichtiger

Lebensräume führen kann, wie z. B. den Rückgang von Seegrasswiesen, welche als Kohlenstoffspeicher fungieren (Buschbaum et al., 2024, KAPITEL 4.2.1). Ebenso kann die Erwärmung bestehende Interaktionen zwischen etablierten Arten entkoppeln, wodurch sich bestehende Räuber-Beute-Dynamiken auflösen. Kälteliebende Arten werden dabei häufig von wärmeliebenden, nicht heimischen Arten verdrängt. Diese direkten Veränderungen, wie Meeresspiegelanstieg, Erwärmung und veränderte Hydrodynamik (Buschbaum et al., 2024, KAPITEL 4.2.5) haben ebenso einen signifikanten Einfluss auf den Fischereisektor, wie auch die indirekten Veränderungen des Nahrungsnetzes durch das begünstigte Einwandern von nichtheimischen Arten.

Die niedersächsischen **Binnengewässer** erstrecken sich von den quelligen Hochlagen im Harz bis zur Nordseeküste und erfahren eine vielfältige fischereiliche Nutzung. Im Jahr 2022 wurden ca. 12.800 ha der insgesamt rund 100.000 ha umfassenden Wasserfläche durch 28 Fluss- und Seenfischereibetriebe bewirtschaftet und 65 t Fisch entnommen. Dabei entfielen ca. 23,1 % der gesamten Anlandemenge auf den europäischen Aal, 16,9 % auf Brassen und 10,8 % auf Zander sowie Wollhandkrabben (Brämick & Schiewe, 2023). Die wesentlichen Fanggebiete befinden sich in den Flussgebieten Weser und Elbe sowie den beiden großen Flachlandseen Dümmer und Steinhuder Meer. Neben der Fluss- und Seenfischerei entnahmen die ca. 250.000 erfassten Fischereischeinhaber:innen (Angler:innen) weitere 650 t Fisch aus den niedersächsischen Oberflächengewässern, was in Summe bezogen auf die Gesamtwasserfläche von 100.000 ha einem Flächenertrag von 7,15 kg/ha entspricht.

Der binnenfischereiliche Ertrag wird durch 105 aktive **Aquakulturbetriebe** auf 3.478 t ergänzt (Abbildung 23). Die Produktionsformen reichen von traditionellen Karpfenteichwirtschaften in den Niederungen über Durchflussanlagen zur Salmonidenproduktion in quelligen Hochlagen bis hin zu in Hallen untergebrachten und standortunabhängigen technischen Kreislaufanlagen zur Produktion Europäischer Aale, Europäischer Welse, Zander u. v. a. m.

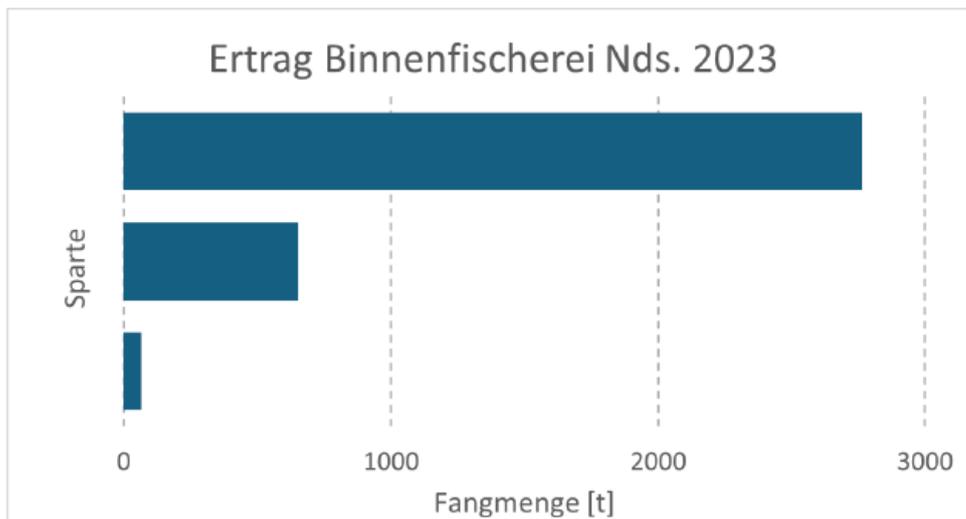


Abbildung 23: Produktionskennzahlen Binnenfischerei u. Aquakultur Niedersachsen 2022 Quelle: Brämick, 2023.

Neuere Entwicklungen

Nach der Corona-Pandemie und den damit einhergegangenen Einschränkungen für die Fischerei hatten die Folgen des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine weitreichende wirtschaftliche Folgen. Die zunächst stark gestiegenen Treibstoffpreise, wie auch die gestiegenen Betriebskosten konnten zwar durch ein staatliches Beihilfenprogramm etwas abgemildert werden, dennoch waren die letzten Jahre wirtschaftlich fordernd für die niedersächsischen Fischereibetriebe. Die zusätzlichen Gebietseinschränkungen durch den Brexit und den Ausbau der erneuerbaren Energien auf See sowie die benötigten Kabeltrassen durch das Küstenmeer Niedersachsens führen sowohl für die Kleine Hochsee- als auch die Küstenfischerei zu Beeinträchtigungen und Fanggebietsverlusten. Trotz der wirtschaftlich schwierigen Lage sind die Ambitionen der Branche sich zukunftsorientiert und umweltbewusst aufzustellen hoch. Sowohl die Kleine Hochseefischerei auf Seelachs als auch die Krabben- und Muschelfischerei sind seit vielen Jahren MSC (Marine Stewardship Council) zertifiziert, womit diese Fischereien einen höheren Nachhaltigkeitsstandard erfüllen, zum Beispiel hinsichtlich der Fangmethoden, als rechtlich vorgegeben ist. Die Weiterentwicklung umweltschonender

Fanggeräte sowie die Unterstützung wissenschaftlicher Projekte, zum Beispiel zur Steigerung der regionalen Wertschöpfungskette, sollen die Fischerei zukunftsfähig machen. Dabei haben globale Entwicklungen und Entscheidungen zum Teil größere Auswirkungen auf die Fischerei als der Einfluss des Klimas.

Die fischwirtschaftliche Nutzung der niedersächsischen **Binnengewässer** wird nach wie vor von der Angel-fischerei dominiert. Die Anzahl der Erwerbsfischenden ist weiterhin rückläufig. Dies gründet sich zunehmend auf Interessenkonflikte mit anderen Nutzergruppen wie dem Naturschutz und einer ausbleibenden Betriebsnachfolge. Erwerbsmäßige Binnenfischereibetriebe beteiligen sich vermehrt an Artenschutzhilfsmaßnahmen wie z. B. „Aaltaxi Weser“ oder arbeiten als Dienstleister für Forschungseinrichtungen. Die traditionellen Karpfenteichwirtschaften können ihr ursprüngliches Produktionsvolumen u. a. durch die klimatischen Veränderungen und den wachsenden Prädationsdruck nicht halten und werden zukünftig vermehrt Aufgaben als Ökosystemdienstleister wahrnehmen. Reine Durchflussanlagen zur Salmonidenerzeugung werden bereits heute zunehmend technisiert und in Teilkreislaufanlagen überführt.

INFO

- Die Auswirkungen des Klimawandels in marinen Ökosystemen sind nicht zwangsläufig mit denen in limnischen Systemen bzw. der Aquakultur vergleichbar.
- Trotz der wirtschaftlich angespannten Lage gibt es Ambitionen, sich zukunftsorientiert und umweltbewusst aufzustellen, beispielsweise mit MSC-Zertifizierungen und umweltschonenden Fanggeräten.
- Die Anzahl der Erwerbsfischenden ist rückläufig, was sich zunehmend auf Interessenskonflikte mit anderen Nutzungsformen wie dem Naturschutz gründet.

4.1.1 Kommerzielle Fischbestandsänderung in der südlichen Nordsee

Mögliche direkte Folgen des Klimawandels könnten unter Umständen ein Abwandern von etablierten Fischarten sein, da diese sich in Gebiete ausbreiten, welche von der deutschen Fischerei nicht befischt werden dürfen. Die Fischereiflotte in Deutschland besteht aus ca. 1.184 Fischereifahrzeugen (BMEL, 2023), welche sich in die Sparten Große und Kleine Hochseefischerei sowie die Küstenfischerei einteilen lassen. Den größten Anteil an den Anlandungen nimmt der Hering ein, gefolgt von der Nordseegarnele, dem Kabeljau und der Makrele (Abbildung 24). In Niedersachsen wird der überwiegende Anteil der Fischereifahrzeuge der Küstenfischerei zugeordnet. Die Hauptzielart von 88 der insgesamt 96 Fahrzeuge ist hier die Nordseegarnele (*Crangon crangon*), auch Nordseekrabbe genannt. Der Rückgang der Anlandungen in den letzten Jahren ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass Arten wie der Seelachs vorzugsweise im Ausland angelandet werden. Gerade Fischarten wie Sandaal und Sprotte werden überwiegend im Ausland zu Fischmehl verarbeitet und daher direkt in Ländern wie Dänemark angelandet. Damit sind Änderungen in der Verbreitung von marinen Arten (heimisch sowie gebietsfremd) in der Nordsee derzeit die sichtbarsten Auswirkungen des Klimawandels.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Nordseegarnele unterliegt keiner Quotierung und es erfolgt keine Bestandsabschätzung. Damit ist eine genaue Vorhersage der Bestandsentwicklung der Hauptzielart der niedersächsischen Küstenfischerei hier nicht möglich. Zwar ist bekannt, dass die Nordseegarnele von einer ansteigenden Wassertemperatur nicht zwangsläufig negativ beeinflusst ist, jedoch zeigen die Anlandungen der vergangenen Jahre enorme Schwankungen, wodurch die Abschätzung klimabedingter Effekte auf die Bestandsentwicklung erschwert wird.

Die Produktivität eines Fischbestandes ist neben der nachhaltigen Befischung eng mit umwelt- und klimabedingten Prozessen verknüpft. Laut FAO (Food and Agriculture Organization) gelten weltweit etwa 60 % der Fischbestände als nachhaltig befischt, damit wird nicht mehr gefangen, als im gleichen Zeitraum nachwachsen kann (FAO, 2022). Klimabedingte Veränderungen der Wassertemperatur sowie des Nährstoffgehaltes (KAPITEL 4.2.6) haben sowohl Einfluss auf die Ausbreitung von Fischarten als auch auf das Überleben des Fischnachwuchses. Bezogen auf den Nachwuchs einiger fischereilich relevanter Arten, wie dem Hering (*Clupea harengus*), kann die Erhöhung der Wassertemperatur zu einer Entkopplung der

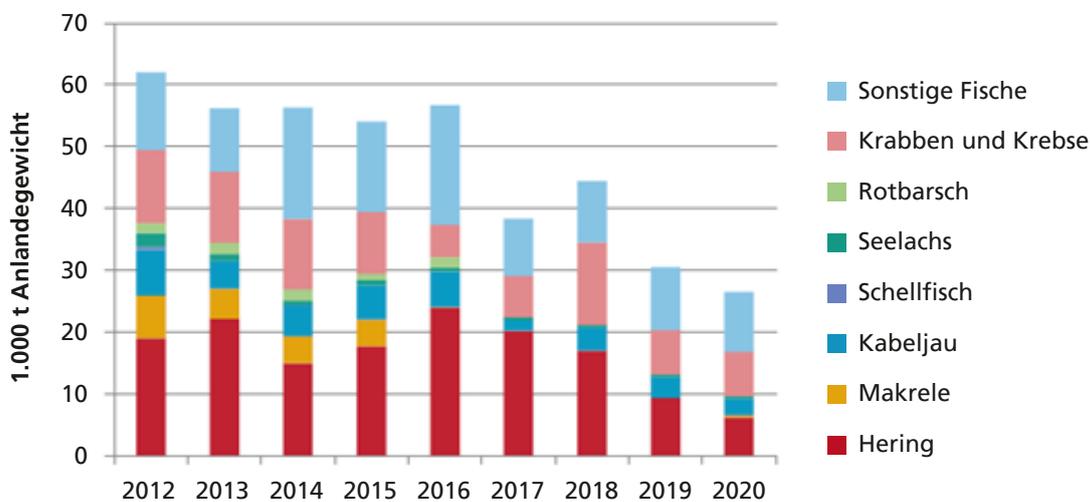


Abbildung 24: Anlandungen der Hochsee- und Küstenfischerei in Deutschland nach Fischart, ohne Muscheln (Edebohls et al., 2022).

Nahrungskette führen. Die Wassertemperatur bestimmt häufig, wann die Eier abgelegt werden. Werden diese Temperaturen nun früher im Jahr erreicht, schlüpfen die Larven dementsprechend früher. Dagegen wird die Algenblüte durch die Veränderung der Lichtintensität im Frühjahr ausgelöst, was für die Nahrungsverfügbarkeit für u. a. Fischlarven entscheidend ist.

Dies bedeutet, dass die Fischlarven durch den früheren Schlupf auch früher im Jahr auf externe Nahrung angewiesen sind, welche sie nicht finden können, da diese noch nicht ausgebildet ist (Durant et al., 2007) Hinzu kommt, dass sich zum Beispiel Heringseier sowie Larven bei höheren Temperaturen schneller entwickeln (Paulsen et al., 2016), was diesen Prozess zusätzlich verstärkt. Diese Entkopplung führt zu deutlich negativen Auswirkungen auf fischereiwirtschaftliche Betriebe, insbesondere wenn diese Betriebe spezialisiert arbeiten und keine alternativen Zielarten vorhanden sind. Eine weitere, zum Teil negative Veränderung des Nahrungsnetzes, welche durch die Erwärmung der Nordsee ausgelöst wird, ist die Abwanderung von kälteliebenden Fischarten in die nördlichen Regionen und die Ausbreitung von ursprünglich gebietsfremden, wärmeliebenden Fischarten. So hat sich zum Beispiel die Nahrungsverfügbarkeit vom jungen Kabeljau (*Gadus morhua*) klimabedingt verändert, was zu einem Einbruch in der Rekrutierung führte und sich somit negativ auf den gesamten Bestand ausgewirkt hat (Bernreuther & Zimmermann, 2010). Im Wattenmeer wird durch milde Winter und warme Sommer die Ausbreitung von sogenannten gemischten Muschelriffen begünstigt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass sich die pazifische Auster (*Crassostrea pacifica*; eine nicht heimische Art) mit anderen Muschelarten, welche zwischen den Austern wachsen, mischen. Bei diesen Muscheln handelt es sich häufig auch um die kommerziell genutzte Miesmuschel (*Mytilus edulis*). Aufgrund dieser klimabedingten Veränderung in der Ausbreitung der Miesmuschel ist diese nicht mehr kommerziell nutzbar, da die Fangnetze durch die scharfen Schalen der Austern beschädigt werden. Muschelbänke sind wichtige Küstenstrukturen und erfüllen viele ökologische Funktionen. Reine Miesmuschelbänke kommen im Wattenmeer jedoch immer seltener vor. Eine weitere negative Folge des Klimawandels ist die Einschleppung von gebietsfremden Parasiten. Diese Parasiten können zum Beispiel die Miesmuscheln befallen und führen zu einer Verschlechterung des Allgemeinzustandes der Muscheln und damit auch zu einer schlechteren Fleischqualität. Das kann zu erheblichen Verlusten in der Muschelfischerei führen.

Für die Fischerei haben nicht nur die klimabedingten Veränderungen der Vorkommen der Zielarten mögliche negative Folgen, auch physikalische Prozesse, wie zum

Beispiel die Durchmischung des Wassers, sind zum Teil temperaturabhängig. Die Durchmischung ist für die Nährstoffverfügbarkeit, welche die biologische Primärproduktion steuert und damit die Verfügbarkeit an Nahrung im Nahrungsnetz, maßgeblich. Diese weitreichenden Prozesse bestimmen demnach auch die Menge der nachhaltig zu entnehmenden Fischbiomasse.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) des Jahrhunderts

Neben den Unsicherheiten der Klimamodelle sind die grundlegenden Auswirkungen einer Veränderung im Klima auf viele Meeresorganismen teilweise nicht vollständig verstanden, wodurch die Ergebnisse von gekoppelten Modellen nicht vollumfänglich anwendbar sind. Die Anwendung globaler Klimamodelle auf regionale Skalen, wie zum Beispiel das Küstenmeer der Nordsee, wird in vielen fischereiwissenschaftlichen Studien als kritisch bewertet, da Bestandsabschätzungen unter Einbeziehung von Klimamodellergebnissen weiterhin große Unsicherheiten aufweisen. Folglich sind umfassende und fortlaufende Bewertungsverfahren und multifaktorielle Analysen der kumulativen Auswirkungen des Klimawandels auf marine Ökosysteme notwendig, um die Unsicherheiten, welche mit der Klimamodellierung verbunden sind, beständig zu validieren. Für die Entwicklungen bis zum Ende des Jahrhunderts sind keine Bewertungen möglich, da die Kopplung von Klimamodellen an die Bestandsvorhersagen bisher zu große Unsicherheiten aufweist.

Der graduelle Temperaturanstieg in den vergangenen 30 Jahren ist nachgewiesen und die weitere Erwärmung geben die Klimamodelle wieder (KAPITEL 4.2.6). Eine daraus resultierende Verringerung der Produktivität von Fischbeständen muss rechtzeitig erkannt und durch angepasste Managementmaßnahmen aufgefangen werden, um den Niedergang eines Bestandes nicht zusätzlich zu beschleunigen. Daher werden wissenschaftlich erarbeitete Frühwarnsysteme und engmaschige Monitoringkonzepte eine entscheidende Rolle bei der optimalen und nachhaltigen Bewirtschaftung von Fischbeständen spielen.

Küstenfische wie die Flunder (*Platichthys flesus*) haben zwar eine gewisse Toleranz gegenüber Temperaturänderungen, extreme Veränderungen (wie z. B. Hitzewellen oder die WASSERQUALITÄT DER ÜBERGANGS- UND KÜSTENGEWÄSSER) können jedoch die Fortpflanzung und das Überleben der Jungfische beeinflussen. Zusätzlich könnte der Verlust von Küstenhabitaten durch menschliche Aktivitäten, wie zum Beispiel Verklappungen, oder Umlagerungsprozesse die Verfügbarkeit geeigneter Lebensräume für die Flunder reduzieren (KAPITEL 4.2.5). Der Bestand von Wolfsbarschen (*Dicentrarchus labrax*) profitiert hingegen vom Temperaturanstieg, was seit einigen Jahren zu einem Anstieg der

Population in der südlichen Nordsee führt. Demersale Arten wie der Kabeljau (*Gadus morhua*) und die Scholle (*Pleuronectes platessa*) bevorzugen kühle bis gemäßigte Wassertemperaturen. Die Erwärmung der südlichen Nordsee führt wahrscheinlich zu einer Verschiebung der beiden Bestände in nördlichere Regionen. Für die Scholle, ebenso wie für die Flunder, ist der Erhalt und die Wiederherstellung von Lebensräumen wie Seegraswiesen und Sandbänken wichtig. Auch kommerziell wichtige Arten wie Hering (*Clupea harengus*) und Sandaal (*Ammodytes* spp.) bevorzugen kühle bis gemäßigte Wassertemperaturen. Eine Erwärmung der südlichen Nordsee könnte also auch bei diesen Arten dazu führen, dass sich die Verbreitungsgebiete nach Norden verlagern, was zu einer Abnahme der Bestände in der südlichen Nordsee führen könnte. Da Sandaale in sandigen Meeresböden leben und laichen, könnten Veränderungen in der Sedimentqualität durch Verschmutzung oder Verklappung von Baggergut ihre Lebensräume zusätzlich beeinträchtigen.

Im Allgemeinen können klimawandelbedingte Veränderungen der KÜSTENNAHE STRÖMUNGEN zum Beispiel die Verfügbarkeit von Nährstoffen und damit die Produktivität des Nahrungsnetzes beeinflussen, was sich direkt (Verfügbar-

keit von Beutetieren) und indirekt (Entkopplung durch Änderung der Planktonzusammensetzung und -verfügbarkeit) auf die Fischbestände auswirken würde. Eine Änderung in der Artenzusammensetzung und Diversität könnte die Dynamik zwischen den Fischarten in der südlichen Nordsee, einschließlich Konkurrenz und Räubern, beeinflussen und die ökologische Balance nachhaltig stören. In der Folge käme es zu Bestandsschwankungen oder räumlichen Verschiebungen, was direkte Auswirkungen auf die Fangmengen hätte. Durch diese Veränderung in der Artenzusammensetzung bzw. einer räumlichen Verschiebung der Vorkommen kommerziell genutzter Fischbestände wird die Fischereiwirtschaft möglicherweise in neue Ausrüstung investieren müssen, um auf die veränderten Bedingungen reagieren zu können. Dennoch werden sinkende Fangmengen oder der Verlust von bestimmten Fischarten wahrscheinlich zu Einkommenseinbußen in den Fischereibetrieben führen. Ferner wird nicht nur die Ressource Fisch bzw. Nordseegarnele vom Klima beeinflusst, sondern wenn künftig Stürme und Extremwetterlagen zunehmen, werden sich damit auch die Fangbedingungen auf der Nordsee verschlechtern und mögliche Sturmfluten könnten küstennahe Produktionsstätten und Hafenanlagen beschädigen (KAPITEL 4.2.2).

INFO

- Änderungen in der Verbreitung von marinen Arten (heimisch sowie gebietsfremd) in der Nordsee sind derzeit die sichtbarsten Auswirkungen des Klimawandels.
- Klimabedingte Veränderungen bei Temperatur, Salzgehalt und Nährstoffkonzentrationen haben nicht nur Einfluss auf die Ausbreitung von Fischarten, sondern auch auf das Überleben des Fischnachwuchses.
- Auch kommerziell wichtige Arten wie Hering und Sandaal bevorzugen kühle bis gemäßigte Wassertemperaturen. Eine Erwärmung der südlichen Nordsee könnte also auch bei diesen Arten dazu führen, dass sich die Verbreitungsgebiete nach Norden verlagern.
- Küstenfische wie die Flunder haben zwar eine gewisse Toleranz gegenüber Temperaturänderungen, extreme Veränderungen können jedoch die Fortpflanzung und das Überleben der Jungfische beeinflussen.
- Im Allgemeinen können klimawandelbedingte Veränderungen der Meeresströmungen zum Beispiel die Verfügbarkeit von Nährstoffen und damit die Produktivität des Nahrungsnetzes beeinflussen, was sich direkt (Verfügbarkeit von Beutetieren) und indirekt (Entkopplung durch Änderung der Planktonzusammensetzung und -verfügbarkeit) auf die Fischbestände auswirken würde.
- Die Folgen des Klimawandels auf die Fischerei in der südlichen Nordsee hängen maßgeblich davon ab, ob die nachkommenden Arten wirtschaftlich vermarktbar sind und ob der Zugang zu kommerziell etablierten Arten weiterhin aufrechterhalten werden kann.

Bewertung des Klimarisikos

Insgesamt hängt die Zukunft der deutschen Fischereiflotte von einer komplexen Interaktion zwischen ökologischen und ökonomischen Faktoren ab. Die nachhaltige Bewirtschaftung und Anpassung an die sich ändernden Bedingungen werden entscheidend sein, um die Fischbestände und die wirtschaftliche Stabilität der Fischereigemeinden zu sichern. Ein flexibles Fischereimanagement mit adaptiven Befischungsregeln, welches durch Aktualisierung der Schwellenwerte auf Veränderungen der Produktivität von Beständen reagieren kann, wird unter sich ändernden klimatischen Bedingungen viele Vorteile bieten. Eine höhere fischereiliche Sterblichkeit durch die Nichteinhaltung von Quoten in Verbindung mit den möglichen negativen klimabedingten Auswirkungen könnte dazu führen, dass die Reproduktionsfähigkeit von befischten Beständen so weit zurückgeht, dass diese Bestände nicht mehr nachhaltig befischt werden können. Daher sind ökosystembasierte Managemententscheidungen sowie die Förderung von Investitionen in die Diversifizierung der Fischerei, also die Anpassung der Fanggeräte und teilweise der Fahrzeuge an klimabedingten Änderungen der kommerziell nutzbaren Arten ein wichtiger Faktor für die Zukunftsfähigkeit des Seefischereisektors. Dabei ist ebenfalls die generelle Transformation der Fischerei zu bedenken, denn die Flotte der Krabbenfischerei ist zum Beispiel sehr alt. Die Schiffe können nur in einem geringen Umfang modernisiert und erweitert werden. Neubauten inkl. Neubauförderung werden in der Zukunft eine entscheidende Rolle bei der Anpassung der deutschen Fischerei an die Klimaverän-

derungen spielen. Der Bau von emissionsfreien Multi-use Kuttern hat im Rahmen von Forschungsprojekten schon begonnen (HS Emden-Leer, 2022). Für eine nachhaltige und zukunftsfähige Fischerei ist die Erprobung und Umsetzung dieser Strategien unabdingbar.

Die Folgen des Klimawandels auf die Fischerei in der südlichen Nordsee hängen maßgeblich davon ab, ob die nachkommenden Arten wirtschaftlich vermarktbar sind und ob der Zugang zu kommerziell etablierten Arten weiterhin aufrechterhalten werden kann. Dies hängt einerseits von der Zuteilung von Quoten und andererseits von der Erreichbarkeit der Fanggebiete ab. Für eine bessere Beurteilung der möglichen Folgen des Klimawandels sowie der notwendigen Maßnahmen zur Erhaltung und Anpassung der Fischerei besteht weiterhin ein hoher Forschungsbedarf. Auch wenn sich immer mehr Fachartikel mit den Folgen des Klimawandels und den Auswirkungen auf die Meeresumwelt und die Fischbestände im Konkreten beschäftigen, sind die Unsicherheiten in den Modellannahmen, gerade für die niedersächsische Küstenzone zum Teil sehr groß. Dies führt dazu, dass eine Anwendung, auf regionalen Ebenen wie die südliche Nordsee oder dem Wattenmeer, für die Bewertung einer Bestandsentwicklung weiterhin mit Unsicherheiten behaftet ist, im Besonderen über die Mitte des Jahrhunderts hinaus. Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge und Interaktionen können die genannten Klimarisiken nur sehr allgemein formuliert werden und mit einer geringen Gewissheit bewertet werden.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch		
Gewissheit	Gering				

Tabelle 25: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Kleine Hochsee- & Küstenfischerei: Entwicklung der Verbreitung kommerziell nutzbarer Arten in der südlichen Nordsee“.

4.1.2 Auswirkungen auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischfauna natürlicher und künstlicher zur Fischzucht geschaffenen Gewässer sind Bestandteil aktueller Forschungsprojekte. So beschreibt Basen et al. (2022) kurzfristige und langfristige Klimafolgen u. a. für Fließgewässer in einer Änderung des Artenspektrums im Ober-, Mittel- und Unterlauf. Kurzfristig führen extreme Hitze und Dürre zu einem Verlust von Lebensraum und Laichhabitaten durch das temporäre Trockenfallen von Gewässerabschnitten. Zudem führen Sauerstoffdefizite zu einem lokalen Fischsterben. Langfristig werden kaltstenotherme Arten, wie Salmoniden, Niederungsregionen verlassen und sich in höher gelegene Gewässerabschnitte zurückziehen, sofern dies nicht durch Querverbauungen unterbunden wird. Die freien Habitate werden durch Generalisten wie Cypriniden (Karpfenartige) besetzt, welche aus dem Unterlauf aufsteigen. In Fließgewässern kommt es nicht nur zu einer Migration heimischer Fischarten in Folge klimatischer Veränderungen, sondern auch invasiver Arten wie der Schwarzmundgrundel (Basen & Brinker, 2019).

Stillgewässer wie Teiche und Seen reagieren in Abhängigkeit ihrer Größe, u. a. mit Anomalien der Schichtung, variablen Wasserständen und Nährstoffkreisläufen. Kurzfristige Veränderungen der Umweltparameter führen bei Fischen, welche ihre Entwicklungsstadien optimal an die zeitlichen und räumlichen Gegebenheiten angepasst haben, zu einer temporären Entkopplung entwicklungsphysiologischer Prozesse. Entkoppelte Reproduktionszeiträume von Fischen und Fischnährtieren können zu Nahrungsmangel der Fischlarven führen, wenn die Fischnährtiere sich entweder noch nicht reproduziert haben oder diese eventuell durch eine zu frühe Reproduktion bereits zu groß für die Fischlarven sind (Basen & Brinker, 2019). Des Weiteren neigen Stillgewässer bei stabilen Warmwetterphasen mit verminderter Wind und ausreichender Nährstoffversorgung zu Algenblüten. Diese verdunkeln das Gewässer, wodurch es sich weiter erwärmt (Basen et al., 2022). Zusätzlich führt die Zehrung des für die Photosynthese benötigten Kohlenstoffdioxids zu Schwankungen des pH-Wertes im Wasser und im Fisch über den Tagesverlauf. Nachts verbrauchen die Algen den am Tag produzierten Sauerstoff, wodurch dessen Konzentration sinkt und es primär in den frühen Morgenstunden zu kritisch tiefen Konzentrationen kommen kann. Diese schwankenden Umweltbedingungen sind für Generalisten wie Cypriniden (Karpfenartige) und Siluriformes (Welsartige) weniger gefährlich.

Fische sind wechselwarme (poikilotherme) Lebewesen, ihre Körpertemperatur entspricht der sie umgebenden Wassertemperatur, eine selbstständige Temperaturregulierung ist ihnen nicht möglich. Ein Anstieg der Wassertemperatur, welcher zwangsläufig mit einem Anstieg der Lufttemperatur einhergeht, führt zu erhöhten Wachstums-, Entwicklungs- und Fortpflanzungsraten im Temperaturoptimum einer Fischart sowie möglichen pathogenen Organismen wie Bakterien, Viren und Parasiten. Des Weiteren sinkt im Zuge des Klimawandels die Löslichkeit von Gasen, z. B. Sauerstoff, was bei steigenden Stoffwechselraten und folglich einem höheren Sauerstoffbedarf negativ zu bewerten ist (Abbildung 25). Am Ende des Eiweißstoffwechsels scheiden Fische ca. 50 % des aufgenommenen Stickstoffs in Form von Ammoniak (NH₃) über die Kiemen aus, welches je nach Temperatur und pH-Wert zu Ammonium dissoziiert.

Hohe Temperaturen in Kombination mit hohen pH-Werten (> 7) führen zu einer hohen NH₃-Konzentration, welche in Abhängigkeit der Fischart und des Alters unterschiedlich stark toxisch wirkt. Im jahreszeitlichen Verlauf führen die milderen Winter zu einer Verlängerung der Fütterungs- und somit Wachstumsperiode. Des Weiteren ist die Gefahr der Sauerstoffzehrung durch eine fehlende Eisschicht reduziert. Jedoch schützt die fehlende Eisschicht im Winter Fische nicht mehr vor Prädatoren. Dadurch sind die Fische einem erhöhten Stresslevel ausgesetzt, was in Anbetracht des verringerten Stoffwechsels zu Reservestoffverlusten führt und die Anfälligkeit gegenüber pathogenen Organismen erhöht (Füllner, 2024a). Im Rahmen der ordnungsgemäßen Teichwirtschaft führen fehlende Frosttage zu keiner Eliminierung u. a. von Parasiten in einem über den Winter trockengelegten Teichboden.

Die saisonale Verschiebung des Niederschlags hat einen ebenso bedeutenden Einfluss auf die aquatischen Organismen wie die Temperaturveränderung. Ausgedehnte Trockenperioden führen in den Oberflächengewässern zu einer Reduktion des Wasserstandes, geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und damit vermindertem Stofftransport partikulärer als auch gelöster Stoffe/Gase. Eine Anreicherung stoffwechselbedingter Ausscheidungen der Fische wie Ammoniak und Kohlenstoffdioxid ist die Folge. Ebenso negativ zu werten, ist die Zunahme kurzfristiger und starker Niederschlagsereignisse (STARKREGEN), welche zu vermehrter Bodenerosion (Runoff) und dem Eintrag von Sediment in ein Gewässer führt und in Folge biologischer oxidativer Abbauprozesse Sauerstoff zehrt. Weiterhin führen die eingetragenen Partikel zu einer negativen Beeinträchtigung des Kiemengewebes der Fische und erschweren den Stofftransport.

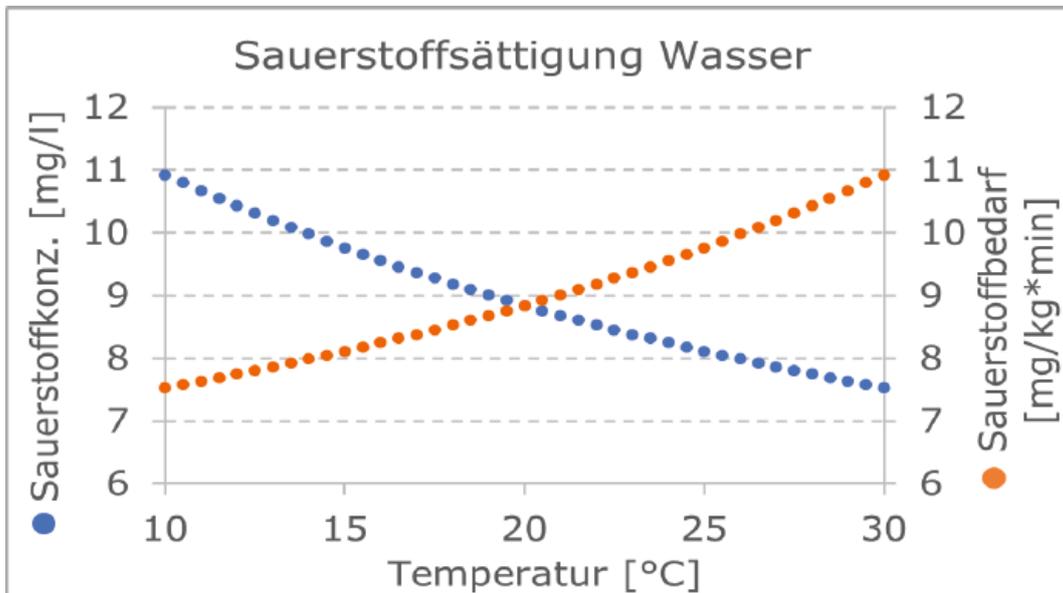


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Sauerstoffkonzentration und des Sauerstoffbedarfs, Quelle: Eigene Darstellung der LWK

Zukünftige klimatische Veränderungen werden die Ausbreitung und Häufigkeit von Fischkrankheiten forcieren (Basen & Brinker, 2019). Schlechte Umweltparameter führen bei Fischen zu Stress, machen diese anfälliger für pathogene Organismen und begünstigen den Ausbruch sowie die Übertragung von Krankheiten. Natürliche Salmonidenbestände sowie in Aquakultur erzeugte Salmoniden (Bsp. Regenbogenforelle), welche mit Bach-/Flusswasser in Kontakt kommen, können zunehmend mit der proliferativen Nierenerkrankung (PKD) infolge der Wassererwärmung infiziert werden. Des Weiteren treten Schwächeparasiten wie *Ichthyophthirius multifiliis* oder das Bakterium *Yersinia ruckeri*, verantwortlich für die Rotmaulseuche bei Salmoniden, vermehrt in Erscheinung und können zu einem Totalausfall der Produktion führen. Bei den Cypriniden wächst mit steigender Wassertemperatur die Widerstandskraft gegenüber pathogenen Organismen und kann zu einer Immunität gegenüber Viruserkrankungen führen (Füllner, 2024b).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Kommerziell binnenfischereilich genutzte Arten wie Brasse und Zander kommen als Generalisten primär in den Mittel- und Unterläufen hiesiger Flussgebiete von z. B. Weser und Elbe vor. Sie gelten als „Gewinner“ des Klimawandels, da sich ihre Habitate ausdehnen und sie von wärmerem Wasser profitieren. Die Reproduktions- und Überlebensraten u. a. der Cypriniden werden mit der Temperatur

steigen, wodurch die Bestände der Raubfische wie Barsch, Hecht und Wels bis Mitte des Jahrhunderts und darüber hinaus anwachsen können.

Hingegen wird erwartet, dass die Spezialisten und kälte liebenden Fischarten wie Bachforelle, Äsche und Quappe zu den „Klimaverlierern“ zählen. Hierbei ist zu erwähnen, dass diese Fischarten in ihren Beständen aktuell durch Querverbauungen, Gewässerverschmutzung und einen konstant wachsenden Prädationsdruck (Kormoran, Fischotter) geschädigt werden. Der Klimawandel führt zusätzlich zu Hitzestress, Habitatverlusten und Fischkrankheiten (z. B. PKD) (Basen et al., 2022). In Niedersachsen werden sich die Salmoniden demnach in höher gelegene Quellregionen, z. B. den Harz zurückziehen und die Niederungsbäche vermutlich bis zum Ende des Jahrhunderts verlassen.

Bewertung des Klimarisikos

Eine Bewertung des Klimarisikos für die natürlichen niedersächsischen Fischbestände kann anhand der aufgeführten „Klimaverlierer“ und „Klimagewinner“ nicht abschließend erfolgen, sondern nur mit Unsicherheiten eingeschätzt werden. Die Erderwärmung führt bereits heute nachweislich zu einer regionalen Verschiebung der Fischarten innerhalb eines Flusssystemes (Basen et al., 2022). Innerhalb anthropogener Einflüsse wie z. B. Querverbauungen, Nährstoffeinleitungen und Prädationsdruck ist der klimatische Einfluss lediglich ein Bestandteil in jenem multikausalen System.

- Kurzfristig führen extreme Hitze und Dürre zu einem Verlust von Lebensräumen und Laichhabitaten durch das temporäre Trockenfallen von Gewässerabschnitten. Zudem führen Sauerstoffdefizite zu einem lokalen Fischsterben. Langfristig werden kaltstenotheime Arten, wie Salmoniden, weiter in höher gelegene Gewässerabschnitte migrieren, sofern dies nicht durch Querverbauungen unterbunden wird.
- Ein Anstieg der Wassertemperatur, führt zu erhöhten Wachstums-, Entwicklungs- und Fortpflanzungsraten im Temperaturoptimum einer Fischart sowie möglichen pathogenen Organismen wie Bakterien, Viren und Parasiten.
- Zukünftige klimatische Veränderungen werden die Ausbreitung von bekannten und noch unbekanntem Fischkrankheiten steigern und führen zu Stress und gesteigerter Anfälligkeit für pathogene Organismen.
- Spezialisten und kälteliebende Fischarten wie Bachforelle, Äsche und Quappe zählen der Erwartung nach zu den „Klimaverlierern“.
- Die Erderwärmung führt bereits heute nachweislich zu einer regionalen Verschiebung der Fischarten innerhalb eines Flusssystemes.
- Kommerziell binnenfischereilich genutzte Arten wie Brasse und Zander sind Generalisten und gelten als „Gewinner“ des Klimawandels.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 26: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Binnenfischerei & Aquakultur: Auswirkung des Klimawandels auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland“.

4.1.3 Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur

Aquakultur ist die kontrollierte Produktion aquatischer Organismen mit dem Ziel des Biomassezuwachses unter geklärten Eigentumsverhältnissen. Als aquatische Organismen werden u. a. Fische, Krebse, Muscheln und Algen bezeichnet. Diese Form der Landwirtschaft ist auf ausreichend Wasser in einer guten Qualität angewiesen. Aquakulturen greifen dafür auf Grund-, Quell-, Oberflächen- oder Trinkwasser zurück und werden direkt durch den Klimawandel beeinflusst.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die **Teichwirtschaft** als traditionellste Form der Aquakultur ist heute ein wertvoller und multifunktionaler Bestandteil unserer Kulturlandschaft. In den über Generationen hinweg betriebenen Anlagen profitieren Karpfen, Schleien, Hechte und viele andere mehr von der natürlichen Ertragskraft dieser künstlich geschaffenen Gewässer, welche mit Oberflächenwasser gespeist werden. Der Karpfen als Primärart in niedersächsischen Teichwirtschaften profitiert prinzipiell von steigenden Temperaturen, da dessen Temperaturoptimum bei 23-28 °C liegt und diese aktuell nur in kurzen Zeiträumen erreicht werden. Höhere Temperaturen beschleunigen das Wachstum, eine raschere Immunantwort bzw. Widerstandskraft gegenüber pathogenen Organismen und können sich positiv auf den Ertrag auswirken, sofern eine ausreichende Wasserversorgung der Teiche gewährleistet ist (Füllner, 2024a).

Die saisonale Verschiebung des Niederschlages führt zu hohen Niederschlägen in den Winter- und geringen in den Sommermonaten. Sofern die Teiche im Frühjahr nicht mit genügend Wasser angestaut werden können, führt die Trockenheit im Sommer vermehrt zu Problemen. Durch einen verminderten Wasserzufluss und sinkenden Wasserspiegel (Verdunstung) steigt die Wassertemperatur stetig an. Dies begünstigt das Wachstum von Algen, welche zu erheblichen pH-Wert- und Sauerstoffschwankungen im Wasserkörper führen. Da die Wassertemperatur negativ mit der Sauerstoffsättigung korreliert, führt dies zwangsläufig zu einem Sauerstoffdefizit, welches nicht selten zu Notabfischungen führt.

Im Jahresverlauf führen die milderen Winter zu einer Verlängerung der Fütterungs- und somit Wachstumsperiode. Des Weiteren ist die Gefahr der Sauerstoffzerrung durch eine fehlende Eisschicht reduziert. Jedoch schützt die fehlende Eisschicht im Winter die Karpfen nicht mehr vor Prädatoren. In Folge sind die Fische einem erhöhten Stresslevel ausgesetzt, was in Anbetracht des verringerten Stoffwechsels zu Reservestoffverlusten führt und die Anfälligkeit gegenüber pathogenen Organismen erhöht

(Füllner, 2024a). Des Weiteren führen fehlende Frosttage in abgelassenen Teichen zu keiner Reduktion u. a. von Parasiten im Teichboden.

Durchflussanlagen zur Forellenproduktion sind primär von einer ausreichenden und sommerkühlen Wasserversorgung abhängig, weil das Temperaturoptimum der Regenbogenforelle 12-16 °C beträgt. Zum anderen liegen in diesem Temperaturbereich bis zu 10,43 mg/l Sauerstoff im Wasser vor, auf den Salmoniden angewiesen sind. Eine Erhöhung der Wassertemperatur würde zu einem Abfall der Sauerstoffkonzentration führen (20 °C, 8,84 mg/l) und das Wachstum sowie den Gesundheitszustand verschlechtern. Die Zunahme eisfreier Tage begünstigt die Forellenproduktion durch höhere Fütterungs- und Stoffwechselraten. Eine Reduktion des Volumenstroms würde neben einer verringerten Sauerstoffzufuhr zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration führen und die Diffusion aus den Kiemen erschweren. Des Weiteren würden Feststoffe im System verbleiben, die enthaltenen Nährstoffe in Lösung gehen und zu einer Verschlechterung der Wasserqualität führen. Eine verringerte Wasserqualität begünstigt in Folge von Stress den Ausbruch von Infektionen. Die Anlagenstrukturen zur Forellenproduktion reichen von natürlich wirkenden Erdteichen, die mit kühlen, sauerstoffreichen Quell- und Oberflächenwasser betrieben werden, bis zu hochtechnisierten, in Beton gegossenen Umlaufkanälen, die auf Grundwasser angewiesen sind. Sowohl Karpfen- als auch Forellenteichwirtschaften sind an Oberflächengewässer angebunden und im Falle von Hochwasser (KAPITEL 4.3.1) diesem ausgesetzt.

In Gebäuden untergebrachte **Kreislaufanlagen**, welche sich u. a. durch einen geringen Wasserbedarf auszeichnen, sind unabhängig von äußeren Einflüssen wie der solaren Strahlung oder Temperatur. Mechanische, biologische und chemische Filtersysteme reduzieren die Stoffwechselprodukte der Fische, wodurch das Prozesswasser mittels Pumpen wiederkehrend im Kreislauf bewegt werden kann. Demnach sind Kreislaufanlagen von den Folgen der Klimaänderungen am geringsten betroffen. Diese Anlagen werden mit Brunnen- oder Trinkwasser gespeist und unterliegen keiner Volumenstromreduktion durch sich ändernde Niederschläge. Eine Erwärmung der Wassertemperatur durch das Aufheizen der Gebäudehülle kann durch aktive Kühlung ausgeglichen werden, wodurch die Produktionskosten zwangsläufig steigen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Produktion von Fisch in Teichwirtschaften und Durchflussanlagen wird zukünftig eine zunehmende Technisierung erfahren. Großflächige Karpfenteichwirtschaften werden vermutlich in kleinere intensivere Produktionsmodule überführt. Diese Erdteiche werden zum Schutz vor fischfressenden Prädatoren vollständig eingehaust. Die Fütterung erfolgt mittels Futterautomaten und die Sauerstoffversorgung wird über technische Eintragungssysteme sichergestellt. Durchflussanlagen sind von einer konstanten und qualitativ hochwertigen Wasserversorgung abhängig. Sollte diese nicht mehr kontinuierlich gegeben sein, werden diese Anlagen ebenfalls technisiert. Die Haltungsbecken werden zunehmend in Betonbauweise erstellt und durch ein festes Dach beschattet. Die Sauerstoffversorgung erfolgt mittels technischem Sauerstoff und die reduzierte Wasserverfügbarkeit wird durch Filteranlagen kompensiert (Füllner, 2024b). Zur Temperaturstabilisierung wird zukünftig vermehrt auf Grundwasser zurückgegriffen, wodurch der Druck auf diese Ressource weiter steigen wird (KAPITEL 4.3.6). Eine prophylaktische

Keimreduktion des Zulaufwassers und des Rezyklats mittels UV-Einheiten, Ozoneinsatz oder chemischer Verbindungen wird zunehmend Normalität sein. Die kreislaufbasierten Systeme werden je nach erzeugter Fischart vermehrt mit Kühlaggregaten ausgestattet. Die bisherigen technischen Anpassungsstrategien werden durch züchterische Maßnahmen komplettiert. Künftige Innovationen in Anpassungsstrategien sowie eine intensive Forschung zu züchterischen Maßnahmen bilden dabei eine Grundlage für Klimaanpassungskonzepte.

Bewertung des Klimarisikos

Analog zur Binnenfischerei unterliegt der niedersächsische Aquakultursektor einer Vielzahl natürlicher und anthropogener Veränderungen. Das klimabedingt größte Problem besteht in der Wasserverfügbarkeit zum Anstauen von Teichen und Haltungseinheiten und deren kontinuierlichen Versorgung, gefolgt von der Wasserqualität. Sowohl der Temperaturanstieg als auch die saisonale Verschiebung des Niederschlages zwingen die traditionellen Teichwirtschaften bereits heute ihre Produktionssysteme zu technisieren.

INFO

- Höhere Temperaturen beschleunigen u. a. das Wachstum von Karpfen und eine raschere Widerstandskraft gegenüber pathogenen Organismen.
- Sofern die Teiche im Frühjahr nicht mit genügend Wasser angestaut werden können, führt die Trockenheit im Sommer vermehrt zu Problemen, indem die Verdunstung sowie Wassertemperatur steigt, was das Algenwachstum begünstigt.
- Durchflussanlagen zur Forellenproduktion sind von einer sommerkühlen Wasserversorgung abhängig, eine höhere Wassertemperatur würde zu abfallender Sauerstoffkonzentration führen und damit zu einem schlechteren Gesundheitszustand.
- Kreislaufanlagen sind unabhängig von Einflüssen wie der solaren Strahlung und deshalb von den Folgen der Klimaänderungen am geringsten betroffen.
- Die Produktion von Fisch in Teichwirtschaften und Durchflussanlagen wird zukünftig eine zunehmende Technisierung u. a. zur Anpassung an die klimatischen Bedingungen erfahren.
- Das klimabedingt größte Problem besteht in der Wasserverfügbarkeit zum Anstauen von Teichen und Haltungseinheiten und deren kontinuierlicher Versorgung, gefolgt von der Wasserqualität.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 27: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Binnenfischerei & Aquakultur: Qualitative- und quantitative Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur“.



KÜSTEN- UND MEERESSCHUTZ

4.2 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Die Küstengewässer Niedersachsens erstrecken sich von der Ems bis zur Elbe und Grenzen im Norden bei der 12-Seemeilen-Grenze an die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). Mit rund 3.450 km² Fläche zählt der überwiegende Anteil zum Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer und gehört gleichzeitig seit 2009 zum UNESCO-Weltnaturerbe Wattenmeer, das sich von den Niederlanden bis nach Dänemark erstreckt. Das Wattenmeer zeichnet sich durch seine besonderen geologischen und hydrologischen Merkmale aus. Es ist geprägt von einer Vielzahl an Lebensräumen, darunter Watten, Priele, Salzwiesen, Strände und Sandbänke, die in einem ständigen Wandel sind. Die Gezeiten führen dazu, dass das Watt regelmäßig überflutet und wieder freigelegt wird, wodurch ein dynamisches System entsteht, das von der Interaktion zwischen Wasser, Boden und Lebewesen lebt. Diese Dynamik schafft eine enorme Biodiversität, die durch sich ändernde klimatische Bedingungen unter Druck geraten könnte. Darüber hinaus sind die Küstengewässer von hoher wirtschaftlicher Bedeutung hinsichtlich Fischerei und Tourismus. Aber auch der Küstenschutz profitiert von der Anpassungsfähigkeit des Wattenmeeres.

Die Landesfläche Niedersachsens wird durch eine rund 610 km lange Deichlinie von den Küstengewässern getrennt. Etwa 14 % der Landesfläche liegt im sturmflutgefährdeten Gebiet, wovon bereits heute ein Großteil unterhalb des Meeresspiegels liegt (NLWKN 2007). Mittelbar ist der Küstenschutz in Niedersachsen zusätzlich für eine große Zahl von Menschen und Werten in den benachbarten Bundesländern Bremen und Hamburg sowie in den Niederlanden wirksam. Der Festlandsküste vorgelagert sind die Ostfriesischen Inseln, die ebenfalls durch Deiche, Deckwerke und Dünen vor Sturmfluten geschützt sind (NLWKN 2010). Wirtschaftlich gesehen haben die Gebiete neben dem Tourismussektor auch Bedeutung als wichtige Industrie- und Handelsstandorte.

Der Klimawandel stellt diese Region vor besondere Herausforderungen. Eine direkte Reaktion auf die Erderwärmung ist der Meeresspiegelanstieg, da die Ozeane sich bei steigenden Temperaturen ausdehnen. Hinzu kommen Abschmelzprozesse an Eisschilden und Gletschern, wodurch zusätzliche Wassermassen den Ozeanen zugeführt werden. Der Meeresspiegelanstieg ist seit Beginn der Wasserstand-

aufzeichnungen messbar, allerdings wird seitens des Weltklimarat mit einer Zunahme der Anstiegsrate in Abhängigkeit von der Klimaschutzpolitik gerechnet (IPCC, 2023b). So könnte sich ohne wirksamen Klimaschutz die Anstiegsrate vervierfachen, wobei in den Projektionen die Abschmelzprozesse noch nicht vollständig einfließen.

Neben dem Meeresspiegelanstieg spielen aber auch die Entwicklung der Wassertemperatur, der Sturmaktivitäten und Niederschlagsereignisse für die Region eine entscheidende Rolle. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Auswirkungen sich verändernder klimatischer Randbedingungen detaillierter betrachtet und ihre Abhängigkeiten und Wechselwirkungen beleuchtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den klimatischen Auswirkungen auf die Hydrodynamik und Gewässergüte der niedersächsischen Küstengewässer, welche wiederum auf den Natur- und Lebensraum in der Küstenregion sowohl vor als auch hinter der Deichlinie wirken. Gleichzeitig bestehen Verbindungen zu anderen Handlungsfeldern wie HANDLUNGSFELD FISCHEREI, HANDLUNGSFELD BODEN, HANDLUNGSFELD MENSCHLICHE GESUNDHEIT und HANDLUNGSFELD WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT, sowie zu einigen in dieser Risikoanalyse noch nicht enthaltenden wirtschaftlichen Handlungsfeldern wie „Tourismus“, „Industrie“ und „Infrastruktur“.

Zahlreiche globale und regionale Meeresschutzübereinkommen widmen sich seit Jahrzehnten dem Schutz der Ökosysteme. Mit der Wasserrahmenrichtlinie und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie hat die EU einen rechtsverbindlichen Rahmen geschaffen, der die Anrainerstaaten dazu verpflichtet, Schutzstrategien umzusetzen. Ziel ist es, eine Verschlechterung des Zustands der Gewässer zu vermeiden, geschädigte Ökosysteme wo möglich wiederherzustellen, die Artenvielfalt und menschliche Gesundheit zu erhalten, sowie eine nachhaltige Nutzung der Ressourcen durch künftige Generationen zu ermöglichen. Die Rahmenrichtlinien und ihre ganzheitlichen Strategien bieten einen guten Rahmen für die Überwachung der Auswirkungen des Klimawandels, die Sondierung von Klimaschutzmaßnahmen und die Anwendung des Ökosystem-Ansatzes bei der Anpassung an den Klimawandel in der Meeresumwelt (Europäische Kommission & Generaldirektion Umwelt, 2020).

INFO

- Der überwiegende Anteil der niedersächsischen Küstengewässer zählt zum UNESCO-Weltnaturerbe Wattenmeer.
- Rund 14 % der Landesfläche Niedersachsens werden durch eine 610 km lange Deichlinie vor Sturmfluten geschützt.
- Meeresschutzübereinkommen und Richtlinien können einen Rahmen für die Überwachung der Auswirkungen des Klimawandels bieten.

4.2.1 Meeresspiegelanstieg

Für den Schutz der Niederungsgebiete Niedersachsens stellt der Meeresspiegelanstieg die bedeutendste Herausforderung dar. Das durch eine etwa 610 km lange Deichlinie vor Sturmfluten geschützte Gebiet umfasst rund 14 % der Landesfläche. Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels wirkt sich sowohl auf das küstenschutzrelevante Tidehochwasser (KAPITEL 4.2.10) als auch auf das für die Entwässerung der Niederungsgebiete bedeutsame Tideniedrigwasser (KAPITEL 4.2.9) aus.

Hintergrund und Stand der Forschung

Seit dem Ende der letzten Kaltzeit vor etwa 10.000 Jahren steigt der Meeresspiegel bis heute an. Durch das in den eiszeitlichen Eisschilden gebundene Wasser lag der Meeresspiegel rd. 130 m unter dem heutigen Niveau (Behre, 2005). Die flache Nordsee fiel bis über die Doggerbank hinaus trocken. Bis ca. 5.000 v. Chr. stieg der Meeresspiegel zunächst mit über einem Meter pro Jahrhundert sehr schnell an. Danach nahm die Geschwindigkeit ab, zwischenzeitlich gab es sogar rückläufige Phasen, wobei der Trend allerdings insgesamt ansteigt (KAPITEL 4.2.8). Ursächlich sind im Wesentlichen zwei Effekte. Zum einen führt die Wärmeausdehnung durch steigende Temperaturen zu einer langsam fortschreitenden Anhebung des Wasserstandes. Durchmischungsprozesse fördern langsam kälteres Wasser nach oben, was sich wiederum aufwärmt und ausdehnen kann. Vergleichbare Prozesse finden bei einer Änderung des Salzgehaltes durch Süßwassereintrag statt, was ebenfalls die Dichte des Wassers reduziert und damit den Wasserspiegel anhebt. Dieser Einfluss ist jedoch deutlich geringer als die Wärmeausdehnung. Zum anderen erhöht sich der Wasserstand durch die Zufuhr von Wassermassen, die vorher nicht Teil der Ozeane waren. Insbesondere abschmelzende Eisschilde oder Gletscher können den Meeresspiegelanstieg deutlich beschleunigen. Hinzu kommt die nacheiszeitliche Landabsenkung der südlichen Nordseeküste mit einer eher untergeordneten Rolle. Erdöl- oder Gasentnahmen können die Landabsenkung jedoch lokal beschleunigen (Fokker et al., 2018).

In Folge der globalen Erwärmung ist der mittlere globale Meeresspiegel zwischen 1901 und 2018 um 20 cm gestiegen. Dabei erhöhte sich die durchschnittliche Geschwindigkeit des Anstieges zwischen 1901 und 2018 von 1,3 auf 3,7 mm pro Jahr. Seit 1970 hat sich die Anstiegsrate fast verdreifacht. Der Meeresspiegel ist damit seit 1900 schneller angestiegen als in jedem vorangegangenen Jahrhundert der letzten 3.000 Jahre (IPCC, 2023b). An der deutschen Nordseeküste betrug der regionale Meeresspiegelanstieg zwischen 1900 und 2011 etwa 1,6 bis 1,8 mm pro Jahr (Albrecht et al., 2011; Wahl et al., 2010).

Für die meisten Bereiche und Anwendungen bilden an der Nordsee die Tidehoch- und -niedrigwasserstände die maßgeblich kennzeichnenden Wasserstände. Signale langfristiger mittlerer Wasserstandsentwicklungen, die sich im Bereich weniger Millimeter pro Jahr bewegen, werden durch die halbtäglich wechselnde Gezeit mit Tidehuben von mehreren Metern deutlich überlagert. Auch meteorologische Einflüsse und saisonale Periodizitäten heben und senken den Wasserstand auf jeweils unterschiedlichen Zeitskalen um einige Dezimeter bis Meter. Anthropogene Eingriffe können teils sprunghafte Änderungen des umgebenden Tideregimes hervorrufen. Bei dauerhaften baulichen Veränderungen verbleibt eine Änderung in der Tidedynamik und damit in den Wasserstandsaufzeichnungen. Temporäre physische Störungen können sich durch die morphologische Anpassungsfähigkeit des dynamischen Systems des Wattenmeeres wieder zurück- bzw. umbilden. Aufgrund der Überlagerung dieser zahlreichen Prozesse auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen ist die Isolierung und Quantifizierung des bisherigen Meeresspiegelanstiegs keine triviale Aufgabe. Die Verfügbarkeit langjähriger, kontinuierlicher und ungestörter Messreihen spielt hier eine entscheidende Rolle, außerdem unterliegen auch die Messsysteme selbst Grenzen der Messgenauigkeit. Die Messdaten zeigen allerdings im mehrjährigen Mittel recht eindeutig einen kontinuierlichen Anstieg des Meeresspiegels. Dabei steigen die mittleren Tidehochwasser (Mthw) deutlich stärker als die mittleren Tideniedrigwasser (MTnw). Daraus resultiert ein Anstieg des Tidehubs, womit stärkere Gezeitenströmungen einhergehen, die von der Morphologie kompensiert werden müssen, um das dynamische Gleichgewicht zu erhalten (NIKO, 2023b).

Die verstärkten Strömungsgeschwindigkeiten können Einfluss auf die Transportpfade und Sedimentationsraten im Wattenmeer haben (KAPITEL 4.2.5). Wenn das Wattenmeer den Meeresspiegelanstieg durch ein Aufwachsen der Wattflächen nicht mehr in der gleichen Größenordnung kompensieren kann, führen steigende Wasserstände unmittelbar zu einer höheren Seegangbelastung an den Küstenschutzbauwerken. Denn dann weichen einerseits die Vorländer und andererseits wird durch die geringere Tiefbegrenzung weniger Seegang im Küstenvorfeld gebrochen.

Auch die Grundwasserspiegel steigen infolge des Meeresspiegelanstiegs. Gleichzeitig werden die Süß-/Salzwassergrenzen sowohl im Grundwasser als auch in den tidebeeinflussten Oberflächengewässern weiter ins Binnenland verschoben. Auch die Süßwasserversorgung der meisten Inseln, welche derzeit durch eigene Süßwasserlinsen sichergestellt ist, wird durch den Meeresspiegelanstieg gefährdet (KAPITEL 4.2.7).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Infolge des Klimawandels wird mit einem beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels gerechnet, der maßgeblich von der zukünftigen Klimaschutzpolitik abhängt. Während eine Reduzierung der Treibhausgase den Meeresspiegelanstieg in einer mit heutigen Verhältnissen vergleichbaren Größenordnung halten kann, zeigen Szenarien mit weniger Klimaschutz eine drastische Zunahme (IPCC, 2019b, 2021a).

Sämtliche Projektionen beziehen sich auf den mittleren Tidewasserstand (MTmw). Wie sich Hoch- und Niedrigwasser entwickeln werden ist bislang unbekannt. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass der Trend sich dahingehend fortsetzt, dass das Niedrigwasser langsamere Anstiegsraten als das Hochwasser zeigt. Für das Szenario ohne Klimaschutz (SSP5-8.5 – der fossile Weg, KAPITEL 2.2.4) (IPCC, 2021a) liegen regionalisierte Meeresspiegelanstiegskurven für Borkum und Cuxhaven vor (BSH, 2024). Grundlage der Berechnungen liefert das dreidimensionale Zirkulationsmodell HIROMB-BOOS Model (KAPITEL 2.2.4), das mit einer Auflösung von etwa 1,9 km in der deutschen Bucht betrieben wird (Berg & Poulsen, 2012). Für die

beiden Pegel liegt aktuell die mittlere Anstiegsrate des Meeresspiegels in etwa bei 20 cm für den jeweiligen Zeitraum der Aufzeichnung (Abbildung 26). Das mittlere Tidehochwasser steigt mit 25 cm deutlich schneller, während das Tideniedrigwasser eine langsamere Anstiegsrate zeigt (9 cm bei Borkum bzw. 12 cm bei Cuxhaven).

Die Projektionen zeigen bereits bis zur Mitte des Jahrhunderts eine deutliche Beschleunigung in der Anstiegsrate in der gesamten Bandbreite. Die derzeitige Anstiegsrate von rd. 2 mm pro Jahr würde auf 5 mm (optimistisch) bzw. 10 mm (pessimistisch) pro Jahr ansteigen. Damit würde der Wasserstand innerhalb von nur 30 Jahren um ca. 15 bis 30 cm ansteigen (Tabelle 28). Ob und wie weit das Aufwachsen der Watten diesen Anstieg kompensieren kann ist unklar und Stand der Forschung.

Bis zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Beschleunigung weiter zu. Innerhalb der Jahre 2071 bis 2100 wird ein Meeresspiegelanstieg von 27 bis 49 cm projiziert, was einer Anstiegsrate von 9 bis 16 mm pro Jahr entspricht. Am Ende des Jahrhunderts läge dann der Wasserstand an der niedersächsischen Küste 47 bzw. 102 cm über dem heutigen Niveau.

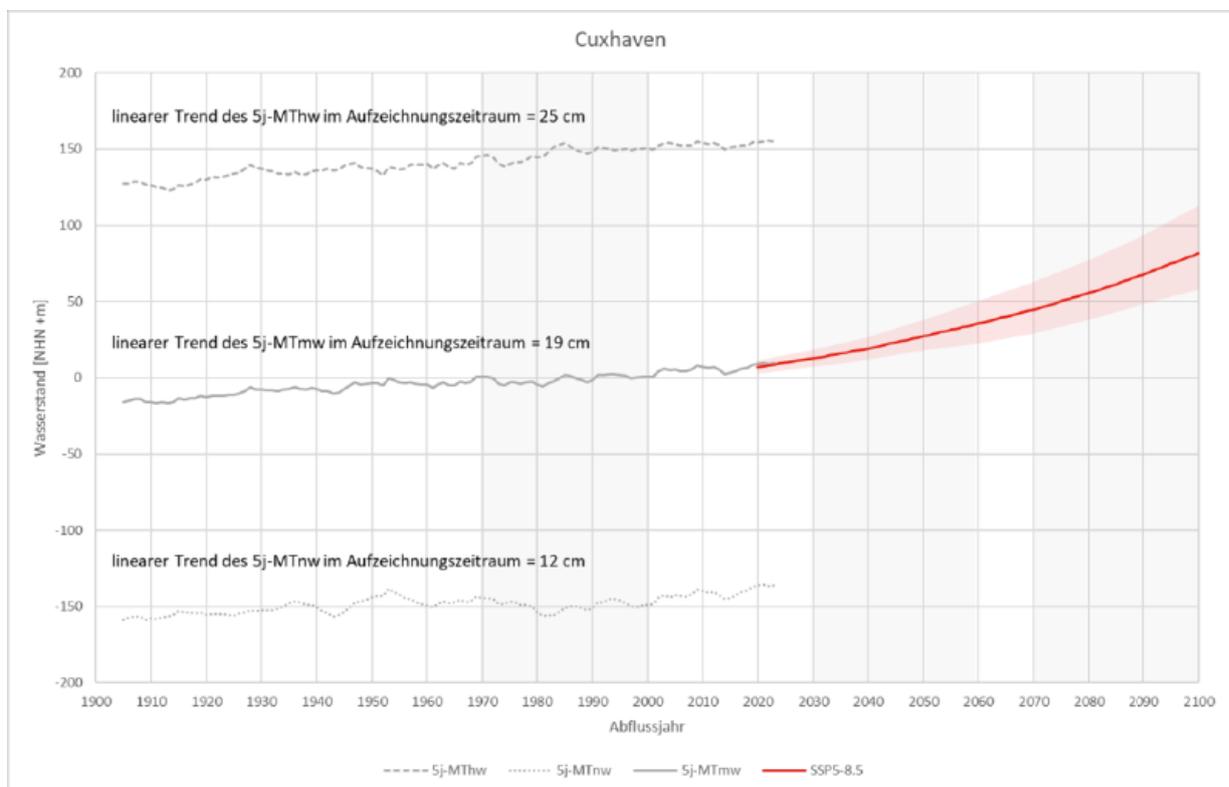


Abbildung 26: Gemessene und prognostizierte Trendentwicklungen der Wasserstände für den Küstenstandort Cuxhaven. (Messdaten – Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (GDWS), Prognosedaten – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)).

	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Borkum	+10 cm	+5 cm	+22 cm	+18 cm	+39 cm
Cuxhaven	+13 cm	+2 cm	+18 cm	+14 cm	+36 cm

Tabelle 28: Mittlere Wasserstände (MTmw bezogen auf NHN) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (SSP5-8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für Borkum und Cuxhaven.

— INFO —

- Maßgebenden Einfluss auf den Meeresspiegel haben Wärmeausdehnung und Abschmelzprozesse.
- Infolge des Klimawandels ist der mittlere globale Meeresspiegel zwischen 1901 und 2018 um 20 cm gestiegen.
- Die Süß-/Salzwassergrenze wird ins Binnenland verschoben.
- Von der Entwicklung des Meeresspiegels sind alle Klimawirkungen des Handlungsfeldes abhängig.
- Mit steigendem Meeresspiegel entwickeln sich die Tidehoch- und Tideniedrigwasser mit unterschiedlicher Geschwindigkeit.
- Bereits heute sind Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Wattenmeer erkennbar. Der aktuelle Sachstandbericht des IPCC stuft den weiteren Anstieg des globalen Meeresspiegels als „praktisch sicher“ ein.

Bewertung des Klimarisikos

Bereits heute sind Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Wattenmeer erkennbar (KAPITEL 4.2.5). Während der Küstenschutz für das geschützte Gebiet bereits so bemessen ist, dass Klimaszenarien ohne Klimaschutz bis zum Ende des Jahrhunderts berücksichtigt sind, muss die Entwässerung der Niederungsgebiete noch an diese Anstiegsszenarien angepasst werden (KAPITEL 4.2.8, 4.2.9, 4.2.10). Auch das Wattenmeer sollte beim Aufwachsen unterstützt werden, um die Konsequenzen, die sich aus den beschleunigten Meeresspiegelanstiegsraten ergeben, abbremsen zu können.

Der aktuelle Sachstandbericht des IPCC stuft den weiteren Anstieg des globalen Meeresspiegels als „praktisch sicher“ ein (IPCC, 2023b). Ein „hohes Vertrauen“ wird auch in die Projektionen, die über das Jahr 2100 hinaus gehen und mit einer weiteren Beschleunigung einhergehen, gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Risiken für Ökosysteme, Menschen und Infrastrukturen an den Küsten weiter zunehmen werden. Auf dieser Basis werden die in Tabelle 27 dargestellten Risiken als gewiss eingestuft, auch wenn die projizierten Bandbreiten (optimistischer und pessimistischer Fall) der gezeigten Beschleunigungsraten sehr groß sind. Das Abschmelzen der Eisschilde und Gletscher geht in die verwendeten Projektionen nicht ein und würde das Risiko weiter anheben.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Hoch		Hoch	

Tabelle 29: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Meeresspiegelanstieg“.

4.2.2 Sturmflut

Sturmfluten stellen eine Gefahr für die Küstenregion Niedersachsens dar. In der Vergangenheit ist es wiederholt durch sehr schwere Sturmfluten zu teils katastrophalen Überflutungen mit vielen Todesopfern gekommen, an die sich die Küstenbewohner mit Warften und Deichbau stets anpassen mussten. So führte beispielsweise die Katastrophenflut von 1962 zu 61 Deichbrüchen in Niedersachsen mit zahlreichen Toten und enormen Schäden bis ins Binnenland. Aber auch historische Sturmfluten wie die Weihnachtsflut von 1717 oder Märzflut von 1906 sind in der Küstenregion aufgrund der katastrophalen Auswirkungen in Erinnerung. Sturmfluten haben ein enormes Schadenspotenzial, da sie sich bei einem Versagen der Küstenschutzbauwerke bis tief in das unter dem Meeresspiegel liegende Hinterland ausbreiten können. Neben der augenblicklichen Zerstörung von Bauwerken und Infrastruktur ist auch eine langfristige Beeinträchtigung der Wasserversorgung und Landwirtschaft durch Versalzung die Folge.

Hintergrund und Stand der Forschung

Sturmfluten an der niedersächsischen Küste entstehen, wenn starke auflandige Winde aus westlicher bis nordwestlicher Richtung das Wasser der Nordsee gegen die Küste drücken und dort aufstauen (auch als Windstau bezeichnet). Dadurch entstehen außergewöhnlich hohe Wasserstände, die mehrere Meter höher sein können, als die normalen Tidehochwasserstände. Von großer Bedeutung dabei ist die zeitliche Überlagerung mit der Tide, dem durch die astronomische Konstellation von Mond, Erde und Sonne erfolgenden Wechsel von Ebbe und Flut. Nur bei Zusammenfallen des durch den Sturm verursachten Windstaus mit dem Tidehochwasser entstehen Wasserstände, die potenziell gefährlich sind. Besonders hoch werden die Wasserstände, wenn langanhaltende, auflandige Winde bereits ein Abfließen des Wassers während der vorherigen Ebbphase behindern und das Tideniedrigwasser vor dem Sturmflutscitadel dadurch schon deutlich zu hoch ausfällt. Mit der folgenden Flutphase erreicht der bereits gestaute Wasserstand durch die zusätzliche Überlagerung mit der astronomischen Gezeit Extremwerte, die durch den anhaltend starken Wind gegen die Küste und bis tief in die Flussmündungen weiter aufgestaut werden.

Die meisten Sturmfluten treten in den Herbst- und Wintermonaten auf. Das liegt an der Entwicklung der für die niedersächsische Küste maßgebenden westlichen Tiefdruckgebiete, die an der Polarfront mit dem dortigen Jetstream entstehen. Die Polarfront ist eine Luftmassengrenze, die über den mittleren Breitengraden verläuft und von den Temperaturunterschieden zwischen den Subtropen und der Arktis angetrieben wird. Sie verändert ihre Lage mit den Jahreszeiten und rückt im Winter weiter nach Süden, wodurch dann die Zugbahnen der starken westlichen Winde über der zentralen Nordsee verlaufen können. Generell zeigte das Sturmflutgeschehen in der Vergangenheit eine große Variabilität hinsichtlich Stärke und Häufigkeit.

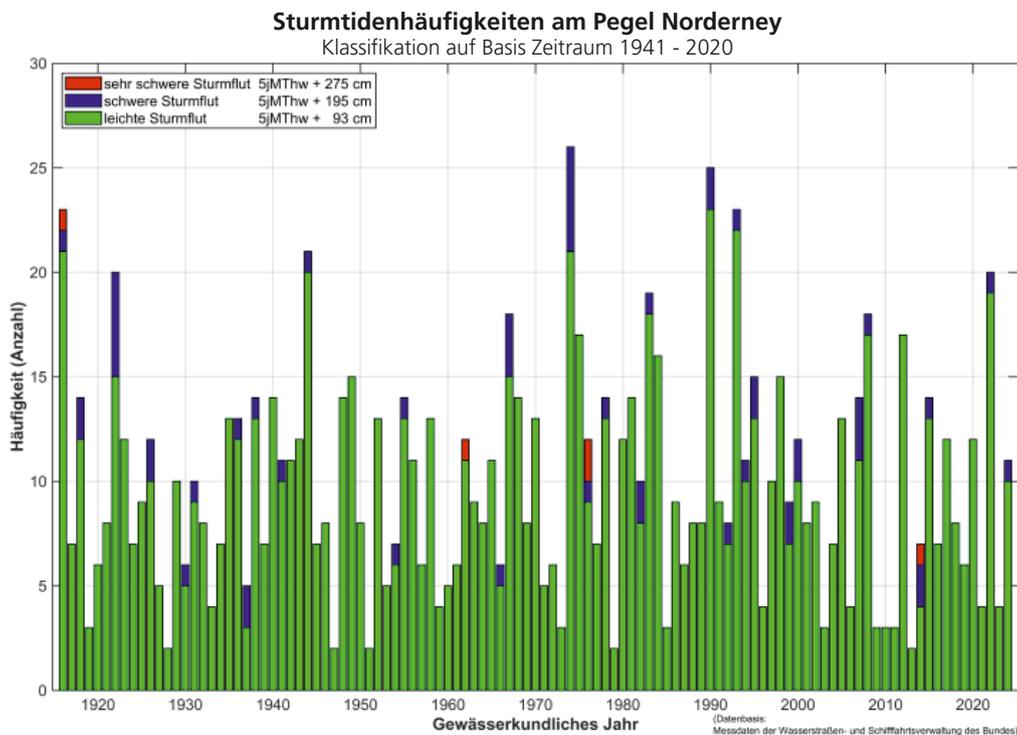


Abbildung 27: Anzahl der Sturmfluten auf Norderney von 1916 bis 2023, Quelle: NLWKN.

Für die Einteilung und Bewertung der Schwere einer Sturmflut wird in Niedersachsen die Klassifikation nach DIN 4049 verwendet (DIN 4049-3, 1994) (Abbildung 27). Die Klassifikation erfolgt statistisch an Hand der mittleren Eintrittshäufigkeit. Nach dieser Definition spricht man von einer Sturmflut bei einem Wasserstand, der im Mittel zehn Mal im Jahr überschritten wird. Dieser Grenzwert liegt an der niedersächsischen Küste bei einem Stau über dem mittleren Tidehochwasser von etwa einem Meter, variiert aber entlang der Küste mit etwas niedrigeren Werten an der offenen Küste und höheren Werten in den Flussmündungen. Schwere und sehr schwere Sturmfluten ereignen sich nach dieser Definition statistisch alle zwei bzw. alle zwanzig Jahre einmal. Diese Einteilung macht es möglich, lokal zugeschnittene Warn Grenzen festzulegen, welche die räumliche Variabilität der stark ortsabhängigen Sturmfluthöhen berücksichtigen, die von West nach Ost und von Nord nach Süd sowie in die Ästuare hinein ansteigen. Bezogen auf klimatische Änderungen in der Häufigkeitsverteilung ist diese Auswertung jedoch schwierig.

Angesichts des vorhandenen hohen Sicherheitsstands des Küstenschutzes stellen die seltenen, sehr schweren Sturmfluten die eigentlich kritischen Ereignisse dar. Von Bedeutung sind jedoch auch sogenannte Sturmtidenketten, bei denen sich über mehrere aufeinanderfolgende Tiden hohe Wasserstände einstellen und diese einerseits zu einem Aufweichen der Deiche führen können, andererseits auch Probleme bei der Entwässerung der niedrigliegenden Marschgebiete bereiten können, insbesondere wenn das Ereignis mit starken Niederschlägen über Land verbunden ist (KAPITEL 4.2.9).

Die zukünftige Entwicklung der Intensität und des Auftretens von Sturmfluten an der niedersächsischen Küste hängt in erster Linie von etwaigen Änderungen der meteorologischen Gegebenheiten über der Nordsee ab, wie u. a. der Entwicklung der Polarfront. Frühere Studien sind zu dem Ergebnis gekommen, dass sich die Luftmassengrenze durch die Erderwärmung nach Norden verschiebt und durch den niedrigeren Temperaturgradienten zwischen Arktis und Tropen geschwächt wird (Rivière, 2011). Das könnte die Sturmaktivität an der deutschen Küste verringern. Neuere Studien zeigen allerdings noch weitere Zusammenhänge auf, die bislang noch nicht vollständig geklärt sind. So ist beispielsweise unklar, ob eine

Abschwächung des Temperaturgradienten auch zu einer Verstärkung einer wellenartigen Ausbreitung der Front führen könnte, was wiederum stärkere Stürme in unserer Region zur Folge haben könnte (Fragkoulidis, 2022). Damit ist das Zugverhalten der Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik und der Nordsee ungewiss und die Prognosen zu den Änderungen der Windgeschwindigkeiten und -häufigkeiten sehr unsicher. Dies betrifft auch die darauf aufbauenden Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des regionalen Windstaus (Weisse & Meinke, 2023).

Sicherer hingegen ist die Entwicklung des Meeresspiegels. Dieser zeigt für alle Projektionen einen steigenden Trend mit unterschiedlich starken Beschleunigungsraten (KAPITEL 4.2.1). Auch wenn sich die Windverhältnisse möglicherweise nicht ändern, wird das Ausgangsniveau der Sturmflutwasserstände dadurch steigen und zu höheren Belastungen an den Küstenschutzbauwerken führen (KAPITEL 4.2.3, 4.2.10).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Auswertungen von regionalen Klimamodellierungen hinsichtlich der Windverhältnisse im Bereich der Nordsee bis 2100 zeigen keine eindeutigen Änderungen der Häufigkeit und des Andauerns höherer Windgeschwindigkeiten und ebenso wenig der Windrichtungen (Ganske, 2019; Gaslikova et al., 2013). So sind – vor dem Hintergrund der großen Unsicherheiten der Modellierungen von Windfeldern in Klimamodellen und der ohnehin großen räumlichen und zeitlichen Variabilität des Windes – nach derzeitigem Stand in den nächsten Dekaden keine wesentlichen Änderungen im eigentlichen Sturmflutgeschehen zu erwarten. In Kombination mit dem vom Klimawandel verursachten beschleunigten Meeresspiegelanstieg in der südlichen Nordsee werden die absoluten Sturmflutwasserstände jedoch ansteigen (Weisse & Meinke, 2023).

Auch der aktuelle Sachstandbericht des Weltklimarats liefert davon abweichende neue Erkenntnisse. Für die mittleren Windgeschwindigkeiten wird sogar eine leichte Abnahme allerdings mit einer hohen Unsicherheit prognostiziert. Allerdings sollen schwere Stürme häufiger auftreten, was mit einer mittleren Zuverlässigkeit belegt wird (IPCC, 2021c).

INFO

- Sturmfluten haben ein großes Schadenspotenzial, wenn sie sich ins unter dem Meeresspiegel liegende Hinterland ausbreiten können.
- Sturmfluten entstehen, wenn starke auflandige Winde aus westlicher bis nordwestlicher Richtung das Wasser der Nordsee gegen die Küste drücken und dort aufstauen.
- Die meisten Sturmfluten treten in den Herbst- und Wintermonaten auf.
- Die Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten an der niedersächsischen Küste weist eine große Variabilität von Jahr zu Jahr und über Dekaden auf.
- Wie sich die Intensität und das Auftreten von Sturmfluten in Zukunft entwickeln, hängt vor allem von den meteorologischen Gegebenheiten über der Nordsee ab.

Bewertung des Klimarisikos

Die Entwicklung der absoluten Höhen der Sturmfluten an der niedersächsischen Küste ist im Zusammenhang mit der Entwicklung der mittleren Wasserstände zu sehen. Während die Prognosen für den Meeresspiegelanstieg robuste Tendenzen zu einer (beschleunigten) Zunahme aufweisen, ist die zukünftige Entwicklung der eigentlichen Sturmfluten hinsichtlich Intensität und Dauer unklar und somit ist die Bewertung dieses kombinierten Klimarisikos unsicher.

In der nachfolgenden Tabelle wird das Risiko nur in Bezug auf Sturmintensität, -häufigkeit und -dauer vorgenommen. Bereits heute könnte angesichts der hohen natürlichen Variabilität des Windes eine, allein durch den Wind verursachte, stärkere Sturmflut als bislang beobachtet eintreten. Daher wird das Risiko als mittel eingestuft. Bezüglich der Trends bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts wird auf Basis der bisherigen Forschung, die keinen erkennbaren Trend zeigt, das gegenwärtige Risiko fortgeschrieben. Der steigende Meeresspiegel erhöht das Risiko entsprechend des Klimarisikos bewertet in KAPITEL 4.2.1.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 30: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Sturmflut“.

4.2.3 Seegang

Der Seegang stellt neben den Gezeiten, Sturmflutwasserständen und Strömungen die wichtigste Einflussgröße für die Gestaltung des Insel- und Küstenvorfeldes Niedersachsens dar. Für die Dimensionierung von Küstenschutzbauwerken ist er von entscheidender Bedeutung und zudem maßgeblich an den Erosions- und Sedimentationsprozessen an Stränden und Dünen beteiligt. Im Alltag sind Seeschifffahrt, Inselversorgung und Fischerei von den Seegangsverhältnissen abhängig.

Hintergrund und Stand der Forschung

Beim Seegang handelt es sich um winderzeugte Schwerkwellen an der Meeresoberfläche. Wellen, welche unter dem unmittelbaren Einfluss des örtlichen Windes liegen, werden der sogenannten Windsee zugeordnet. Werden die Wellen durch Wind außerhalb des Gebietes erzeugt, werden sie als Dünung bezeichnet. Neben Windstärke, -richtung und -dauer haben aber auch Topografie, Strömung und die Entwicklung der Wassertiefen einen entscheidenden Einfluss auf Wellenhöhe, -länge und -richtung, die wiederum Einfluss auf die Topografie und die Strömungen nehmen.

An der niedersächsischen Küste erfährt der energiereiche Seegang der offenen Nordsee eine starke Wechselwirkung mit den morphologischen Formationen in Küstennähe, die wiederum durch den Seegang geprägt werden. Messungen rund um Norderney zeigen, dass nur 30 % der Seegangsenergie aus der offenen Nordsee, gebrochen durch das Ebbtidedelta (Norderneyer Riffbogen), am Inselvorstrand ankommt. Die Inselvorstrände, die nicht durch ein Ebbtidedelta geschützt sind, sind i. d. R. flacher und weisen aufeinanderfolgende morphologisch unterschiedliche Riffsysteme aus, wodurch insgesamt eine hinreichende Energieumwandlung vor den Stränden und Dünen gewährleistet ist, um Erosion zu verhindern. Werden die Vorstrände zu steil, erfolgt eine vorübergehende oder

dauerhafte Rückverlagerung von Strand und Dünen, bis das dynamische Gleichgewicht von Energieumwandlung des Seegangs mit Vorstrand- und Strandmorphologie wiederhergestellt ist.

Die Inseln bieten eine weitestgehend vollkommene Abschattung der Watten gegen Seegang, der nur durch die tiefen Rinnen zwischen den Inseln (Seegatten) einschwingen kann. Nur 10 % der von der Nordsee ankommende Seegangsenergie breitet sich ins Wattenmeer aus (Niemeyer, 1986). Der Seegang erfährt bei seiner Ausbreitung auf den Wattflächen eine weitere Dämpfung, die mit wachsender Entfernung von den Seegatten zunimmt. Daher bilden sich Schlickwatten und Salzwiesen aus (Niemeyer, 1983). Die inselgeschützten Watten sind erheblich schmaler als an den offenen Ästuarküsten, wo erheblich breitere Wattsäume erforderlich sind, um die für die Ausbildung von Schlickwatten, Verlandungsbereichen und insbesondere von Salzwiesen erforderliche Seegangsdämpfung zu bewirken. Sollten bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg die Wattflächen und Vorländer verzögert oder gar nicht mitwachsen, würde die Seegangsdämpfung geringer ausfallen. Es würden sich höhere und längere Wellen im Wattenmeer ausbreiten können.

Die Wellenhöhen weisen einen saisonalen Jahresgang auf, die den jahreszeitlichen Windgeschwindigkeiten folgen. So nimmt in den windreicheren Herbst-/Wintermonaten die Seegangsenergie im Vergleich zu Frühjahr und Sommer zu. Bei Sturmflut sind die höchsten Wellen zu beobachten. Diese bauen sich bereits in der Nordsee durch die hohen Windgeschwindigkeiten auf. In Küstennähe werden die durch den Wind immer wieder angefachten Wellen durch die geringe Wassertiefe gebrochen. Das durch die Sturmfluten aufgestaute Wasser sorgt für größere Wassertiefen (KAPITEL 4.2.2), wodurch die Seegangsdämpfung reduziert wird und sich höhere Wellen bis auf die Strände und ins Deichvorland ausbreiten können.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Während in der Nordsee die Entwicklung des Seegangs maßgeblich von der Entwicklung des Windes abhängig ist, ist in Küstennähe die Entwicklung des Meeresspiegels zusammen mit der morphologischen Anpassung der Vorländer und Wattflächen von entscheidender Bedeutung.

Nach aktuellem Stand der Forschung ist die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeiten und -richtungen unklar. Für die mittleren Windgeschwindigkeiten wird eine leichte Abnahme allerdings mit einer hohen Unsicherheit prognostiziert. Allerdings sollen schwere Stürme häufiger auftreten, was mit einer mittleren Zuverlässigkeit belegt wird (IPCC, 2021c). Dadurch würden häufiger Sturmfluten mit hohen Wellen auf die Küste treffen, wodurch insbesondere Inselstrände und Deichvorländer, aber auch die Dünen betroffen wären.

Der Meeresspiegelanstieg wird jedoch fortschreiten und sich in Abhängigkeit der Klimaschutzpolitik beschleunigen. Dadurch kann sich der Seegang verstärken, wie Ergebnisse des Forschungsprojektes KLIWAS zeigen (BMVI, 2015). Im

Wattenmeer wird sich dieser Trend jedoch nur fortsetzen, wenn sich das oben genannte Mitwachsen der Watten nicht in derselben Größenordnung durchsetzen kann. Bleiben die Wassertiefen auf den Watten und Vorländern konstant, werden sich kaum Änderungen im Seegang ergeben. In wie weit die Morphologie die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs kompensieren kann ist allerdings noch Gegenstand der Forschung (z. B. WAKOS, MetaScales, RestCoast, CoastAdapt).

Bewertung des Klimarisikos

Gegenwärtig ist keine Veränderung im Seegang des Insel- und Küstenvorfeldes nachweisbar, weswegen das Risiko als gering eingestuft wird. Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der Windverhältnisse (KAPITEL 4.2.2) und der natürlichen Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers (KAPITEL 4.2.5) in Bezug auf die Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs (KAPITEL 4.2.1), wird das Risiko für die pessimistischen Realisationen des Szenarios ohne Klimaschutzmaßnahmen, die eine Beschleunigung der Anstiegsrate prognostizieren, auf „mittel“ gesetzt.

INFO

- Seegang wird durch Wind erzeugt und ist damit von der bislang unklaren Entwicklung der Windverhältnisse abhängig.
- Neben den Gezeiten und Strömungen ist der Seegang eine der wichtigen Einflussgrößen für Küstengestaltung und -schutz.
- Die geringeren Wassertiefen im Insel- und Küstenvorfeld dämpfen den Seegang.
- In den windreicheren Herbst- und Wintermonaten ist auch der Seegang stärker.
- Ein steigender Meeresspiegel wird die Seegangsbelastung verstärken, wenn die Watten und Vorländer den Anstieg nicht durch ein Mitwachsen kompensieren können.
- Bei der Einschätzung des zukünftigen Risikos spielen aber die Entwicklung der Windverhältnisse und die Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers an Meeresspiegelanstieg eine wesentliche Rolle.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 31: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Seegang“.

4.2.4 Küstennahe Strömungen

Neben dem Seegang stellen Strömungen in den Küstengewässern eine wichtige hydrodynamische Belastungsgröße dar, da sie einen wesentlichen Anteil an der Gestaltung des Wattenmeers, der Schweb- und Nährstoffdynamik, der Temperaturverteilung und den Erosions- und Sedimentationsprozessen an der Küstenlinie haben. Die küstennahen Strömungen stehen in direkter Wechselwirkung mit verschiedensten Prozessen und spielen beispielsweise bei den Planungsaufgaben des Küsteningenieurwesens und Sedimentmanagements eine große Rolle. Daher ist die Kenntnis über die zukünftige Entwicklung von Stärke, Richtung und zeitlichem Ablauf von Bedeutung.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die küstennahen Strömungen sind im Wesentlichen geprägt durch die Gezeiten, Wind, Seegang und Dichteunterschiede. Die gegen den Uhrzeigersinn einschwingende Tidewelle erzeugt Tidenhübe in der Deutschen Bucht von mehreren Metern mit einer Wiederkehrperiode von ca. 12 Stunden und 25 Minuten. An der niedersächsischen Küste verläuft die Tidewelle von West nach Ost und in die Ästuar Ems, Weser und Elbe hinein. Mit abnehmender Wassertiefe zur Küste hin verformt sie sich durch Wechselwirkungen mit dem Küstenrelief, so dass eine Asymmetrie in den Strömungsgeschwindigkeiten erzeugt wird. Dadurch sind Flut- und Ebbstrom nicht gleich stark und es bildet sich an der Küste und vor den Inseln ein nach Osten gerichteter küstenparalleler Sedimenttransport aus.

Das Wattenmeer ist über ein Rinnensystem mit der Nordsee verbunden, so dass mit jeder Flut eine große, mit Sedimenten und Nährstoffen angereicherte Wassermenge aus der Nordsee in das Wattenmeer einströmen kann. Mit dem Rückgang der Strömungsgeschwindigkeit setzen sich die Schwebstoffe und Sedimente auf den Wattflächen und Vorländern ab. Durch die signifikant geringeren Geschwindigkeiten auf den Wattflächen werden diese mit dem Ebbstrom nicht wieder bzw. erst sehr spät remobilisiert (Abbildung 28). Die tiefen Rinnen und Priele stehen in einem dynamischen Gleichgewicht zur Wattenzugsgebietsgröße und dem Tidevolumen. Veränderungen der hydrologischen Randbedingungen (z. B. Meeresspiegelanstieg) erzeugen somit eine morphologische Reaktion auf das gesamte Gebiet und umgekehrt.

Auswirkungen anthropogener Eingriffe sind insbesondere in den Ästuaren erkennbar. Diese wurden begradigt und vertieft, wodurch die Tidewelle zum Teil nicht mehr auf natürliche Weise abklingt, sondern sich aufsteilt. Gleichzeitig stellt sich ein Ungleichgewicht zwischen Flut- und Ebbstrom ein. So entstand ein erhöhter Sedimenteintrag, der u. a. durch regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen ausgeglichen werden muss.

Windinduzierte Strömungen (Driftströmungen) entstehen an der Wasseroberfläche und verlaufen in etwa in Windrichtung (Göhren, 1968). Besonders in Flachwasserbereichen kann dadurch die Gezeitenströmung dominiert werden. Heftige Winde sorgen gleichzeitig für einen Aufstau der Wasseroberfläche, wodurch zusätzlich zur oberflächennahen Driftströmung eine sohlennahe Rückströmung erzeugt wird. Dadurch kann der Flutstrom über die Dauer des Windstaus unterbunden werden (M. Koch & Niemeyer, 1978).

Strömungen haben Einfluss auf den Seegang als auch umgekehrt. Je nach Strömungsrichtung wird die Welle schneller oder langsamer, länger oder steiler. Gleichzeitig erzeugt aber auch der Seegang Strömungsmuster, die insbesondere dort von hoher Bedeutung sind, wo hohe Wellen auf Flachwasser treffen, wie beispielsweise an den Stränden der Inseln und den Sandbänken davor. Im Allgemeinen entsteht eine landwärts gerichtete Strömung, die den Strand mit Sedimenten versorgt. Doch dort wo die Wellen brechen entsteht eine Brandungszone mit einer längs zur Küstenlinie verlaufenden Strömung. Gleichzeitig entsteht ein leichter Aufstau landeinwärts der Brandungszone, der durch seewärts gerichtete Ausgleichströmungen (Rückströmungen und Rippströmungen) zurückfließen muss. Bei energiereichem Seegang entstehen sehr starke Rückströmungen, die im Sturmflutfall den Strand erodieren lassen und den Sand in den Vorstrand umlagern (Riffbildung). Bei ruhigen Wetterlagen wird der Vorgang auf natürliche Weise rückgängig gemacht. Für diese Vorgänge ist jedoch die Strandneigung wesentlich. Flache Strände bewirken ein frühes Brechen, so dass sich hinter der Brandungszone eine Strömungszelle ausbilden kann. An steilen Stränden befindet sich die Brandungszone so nah am Strand, dass die längs zur Küstenlinie ausgebildete Brandungsströmung dominiert.

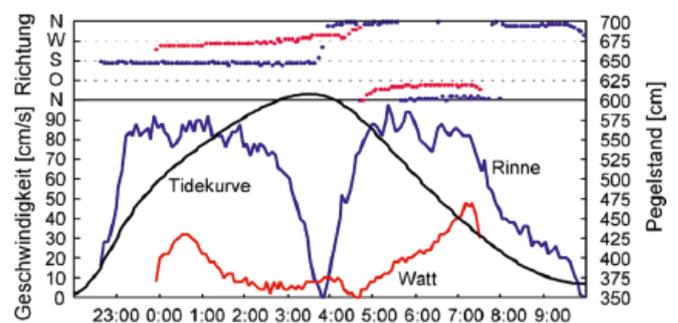


Abbildung 28: Gegenüberstellung gemessener Strömungsgeschwindigkeiten über einen Tidezyklus (schwarz) im Wattenmeer. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Rinne (blau) liegen deutlich über den Strömungsgeschwindigkeiten auf der Wattfläche (rot) (Kaiser & Niemeyer, 1996).

Dort, wo das salzhaltige Meerwasser auf Süßwasser trifft, entstehen Dichteströmungen. Sie spielen in den Ästuaren eine wesentliche Rolle, wenn sich das schwere Wasser der Nordsee bei Flut unter das Süßwasser des Ästuars schiebt. Durch die Dichteunterschiede entstehen barokline Strömungen, die den stromauf gerichteten Sedimenttransport unterstützen. Auch Temperaturunterschiede rufen Dichteströmungen hervor, wenn beispielsweise im Sommer das tieferliegende kältere Nordseewasser in das wärmere Wattenmeer strömt.

Über die zukünftige Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten ist bislang wenig bekannt. Studien zeigen eine Zunahme der Gezeitenströmungen bei einem gestiegenen Meeresspiegel insbesondere in den Rinnen und Ästuaren (Wachler et al., 2020). Allerdings berücksichtigen diese und vergleichbare Studien keine morphologische Anpassung, so dass die Aussagen nicht belastbar sind. Morphologische Reaktionen auf Klimawandelauswirkungen sind Gegenstand aktueller Forschung in Niedersachsen (z. B. WAKOS, RestCoast, METAscales, CoastAdapt) und werden modelltechnisch untersucht. Auch über die Entwicklung der seegangsinduzierten Strömungen können derzeit keine Aussagen getroffen werden. Die Stärke des Seegangs ist einerseits tiefenbegrenzt und dementsprechend von der Entwicklung des Wattenmeeres abhängig und andererseits von der Entwicklung der Windintensität, dessen Projektionen unsicher sind (IPCC, 2021c), (KAPITEL 4.2.3).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Durch den Meeresspiegelanstieg ist eine Änderung in der Gezeitenströmung erwartbar. Der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf die Entwicklung der Morphologie ist jedoch noch nicht hinreichend geklärt. Bislang konnte zumindest das Wattenmeer durch ein Aufwachen das dynamische Gleichgewicht aufrechterhalten. Die Meeresspiegelanstiegsszenarien, die den optimistischen Fall der Projektionen ohne Klimaschutz bilden, zeigen eine gemäßigte Änderung der Anstiegsrate im Vergleich zu heute bis zur Mitte des Jahrhunderts, so dass sich die Strömungsverhältnisse möglicherweise nicht ändern. Die pessimistischen Realisationen oder die Projektionen bis zum Ende Jahrhunderts hingegen zeigen eine signifikant erhöhte Beschleunigungsrate, die das Wattenmeer möglicherweise nur teilweise oder gar nicht kompensieren kann. Dann würden sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten und -muster ändern.

Bewertung des Klimarisikos

Gegenwärtig ist keine Veränderung in den küstennahen Strömungen nachgewiesen, weswegen das Risiko als gering eingestuft wird. Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der Treiber (Wind) und natürlichen Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers in Bezug auf die Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs, wird das Risiko für die pessimistischen Realisationen des Szenarios ohne Klimaschutzmaßnahmen, die eine Beschleunigung der Anstiegsrate projiziert, auf „mittel“ gesetzt.

INFO

- Strömungen haben einen wesentlichen Anteil an den gestalterischen Prozessen, aber auch Schweb- und Nährstoffe, werden durch die Strömung verteilt.
- Gezeiten, Wind, Seegang und Dichteunterschiede prägen die Strömungen in Küstennähe.
- Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten können sich Sedimente absetzen.
- Die durch Seegang entstehende Rückströmung lässt Strände erodieren.
- Anthropogene Eingriffe beeinflussen die Strömung insbesondere in den Ästuaren.
- Durch Dichteunterschiede erzeugte Strömungen unterstützen einen stromaufgerichteten Sedimenttransport in den Ästuaren.
- Die Entwicklung der Strömungen hängt von der morphologischen Anpassungsfähigkeit ab.
- Durch einen steigenden Meeresspiegel können sich Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsmuster im Laufe der Zeit verändern.
- Die morphologische Anpassung auf den Meeresspiegelanstieg wird die Auswirkungen auf die Strömung reduzieren.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 32: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Küstennahe Strömungen“.

4.2.5 Entwicklung des Wattenmeers

Neben den großen Flussmündungen Ems, Weser und Elbe prägen insbesondere die Nordsee und das niedersächsische Wattenmeer das Küstenbild. Als Teil des UNESCO Welt- naturerbes Wattenmeer, das von den Niederlanden bis nach Dänemark reicht, gehört eins der weltweit größten natürlichen Ökosysteme zu Niedersachsen. Es stellt nicht nur einzigartige Lebensräume mit enormer Biodiversität zur Verfügung und zeichnet sich durch eine natürliche geologische Dynamik aus, sondern bildet auch eine natürliche CO₂- und Sedimentsenke und damit einen natürlichen Klima- und Küstenschutz.

Hintergrund und Stand der Forschung

Voraussetzung für die Existenz des Wattenmeeres sind ständig wechselnde Wasserstände (Gezeiten) an einer flachen Küste, verbunden mit einer guten Verfügbarkeit von Sediment. Durch die Gezeiten fallen große Teile des Wattenmeers periodisch trocken und werden während der Flut wieder mit Wasser überdeckt. Dadurch entstehen Flächen mit unterschiedlich langer Überflutungsdauer (litorale Flächen), die einzigartige Lebensräume mit hoher Biodiversität und einer enormen Produktivität bilden. Das Sublitoral (Tiefwasser und Flachwasser) umfasst den Teil des Gewässers, der ständig vom Wasser bedeckt ist. Zu ihm gehören auch Priele, die über ein verzweigtes Netz in das Eulitoral hineinreichen. Als Eulitoral bezeichnet man die Fläche, die bei Ebbe trockenfällt (Watt). Das Supralitoral (Salzwiesen, Deichvorland und Strände) kennzeichnet den Gewässerbereich, der oberhalb des mittleren Tidehochwassers liegt. Diese Flächen werden nur unregelmäßig z. B. bei Sturmfluten überspült.

Der Einfluss der Gezeiten ist lokal unterschiedlich. Der Tidenhub (Höhenunterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser) ist durch die gegen den Uhrzeigersinn verlaufende Tidewelle und die Wechselwirkung mit dem Küstenrelief unterschiedlich hoch. Er steigt von West nach Ost und in die Ästuarie hinein (Lassen & Siefert, 1991) womit auch die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmen. Aufgrund der ebenfalls von West nach Ost gerichteten vorherrschenden Seegangs- und Strömungsrichtung wandern die Gezeitenströme, Platen und Riffe in dieselbe Richtung.

Mit ihnen wanderten auch die bewohnten Barriereinseln, bis sie durch Küstenschutzbauwerke befestigt wurden (Homeier et al., 2010). Auch der Festlandsockel ist durch den Deichbau fixiert.

Durch die Gezeitenströmung und den Seegang werden die Sedimente in der Nordsee und im Wattenmeer in Bewegung versetzt. Mit der Flut werden Sedimente aus der Nordsee in das Wattenmeer transportiert, die sich in den strömungsberuhigten Flachwasserbereichen ablagern können. So waren bislang die Wattflächen in der Lage, genügend marine Sedimente abzulagern, um trotz steigender Pegelwasserstände die Wassertiefen auf den Watten und den Vorländern nahezu konstant zu halten, wovon auch der Küstenschutz profitiert. Die Wattflächen sind also mit dem bisherigen Meeresspiegelanstieg mitgewachsen.

Allerdings zeigen sich bereits jetzt die Auswirkungen der beschleunigten Erderwärmung auf das Wattenmeer. Die Wassertemperaturen steigen nachweislich seit Beginn der Aufzeichnungen. Infolge des Klimawandels wird mit einem erhöhten Anstieg der Wassertemperatur gerechnet, der maßgeblich von der zukünftigen Klimaschutzpolitik abhängt. Marine Hitzewellen sollen ebenfalls zunehmen (IPCC, 2021c). Hinzu kommt der steigende Meeresspiegel, der mit einer Änderung der Gezeitenströmung verbunden ist, was allerdings bislang durch die morphodynamische Anpassung des Gebietes kompensiert wurde (KAPITEL 4.2.1, 4.2.4). Ob diese natürliche Anpassungsfähigkeit zukünftig bei einer Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs beibehalten werden kann, ist noch nicht erwiesen, weswegen sich Sedimenttransporte, Sedimentverteilungen und die litoralen Flächenanteile ändern können. Ein Rückgang der Flachwasserbereiche würde wiederum den Seegang verstärken (KAPITEL 4.2.3).

Jeder dieser Faktoren hat Einfluss auf das sensible Ökosystem und die Vielzahl der darin beheimateten Lebewesen. Zusätzlich haben steigende Wassertemperaturen und extreme Temperaturschwankungen Einfluss auf Flora und Fauna des Wattenmeeres. Nicht alle Arten können sich auf höhere Temperaturen einstellen. Eine Änderung der Artenzusammensetzung ist bereits heute erkennbar (Philippart et al., 2024).

Die Veränderungsprozesse sind jedoch hoch komplex und daher Gegenstand aktueller Forschungen, die im Folgenden kurz und lediglich überblicksweise vorgestellt werden:

- Der Meeresspiegelanstieg hat direkte Auswirkungen auf die Lage und Größe von Biotop-Ausstattungen. So können beispielsweise Salzwiesen in ihrer Ausdehnung und Arten-Gemeinschaft verändert werden. Steigende Temperaturen und CO₂-Gehalte üben zusätzlichen Druck aus (Koop-Jakobsen & Dolch, 2023). Darüber hinaus führt dies zu Veränderungen und Verschiebungen in der zeitlichen Abfolge und Entwicklung von verschiedenen Komponenten der Nahrungsnetze, die sich wiederum auf die Dynamik und Interaktion mehrerer trophischer Ebenen auswirken (Van der Veer et al., 2022).
- Bei einer Zunahme von Strömungsgeschwindigkeiten und Starkregenereignissen kommt es zu kurzfristigen, vermehrten Sedimentaufwirbelungen, was zu einer langfristigen Zunahme der Wassertrübung und davon abhängigen Abnahme der Lichtverfügbarkeit für die Photosynthesebetreibenden Organismen führen kann. Beispielsweise kann eine Reduktion der Lichtverfügbarkeit generell die Menge des Phytoplanktons in der Wassersäule verringern, aber auch die Gemeinschaft innerhalb des Phytoplanktons verändern (Hintz et al., 2022) (2. Ebenso können sessile Organismen des Wattenmeeres, wie das Seegras, durch eine verringerte Lichtverfügbarkeit in ihrem Wachstum beeinflusst werden, was zu einem Rückgang der für die CO₂-Bindung wertvollen Bestände beitragen kann (Projekt SeeUs). Aber auch die photische (lichtdurchflutete) Zone in sublitoralen Habitaten würde sich verändern und infolge dessen die Besiedlung und Gemeinschaften des Benthos beeinflussen (BLANO-Projekt der FachAG Benthos).
- Auch Baggerarbeiten im Zusammenhang mit Bauvorhaben sowie Unterhaltungsmaßnahmen der Wasserstraßen oder die Fischerei können zu einer Zunahme der Wassertrübung führen und ihre Effekte durch den Klimawandel verstärkt werden. Des Weiteren wird eine steigende Tendenz von räumlich und zeitlich stark wechselnden Verschlickungen durch lokale Umlagerungsprozesse beobachtet (z. B. im Rahmen des biologischen Monitorings), die in einigen Bereichen des Wattenmeeres zunehmend häufiger auftreten und sensible Lebensräume wie beispielsweise Miesmuschelbänke oder Seegraswiesen zusätzlich gefährden.
- Aufgrund anthropogener und natürlicher Einflüsse weisen Teile des Wattenmeers heute schon Defizite in der Sedimentversorgung auf. Die Verbringung/Nutzung von Sedimenten aus der Unterhaltung von Schifffahrtsrinnen oder überschüssiges Material aus Bauvorhaben soll zukünftig auf Basis eines ökologischen Konzepts genutzt werden. In erster Linie wird angestrebt den natürlichen Transport mit überschüssigem Material zu unterstützen und Defizite in der Sedimentverfügbarkeit auszugleichen und so eine Klimafolgenanpassung zu unterstützen. Das Projekt SediEms beschäftigte sich in diesem Rahmen mit einer ökologischen Verbringung von Sedimenten unter Berücksichtigung der Dynamik ökologisch sensibler Habitats (Oberrecht et al., 2024).
- Steigende Wassertemperaturen haben bereits einen Effekt an der Basis des Nahrungsnetzes. So sind im Phytoplankton bereits Veränderungen der Zellgröße (Trend hin zu kleineren Zellen) sowie der Zusammensetzung der Gemeinschaft (Trend hin zu kleineren Arten) sichtbar, was hauptsächlich auf steigende Wassertemperaturen zurückzuführen ist, gleichzeitig aber auch durch andere Faktoren, wie sinkende Nährstoffeinträge oder Veränderungen im selektiven Fraßverhalten von Konsumenten, beeinflusst wird (Hillebrand et al., 2022). Die Effekte pflanzen sich im Nahrungsnetz fort, verbunden mit weiteren temperaturbedingten Effekten kommt es zu einer Entkopplung bestehender Räuber-Beute-Beziehungen (Buschbaum et al., 2024). Darüber hinaus belasten Wetterextreme wie Hitzewellen zusätzlich und können für Ereignisse wie das Massensterben der Herzmuscheln 2018 verantwortlich sein (Haan et al., 2021; Troost & Asch, 2018).

Solche direkten und indirekten Effekte des Klimawandels auf das Ökosystem Wattenmeer lassen sich meist auch nicht ohne Weiteres entkoppelt von anderen anthropogenen Einflüssen betrachten.

Während sich beispielsweise Ökosystemeigenschaften durch steigende Temperaturen verändern und damit u. a. geeignete Habitate für invasive Arten bilden können, wird der Eintragungsprozess dieser Arten zusätzlich erheblich durch Schifffahrt und Aquakultur beeinflusst und beschleunigt. Ein prominentes Beispiel für eine invasive Art stellt die Ausbreitung der pazifischen Auster dar, die von den steigenden Wassertemperaturen profitiert hat. Sie ist mittlerweile mit bestehenden Miesmuschelbänken erfolgreich vergesellschaftet und bildet zusammen mit der Miesmuschel ein eigenes Habitat mit Ansiedlungsmöglichkeiten für weitere Arten (Büttger et al., 2022).

Von weiterem Forschungsinteresse ist auch eine Betrachtungsweise hinsichtlich der Ökosystemleistungen, sprich die Funktion eines Ökosystems als Dienstleister für den Menschen. Diese Ökosystemleistungen – unter anderem Fischbestände (Lebensmittel) oder Naherholung (Tourismus) – können dabei stark durch den Klimawandel beeinflusst werden. Direkt in Zusammenhang mit dem Klimawandel steht dabei insbesondere die Funktion der Ozeane und des Wattenmeers, CO₂ zu binden. Hierbei spielt das Wattenmeer eine besondere Rolle, da die Küstenökosysteme (Watt, Seegraswiesen, Salzwiesen) eine besonders hohe Rate an Kohlenstoffbindung aufweisen und so einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz liefern (Mueller et al., 2019). Dies wird derzeit in mehreren Projekten untersucht (z. B. CARBOSTORE, WATTRenature, RestCoast) beziehungsweise durch Maßnahmen des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz, mit dem die Resilienz der Lebensräume gestärkt werden soll. Allerdings kann eine Temperaturerhöhung die Löslichkeit von CO₂ im Wasser verringern, welches dann in die Atmosphäre ausgetragen wird.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wattenmeer sind Gegenstand aktueller Forschung. Jedoch sind die zahlreichen Indikatoren und Wirkungen nur selten voneinander entkoppelt untersuchbar und müssen immer in Kombination mit anderen Einflüssen betrachtet werden. Diese Komplexität erschwert die Prognose zur Entwicklung des Wattenmeers.

Ein beschleunigt ansteigender Meeresspiegel und das damit verbundene größere Tidevolumen kann zu reduzierter Sedimentation im Bereich des Wattenmeeres führen und die Seegangs- und Strömungsbelastung verstärken (KAPITEL 4.2.3, 4.2.4). Das Wattenmeer kann theoretisch durch eine Zunahme der Sedimentablagerungen mitwachsen und so den steigenden Meeresspiegel zumindest teilweise kompensieren. Allerdings ist bislang unklar, bis zu welchem Umfang die Nordsee Sedimente bereitstellt und wie sich das hydromorphodynamische Gleichgewicht bei fehlender Sedimentzufuhr entwickelt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden die Veränderungen in der Meeresspiegelanstiegsrate noch moderat sein, so dass davon ausgegangen wird, dass das Wattenmeer diese kompensieren kann. Bis zum Ende des Jahrhunderts können jedoch die Wattflächen bereits überflutet sein (Heron et al., 2020). Dadurch wären u. a. auch die Vorländer mit den Salzwiesen bedroht, wodurch nicht nur der CO₂-Speicher gefährdet wäre, sondern auch spezielle Lebensräume vieler charakteristischer Tier- und Pflanzenarten unter Druck geraten.

Ein weiterer Anstieg der Wassertemperatur kann dazu führen, dass wärmeliebende Tier- und Pflanzenarten aus anderen Regionen sich vermehrt im Wattenmeer ausbreiten, während bislang heimische Arten als eine Form der Anpassungsstrategie in kältere, nördlich gelegene Regionen abwandern bzw. von den zugewanderten Arten verdrängt werden. Neben der bereits jetzt festgestellten nordwärts gerichteten Abwanderung einiger Fischarten (z. B. Kabeljau) (Buschbaum et al., 2024) könnte es zu einem Abwanderungstrend beispielsweise auch beim Wattwurm kommen (Wetthey & Woodin, 2022).

Aber auch sich ändernde Süßwasser- und Nährstoffeinträge durch die Flüsse beeinflussen bereits heute das Wattenmeer. Verringerte Nährstoffeinträge über die Flüsse Ems, Weser und Elbe führten in den vergangenen Jahrzehnten bereits zu einer Verbesserung der Wasserqualität (KAPITEL 4.2.6), jedoch sind weitere Reduktionen der Nährstoffeinträge nötig, um das Erreichen eines guten ökologischen Zustands im Wattenmeer zu ermöglichen (van Katwijk et al. 2024). Ob und wie sich Veränderungen in den Nährstoffeinträgen auf das Nahrungsnetz des Wattenmeers auswirken, ist derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion (Philippart et al., 2024). Jedoch sind die Wechselwirkungen sich gleichzeitig verändernder Faktoren, wie die Wassertemperaturen und die Nährstoffeinträge, sehr komplex und müssen weitergehend untersucht werden.

INFO

- Das Wattenmeer ist eines der weltweit größten natürlichen Ökosysteme.
- Durch die Gezeiten fallen große Teile des Wattenmeers periodisch trocken.
- Dynamische Prozesse verändern die Gezeitenströme, Platen und Riffe.
- Bislang wachsen die Wattflächen durch Anlagerung von Sedimenten mit dem Wasserstand mit, wovon auch der Küstenschutz profitiert.
- Auswirkungen der Erderwärmung sind bereits sichtbar.
- Die Veränderungsprozesse sind hoch komplex und Gegenstand aktueller Forschung.
- Der Meeresspiegelanstieg hat direkte Auswirkungen auf die Lage und Größe von Biotop-Ausstattungen.
- Vermehrte Sedimentaufwirbelungen verringern die Lichtverfügbarkeit für die Photosynthese.
- Anthropogene Effekte können durch den Klimawandel verstärkt werden.
- Ökologische Konzepte zum Ausgleich von Sedimentdefiziten unterstützen den Erhalt des Wattenmeers.
- Steigende Wassertemperaturen beeinflussen das Nahrungsnetz.
- Steigende Wassertemperaturen können zu Abwanderungen heimischer bzw. Zuwanderung fremder Arten führen.
- Das Wattenmeer ist nicht nur ein einzigartiges Ökosystem, sondern auch eine natürliche Kohlenstoffsенke.
- Ein Anstieg des Meeresspiegels und der Wassertemperatur gilt als sicher.
- Die zahlreichen Indikatoren und Wirkungen des Klimawandels auf das Wattenmeer müssen immer kombiniert mit anderen Einflüssen betrachtet werden, was eine Prognose zur Entwicklung des Wattenmeers erschwert.
- Die Anpassungsfähigkeit des Wattenmeeres ist jedoch noch unklar.
- Zusätzliche Faktoren wirken auf das Ökosystem in ungewissem Ausmaß.
- Ein Anstieg des Meeresspiegels und der Wassertemperatur gilt als sicher.

Bewertung des Klimarisikos

Die Projektionen der einzelnen Klimastressoren sind unterschiedlich robust. Gesichert ist der Anstieg der Temperatur und der damit verbundene Anstieg des Meeresspiegels und der Wassertemperatur. Änderungen in den Wind- und den damit verbundenen Sturm- und Seegangsverhältnissen zeigen keinen eindeutigen Trend.

Mit Hilfe des Klimavulnerabilitätsindex (Climate Vulnerability Index – CVI) wurde die Anfälligkeit des Wattenmeers im Zusammenhang mit temperaturbedingten Klimastressoren bis Mitte und Ende des Jahrhunderts jeweils mit „hoch“ bewertet (Heron et al., 2020; Philippart et al., 2024). Bezüglich des Meeresspiegelanstiegs wird die Anfälligkeit aufgrund der Anpassungsfähigkeit der Morphologie bis Mitte des Jahrhunderts zunächst niedrig eingeschätzt, bis zum Ende des Jahrhunderts jedoch ebenfalls mit hoch.

Allerdings ist eine Bewertung des Risikos der Auswirkungen der Klimaänderungen auf die sensiblen und stark voneinander abhängigen biologischen Komponenten im Ökosystem Wattenmeer schwierig. Dies liegt nicht zuletzt daran, weil die Wirkungszusammenhänge und Folgen für dieses dynamische Ökosystem sehr komplex sind, keinem linearen Trend folgen und Gegenstand aktueller Forschung sind. Bisherige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass zu rasante Veränderungen nicht kompensiert werden können und das Risiko besteht, dass irgendwann ein Kipppunkt erreicht ist, an dem sich die Ökosysteme unumkehrbar verändern (Scheffer et al., 2001).

Daher werden die Klimarisiken insgesamt mit einer geringen Gewissheit bewertet, auch wenn beeinflussende Komponenten wie Meeresspiegelanstieg und Temperatur einen eindeutigen Trend aufweisen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 33: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Entwicklung des Wattenmeers“.

4.2.6 Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer

Der Klimawandel hat bereits heutzutage vielfältige Auswirkungen auf flache, durch Gezeiten beeinflusste Küsten-ökosysteme wie das niedersächsische Wattenmeer und wirkt sich auf verschiedenen Ebenen auf die physikalisch-chemische Wasserqualität und somit wiederum auf die Vielzahl an charakteristischen biologischen Lebensformen aus. Zu den wichtigsten Faktoren, die die Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer beeinflussen, gehören die Flusseinträge (Nähr- und Schadstoffe, Sedimente), Strömungsdynamiken zwischen offener Nordsee und Wattenmeer, lokale Prozesse wie Resuspension von Sedimenten sowie atmosphärische Faktoren wie Niederschlag und Gasaustausch (Philippart et al., 2024).

Die durch den Klimawandel bedingten Änderungen in der Stärke von Einströmungen aus der offenen Nordsee und über die Flüsse haben einen großen Einfluss auf Parameter wie Wassertemperatur, Salinität, Schweb- und Nährstoffgehalte und wirken somit direkt auf die Wasserqualität (van der Molen et al., 2022). Neben dem Klimawandel wirken weitere vom Menschen verursachte Belastungen auf die Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer, wie u. a. starker Schiffsverkehr und dadurch bedingte Emissionen, Fischerei, on- und offshore Bauvorhaben der Energiewende, Tourismus, Einleitung von Nähr- und Schadstoffen, Abfällen und Abwasser etc. Die niedersächsischen Küstengewässer befinden sich nach der Wasserrahmenrichtlinie daher in einem schlechten chemischen Zustand und auch der ökologische Zustand bzw. das ökologische Potenzial erreicht in den Übergangs- und Küstengewässern nur einen mäßigen bis schlechten Zustand (MU, 2021). Die Wechselwirkungen zwischen den genannten multiplen Belastungen sind komplex und bedingen und verstärken sich zum Teil gegenseitig, so dass die Folgen selten auf einen einzelnen Parameter zurückzuführen sind. Es ist davon auszugehen, dass die Klimawirkung einiger dieser Faktoren auf die Wasserqualität und somit auf das empfindliche Ökosystem Wattenmeer im Laufe der nächsten Jahrzehnte noch zunehmen wird, wobei nach wie vor große Unsicherheiten bestehen.

Hintergrund und Stand der Forschung

Im Folgenden werden die Einflüsse von Temperaturerhöhung, Versauerung, Lichtverfügbarkeit, Eutrophierung und Sauerstoffgehalt auf die Wasserqualität niedersächsischer Übergangs- und Küstengewässer näher erläutert, um anschließend die zu erwartende Entwicklung dieser Faktoren im Zuge des Klimawandels zu betrachten.

Temperaturerhöhung

Die globale Temperaturerhöhung im Zuge des Klimawandels erreicht im Wattenmeer bereits ein extremes Ausmaß: Hier hat sich die mittlere Wassertemperatur im nördlichen Wattenmeer (Schleswig-Holstein) in den letzten 60 Jahren um 1,8 °C erhöht (0,31 °C pro Dekade nach Buschbaum et al. (2024) und im südlichen Wattenmeer (Niedersachsen und Niederlande) in den letzten 50 Jahren um 2 °C (0,4 °C pro Dekade nach Rönn et al. (2023)). Der Anstieg der Wassertemperatur im Wattenmeer ist somit fast doppelt so stark wie im globalen Vergleich, und die sehr warmen Wassertemperaturen im Sommer sowie die milden Wassertemperaturen im Winter tragen hierzu gleichermaßen bei (Buschbaum et al., 2024). Im Juni 2023 wurden im südlichen Wattenmeer (Station Marsdiep in den Niederlanden) die bis dahin höchsten Wassertemperaturen der letzten 160 Jahren gemessen (Philippart et al., 2024). Der Temperaturanstieg ist ebenso an den niedersächsischen Messstationen (Langzeitmessreihe Norderney, Abbildung 29) erkennbar.

Neben dem Anstieg der Wassertemperatur werden temporäre Hitzewellen (mit 3-5 °C über dem Durchschnitt) in ihrem Ausmaß häufiger und sind von längerer Dauer (Heron et al., 2020; IPCC, 2019c), was wiederum besonders charakteristische Lebensräume im Wattenmeer wie Seegrasswiesen und Muschelbänke beeinflusst (Philippart et al., 2024), (KAPITEL 4.2.5). Das Wattenmeer hat besonders durch die Tidedynamik generell auch eine hohe Temperaturdynamik, insbesondere im eulitoral Bereich, der durch die Gezeiten ständig trockenfällt und überspült wird. Hier müssen die Organismen besonders viele Schwankungen ertragen. Höhere Temperaturen könnten hier eventuell die Toleranzgrenzen einiger Arten überschreiten.

Die Erhöhung der Wassertemperatur führt ebenfalls zu einer verstärkten Einwanderung von wärmeliebenden Arten ins Ökosystem Wattenmeer, die zwar bisher die lokalen Lebensgemeinschaften nicht bedrohen und noch zu keiner vollständigen Verdrängung heimischer Arten führen, die aber zu einer langfristigen Veränderung des Ökosystems und dessen Funktionen beitragen (Buschbaum et al., 2024), (KAPITEL 4.2.5).

Da die Wassertemperatur auch einen maßgeblichen Einfluss auf die Physiologie sowie auf Lebens- und Entwicklungszyklen von marinen Organismen hat, sind auch hier langfristig erhebliche Auswirkungen auf Vorkommen und Reproduktion von Arten, Nahrungsnetze sowie Funktionen des Ökosystems zu erwarten und schon heute erkennbar, wie zum Beispiel frühere Phytoplanktonblüten im Frühjahr, oder zeitliche Entkopplung von Räuber- und Beuteorganismen (Buschbaum et al., 2024).

Erste Hinweise liefert beispielsweise die Veränderung der Größe von Phytoplanktonorganismen, welche unmittelbar von sich ändernden Umweltbedingungen beeinflusst sind; sowohl die einzelnen Phytoplanktonzellen als auch die Arten der Phytoplanktongemeinschaft im Wattenmeer werden zunehmend kleiner (Hillebrand et al., 2022), was sich wiederum auf höhere trophische Ebenen im Nahrungsnetz auswirken kann (KAPITEL 4.2.5 und 4.1).

Versauerung

Der Klimawandel beruht auf einem raschen Anstieg des globalen atmosphärischen CO_2 -Gehalts, in erster Linie freigesetzt aus anthropogenen Verbrennungsprozessen, hauptsächlich fossiler Brennstoffe. Grundsätzlich stehen die Ozeane über die Meeresoberflächen im kontinuierlichen Gasaustausch mit der Atmosphäre und nehmen somit stetig einen Anteil der anthropogen verursachten CO_2 -Emissionen auf. Seit den 1980er-Jahren hat der Ozean schätzungsweise 20-30 % der globalen anthropogenen CO_2 -Emissionen aufgenommen (IPCC, 2019c).

Da CO_2 durch die Photosynthese fest als Kohlenstoff in Biomasse gebunden wird, ist die Primärproduktion in der photischen (lichtdurchfluteten) Zone durch Phytoplankton und Phytobenthos eine wichtige CO_2 -Senke (Buschbaum et al., 2024). Besonders Seegraswiesen, Salzwiesen, Kalkflagellaten (Coccolithophoriden) und feinkörnige Sedimente können große Mengen CO_2 aufnehmen (Fourqurean et al., 2012; Ogden, 2006). Dieser Kompensationseffekt verringert sich jedoch im niedersächsischen Wattenmeer durch einen massiven Rückgang der Seegrasbestände (Kolbe, 2021). Die Bestände können ihre Ökosystemfunktion kaum noch erfüllen, ihr Grad der Bedeckung und die Flächenausdehnung sind alarmierend gesunken (KÜFOG GmbH & Steuer, 2020). Ursprünglich gebundenes CO_2 gelangt aus dem Ozean aber auch wieder in die Atmosphäre, z. B. durch mechanische Einwirkungen auf den Meeresboden wie Schleppnetzerei und Baumaßnahmen. Diese Faktoren verstärken dadurch zusätzlich den Klimawandel.

Eine erhöhte CO_2 -Verfügbarkeit kann in direkter Folge die Photosyntheserate beeinflussen, wobei sich dieser Effekt sowohl förderlich als auch hemmend zeigen kann. So werden bei einigen Arten der Kieselalgen (Diatomeen) erhöhte Photosyntheseraten und/oder vermehrtes Wachstum beobachtet (Gao & Campbell, 2014). Zum Teil sind aber auch Photoinhibition, d. h. die Hemmung der Photo-

syntheseleistung bei Starklicht, und/oder verringertes Wachstum die Folge einer höheren CO_2 -Konzentration. Kieselalgen besiedeln in großer Zahl das belichtete Sediment und bilden einen wichtigen Grundstein des Nahrungsnetzes im Wattenmeer, weshalb sich der Klimawandel somit auf weitere an sie gekoppelte Gruppen des Nahrungsnetzes auswirkt.

Auch die Pflanzen der Salzmarschen reagieren auf eine veränderte CO_2 -Verfügbarkeit, wobei anhand von Mesokosmos-Studien im Zuge der Klimaveränderung eine Dominanz des Salz-Schlickgrases (*Spartina anglica*) gegenüber anderen Pionier-Arten vermutet wird (Koop-Jakobsen & Dolch, 2023). Eine so entstehende Monokultur in der Pionierzone der Salzmarschen wäre störanfälliger als komplexstrukturierte Ökosysteme, wo diverse Arten gleichzeitig nebeneinander auftreten.

Als direkte Folge eines erhöhten CO_2 -Gehalts sinkt der pH-Wert des Wassers ab, da das CO_2 in Reaktion mit Wasser Protonen abgibt. In Langzeitmessreihen vor Norderney zeichnet sich dieser Trend inzwischen leicht ab (Abbildung 29) und wird sich in Zukunft fortsetzen (Birchenough et al., 2017; IPCC, 2019c). Die sogenannte Versauerung des Meeres beeinflusst die biogene Kalzifizierung kalkbildender Organismen wie Algen, Kalkflagellaten, Muscheln und Schnecken sowie Krebstieren und Stachelhäutern. Daneben wirkt sich ein langfristig niedrigerer pH-Wert auch auf den Stoffwechsel mariner Organismen aus.

Die Versauerung beeinflusst einige Gruppen im Negativen (am deutlichsten kalzifizierende Organismen), andere dagegen im Positiven (vor allem Photosynthesebetreibende Organismen, wie z. B. die Kieselalgen), vgl. Abbildung 30 (Kroeker et al., 2013), wodurch ein Regimewechsel und eine Veränderung der Ökosystemstruktur wahrscheinlich wird. Im Gegensatz zum offenen Ozean sind Küstenökosysteme und Ästuare anfälliger für schnellere Veränderungen der Umweltbedingungen und daher vom Klimawandel stärker beeinflusst. Küstengebiete wie das Wattenmeer sind hoch produktive Systeme, deren Stoffumsatz über das Nahrungsnetz die Nahrungsgrundlage vieler verschiedener Gruppen bildet, letztlich auch Seevögel und marine Säuger (z. B. Seehunde). Veränderungen an der Basis des Nahrungsnetzes haben daher Einfluss auf das ganze System.

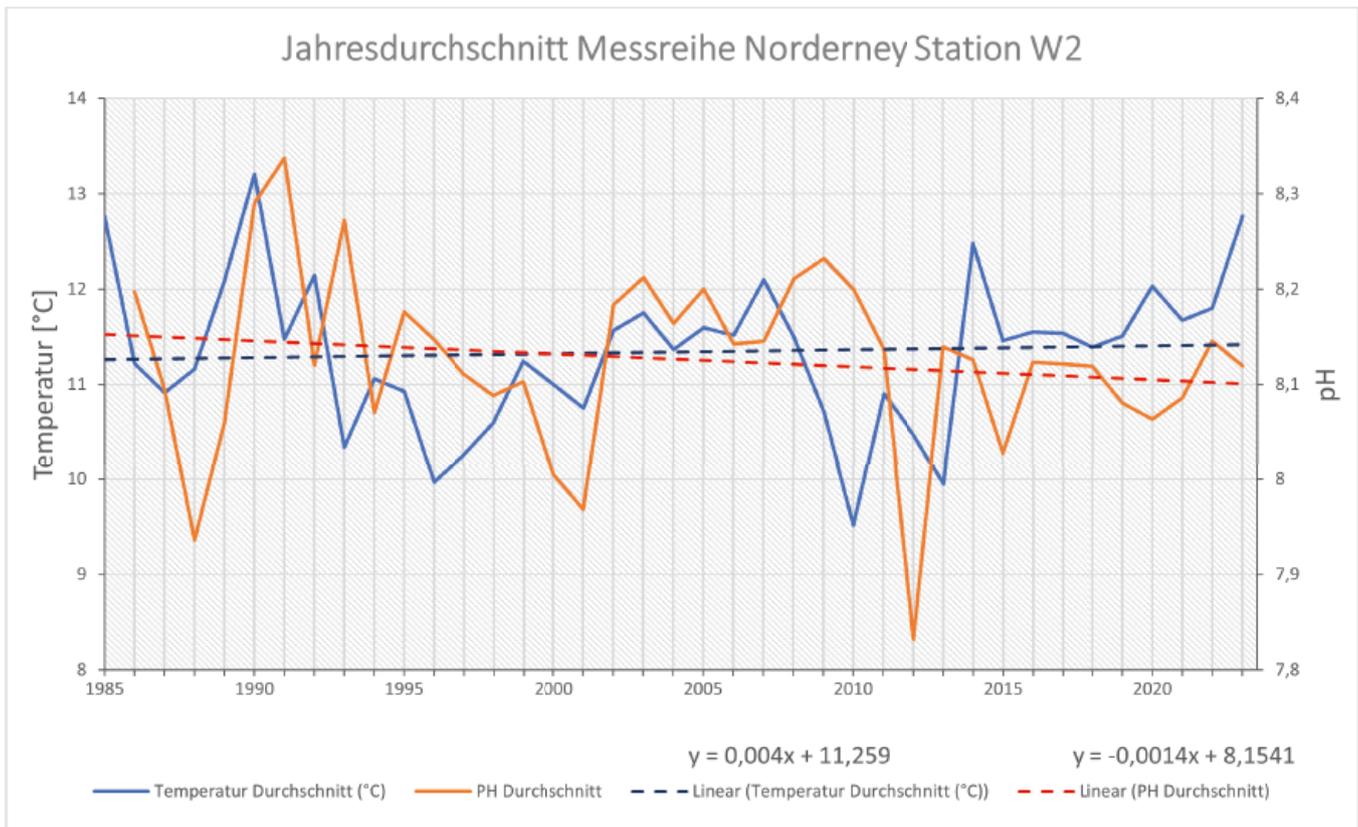


Abbildung 29: Langzeitmessreihe der Station Norderney W2 von 1985 bis 2023 für die durchschnittliche Wassertemperatur (blau) und den durchschnittlichen pH-Wert (rot) des Wassers. Die aufgezeichnete lineare Trendlinie für die Temperatur steigt in diesem Zeitraum leicht an, während die lineare Trendlinie für pH leicht abfällt. Quelle: NLWKN

Lichtverfügbarkeit

Die Gezeitenströmungen und die damit einhergehende zyklische Durchmischung der Wassermassen in den Übergangs- und Küstengewässern beeinflussen die Wasserqualität wesentlich. Sedimente und Schwebstoffe werden durch diese Prozesse vom Meeresboden aufgewirbelt und im Wasser gehalten, wodurch eine hohe Trübung und die charakteristisch braune Farbe der Nordsee entstehen. Dies verringert die Lichtverfügbarkeit in der Wassersäule, was sich wiederum negativ auf die Produktivität von Phytoplankton, Makroalgen und Seegras auswirken kann.

Der Klimawandel beeinflusst die Lichtverfügbarkeit in den Küstengewässern anhand verschiedener Prozesse. Durch eine Zunahme von Strömungsgeschwindigkeiten, Wetterextremen und Starkregenereignissen (IPCC, 2021b) erodiert mehr terrestrisches Material und Sedimente werden stärker aufgewirbelt, was eine weitere Zunahme der Trübung bewirkt (Hintz et al., 2022), (KAPITEL 4.2.5). Während in offenen Ozeanen eine höhere Lichtverfügbarkeit einen kompensatorischen Effekt auf die (pH-Abnahmebedingte) erschwerte Kalzifizierung der Kalkflagellaten haben kann, wird dieser ausgleichende Effekt im flachen Wattenmeer aufgrund der Trübungszunahme vermutlich nicht eintreten. Kalkflagellaten gelten als wichtige CO_2 -Fixierer, eine erhöhte Trübung wirkt sich, neben dem Einfluss der Versauerung, negativ auf ihre Kohlenstofffixierung aus. Eine

Veränderung der Lichtverhältnisse bzw. der Ausdehnung der photischen Zone, beeinflusst direkt die Gemeinschaft und Besiedlungsdichte der Primärproduzenten (wie Kieselalgen). Dies wirkt sich im Folgenden weiter auf die höheren Ebenen des Nahrungsnetzes aus, wie z. B. die Besiedlung und Gemeinschaften der am Meeresboden lebenden Organismen.

Eutrophierung

Der Eintrag von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor über die Flüsse in die niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer hat sich seit den 1980er-Jahren durch wirksame Maßnahmen stark vermindert, was zu einer Verringerung der Eutrophierung und somit zu einer Verbesserung der Wasserqualität führte (van Beusekom et al., 2019), (KAPITEL 4.2.5). Obwohl mit der Reduktion der Nährstoffeinträge auch zunächst eine Verringerung der Phytoplanktonbiomasse einherging (van Beusekom et al., 2019), weist das südliche Wattenmeer nach wie vor erhöhte Nährstoff- sowie Chlorophyll-a-Konzentrationen (ein Indikator für Phytoplanktonbiomasse) auf (Di Cavalho et al., 2023; Rönn et al., 2023) und befindet sich daher nach Wasserrahmenrichtlinie nach wie vor in einem mäßigen bis schlechten ökologischen Zustand. Die Anreicherung von Nährstoffen im Sediment sowie deren Resuspension in die Wassersäule (hierbei vor allem Phosphor) ist ein charakteristischer Prozess in den Wattengebieten,

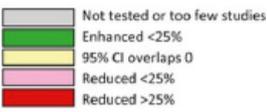
Taxa	Response	Mean Effect	
 Calcifying algae	Survival		
	Calcification		
	Growth		
	Photosynthesis	-28%	
	Abundance	-80%	
 Corals	Survival		
	Calcification	-32%	
	Growth		
	Photosynthesis		
	Abundance	-47%	
 Coccolithophores	Survival		
	Calcification	-23%	
	Growth		
	Photosynthesis		
	Abundance		
 Mollusks	Survival	-34%	
	Calcification	-40%	
	Growth	-17%	
	Development	-25%	
	Abundance		
 Echinoderms	Survival		
	Calcification		
	Growth	-10%	
	Development	-11%	
	Abundance		
 Crustaceans	Survival		
	Calcification		
	Growth		
	Development		
	Abundance		
 Fish	Survival		
	Calcification		
	Growth		
	Development		
	Abundance		
 Fleshy algae	Survival		
	Calcification		
	Growth	+22%	
	Photosynthesis		
	Abundance		
 Seagrasses	Survival		
	Calcification		
	Growth		
	Photosynthesis		
	Abundance		
 Diatoms	Survival		
	Calcification		
	Growth	+17%	
	Photosynthesis	+12%	
	Abundance		

Abbildung 30:
Überblick verschiedener Effekte der Versauerung für wichtige taxonomischer Gruppen, für die Aspekte Überleben, Kalzifizierung, Wachstum, Photosynthese, Abundanz und Entwicklung, Quelle: Kroecker et al. 2013.

der eine kontinuierliche, interne Quelle an Nährstoffen darstellt (U. H. Brockmann, 1997). Das Wachstum des Phytoplanktons ist neben der Nährstoffverfügbarkeit ebenso von weiteren Faktoren wie Trübung bzw. Lichtverfügbarkeit, Wassertemperatur und Fraßdruck abhängig, die im Zuge des Klimawandels simultane Veränderungen erfahren und deren Effekte auf die Phytoplanktonbiomasse noch nicht umfassend verstanden sind (Rönn et al., 2023). Veränderungen an der Basis des Nahrungsnetzes können wiederum unmittelbare Auswirkungen auf höhere trophische Ebenen wie Fische und Bodenlebewesen sowie See- und Zugvögel und somit auf die Funktion des Ökosystems haben (Büttger et al., 2022; Philippart et al., 2024), (KAPITEL 4.1 und 4.2.5). Trotz der bereits erzielten Reduzierung der Nährstoffeinträge sind die niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer nach wie vor eutrophiert, was sich neben dem Phytoplankton auch auf die Seegrassbestände auswirkt (van Katwijk et al. 2024). Da die Abnahme der Nährstoffeinträge über die Flüsse aktuell eher stagniert, sind weitere Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge nötig, um die negativen Auswirkungen der Eutrophierung im Wattenmeer weiter zu reduzieren.

Sauerstoffgehalt

Die oberflächennahen Meeresschichten sind gewöhnlich mit Sauerstoff gesättigt, da dort der direkte Gasaustausch mit der Atmosphäre stattfindet. Obwohl der Anstieg der Meerestemperatur die Löslichkeit für Sauerstoff im Wasser reduziert, stellt Sauerstoffmangel aufgrund der intensiven und regelmäßigen Durchmischung der Wassersäule durch die Gezeiten aktuell kein Problem im niedersächsischen Wattenmeer dar. In den Übergangsgewässern ist die Situation jedoch eine andere; die Nährstoffeinträge von landwirtschaftlichen Flächen können dort die Bildung von unnatürlich starken Algenblüten begünstigen, die im weiteren Flussverlauf unter ungünstigeren Lichtbedingungen (erhöhter Trübung) absterben und unter hoher mikrobieller Sauerstoffzehrung abgebaut werden. Diese Prozesse, ausgelöst durch die Eutrophierung, führen in den Übergangsgewässern regelmäßig zu lokalem und temporärem Sauerstoffmangel (Brinkman & Jacobs, 2023; Schöl, 2015). Besonders davon betroffen ist die Tideelbe in den Sommermonaten, wo die Sauerstoffkonzentration unter den kritischen Wert von 4 mg/L sinkt, was zu akutem Fischsterben führen kann (Schöl, 2015). Ein Sauerstoffmangel in den Übergangsgewässern kann sich auf viele Fischpopulationen auswirken, viele Arten wandern zwischen den Fließgewässern und dem Meer oder suchen gezielt die Übergangsgewässer während ihres Lebenszyklus oder einer bestimmten Saison auf.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die vielfältigen physikalisch-chemischen sowie anthropogenen Belastungen, die im Allgemeinen auf die Wasserqualität der niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer und im Besonderen auf das komplexe und dynamische Ökosystem Wattenmeer einwirken, ändern sich im Zuge des Klimawandels gleichzeitig, z. T. gegenläufig und bedingen sich gegenseitig. Aufgrund dieser komplexen Wechselwirkungen lassen sich die zu erwartenden Auswirkungen einzelner Klimastressoren auf die Wasserqualität und das Ökosystem mit seinen charakteristischen Habitaten und Organismen nur schwer vorhersehen und nicht isoliert voneinander bewerten. Weitere zu erwartende Klimawirkungen wie eine veränderte Strömungsdynamik und der Meeresspiegelanstieg (IPCC, 2019c) haben ebenfalls einen Effekt auf die Wasserqualität (KAPITEL 4.2.1 und 4.2.4).

Temperaturerhöhung

Die Projektionen der einzelnen Klimastressoren sind zudem unterschiedlich robust. Gesichert ist der Anstieg der globalen Temperatur und der damit verbundene Anstieg des Meeresspiegels und der Wassertemperatur (IPCC, 2019c, 2021b). Mit Hilfe des Klimavulnerabilitätsindex (Climate Vulnerability Index – CVI) wurde die Anfälligkeit des Wattenmeers im Zusammenhang mit temperaturbedingten Klimastressoren bis Mitte und Ende des Jahrhunderts jeweils mit „hoch“ bewertet (Heron et al., 2020; Philippart et al., 2024).

Sauerstoffgehalt

Durch die Zunahme von heißeren und trockeneren Sommern ist anzunehmen, dass es in Gewässern wie den niedersächsischen Flüssen und Übergangsgewässern durch erhöhte bakterielle Atmung öfter zu Sauerstoffmangelsituationen kommen kann (NLWKN, 2021b) und sich Bereiche mit Sauerstoffmangel ausdehnen (IPCC, 2019c), die akut das Überleben höherer Organismen gefährden.

Versauerung

Trotz internationaler Bemühungen die CO₂-Emissionen zu reduzieren, zeichnet sich derzeit global noch keine Trendumkehr ab. Einhergehend mit höheren CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre wird auch weiterhin die Versauerung der Meeresgewässer mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zunehmen (IPCC, 2019c). Auf diesen Trend deutet auch die Aufzeichnung der pH-Werte der Langzeitmessreihe an der Monitoringstation Norderney hin. Der aktuelle Rückgang biologischer CO₂-Fixierer, wie die Seegrasbestände, intensivieren diese Entwicklung zusätzlich.

Lichtverfügbarkeit

Auch ist künftig von einer Zunahme von Strömungsgeschwindigkeiten in den Übergangs- und Küstengewässern sowie von Wetterextremen und Starkregenereignissen in der Küstenregion auszugehen (IPCC, 2021b), die zu Erosion und Aufwirbelung von Material führen. Die dadurch bedingte Trübung und einhergehende Abnahme der Lichtverfügbarkeit in der Wassersäule, wird daher sehr wahrscheinlich weiterhin anhalten.

Eutrophierung

Aufgrund der mit hoher Wahrscheinlichkeit eintretenden Zunahme von Wetterextremen (IPCC, 2021b), können die Auswirkungen auf die Nährstoffeinträge in die Übergangs- und Küstengewässer im Jahresverlauf sehr unterschiedlich ausfallen. Einhergehend mit zunehmenden extremen Dürren und Jahren mit geringen Niederschlägen (Ossó et al., 2022; Sieck et al., 2021) wird sich der Eintrag von Süßwasser und Nährstoffen über die Flüsse ins Wattenmeer vermindern. Auf der anderen Seite werden tendenziell zunehmende STARKREGENEREIGNISSE lokal und temporär die Flusseinträge erhöhen.

Zukünftige Entwicklungen in der Landwirtschaft und Industrie werden ebenfalls die Nährstofffrachten, die über die Flüsse und Siele in die Übergangs- und Küstengewässer eingetragen werden, beeinflussen. Es wird erwartet, dass das Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor (N:P-Verhältnis) in europäischen Küstengewässern weiter ansteigt (Grizzetti et al., 2012), was bereits im niedersächsischen Wattenmeer zu beobachten ist (Rönn et al., 2023; van Beusekom et al., 2019). Dies kann sich wiederum auf die Wasserqualität, biogeochemische Prozesse und Nahrungsnetze in den Übergangs- und Küstengewässern auswirken und ist Gegenstand aktueller Forschung. Im Allgemeinen wird angenommen, dass Klimastressoren wie erhöhte Temperaturen und verringerte Flussabflussmengen in Verbindung mit EU-Maßnahmen und -Richtlinien zur weiteren Verringerung der Eutrophierung und der Phytoplanktonbiomasse führen (Buschbaum et al., 2024). Allerdings hängt die Entwicklung der Phytoplanktonbiomasse auch von der gleichzeitigen Veränderung anderer Umweltfaktoren ab, die wiederum entgegengesetzte Effekte haben können (Buschbaum et al., 2024; Rönn et al., 2023), (KAPITEL 4.2.5). Die Komplexität dieser Wechselbeziehungen ist noch nicht gänzlich verstanden und beschreibt den weiteren Forschungsbedarf in diesem Feld.

INFO

- Der Klimawandel hat vielfältige Auswirkungen auf die Wasserqualität der nds. Übergangs- und Küstengewässer sowie auf Küstenökosysteme wie das Wattenmeer.
- Auch Schiffsverkehr und damit verbundene Emissionen, Fischerei, Bauvorhaben der Energiewende, Tourismus und die Einleitung von Schadstoffen nehmen Einfluss auf die Qualität.
- Der bisherige Anstieg der Wassertemperatur im Wattenmeer ist fast doppelt so stark wie im globalen Vergleich, auch temporäre Hitzewellen werden häufiger, was Stoffumsätze und Lebensräume im Wattenmeer beeinflusst und wärmeliebende Arten fördert, bzw. weniger wärmeliebende Arten unter Stress setzt.
- Als direkte Folge des erhöhten CO₂-Gehalts sinkt der pH-Wert des Meerwassers. Diese sog. Versauerung des Meeres beeinflusst u. a. Algen, Muscheln, Schnecken und Krebstiere.
- Die erhöhte CO₂-Verfügbarkeit kann förderlich, aber auch hemmend auf die Photosyntheseraten und somit auf das Wachstum von Kieselalgen wirken.
- Klimawandelfolgen wie zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten, Wetterextreme und Starkregenereignisse führen dazu, dass mehr terrestrisches Material erodiert, mehr Sedimente aufgewirbelt wird und die Wassertrübung weiter zunimmt.
- Es wurde eine Reduzierung der Eutrophierung durch verringerte Nährstoffeinträge erreicht.
- Im Wattenmeer ist Sauerstoffmangel aktuell kein Problem, jedoch könnte der Sauerstoffgehalt in den Übergangsgewässern infolge von starken Algenblüten regelmäßig unter ein kritisches Niveau fallen, und dadurch Wirbeltiergruppen wie Fische gefährden.
- Trübung, Wassertemperatur und Fraßdruck ändern sich durch den Klimawandel und könnten, in Bezug auf das Wachstum von Phytoplankton, möglicherweise dem Effekt eines inzwischen reduzierten Nährstoffeintrags entgegenwirken.
- Es wurde bereits eine Verringerung der Nährstoffeinträge erreicht, weitere Reduktionen der Flusseinträge sind jedoch nötig, um negative Auswirkungen der Eutrophierung im Ökosystem Wattenmeer zu verringern.
- Während Temperatur, CO₂- und O₂-Gehalt einem eindeutigen Trend folgen, sind Änderungen bei anderen Einflussgrößen wie Eutrophierung weniger eindeutig vorhersagbar.
- Klimastressoren können sowohl negative als auch positive Auswirkungen auf Organismen haben. Gesamtvorhersagen für das Ökosystem Wattenmeer lassen sich daher nur äußerst schwer treffen.
- Die weitere Entwicklung der Wasserqualität ist durch die komplexen Zusammenhänge mit großer Unsicherheit verbunden.

Bewertung des Klimarisikos

Wie bereits dargelegt, lassen sich die komplexen Wechselwirkungen der zu erwartenden Auswirkungen einzelner Klimastressoren auf die Wasserqualität der niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer und das Ökosystem Wattenmeer mit seinen charakteristischen Habitaten und Organismen z. T. nur schwer vorhersagen und nicht isoliert voneinander betrachten. So ist auch eine Bewertung des Risikos der Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Wasserqualität je nach Einflussgröße unterschiedlich sicher zu projizieren.

Während Wassertemperatur und CO₂-Gehalt bislang einem eindeutig zunehmenden Trend folgen (IPCC, 2019c), wovon auch der sinkende pH-Wert und die Sauerstoffkapazität direkt abhängen, verhält es sich bei anderen Einflussgrößen nicht eindeutig. Was den Anteil der u. a. durch Wetterextreme verursachten erhöhten Trübung und Lichtlimitierung betrifft, ist zwar mit einer weiteren

Zunahme zu rechnen, der Anteil weiterer anthropogen bedingter Belastungen ist jedoch nicht leicht vorherzusagen. Auch die Entwicklung der Eutrophierung, und damit einhergehend der Phytoplanktonbiomasse, hängt zum einen von den anthropogen bedingten Nährstoffeinträgen ab, gleichzeitig aber auch von der Veränderung weiterer Umweltfaktoren und deren Wechselwirkungen, die bislang noch nicht gänzlich verstanden sind. Die Bewertung des Risikos der Klimawirkung auf die Wasserqualität in den niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässern sowie auf das gesamte Ökosystem Wattenmeer ist daher schwierig zu prognostizieren und die weitere Entwicklung ist mit großer Unsicherheit verbunden (KAPITEL 4.2.5).

Daher werden die Klimarisiken insgesamt mit einer geringen Gewissheit bewertet, auch wenn die prägnantesten Klimastressoren wie Temperatur, CO₂-Gehalt und pH-Wert einen deutlichen Trend aufweisen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 34: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Wasserqualität“.

4.2.7 Küstennahe Grundwasserversalzung

Süßes Grundwasser ist die wichtigste Wasserressource für die öffentliche Wasserversorgung in Niedersachsen, sowohl auf dem Festland als auch auf den Inseln (MU, 2022c; Röper et al., 2012; Streif, 1990; Sulzbacher et al., 2012). In Küstennähe kann es durch den Klimawandel zu einer zunehmenden Grundwasserversalzung kommen. Das vor allem durch den Meeresspiegelanstieg bedingte Vordringen des Meerwassers landeinwärts wird als Salzwasserintrusion bezeichnet. Hierbei schiebt sich das dichtere Salzwasser keilförmig unter das Süßwasser. Auch anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt wie z. B. Grundwasserförderung und Binnenentwässerung können das Problem verstärken.

Hintergrund und Stand der Forschung

Weltweit ist das Grundwasser durch Versalzung gefährdet, dies gilt insbesondere für den Küstenraum. Hier wirken Salzwasserintrusion durch den Meeresspiegelanstieg, Grundwasserentnahmen und Entwässerung, aber auch Landabsenkung und andere Klimafaktoren zusammen. Neben der eher langsamen Salzwasserintrusion (Werner et al., 2013) kann Grundwasserversalzung auch durch oberirdische Überflutungen während Sturmfluten verursacht werden, in Folge derer Salzwasser in den Untergrund infiltriert (Paldor & Michael, 2021). Durch die oft dichte Besiedlung im Küstenraum und damit einhergehende Wasserentnahmen wird das Problem zusätzlich verstärkt (Werner et al., 2013). Grundwasserversalzung ist global ein wesentliches Problem für das Wassermanagement in Küstenregionen, insbesondere für flache Küsten wie z. B. die Niederlande (Oude Essink, 2001; Oude Essink et al., 2010), die Niedersachsen küstennah diesbezüglich ähneln, und Inseln (White & Falkland, 2010). Bereits bei einer Zumischung von etwa einem Prozent Meerwasser ist Süßwasser nicht mehr zum Trinken geeignet. Zu den negativen, langfristigen Folgen von Grundwasserversalzung zählen Probleme für die Trinkwasserproduktion, aber auch eine Qualitätsverschlechterung von Bewässerungswasser oder grundwassergespeisten Oberflächengewässern kann daraus resultieren. Durch diese können sich letztlich auch Folgen für Böden und den ökologischen Zustand von Flüssen, Bächen und Seen ergeben (Werner et al., 2013). Auch für die flachen Küstengebiete Nieder-

sachsens ist die Problematik der Grundwasserversalzung ein relevantes und hochaktuelles Thema (González, Deus, Elbracht, Azizur Rahman, et al., 2021; Karrasch et al., 2023; Seibert et al., 2024). Neben dem steigenden Meeresspiegel ist die Grundwasserneubildung für die Grundwasserversalzung relevant, deren Langzeitentwicklung im Zuge des Klimawandels insbesondere für die Inseln unsicher ist (Ley et al., 2023). Das Ausmaß der Versalzung hängt außerdem stark von der Morphologie sowie der Geologie der Grundwasserleiter ab (Wiederhold & Elbracht, 2013). Die dichteabhängige Strömung in den betroffenen Küstengrundwasserleitern ist komplex und die Datenlage oft nicht ausreichend, so dass Vorhersagen über das zukünftige Ausmaß der Versalzung durch Grundwassermodelle mit großen Unsicherheiten einhergehen (Werner et al., 2013).

In Niedersachsen ist ein bis zu 20 km breiter Streifen des Grundwassers am Festland entlang der Nordseeküste und der Ästuarbereiche bereits oberflächennah von Grundwasserversalzung betroffen (González, Deus, Elbracht, Siemon, et al., 2021), die aktuelle Lage der Salz-Süßwassergrenze ist auf dem NIBIS-Server des LBEG abrufbar (NIBIS®). Diese Versalzung ist Folge des allgemeinen Meeresspiegelanstieges im Holozän und betrifft vor allem die Salzmarschen und Ästuarbereiche. Seibert et al. (2023) rekonstruierten die Entwicklung der Grundwassersalinität in den vergangenen 9000 Jahren mit Hilfe eines dichteabhängigen Grundwasserströmungsmodells für das Gebiet zwischen Ems und Weser in Nordwestdeutschland. Die Simulationen unter Berücksichtigung von Meeresspiegelanstieg, paläogeographischer Entwicklung, Deichlinien und sich ändernder Geländehöhen zeigten, dass der Effekt des holozänen Meeresspiegelanstiegs etwa bis 1300 Hauptursache der Versalzung war, diese Entwicklung mit Beginn des Deichbaus jedoch durch anthropogene Maßnahmen (Entwässerung, Landabsenkung, Torfdegradation) stark überprägt und beschleunigt wurde. Es zeigte sich auch, dass die Berücksichtigung der Vergangenheit als Grundlage für sich anschließende Grundwassermodellierungen von Klimaszenarien (Seibert et al., 2024) wichtig ist; die Studie Seibert et al. (2023) lieferte hierzu die rekonstruierte Lage der Salz-Süßwassergrenzfläche im Modellgebiet.

Auf den vorgelagerten niedersächsischen Barriereinseln haben sich durch die Versickerung von Niederschlägen in den vergangenen Jahrhunderten mächtige Süßwasserlinsen gebildet (Houben et al., 2014; Röper et al., 2012). Generell hängt die Größe der Süßwasserlinsen von der Inselgröße und -form, der Grundwasserneubildungsrate sowie der hydraulischen Leitfähigkeit ab, zusätzlich spielt die Tide eine große Rolle (Thissen et al., 2024). Auf den Inseln wäre eine Versalzung besonders dramatisch, da die Süßwasserlinsen hier die einzigen Süßwasserressourcen sind. Bereits eine einmalige Überflutung mit salzigem Meerwasser kann die Förderung von Trinkwasser aus der Süßwasserlinse für Jahrzehnte unmöglich machen.

So führte die Überflutung großer Gebiete Baltrums während der Sturmflut von 1962 zu einer Versalzung der dortigen Süßwasserlinse und einem Einstellen der Förderung für die Trinkwasserproduktion (Post & Houben, 2017), so dass die Insel heute über eine Leitung zum Festland verfügt. Neben der Versalzungsproblematik ist es auch denkbar, dass sich aus der Anhebung der Grundwasserstände in Folge des Meeresspiegelanstiegs bei gleichbleibenden Geländehöhen Probleme mit zunehmender Vernässung durch die geringeren Flurabstände auf den Inseln ergeben, was wiederum eine Entwässerung nötig machen könnte (KAPITEL 4.3.3).

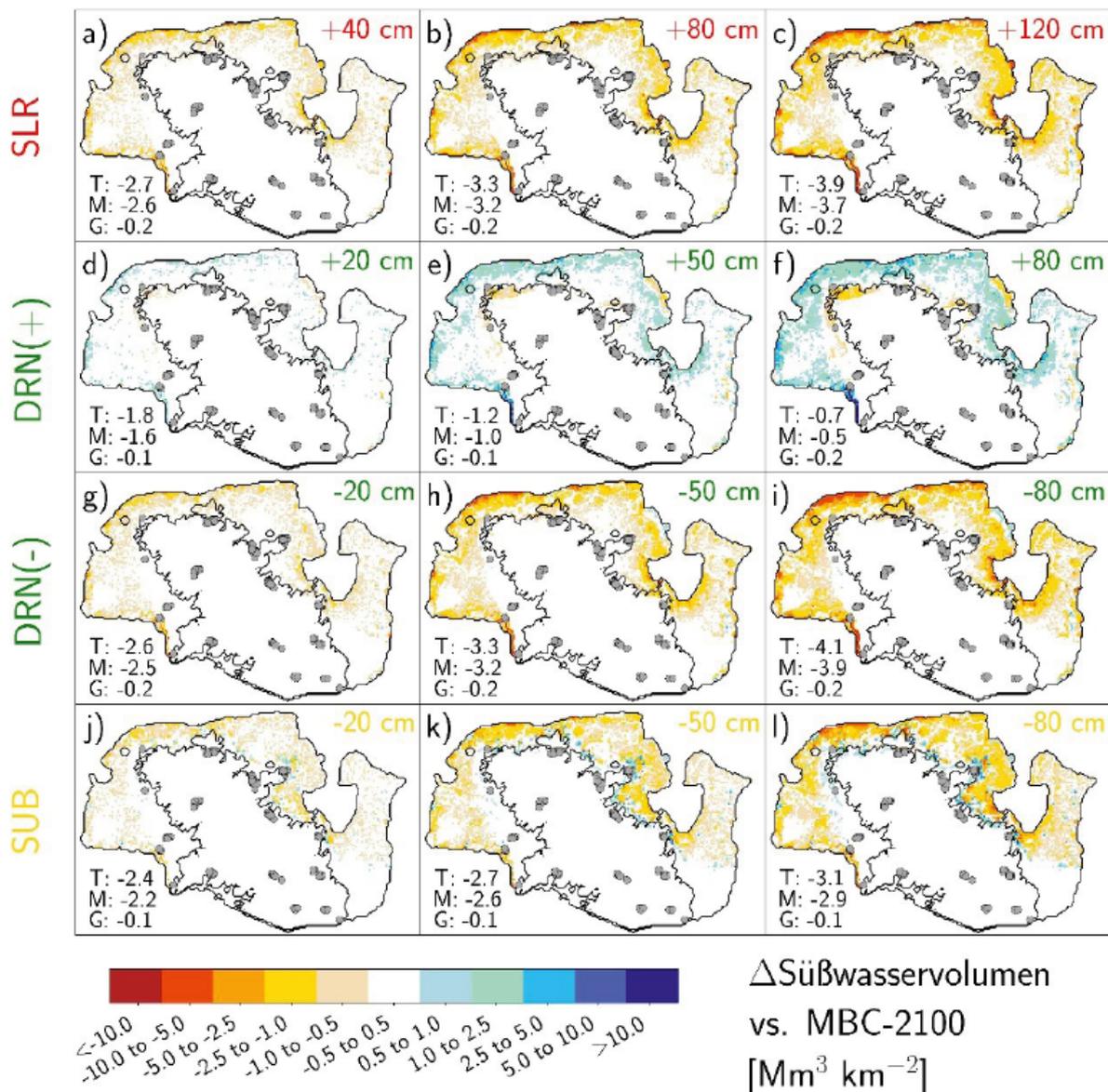


Abbildung 31: Veränderte Süßwasservolumina im SALTSA-Modellgebiet zwischen Ems und Weser für verschiedene Modellvarianten (verändert nach Seibert et al., 2024). Abgebildet sind die Differenzen zwischen der jeweiligen Variante und der Basis-Modellvariante (MBC), bei der sich die aktuellen Randbedingungen wie z. B. der Meeresspiegel, nicht weiter verändern. Gelb-rote Farben bedeuten also eine Abnahme der Süßwasservolumina, während blaue Farben eine Zunahme anzeigen. Die Zahlen in der oberen rechten Ecke zeigen an, wie stark Meeresspiegel (SLR), das Drainageniveau DRN(+) und DRN(-) sowie Landabsenkung (SUB) in der Modellvariante jeweils bis 2100 verändert wurden. Die Werte jeweils unten links nennen die jeweils absolute Änderung der Süßwasservolumina [km^3] im gesamten Modelgebiet (T), in der Marsch (M) sowie in der Geest (G) im Vergleich von 2100 zu 2020.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Seibert et al. (2024) untersuchten den Einfluss verschiedener klimarelevanter Faktoren auf die zukünftige Salzverteilung (2020–2100) für Nordwestdeutschland. Für die dichteabhängige, numerische Grundwassermodellierung wurde das kalibrierte Paläomodell von Seibert et al. (2023) genutzt, wobei die für 2020 berechneten Salz- und Druckverteilungen als Anfangsbedingungen dienten.

Es wurden verschiedene Modellvarianten berechnet, die mit Klimadaten (projizierter Meeresspiegelanstieg und Grundwasserneubildung für RCP2.6 und RCP8.5) sowie möglichen Veränderungen in anderen Randbedingungen wie Landabsenkung, Grundwasserfördermengen und Drainageniveaus, angetrieben wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die höhergelegenen Geestgebiete von Versalzung zukünftig kaum betroffen sein werden. Es zeigt sich auch, dass die unter Beibehaltung der aktuellen Randbedingungen zu erwartende „autonome Versalzung“, also die Versalzung in Folge der langsamen Reaktion der Grundwasserleiter auf bereits erfolgte Veränderungen, fast 50 % der Salzzunahme bis 2100 in den Marschen ausmacht. Der Klimawandel verstärkt den Versalzungsprozess wesentlich, wobei der Meeresspiegelanstieg der dominierende Faktor ist und vor allem eine Zunahme der Salzgehalte im Grundwasser in Küsten- sowie Ems-/Weser-nahen Bereichen zur Folge hat (Abbildung 31, SLR). Der pessimistische Fall hatte die stärkste Grundwasserversalzung mit einer Abnahme des Süßwasservolumens von etwa ~10 % in den Marschgebieten im Vergleich zu 2020 zur Folge. Neben dem Meeresspiegelanstieg ist die Landabsenkung durch Mineralisation und Verdichtung von organischen Böden, insbesondere Torfen,

und die Entwässerung der Marsch relevant, während die veränderte Grundwasserneubildung und die Grundwasserentnahmen einen geringeren bzw. eher lokalen Effekt haben. Es zeigte sich auch, dass eine geringere Entwässerungstiefe in der Marsch eine Versalzung effektiv und deutlich verringern würde (Abbildung 31, DRN(+)), während eine Vertiefung der Entwässerungsniveaus die Versalzung weiter befördern würde (Abbildung 31, DRN(-)).

Thissen et al. (2024) simulierten die Auswirkungen des Klimawandels auf Süßwasserlinsen in einem semigenerischen Modellansatz, in dem sie die Meeresspiegelprojektionen (Meeresspiegelanstieg, Tiden und Sturmfluten) und Projektionen für die Grundwasserneubildung für Norderney auf hypothetische Inselquerschnitte verschiedener Größen, die für die ostfriesischen Inseln realistisch sind, anwendeten. Mit diesem Ansatz können durch den Klimawandel bedingte Änderungen der Süßwasserlinsen für alle ostfriesischen Inseln grob abgeschätzt werden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich Süßwasserlinsenvolumen und -mächtigkeit zukünftig verringern und die Mächtigkeit der Salz-/Süßwasserübergangszone erhöhen werden (Abbildung 32). Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass sie stark vom verwendeten Klimamodell und in geringerem Maße von den Eigenschaften des Grundwasserleiters abhängen. Kleinere Inseln werden stärker vom Klimawandel betroffen sein als größere Inseln. Im schlimmsten Fall kann sich das Süßwasserlinsenvolumen um mehr als 10 % reduzieren, im besten Fall ist eine leichte Zunahme möglich. Unterschiede in den Ergebnissen der RCP8.5-Projektionen resultieren vor allem aus den Unsicherheiten der Grundwasserneubildungsprojektionen im Vergleich zu den Projektionen von Meeresspiegelanstieg und Meeresspiegeldynamik.

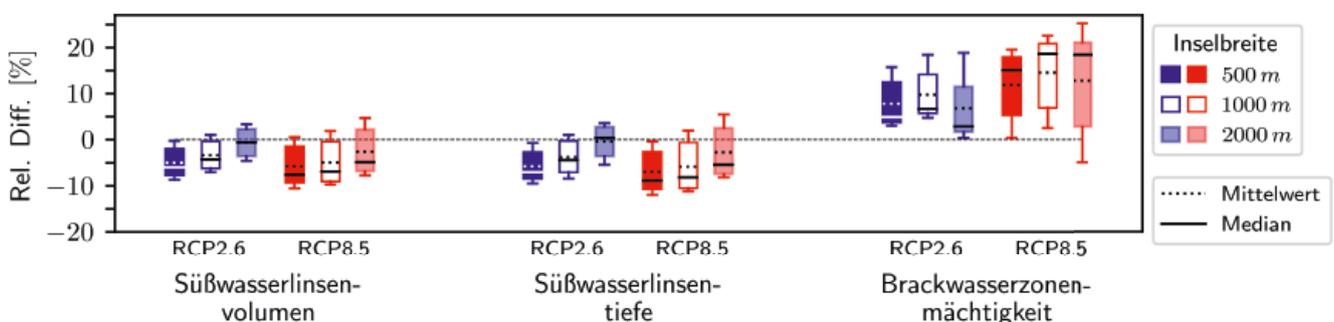


Abbildung 32: Relative Veränderungen der 30-Jahre-Mittel von Süßwasserlinsenvolumen und -tiefe sowie der Mächtigkeit der Übergangszone zwischen der Referenzperiode 1971–2000 und 2071–2100 für die RCP8.5 Szenarien und unterschiedliche Inselbreiten. Negative Werte bedeuten eine Abnahme, positive Werte eine Zunahme des Parameters. Meeresspiegelprojektionen aus den Modellen HadGEM2 und MPI-ESM wurden mit verschiedenen Grundwasserneubildungsmodellen kombiniert, Ergebnisse der jeweils 6 Modelle sind als Boxplots dargestellt (verändert nach Thissen et al. (2024)).

INFO

- In Küstennähe kann es durch den Klimawandel zu einer zunehmenden Grundwasserversalzung kommen, Grundwasserförderung und Binnenentwässerung können dieses Problem noch verstärken.
- Nicht nur der steigende Meeresspiegel, auch die sinkende Grundwasserneubildung spielt eine Rolle bei der Grundwasserversalzung. Auch die Morphologie und Geologie der Grundwasserleiter haben Einfluss.
- Die Süßwasserlinsen der Inseln sind besonders gefährdet, eine Abnahme der Süßwasservolumina ist bis 2100 zu erwarten.
- Weite Teile der tiefliegenden Küstenregion sind bereits von Grundwasserversalzung betroffen, eine weiter fortschreitende Versalzung ist sehr wahrscheinlich.
- Eine weniger tiefe Entwässerung in der Marsch würde das Ausmaß der Versalzung deutlich verringern.

Bewertung des Klimarisikos

Aktuell sind aufgrund des holozänen Meeresspiegelanstiegs sowie der Tatsache, dass Marschgebiete durch Eindeichung und durch Entwässerung urbar gemacht wurden, bereits weite Teile der tiefliegenden Küstenregion Niedersachsens in unterschiedlichem Ausmaß von Grundwasserversalzung betroffen. Eine weiter fortschreitende Versalzung ist sehr wahrscheinlich. Diese hätte eine Abnahme der Süßwasservolumina am Festland und den

Inseln zur Folge. Während der Küstenschutz den Klimawandel bereits berücksichtigt, sind bislang keine Maßnahmen gegen die meist sehr langsam fortschreitende Versalzung getroffen worden. Generell ist ein Eindringen des Meerwassers in Folge von Sturmfluten vor allem auf den Inseln unbedingt zu vermeiden. Am Festland wäre mit Blick auf die Grundwasserversalzung eine weniger tiefe Entwässerung der Marschen sinnvoll.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 35: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserversalzung“.

4.2.8 Geschützte Niederungsgebiete der Festlandsküste

Die niedersächsische Küste ist am Festland durch ausgedehnte Niederungsgebiete geprägt. Ems, Weser und Elbe erstrecken sich als große Tideströme samt ihren Nebenflüssen weit in das Hinterland hinein. Für ein ca. 6.500 km² großes Gebiet, in dem ca. 1,1 Mio. Menschen leben, stellen Überflutungen durch Sturmfluten und auch bereits reguläre Tidehochwässer eine stete Gefahr dar (NLWKN, 2007, 2010). Die Fläche unterhalb Tidehochwasser entspricht rund 1/12 der Fläche Niedersachsens. Der Festlandsküste vorgelagert sind das niedersächsische Wattenmeer und die Ostfriesischen Inseln als sandige Barrierinseln, die durch Sturmfluten und Erosion gefährdet sind (NLWKN, 2010). Wirtschaftlich gesehen haben die Gebiete neben dem Tourismussektor auch Bedeutung als wichtige Industrie- und Handelsstandorte (NLWKN, 2007, 2010). Dazu gehören Standorte des Straßen- und Maschinenbaus, der Rohstoffverarbeitung sowie der Chemie- und Dienstleistungssektoren (NLWKN, 2007).

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Niederungsgebiete sind vom schwankenden Meeresspiegel geprägt. Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit vor etwa 17.000 Jahren war der Meeresspiegel durch die Bindung der Wassermassen im Eis um etwa 130 m abgesunken (Behre, 2005). Nach dem Ende der Eiszeit stieg der Meeresspiegel zunächst rasant und verlangsamte sich ca. 5000 vor Christus. Es folgten Perioden von steigendem und sinkendem Meeresspiegel, wodurch sich zwischen der Nordsee und der Geest eine Übergangszone ausbildete – die Marsch- bzw. Niederungsgebiete (Behre, 2005; Kramer, 1989). Zu Beginn der Besiedelung der heute geschützten Niederungsgebiete vor mehr als 2000 Jahren waren die Marschen ein flaches, unbedecktes, von Prielen durchzogenes Land (Kramer, 1989). Sturmfluten bildeten Buchten wie den Dollart oder den Jadebusen aus. Um sich vor dem Wasser zu schützen, errichteten die Siedler Warften, die mit dem steigenden Meeresspiegel immer weiter erhöht werden mussten. Vor etwa 1000 Jahren begann der Deichbau zunächst in Form von Verwallungen als Ring um die Siedlungen. Diese wurden wegen steigender Bevölkerungszahlen ausgeweitet und verstärkt.

Anfang des 13. Jahrhunderts war die gesamte Küste durch eine geschlossene Deichlinie gesichert (Homeier et al., 2010). Bis zu den 1960er-Jahren wurde die Deichhöhe auf die Höhe vergangener Sturmfluten abgestellt, so dass es neben der Landgewinnung auch Landverluste durch Sturmflutkatastrophen gab. Durch Verbesserung der Deichbautechnik konnte die Landgewinnung überwiegen und schließlich die uns heute bekannte Küstenlinie gehalten werden.

Nach der letzten schweren Sturmflutkatastrophe 1962 wurde der vorsorgliche Küstenschutz entwickelt, der u. a. zukünftige Landabsenkungen und den Meeresspiegelanstieg bei der Ermittlung der erforderlichen Höhe berücksichtigt (KAPITEL 4.2.10). Durch die stetige Verbesserung und Intensivierung von Küstenschutzmaßnahmen konnten Katastrophen infolge Sturmfluten ähnlichen Ausmaßes seitdem vermieden werden.

Die Hauptdeichlinie umfasst heute etwa 610 Kilometer. Insgesamt gibt es mehr als 1000 Kilometer Deiche an den Küsten, an den tidebeeinflussten Flussmündungen und auf den Inseln. Damit werden auch mittelbar Gebiete in den benachbarten Bundesländern Bremen und Hamburg sowie in den Niederlanden geschützt. Das durch Deiche geschützte Gebiet reicht bis zu den Geestausläufern. Die Niederungsgebiete wurden durch den Deichbau von der Sedimentzufuhr der Nordsee abgeschnitten, so dass diese mittlerweile niedriger liegen als die Wattflächen vor den Deichen.

Die Entwässerung der Niederungsgebiete erfolgt über ein weit verzweigtes Netz aus Gräben, Kanälen und Vorflutern (den sog. Tiefs), die an zentralen Stellen über Siele und Schöpfwerke durch die Hauptdeichlinie entwässert werden müssen (KAPITEL 4.2.9). Dabei sind die Sielzugzeiten abhängig von der Dauer, während der die Tide bestimmte Wasserstände unterschreitet. Mit steigendem Meeresspiegel werden diese Zeitfenster kleiner. Zur Haltung der Binnenwasserstände muss dann vermehrt gepumpt werden. Auch höhere Niederschlagsmengen steigern den Einsatzbedarf von Pumpen (Spiekermann et al., 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Das Ausmaß der Schäden an Siedlungen und Infrastrukturen in den Niederungsgebieten durch Sturmfluten und Überschwemmungen ist von der Widerstandsfähigkeit des Küstenschutzes und der Leistungsfähigkeit des Entwässerungssystems abhängig (KAPITEL 4.2.9, 4.2.10).

Die Belastung wird jedoch insbesondere durch den steigenden Meeresspiegel zunehmen. Sturmfluten können höher auflaufen und die Sielzugzeiten werden sich verkürzen. Diese Ereignisse können sich zudem überlagern und gegenseitig beeinflussen (sog. Compound-Events). Bei dem gleichzeitigen Auftreten von Sturmflut und Binnenhochwasser verhindern die hohen Außenwasserstände die Ableitung des Binnenhochwassers. Langanhaltende Sturmtidenketten können zudem bei moderaten Niederschlägen ein Binnenhochwasser auslösen, wenn die Entwässerungskapazitäten über Schöpfwerke nicht ausreichen. Dabei müssen keine Extremwasserstände erreicht werden, um ein derartiges Szenario auszulösen (Bormann et al., 2024; Weisse et al., 2024).

Die Größe des geschützten Gebiets ist abhängig von den anzunehmenden Sturmflutwasserständen und wächst somit mit steigendem Meeresspiegel bzw. Bemessungswasserstand (Abbildung 33). Mit dem Übergang der Marschgebiete in die Geest steigt das Gelände allerdings unmittelbar an, wodurch die Grenzen dieser Gebiete relativ stabil gehalten werden, zumindest bezogen auf den anzunehmenden Anstieg der nächsten 100 Jahre. Größte Änderungen ergeben sich zwischen Ems und Weser insbesondere an der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest, während die Geländegradien der an die Elbeniederungen grenzenden Geestrücken deutlich steiler sind und sich damit die geschützten Gebiete nicht wesentlich verändern (Ritzmann & Niemeyer, 2011). Prinzipiell ergibt sich somit also keine signifikante Änderung der Gefährdung, solange der Küstenschutz das aktuelle Schutzniveau aufrechterhalten kann.

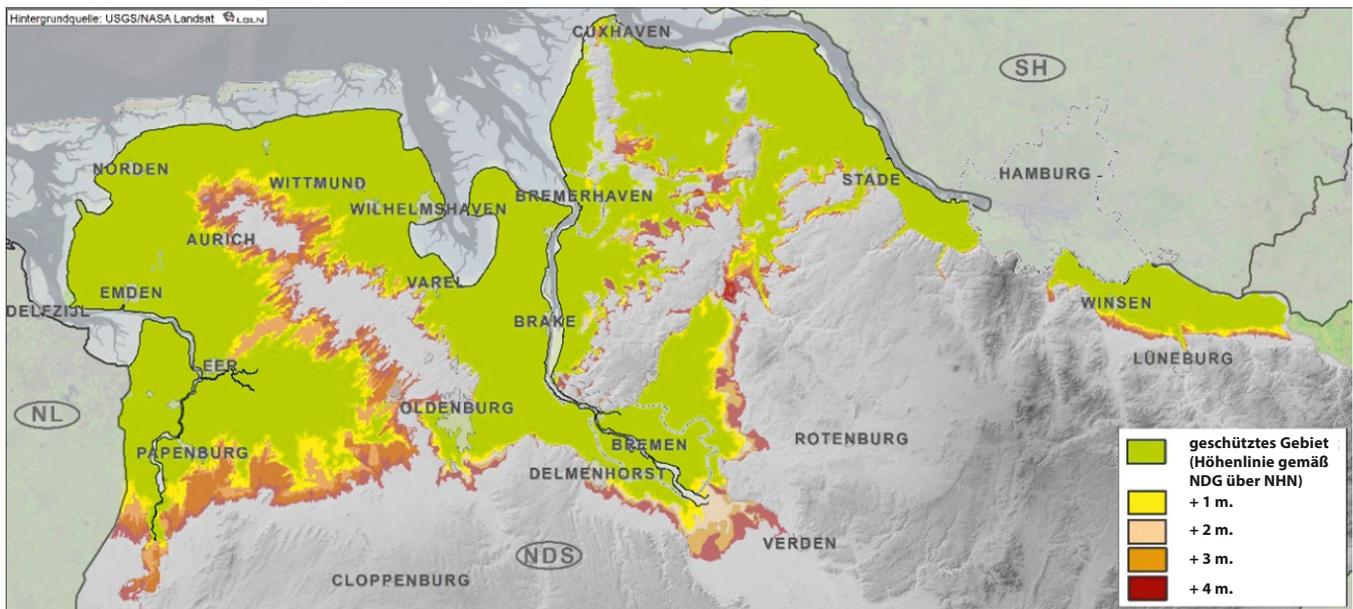


Abbildung 33: Das bereits heute vor Sturmfluten geschützte Gebiet (grün) und Erweiterung der Fläche für einen steigenden Meeresspiegel (Niemeyer et al. 2018).

INFO

- Die Niederungsgebiete mit einer Fläche von ca. 6.500 km² liegen unterhalb des Tidehochwassers. Das entspricht rund 1/12 der Fläche Niedersachsens.
- Sie sind vom schwankenden Meeresspiegel geprägt worden.
- Der anschließende Geestrücken bildet eine natürliche Barriere und begrenzt die zu schützenden Gebiete binnenseitig.
- Seit den 1960er-Jahren wird ein vorsorgender Küstenschutz betrieben, der das gesamte Gebiet vor Sturmfluten schützt.
- Bei dem gleichzeitigen Auftreten von Sturmflut und Binnenhochwasser verhindern die hohen Außenwasserstände die Ableitung des Binnenhochwassers.
- Im Küstenschutz wird bereits Klimaanpassung bis über 2100 hinaus betrieben.
- Das Überflutungsrisiko durch Starkregenereignisse steigt
- Die Ausdehnung des Gebietes wird sich im Vergleich zu heute durch einen steigenden Meeresspiegel nicht gravierend ändern.
- Die Entwässerung der Gebiete erfolgt durch ein Kanalnetz in Richtung der Siel- und Schöpfwerke.

Bewertung des Klimarisikos

Der Meeresspiegelanstieg steht in engem Zusammenhang mit der Temperaturentwicklung (KAPITEL 4.2.1). Er stellt somit ein robustes Klimasignal mit einem klaren Trend dar. In Bezug auf den Niederschlag ist u. a. eine Zunahme der Winterniederschläge zu erwarten, während die Sommerniederschläge tendenziell eher abnehmen. Die Streuung der Niederschlagsprojektionen ist allerdings relativ hoch. Es ist allerdings mit einer Zunahme der Starkregenextreme (v. a. Intensitäten) im Zuge zukünftig zunehmender Temperaturen zu rechnen (KAPITEL 4.2.3).

Bezogen auf den Meeresspiegelanstieg und der Gefahr durch Sturmfluten ist das Risiko für das geschützte Gebiet seit Beginn der Besiedlung präsent und als hoch einzustufen. Allerdings wird bereits seit den 1960er-Jahren ein vorsorgender Küstenschutz betrieben, in den auch klima-

tische Einflüsse einbezogen werden (KAPITEL 4.2.10). Die Bauwerke werden so ausgelegt, dass sie den Belastungen, die aus den Projektionen ohne Klimaschutz resultieren, standhalten können. Aufgrund dieser Anpassungsmaßnahmen ist das Klimarisiko bis 2100 als gering zu bewerten. Ohne Anpassungen, also ohne vorsorglichen Küstenschutz, wäre das Risiko einer Sturmflutkatastrophe bereits heute sehr hoch.

Bezogen auf die Entwässerung ist eine Anpassung noch nicht erfolgt. Besonders im Winter, wenn die Niederschlagsmengen zunehmen und erhöhte Binnenwasserstände zeitgleich mit Sturmfluten auftreten, gerät das Entwässerungssystem unter Druck. Überflutungen können die Folge sein. Das Überflutungsrisiko steigt ebenso, wenn Starkregenereignisse zunehmend häufiger auftreten und auf gesättigte Böden treffen (KAPITEL 4.2.9).

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Hoch		Hoch	

Tabelle 36: Das Klimarisiko für die „Geschützten Niederungsgebiete der Festlandsküste“

4.2.9 Entwässerung der Küstenniederungen

Zukunftsprojektionen für die Niedersächsische Küste weisen übereinstimmend darauf hin, dass der Entwässerungsbedarf der Küstenniederungen bis Ende des Jahrhunderts v. a. im Winter niederschlagsbedingt um etwa 25 % zunehmen wird.

Gleichzeitig zeigen aktuelle Untersuchungen, dass die potenziellen Sielzeiten durch den Anstieg des Meeresspiegels signifikant zurückgehen werden. Auch die Pumpleistung der vorhandenen Schöpfwerke wird v. a. unter Sturmflutbedingungen deutlich abnehmen.

Noch mehr als heute wird zukünftig das Zusammentreffen von Sturmfluten und ergiebigen Regenfällen (**Compound Events**) die Binnenentwässerung im Küstenraum vor große Herausforderungen stellen.

Hintergrund und Stand der Forschung

Seit Eindeichung der Nordseeküste werden die Wasserstände in den Binnengewässern der Küstenniederungen mit Hilfe historisch gewachsener Entwässerungssysteme künstlich reguliert und überschüssige Niederschlagsmengen durch in der Deichlinie gelegene Siele und Schöpfwerke in die Nordsee bzw. in die Ästuare abgeführt. Zusammen mit dem Küstenschutz bildet die Binnenentwässerung damit die Grundvoraussetzung für die in der Küstenregion entstandene Kulturlandschaft und deren Nutzung als Siedlungs- und Wirtschaftsraum.

Die bestehenden Entwässerungssysteme sind in der Regel so dimensioniert, dass regenreiche Perioden im Deichhinterland schadlos überstanden werden können. Bei bestimmten Extremwetterkonstellationen stoßen die Entwässerungssysteme vieler Entwässerungsverbände entlang der Nordseeküste jedoch bereits heute zunehmend an ihre Grenzen (z. B. im Februar 2022 und im Januar 2024). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ergiebige Winterniederschläge, die auf bereits wassergesättigte Böden fallen und innerhalb kurzer Zeit besonders hohe Abflussmengen hervorrufen, mit langanhaltenden Sturmflutkettentiden zusammentreffen, bei denen sich über mehrere aufeinanderfolgende Tiden hohe Wasserstände einstellen, die zu reduzierten Entwässerungsleistungen der Siel- und Schöpfwerke aufgrund stark erhöhter Außenwasserstände führen. In solchen Situationen trifft ein erhöhter Entwässerungsbedarf auf eine eingeschränkte Entwässerungskapazität, was zur Folge hat, dass die Wasserstände in den Binnengewässern auf kritische Marken ansteigen und mitunter zu Überflutungen tiefliegender Flächen führen können.

Infolge des Klimawandels sorgen zunehmend extremere Regenereignisse auf der Landseite und der Meeresspiegelanstieg auf der Meereseite dafür, dass größere Wassermengen gegen einen zunehmenden Höhenunterschied entwässert werden müssen. Wo bisher gesielt werden konnte, muss künftig verstärkt gepumpt werden, was mit erhöhten Energieverbräuchen und Kosten verbunden ist. Zudem müssen die Entwässerungssysteme für größer werdende Extremereignisse bemessen werden.

Im Rahmen der vom Bundesumweltministerium im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie geförderten Projekte KLEVER (Spiekermann et al., 2018) und KLEVER-Risk (Spiekermann et al., 2023) wurden sowohl die klimawandelbedingten Veränderungen der Entwässerungsbedarfe als auch der Entwässerungskapazitäten erstmalig systematisch für mehrere Entwässerungsverbände im westlichen Ostfriesland quantifiziert.

Das physikalische Wasserhaushaltsmodell SIMULAT wurde auf Basis der verfügbaren Siel- und Schöpfwerksdaten für die Verbandsgebiete der Entwässerungsverbände Emden, Norden und Oldersum validiert und für Klimafolgsimulationen eingesetzt (Bormann & Kebschull, 2023). Basierend auf den Simulationen der Abflussbildung kann der zukünftige Entwässerungsbedarf für die betroffenen Verbandsgebiete berechnet werden. Angetrieben wurde das Modell von einem Ensemble unterschiedlicher Klimaprojektionen (Spiekermann et al., 2018, 2023), das neben dem Emissionsszenario der KRANI 2025 auch ein weiteres Emissionsszenario, das erheblichen Klimaschutz voraussetzt, enthält. Dadurch wurde ein vergleichbares Spektrum an Ergebnissen abgebildet, wie es auch der Klimawirkungsstudie zugrunde liegt.

Zur Abschätzung der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Sielmöglichkeiten wurden die potenziellen Sielzeiten diverser Mündungsbauwerke in Ostfriesland bis Ende des Jahrhunderts für das in der KRA verwendete Szenario RCP8.5 berechnet, das mit einem angenommenen Anstieg des Meeresspiegels um ca. 1 m den Anforderungen für die Anpassung der Deichbemessung entspricht. Auf Grundlage dieses Szenarios wurde auch die Entwässerungskapazität der vorhandenen Siel- und Schöpfwerke sowohl für die mittlere Tidekurve als auch für Sturmflutwasserstände bis Ende des Jahrhunderts quantifiziert (Bormann et al., 2023).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Simulationen für die Verbände im westlichen Ostfriesland zeigen, dass aufgrund der zu erwartenden Zunahme der Winterniederschläge der Entwässerungsbedarf bis Ende des Jahrhunderts in den ohnehin abflussreichen Wintermonaten signifikant steigen wird (Abbildung 34; am Beispiel des 1. EV Emden), während in den Sommermonaten eher eine geringere Abflussbildung zu erwarten ist. Alle untersuchten Verbände weisen eine ähnliche Entwicklung auf (Tabelle 37).

Aufgrund des robusten Klimaänderungssignals kann davon ausgegangen werden, dass die tendenzielle Entwicklung bei ähnlichen Klimaprojektionen auch auf andere Küstenniederungen an der niedersächsischen Nordseeküste übertragbar ist.

Sielzeiten

Vor dem Hintergrund des Meeresspiegelanstiegs ist bei konstant gehaltenen Binnenwasserständen zu erwarten, dass die potenziellen Sielzeiten bis Ende des Jahrhunderts kontinuierlich abnehmen werden (Abbildung 35). Alle im Rahmen des Projekts KLEVER-Risk untersuchten Mündungsbauwerke im westlichen Ostfriesland weisen diese Tendenz auf (Tabelle 38), wobei die relative Wirkung stark von der topographischen Lage abhängt. Je niedriger der Zielwasserstand binnendeichs liegt, desto früher wird eine Einschränkung der potenziellen Sielzeiten im Vergleich zur aktuellen Sieltätigkeit spürbar sein.

Verbandsgebiet	ΔQ Jahr [%]	ΔQ Winter [%]	ΔQ Sommer [%]
I. EV Emden	+11 bis +13	+18 bis +26	-22 bis -13
EV Norden	+6 bis +11	+20 bis +26	-14 bis -9
EV Oldersum (Untergebiet)	+2 bis +7	+16 bis +20	-14 bis -10
EV Oldersum (Obergebiet)	+10 bis +11	+19 bis +28	-7 bis -4
EV Aurich	+7 bis +10	+16 bis +28	-7 bis -6

Tabelle 37: Simulierte klimawandelbedingte Veränderungen der Abflussbildung (ΔQ) in den betrachteten Verbandsgebieten für 2071–2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum. Quelle: Spiekermann et al. (2023).

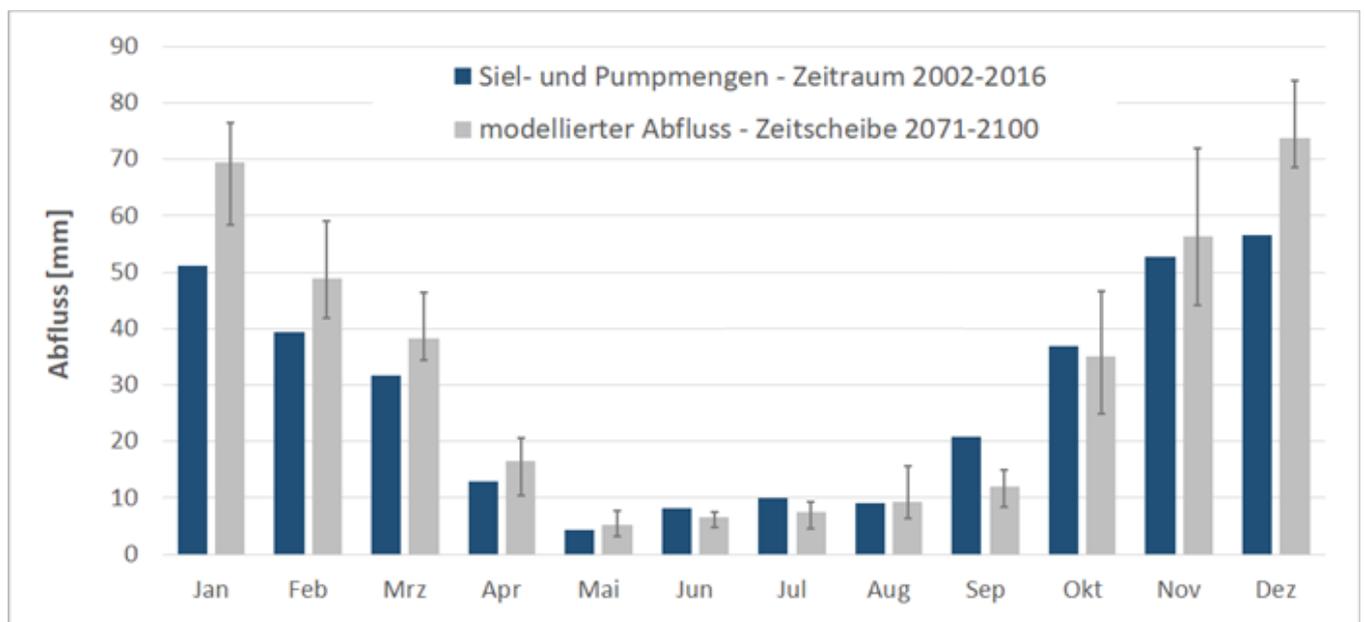


Abbildung 34: Modellbasierte Abschätzung der Veränderung der mittleren monatlichen Abflussbildung im Verbandsgebiet des 1. EV Emden für 2071–2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum. Quelle: Spiekermann et al., 2023.

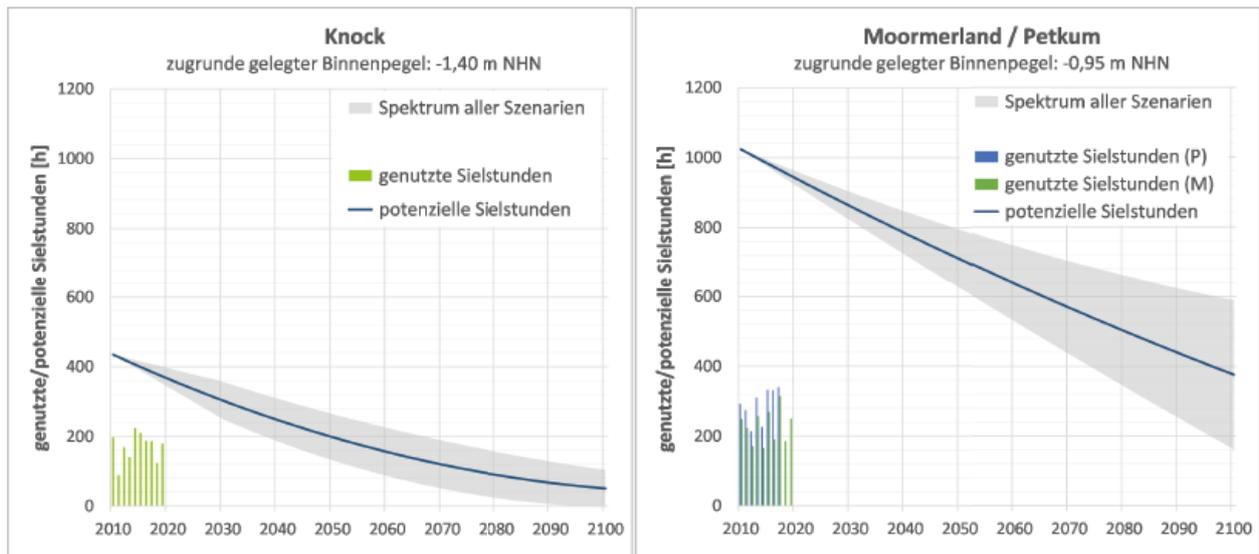


Abbildung 35: Projektion der potenziellen Sielzeiten bis Ende des Jahrhunderts für beispielhafte Mündungsbauwerke in Ostfriesland: Knock und Moormerland/Petkum. Quelle: Bormann et al.,(2023).

Sielbauwerk	Sielzeit (aktuell) [h/Halbjahr]	Sielzeit (Projektion 2100) [h/Halbjahr]	Abnahme der Siezeit [%]	Trend
Knock	430	0	100	↓
Moormerland/Petkum	1.020	170	83	↓
Sautel	1.800	790	56	↘
Leysiel	700	0	100	↓
Emder Hafen	2.600	1.750	33	↘

Tabelle 38: Abnahme der potenziellen Sielzeiten im Winterhalbjahr unter Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von 110 cm bis zum Jahr 2100 (entsprechend dem 95. Perzentil des Szenarios RCP8.5) an den betrachteten Mündungsbauwerken (Bormann et al., 2023).

Entwässerungskapazitäten

Auch die Schöpfwerksleistung der bestehenden Mündungsbauwerke wird ohne eine Anpassung an den Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kontinuierlich abnehmen. Während die Abnahme der Entwässerungskapazitäten bei mittleren Tideverhältnissen noch relativ gering ausfällt, ist v. a. bei langandauernden Sturmfluten mit einer signifikanten Abnahme zu rechnen (Abbildung 36).

Alle im Rahmen des Projekts KLEVER-Risk untersuchten Mündungsbauwerke im westlichen Ostfriesland mit Ausnahme der durch das Ems-Sperrwerk geschützten Standorte weisen diese Tendenz auf (Tabelle 39), wobei die relative Wirkung stark von der topographischen Lage und wasserbaulichtechischen Besonderheiten der Schöpfwerke abhängt.

Bewertung des Klimarisikos

Vor dem Hintergrund der gleichermaßen ungünstigen Entwicklungen des Entwässerungsbedarfs im Winter und der Entwässerungskapazität - insbesondere aufgrund

steigender Sturmflutwasserstände - ist das Klimarisiko umso ungünstiger einzuschätzen, je weiter der Betrachtungszeitraum in der Zukunft liegt. Schon heute nehmen viele Entwässerungsverbände ein zunehmendes Risiko wahr, da die Häufigkeit der Ereignisse, die die Systeme an ihre Grenze bringen, bereits steigt.

Auch bei einer erfolgreichen Klimapolitik, die den Klimawandel abbremsen würde, ist davon auszugehen, dass das Risiko infolge von Compound Events von Starkregen und Sturmfluten bis zum Ende des Jahrhunderts ansteigen wird (Bormann et al. 2024 ; Weisse et al., 2024). Eine Anpassung ist daher erforderlich, wenn der Status quo der Binnenentwässerung gehalten werden soll (Tabelle 40).

Um die konzeptionellen Grundlagen für die Umsetzung erforderlicher Maßnahmen zur Anpassung der Binnenentwässerung an die Auswirkungen des Klimawandels in den niedersächsischen Küstenniederungen zu schaffen, wird seitens des NLWKN aktuell ein Generalplan „Klimafolgenanpassung in Siel- und Schöpfwerksgebieten“ erarbeitet.

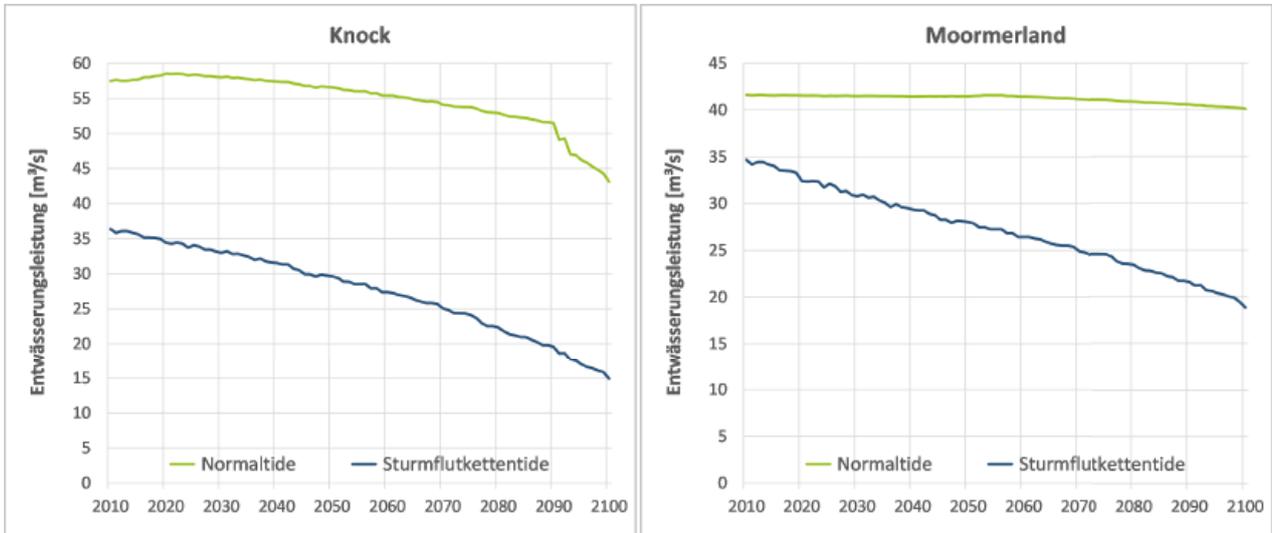


Abbildung 36: Veränderungen der Entwässerungskapazitäten der Mündungsbauwerke Knock und Moormerland bezogen auf Normaltidebedingungen (grüne Linie) und Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide; blaue Linie) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 22100 (RCP8.5-Szenario, 95. Perzentil). Quelle: Bormann et al., 2023.

Siel und Schöpfwerk	Entwässerungsleistung (aktuell) [m³/s]		Entwässerungsleistung (Projektion 2100) [m³/s]		Abnahme der Entwässerungsleistung [%]		Trend	
	Normaltide	Kettentide	Normaltide	Kettentide	Normaltide	Kettentide	Normaltide	Kettentide
Knock	57,5	36,4	43,1	14,9	25	59	↘	↓
Moormerland	41,7	34,7	40,1	18,8	4	46	→	↓
Sautel	34,7	34,5	35,7	32,1	-	7	→	→
Borssum	20,0	17,2	18,2	10,3	9	40	→	↓
Leybuchtziel	45,0	41,5	45,0	13,4	0	68	→	↓
Greetsiel	13,5	13,3	13,5	4,7	0	65	→	↓

Tabelle 39: Veränderungen der Entwässerungskapazitäten der betrachteten Mündungsbauwerke bezogen auf Normaltidebedingungen und Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5-Szenario, 95. Perzentil). Quelle: Bormann et al., 2023.

INFO

- Der Entwässerungsbedarf der Küstenniederungen wird bis Ende des Jahrhunderts um etwa 25 % zunehmen.
- Der Meeresspiegelanstieg bewirkt, dass zukünftig mehr gepumpt werden muss, wo bisher gesielt werden konnte.
- Aufgrund der erwarteten Zunahme der Winterniederschläge wird der Entwässerungsbedarf in den Wintermonaten signifikant steigen.
- Durch den Meeresspiegelanstieg werden die potenziellen Sielzeiten abnehmen.
- Infolge des Meeresspiegelanstiegs wird die Schöpfwerkleistung der bestehenden Mündungsbauwerke bis Ende des Jahrhunderts abnehmen.
- Klimafolgen werden sich negativ auf die Entwässerungskapazität der Niederungsgebiete auswirken und das Überflutungsrisiko erhöhen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Hoch		Hoch	

Tabelle 40: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Entwässerung der Küstenniederungen“.

4.2.10 Belastung auf den Insel- und Küstenschutz

Der Insel- und Küstenschutz gewinnt vor dem Hintergrund des Klimawandels und dem damit einhergehenden Meeresspiegelanstieg zunehmend an Bedeutung. 14 % der Landesfläche Niedersachsens gelten als sturmflutgefährdet, wovon bereits heute große Teile unterhalb des mittleren Tidehochwassers liegen. Eine rund 610 km lange Hauptdeichlinie schützt Bewohner, Industrie, Landwirtschaft und Infrastruktur vor dem Eindringen der Flut (NLWKN, 2007). Damit werden auch mittelbar Gebiete in den benachbarten Bundesländern Bremen und Hamburg sowie in den Niederlanden geschützt. Der Festlandsküste vorgelagert sind die Ostfriesischen Inseln, die neben Sturmfluten auch durch Erosion gefährdet sind (NLWKN, 2010). Der Küstenschutz auf den Inseln wird durch ca. 35 km Hauptdeiche und 92 km Schutzdünen und zugehörige Sicherungs- und Schutzwerke gewährleistet.

Hintergrund und Stand der Forschung

Nach der Sturmflutkatastrophe von 1953 in den Niederlanden ist in den deutschen Küstenländern die Strategie im Insel- und Küstenschutz von Reagieren auf Vorsorge umgestellt worden. Zudem wurde in Niedersachsen nach der Sturmflut vom Februar 1962 mit dem Niedersächsischen Deichgesetz (NDG) eine belastbare planrechtliche Grundlage für Behörden und Deichverbände geschaffen. Für die adäquate Anwendung wurde ein ausführlicher Kommentar erstellt (Lüders & Leis, 1964). Nach diesen Vorgaben muss das „zu erwartende höchste Tidehochwasser“ und der „örtliche Wellenauflauf“ zur Ermittlung der erforderlichen Bestickhöhe herangezogen werden.

Das „zu erwartende höchste Tidehochwasser“ wird bei der Bemessung der Küstenschutzbauwerke durch den Bemessungswasserstand repräsentiert. Dieser wird in Niedersachsen gemäß Kommentar zum Deichgesetz nach dem Einzelwertverfahren nach Lüders (1957) berechnet. Dabei handelt es sich um ein deterministisches Verfahren, das die aktuelle Entwicklung des Tidehochwasserstandes, die ungünstigste Konstellation von maximalem Windstau und Springtide sowie einen Klimazuschlag von 100 cm für die nächsten 100 Jahre berücksichtigt (Berkenbrink & Wurpts, 2019).

Der den örtlichen Bemessungswasserständen zugrundeliegende Windstau leitet sich aus den jeweiligen höchsten jemals gemessenen Tidehochwasserscheiteln ab. Die Kenntnisse über die Höhen historischer Sturmfluten

sind allerdings lückenhaft und teilweise widersprüchlich. Außerdem sind höhere als die bisher beobachteten Sturmfluten nicht nur durch klimatische Veränderungen möglich. Diese Unsicherheiten werden bei der Bemessung durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten als Teil des Vorsorgemaßes für Klimaänderungen und durch die Einbeziehung der maximalen Springerhöhung kompensiert.

Zur Bestimmung der erforderlichen Bestickhöhe wird neben dem Bemessungswasserstand die Bemessungswellenaufbauhöhe benötigt. Die Wellenaufbauhöhe wird maßgeblich durch den Seegang bestimmt, dessen Energie und Ausbreitung wiederum vom Wasserstand und der Entwicklung des Insel- und Küstenvorfeldes abhängig ist (KAPITEL 4.2.3, 4.2.5). Durch die numerische Modellierung des Seegangs unter Berücksichtigung erhöhter Wasserstände wird die Berücksichtigung klimawandelbedingter Änderungen gewährleistet.

Die aus Bemessungswasserstand und Wellenaufbauhöhe resultierende rechnerisch erforderliche Bestickhöhe bildet die Grundlage für die Bestickfestsetzung durch die Genehmigungsbehörde. Hier werden die erforderlichen äußeren Abmessungen des Deiches im Profil einschließlich der Sicherungswerke und in der Linienführung beschrieben. Es beschreibt also das erforderliche Maß des Küstenschutzes, welches im Rahmen der Deicherhaltung zu gewährleisten ist. Das Bestick wird in Niedersachsen in der Form einer Allgemeinverfügung vom NLWKN festgesetzt und im Ministerialblatt öffentlich bekannt gemacht.

Die besiedelten Gebiete der Ostfriesischen Inseln werden durch einen Ring aus Dünen, Deichen und Deckwerken vor Sturmfluten geschützt. Aufgrund der ständigen Veränderungen von Stränden, Vorstränden und Dünen besteht andauernder Handlungsbedarf, den Küstenschutz auf den Inseln langfristig und vorsorgend sicher zu stellen. Die Deiche auf der Südseite der Inseln sind durch Lahnungsfelder gesichert, die die hydrodynamische Belastung mindern und gleichzeitig die Sedimentation im Vorland begünstigen. Die Stabilität der Schutzdünen ist maßgeblich durch die Sedimentbilanz an den Stränden und Vorstränden beeinflusst. An den West- und Nordseiten vieler Inseln ist auf Grund der hydromorphologischen Rahmenbedingungen keine ausreichende Sedimentversorgung vorhanden. Dort schützen massive Deckwerke, Mauern und Bühnen die Inseln vor Erosion. Nicht ausreichend mit Sediment versorgte Strandabschnitte werden zur Sicherung der Dünen und Deckwerke künstlich aufgespült.

Für eine dauerhafte Besiedlung der Inseln und die Sicherstellung ihrer wirtschaftlichen Bedeutung als touristischer Schwerpunktraum bildet der Küstenschutz eine unabdingbare Voraussetzung. Auch die unter den Inseln befindlichen Süßwasserlinsen, die auf den meisten Inseln eine festlandsunabhängige Wasserversorgung sicherstellen, wird durch den Inselchutz vor eindringendem Salzwasser geschützt. Die Ostfriesischen Inseln bilden zudem einen wichtigen Bestandteil des Küstenschutzes für die niedersächsische Festlandsküste, weil sie diese gegen die unmittelbare Wirkung des Seegangs aus der Nordsee abschirmen und so als natürliche Wellenbrecher fungieren (NLWKN, 2010).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Belastung der Küstenschutzbauwerke ist im Wesentlichen von der Entwicklung des Meeresspiegelanstieg geprägt. In Abhängigkeit der globalen Erwärmung wird der Meeresspiegel mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ansteigen (KAPITEL 4.2.1). Dadurch steigt das Ausgangsniveau für Sturmfluten und die Höhe des Bemessungswasserstandes. Inwieweit das Wattenmeer diesen Anstieg kompensieren kann, ist unklar (KAPITEL 4.2.5). Steigen

die Wasserstände vor den Küstenschutzbauwerken würde sich die Seegangsbelastung und die daraus resultierende Bemessungswellenaufbauhöhe erhöhen (KAPITEL 4.2.3). Bei der Bemessung der Küstenschutzanlagen wird ein solches Mitwachsen der Watten allerdings nicht berücksichtigt, wodurch eine zusätzliche Sicherheit bei der Bemessung der Küstenschutzbauwerke vorgehalten wird.

Projektionen zur Windentwicklung (Geschwindigkeiten, Richtung und Häufigkeit von Sturmereignissen), deren Erkenntnisse Auswirkungen auf die Belastungsgrößen Windstau und Seegang haben, sind dagegen nicht eindeutig und zeigen keinen ausgeprägten Trend (KAPITEL 4.2.2). Bei dem Szenario ohne Klimaschutz nimmt die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs bei allen Projektionen zu (KAPITEL 4.2.1). Das führt nicht nur zu höheren Bemessungswasserständen, sondern könnte auch die Wassertiefen vor den Küstenschutzbauwerken verändern, wenn das Wattenmeer und die Vorländer diesen Anstieg nicht kompensieren können. Dadurch würden sich die Seegangsverhältnisse ändern und die Bemessungswellenaufbauhöhe steigt insbesondere dort, wo der Seegang bislang tiefenbegrenzt ist. Dies zeigen aktuelle Bemessungsergebnisse der Forschungsstelle Küste.

INFO

- Etwa 14 % der Landesfläche gelten als sturmflutgefährdet und werden durch eine 610 km lange Deichlinie geschützt.
- Nach der Sturmflutkatastrophe von 1962 wurde in Niedersachsen ein Gesetz zur Errichtung und Unterhaltung von Küstenschutzanlagen eingeführt.
- Neben aktuellen Tideverhältnissen und ungünstigen meteorologischen Bedingungen wird ein Klimazuschlag bei der Ermittlung der erforderlichen Höhe berücksichtigt.
- Der Seegang stellt ebenfalls eine wichtige Belastungsgröße für den Küstenschutz dar.
- Der Schutz der Inseln erfolgt auf vielfältige Weise – vom Ausgleich von Sedimentdefiziten bis hin zu massiven technischen Maßnahmen.
- Die Inseln sind ein wichtiger Bestandteil des Küstenschutzes am Festland.
- Die Belastung auf die Küstenschutzbauwerke nimmt durch den Klimawandel zu.
- Mit dem steigenden Meeresspiegel könnte auch die Seegangsbelastung zunehmen.
- Eine wichtige Rolle für den Küstenschutz spielt die Entwicklung des Wattenmeers, dessen natürliche Schutzfunktion erhalten werden muss.
- Klimadeiche gewährleisten eine flexible Reaktion auf zukünftige Anpassungsbedarfe.
- Die Anpassung an den Klimawandel erfolgt bereits unter Berücksichtigung pessimistischer Klimaänderungssignale.

Bewertung des Klimarisikos

Durch die Klimawirkungen und die damit verbundenen Veränderungen im Wattenmeer und an den Küsten werden die Küstenschutzanlagen zunehmend stärker belastet. Durch eine Änderung des Meeresspiegelanstiegs werden sich Seegangsklima, Tidedynamik und das damit einhergehende Strömungsregime ändern. Eine Änderung der Hydrodynamik hat eine Änderung der morphodynamischen Entwicklung zur Folge, weswegen neben dem technischen Küstenschutz auch das Wattenmeer durch die Entwicklung von Sedimentmanagementstrategien, die einen natürlichen Anwuchs des Meeresbodens unterstützen sollen, im Fokus der Untersuchungen stehen (Oberrecht et al., 2024).

Die Küstenschutzanlagen werden bereits seit den 1960er-Jahren für steigende Belastungen aus Meeresspiegelanstieg und Landsenkung ausgelegt. In 2021 wurde vom Umweltministerium die „Umsetzung der niedersächsischen Küstenschutzstrategie 2020“ eingeführt, die festlegt, dass bei der Ermittlung der erforderlichen Deichhöhen ein Vorsorgemaß für Klimaänderungen in Anlehnung an das IPCC-Szenario RCP8.5 von 100 cm im Bemessungswasserstand berücksichtigt werden muss.

Hauptdeiche sollen auch zukünftig standardmäßig in Erdbauweise ausgeführt werden, um die Vorteile leichter

Anpassbarkeit, Ressourcenschonung sowie einfacher, wirtschaftlicher Unterhaltung und Pflege zu kombinieren. Dabei wird das Deichprofil um eine breitere Binnenberme ergänzt, die eine leichtere Nacherhöhbareit um einen weiteren Meter ermöglicht. Dieser Klimadeich gewährleistet eine flexible Reaktion auf zukünftige Projektionen und Anpassungsbedarfe. Bei dem Bau massiver Küstenschutzbauwerke in der Hauptdeichlinie (zum Beispiel Sperrwerke) wird dessen Gründung bereits heute so ausgelegt, dass eine zukünftige Nacherhöhbareit um einen weiteren Meter über die mit dem neuen Vorsorgemaß ermittelte Höhe hinaus möglich ist. Die erforderlichen Höhen werden in einem Turnus von etwa zehn Jahren regelmäßig überprüft, so dass rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen erfolgen können.

Im Küstenschutz findet die Anpassung an den Klimawandel, insbesondere an den Meeresspiegelanstieg, bereits statt. Die Bauwerke werden so ausgelegt, dass sie den Belastungen, die aus den Berechnungen mit Klimamodellen die keine Reduktion der Treibhausgase annehmen resultieren, standhalten können. Aufgrund dieser Anpassungsmaßnahmen ist das Klimarisiko bis 2100 als gering zu bewerten. Ohne Anpassungen, also ohne vorsorglichen Küstenschutz, wäre das Risiko einer Sturmflutkatastrophe bereits heute hoch (KAPITEL 4.2.8).

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Gering	Gering	Gering
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 41: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Belastung auf den Küstenschutz“ unter Berücksichtigung der laufenden Anpassungsmaßnahmen.



WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT

4.3 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

Niedersachsen kann grundsätzlich als wasserreiches Land bezeichnet werden. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge betrug im Bezugszeitraum 1971–2000 742 mm und stieg auf 764 mm in 1991–2020 an. Innerhalb des Wasserkreislaufs verdunstet ein Großteil wieder, ohne dem Grundwasser oder den Flüssen für weitere Nutzungen verfügbar zu sein. Der Anteil der nutzbar ist (als Oberflächen- oder Grundwasser), unterscheidet sich sowohl saisonal als auch regional. So gibt es im landesweiten Mittel im Sommerhalbjahr eher ein Wasserdefizit durch hohe Verdunstungsraten, während es im Winterhalbjahr zu einem Überschuss kommt. Gleichzeitig verteilt sich das Wasserdargebot regional unterschiedlich. So ist der Harz durch ein montanes Klima niederschlagsreich und verdunstungsarm, während der zentralöstliche Teil Niedersachsens durch ein subkontinentales Klima geprägt und damit niederschlagsarm und verdunstungsreich ist. Die Küste wiederum weist ein maritimes Klima mit ganzjährig konstanten Niederschlägen und einer hohen Verdunstung auf (Hajati et al., 2023). Das verfügbare Angebot an Wasser für den Menschen als auch für die natürlichen Ökosysteme in Niedersachsen hängt somit von diesen saisonalen und räumlichen Randbedingungen ab. Besondere Herausforderungen ergeben sich vor allem dann, wenn es zu erheblichen Abweichungen vom Normalzustand im Wasserhaushalt kommt.

Der Klimawandel verändert einerseits die mittleren Verhältnisse im Landschaftswasserhaushalt, erzeugt andererseits aber auch intensivere Extremereignisse. Grundsätzlich wird im Zuge des Klimawandels in Niedersachsen zukünftig mit einer weiteren Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter gerechnet (KAPITEL 2.2.1), die heute schon beobachtet werden kann (NIKO, 2023b). Dadurch kann es einerseits zu einem (zunehmenden) Defizit in Zeiten von erhöhten Bedarfen kommen, wenn z. B. während der sommerlichen Vegetationsphase Pflanzen mehr Wasser benötigen und auch die Feldberegnung zunimmt. Andererseits kommt es zu einem Wasserüberschuss im Winterhalbjahr, wenn außerhalb der Vegetationszeit die verfügbaren Wassermengen zunehmen, der Bedarf z. B. von Pflanzen aber gleichzeitig gering ist. Zudem werden Extremereignisse und damit das Klimarisiko von zu viel Wasser, z. B. in Form von HOCHWASSER, STARKREGEN,

VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER, GRUNDWASSERHOCHSTAND und von zu wenig Wasser, z. B. in Form von NIEDRIGWASSER, GRUNDWASSERDÜRRE, GRUNDWASSERTIEFSTAND und MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER zunehmen. Dies betrifft sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität solcher Ereignisse (Kreienkamp et al., 2021; World Weather Attribution, 2018). Beispiele sind die Trockenjahre 2018–2020, die im Grundwasser und an vielen Flusspegeln in Niedersachsen zu Rekorden im Hinblick auf niedrige Wasserstände führten (NLWKN, 2019b). Auf der anderen Seite gab es in der Vergangenheit auch extreme Hochwasser in Niedersachsen wie etwa das Ereignis 2017 im Bereich des Harzes oder das Winterhochwasser 2023/2024 mit rekordverdächtigen hohen Wasserständen (Anhalt et al., 2021; NLWKN, 2024b).

Die beschriebenen Veränderungen der Wassermenge sowie die im gleichen Maße auftretenden Veränderungen der Wasserqualität (KAPITEL 4.3.10) können bei unterschiedlichen Nutzergruppen konkurrierenden Bedarfen auslösen, wodurch es zu Problemen kommt. Zu den Zielkonflikte verschärfen, wodurch es zu Problemen kommt. Die von den Verhältnissen im Wasserhaushalt abhängig sind bzw. auf diese einwirken, zählen z. B. die Trinkwasserversorgung (KAPITEL 4.3.9), die landwirtschaftliche Produktion (ERTRAGSAUSFÄLLE, QUALITÄT DER ERNTEPRODUKTE, WASSERMANGEL IM BODEN), industrielles Brauch- und/oder Kühlwasser, die Energieproduktion, die Schifffahrt, das Hochwasser- und Niedrigwassermanagement und nicht zuletzt wasserabhängige Ökosysteme (KAPITEL 3.3.1).

Trockenheit, Hitze und Dürren sowie damit verbundene niedrige Wasserstände in Fließgewässern und im Grundwasser können beispielsweise negative Folgen bzw. Einschränkungen für die Schifffahrt, Kühlwasserentnahmen, die Gewässerökologie, Einleitungen aus Kläranlagen oder im Hinblick auf Entnahmen für die Feldberegnung bedeuten. Extreme Niederschläge und STARKREGEN sowie damit verbundene HOCHWASSER, Sturzfluten und ein daraus resultierender GRUNDWASSERHOCHSTAND können wiederum z. B. zu Schäden an Gebäuden und der Verkehrsinfrastruktur führen, BODENEROSION DURCH WASSER hervorrufen, Schäden an landwirtschaftlichen Flächen verursachen und nicht zuletzt Menschenleben gefährden.

Der Klimawandel verändert nicht nur das Dargebot an Wasser, sondern auch die Bedarfe. So zeigen etwa Abschätzungen zur Entwicklung zukünftiger Entnahmen aus dem Grundwasser für Niedersachsen, dass diese Mengen bis zur Mitte des Jahrhunderts insgesamt zunehmen werden (in der Größenordnung von heute rund 1,3 Mrd m³/Jahr auf etwa 1,65 Mrd m³/Jahr ~ +27 %) (MU, 2022c). Dabei käme es zu erhöhten Bedarfen vor allem im Bereich der Feldberegung, aber auch im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung, während bei den Entnahmen von tierhaltenden Betrieben zur Eigenversorgung eher ein Rückgang erwartet wird. Gleichzeitig zeigen Analysen zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserneubildung als auch der Grundwasserstände in Niedersachsen, dass diese (regional unterschiedlich) alleine aufgrund klimatischer Veränderungen im Sommer tendenziell abnehmen, während sie im Winter steigen (Hajati et al., 2024; NLWKN, 2023a).

Aufgrund dieser vielfältigen Einflüsse des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft in Niedersachsen sowie den damit verbundenen Auswirk-

ungen auf das verfügbare Wasserdargebot, bestehen zahlreiche Wechselwirkungen mit allen hier behandelten Handlungsfeldern, die in direkter bzw. indirekter Beziehung zum Medium Wasser stehen. Dementsprechend sind diese Handlungsfelder in erheblichem Maße durch Wasserdefizite und Wasserüberschüsse sowie die erwartete Zunahme von Extremereignissen im Wasserhaushalt betroffen.

Als ein wichtiger Baustein und Wegweiser für ein zukunftsorientiertes Wassermanagement dient der sog. Masterplan Wasser, der aktuell von der niedersächsischen Landesregierung erarbeitet wird. Er fokussiert drei zentrale Handlungsfelder bzw. Herausforderungen in der Wasserwirtschaft: das nachhaltige Wassermengenmanagement, den Schutz vor Wasser (Hochwasser- und Küstenschutz) sowie die Reduzierung von Schadstoffen. Mit dieser Strategie werden wesentliche Handlungsfelder und Ziele in der Wasserwirtschaft dargestellt und konkrete Lösungswege aufgezeigt. Damit soll die Umsetzung effektiver Maßnahmen auf Landes- und kommunaler Ebene vorangebracht werden.

— INFO —

- Das Wasserangebot für den Menschen und die Ökosysteme Niedersachsens hängen von regionalen und saisonalen Faktoren ab und wird durch den Klimawandel verändert.
- Der Klimawandel ändert sowohl die mittleren Verhältnisse als auch die Extremereignisse im Landschaftswasserhaushalt.
- Die Änderungen in Wassermenge und -qualität können zu konkurrierenden Nutzungsbedarfen und damit -konflikten führen.
- Der Klimawandel könnte in Zukunft die Bedarfe für Grundwasserentnahme verstärken – bei tendenziell abnehmenden Grundwasserständen im Sommer.

4.3.1 Hochwasser

Je nach Ausmaß der Überschwemmungen können Hochwasserereignisse unterschiedliche ökonomische und ökologische Folgen nach sich ziehen und Auswirkungen auf verschiedene Handlungsfelder haben. Ökosysteme an Fließgewässern sind im Allgemeinen an regelmäßige Überschwemmungen angepasst und nicht selten auch darauf angewiesen, z. B. Flussauen. Extreme Abflussereignisse können jedoch aufgrund hoher Wasserstände, langer Dauer der Überflutung oder hoher Fließgeschwindigkeiten auch hier zu Problemen führen, z. B. aufgrund von **BODENEROSION DURCH WASSER** oder Schäden an den Pflanzen durch Staunässe (KAPITEL 3.1.2 und 4.3.4) bzw. Sauerstoffmangel im Wurzelbereich (KAPITEL 3.2.2). Menschliche Systeme können ebenfalls von Hochwasser betroffen sein, sofern sie nicht durch entsprechende Maßnahmen geschützt sind. Dies betrifft z. B. in Siedlungsbereichen die Bausubstanz von Gebäuden sowie Verkehrsinfrastrukturen durch Vernässung oder mechanische Belastung. Land- und forstwirtschaftliche Flächen sowie Böden generell können über **BODENEROSION DURCH WASSER**, Verschlammung oder Eintrag von Schadstoffen belastet werden. Schlimmstenfalls kommt es zur Gefährdung von Menschenleben.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Nach §72 des Wasserhaushaltgesetzes (WHG, 2009) ist Hochwasser als eine zeitlich beschränkte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land definiert. Dabei steigt der Abfluss (und damit der Wasserstand) in einem Fließgewässer soweit an, dass das Wasser aus dem Gewässerbett austritt, über die Ufer in die Fläche fließt und diese überflutet (sog. fluviale Überflutung). Faktoren, die einen Einfluss auf das Ausmaß von Hochwasserereignissen haben, sind u. a. die Form und Stärke der Niederschläge sowie die Eigenschaften des Einzugsgebietes und des Gewässers selbst. Sowohl langanhaltender Dauerregen als auch kurzzeitige Regenereignisse mit hoher Intensität können zu Hochwasser führen. In beiden Fällen fließt ein hoher Anteil des Niederschlags als sog. Direktabfluss (bestehend aus Oberflächen- und Zwischenabfluss) innerhalb relativ kurzer Zeit dem Gewässer zu. Dieser Effekt kann durch Schneeschmelze zusätzlich verstärkt werden. Gleichzeitig haben auch die Verhältnisse im Gebiet einen Einfluss auf die Entstehung von Hochwasser. So kann beispielsweise die Neigung des Geländes die Abflussbildung an der Bodenoberfläche fördern. Gleiches gilt im Falle von fehlendem Bewuchs,

gesättigten bzw. gefrorenen Böden oder einer versiegelten Landschaft. Auch Maßnahmen am Gewässer können die Gefahr von Überschwemmungen erhöhen. Begradigte Flussläufe steigern die Fließgeschwindigkeiten, Deiche verkleinern die natürlichen Retentionsflächen. Dadurch kann weniger Wasser in der Fläche zurückgehalten werden, das Wasser fließt schneller ab und die Hochwasserwelle im Fluss wird steiler (Baumgarten et al., 2012).

Hochwasser können in Niedersachsen prinzipiell überall dort auftreten, wo sich ein Fluss bzw. Bachlauf befindet. Einen wichtigen Hinweis auf Gebiete, die durch Flusshochwasser betroffen sein können, bieten z. B. Hochwassergefahrenkarten, die auf dem **Umweltkartenserver** (2024a) des niedersächsischen Umweltministeriums zu finden sind.

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Klimawandels auf Flusshochwasser durch zwei verschiedene Indikatoren bzw. deren mögliche Veränderung in der Zukunft charakterisiert. Zum einen geht es um den Abflussscheitel, also den maximalen Abflusswert im Verlauf einer Hochwasserwelle. Dieser wird für alle Jahreshöchstabflüsse (im hydrologischen Jahr von November bis Oktober) an einem Pegel ermittelt, um anschließend den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) aus den Jahreshöchstabflüssen über einen definierten Zeitraum zu berechnen. Zum anderen geht es um die Anzahl der Hochwasserereignisse, deren Abflussscheitel größer sind als der MHQ aus einem Bezugszeitraum (1971–2000). Grundlage der Analysen bilden die Tageswert-Zeitreihen der Abflüsse von 61 ausgewählten Pegeln an niedersächsischen Fließgewässern. Die Datenbasis für den Bezugszeitraum sind gemessene Abflusswerte aus der **Landesdatenbank des NLWKN** (2024c). Die Abflüsse der Zukunft stammen aus der Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell *Panta Rhei* (NLWKN, 2019a, 2021a), welches durch ein Ensemble aus Klimaprojektionen (KAPITEL 2.2.1) angetrieben wurde.

Auswertungen von gemessenen Abflussdaten aus der Vergangenheit haben gezeigt, dass es langfristig betrachtet bisher keinen eindeutigen Trend bei der landesweiten Entwicklung von Hochwasserereignissen an niedersächsischen Flüssen gibt (NIKO, 2023b). Saisonale differenzierte Betrachtungen der letzten Jahrzehnte zeigen jedoch Hinweise für eine tendenzielle Zunahme der Abflussscheitel im Sommerhalbjahr sowie einen leichten Rückgang im Winterhalbjahr (NLWKN, 2021a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Analysen der Entwicklungen auf Basis der Klimaprojektionen zeigen in allen betrachteten Flusseinzugsgebieten mehr oder weniger ausgeprägte Bandbreiten in den zukünftigen Veränderungen des MHQ (Abbildung 37 und Tabelle 42). Dabei liegen die Zunahmen zur Mitte des Jahrhunderts an den meisten Gewässern im pessimistischen Fall in der Größenordnung von 20 bis 25 %. Im optimistischen Fall werden leichte Abnahmen erwartet, die an Aller, Leine und Großer Aue – welche alle eher im südöstlichen bzw. südlichen Niedersachsen zu finden sind und in die Weser entwässern – mehr als 10 % betragen. An der Ilmenau im Nordosten, die in die Elbe mündet, erscheint die Entwicklungsrichtung hin zu einer Verschärfung der Verhältnisse in diesem Zeitraum am eindeutigsten, gefolgt

von der Hase, die der Ems zufließt, und der Vechte im Südwesten. Zum Ende des Jahrhunderts muss an den meisten Gewässern im pessimistischen Fall mit einer Zunahme des MHQ in der Größenordnung von 35 bis 45 % gerechnet werden. Spitzenreiter sind dabei Hase, Hunte und Vechte im westlichen bzw. südwestlichen Niedersachsen. Lediglich an der Aller liegen die Zunahmen unter 30 %. Im optimistischen Fall würde sich an den meisten Flüssen nur wenig ändern, teilweise käme es zu einer leichten Entspannung der Situation. An der Großen Aue, der Hase und der Vechte können die Abnahmen sogar mehr als 10 % betragen. An Wümme, Leine, Ilmenau und Hunte erscheint die Entwicklungsrichtung hin zu einer Verschärfung der Situation in diesem Zeitraum relativ eindeutig.

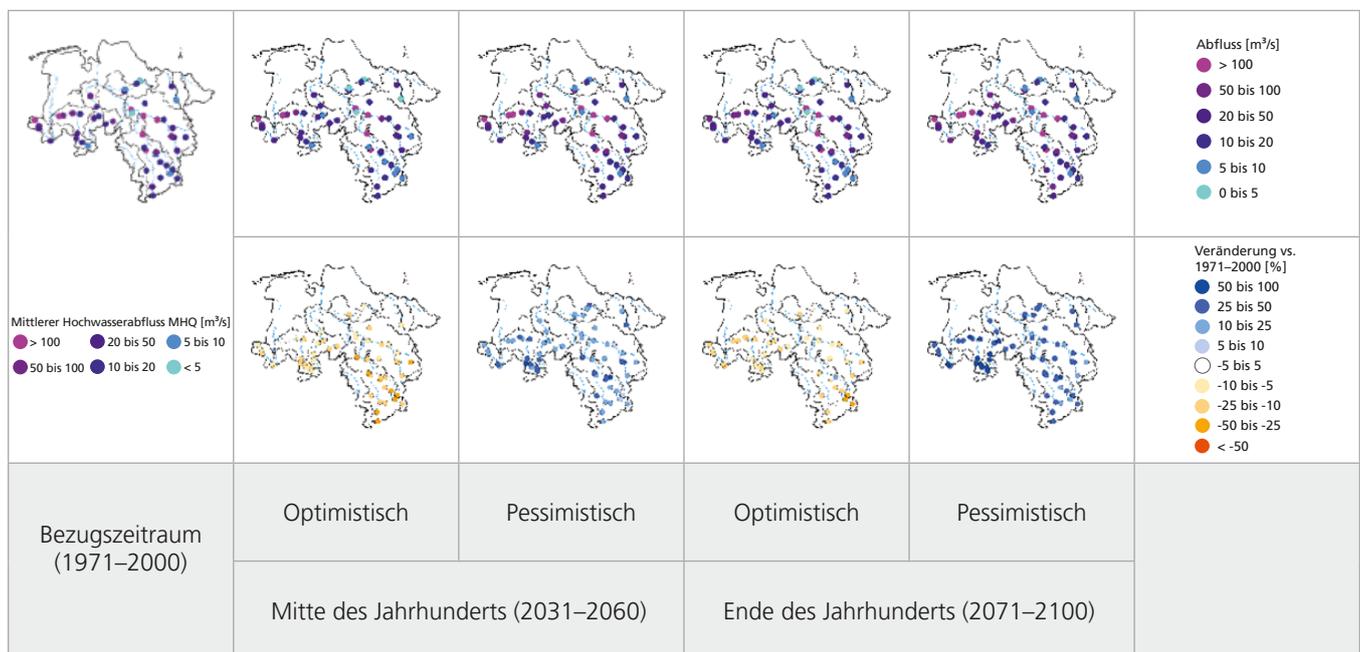


Abbildung 37: Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Flussgebiet	Anzahl Pegel	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Aller	13	124 m³/s	-11 %	+18 %	-7 %	+27 %
Große Aue	2	39 m³/s	-15 %	+19 %	-13 %	+39 %
Hase	11	65 m³/s	-6 %	+24 %	-12 %	+46 %
Hunte	6	36 m³/s	-8 %	+19 %	-8 %	+46 %
Ilmenau	2	25 m³/s	-1 %	+18 %	-5 %	+33 %
Leine	16	118 m³/s	-18 %	+25 %	-5 %	+37 %
Vechte	5	63 m³/s	-8 %	+23 %	-12 %	+41 %
Wümme	6	33 m³/s	-6 %	+18 %	-3 %	+34 %

Tabelle 42: Mittlerer Hochwasserabfluss (MHQ) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete KAPITEL 2.3.2).

Auch die Veränderungen der Anzahl der Hochwasserereignisse mit einem Abfluss größer dem MHQ (von 1971–2000) zeigen mehr oder weniger ausgeprägte Bandbreiten (Abbildung 38 und Tabelle 43). Diese weisen zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall an allen Pegeln auf eine deutliche Zunahme in der Größenordnung zwischen 15 und 30 Ereignissen im gesamten Zeitraum hin. An Vechte und Ilmenau würde sich die Anzahl dadurch mehr als verdoppeln. Im optimistischen Fall würde sich die Anzahl der Ereignisse um etwa bis zu 10 reduzieren. Dabei erscheint die Entwicklungsrichtung an Aller und Leine insgesamt am wenigsten eindeutig.

Zum Ende des Jahrhunderts käme es im pessimistischen Fall zu einer weiteren deutlichen Verschärfung der Situation, da sich die Anzahl der Hochwasserereignisse an allen Gewässern mehr als verdoppeln würde (um rund 30 bis 50 Ereignisse in 30 Jahren). Auch hier ergeben sich für Vechte und Ilmenau wieder die größten Zunahmen. Im optimistischen Fall zeigen alle Gewässer wiederum einen leichten Rückgang der Hochwasserereignisse um bis zu etwa 10 Ereignisse. Dabei zeigt sich auch hier wieder an Aller und Leine die geringste Sicherheit im Hinblick auf die Entwicklungsrichtung.

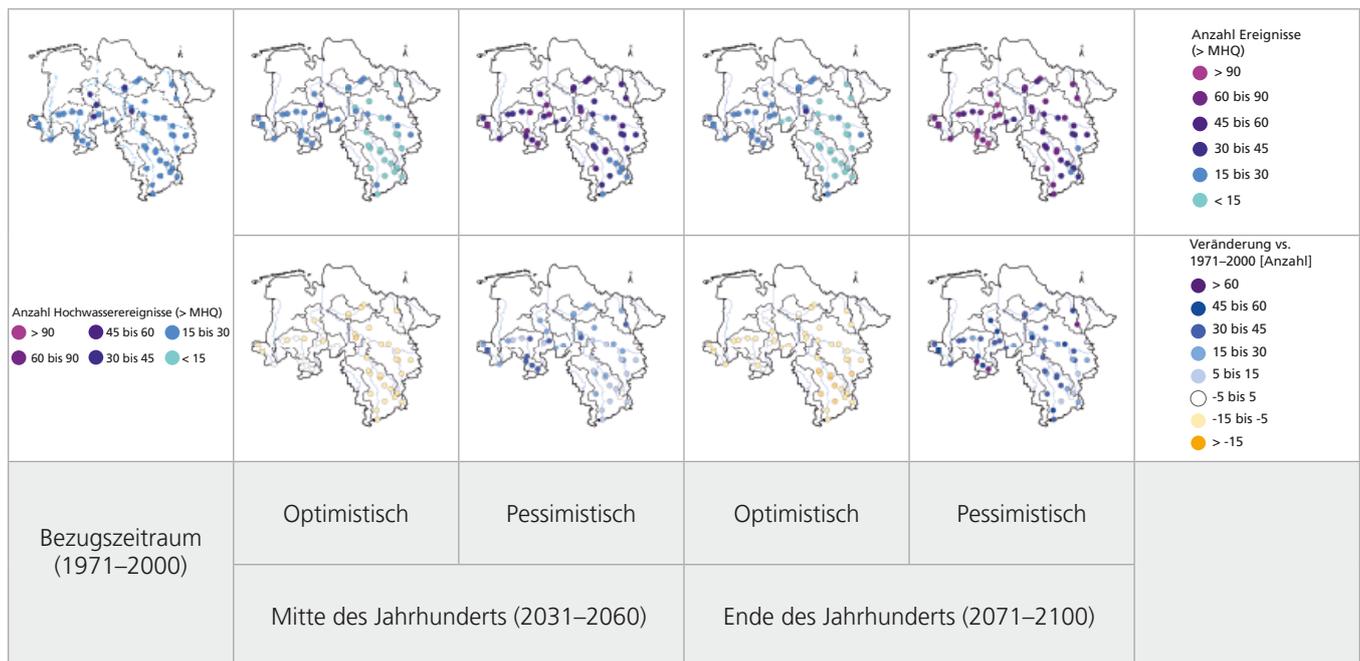


Abbildung 38: Summe der Hochwasserereignisse (mit Abflussscheitel > MHQ (1971–2000)) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Flussgebiet	Anzahl Pegel	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Aller	13	22	-7	+17	-11	+28
Große Aue	2	18	-2	+17	-7	+29
Hase	11	24	-5	+21	-7	+39
Hunte	6	33	-6	+23	-5	+45
Ilmenau	2	23	-7	+25	-10	+52
Leine	16	21	-8	+14	-10	+33
Vechte	5	26	-5	+30	-7	+47
Wümme	6	25	-9	+24	-6	+33

Tabelle 43: Summe der Hochwasserereignisse (mit Abflussscheitel > MHQ) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).

INFO

- Hochwasserereignisse können verschiedene Folgen für ökologische und ökonomische Systeme haben.
- Das Ausmaß von Hochwasser wird durch Form und Stärke der Niederschläge sowie die Eigenschaften des Einzugsgebiets und Gewässers beeinflusst.
- Betrachtungen der letzten Jahrzehnte zeigen Hinweise für eine Zunahme der Abflussscheitel im Sommerhalbjahr.
- Die Situation der Hochwasserverhältnisse kann sich zukünftig relativ deutlich verschärfen.
- Die Entwicklungen zeigen zum Ende des Jahrhunderts insgesamt stärkere Veränderungen als zur Mitte.
- Die größte Verschärfung zeichnet sich im Westen von Niedersachsen ab, v. a. an Hase, Hunte und Vechte.
- Im pessimistischen Fall kommt es zu einer Verschärfung des Risikos von Hochwasser, extreme Ereignisse werden hier jedoch nicht betrachtet.

Bewertung des Klimarisikos

Flusshochwasser sind per se natürliche Ereignisse. D. h. sie sind bereits in der Vergangenheit ohne Einfluss des Menschen aufgetreten und werden es auch zukünftig tun. Abflüsse in der Größenordnung eines mittleren jährlichen Hochwassers (MHQ) führen zunächst zu keinen nennenswerten Schäden oder Beeinträchtigungen (Fritsch et al., 2021), da Schutzmaßnahmen wie Deiche oder Retentionsräume in der Regel für größere Ereignisse dimensioniert sind. Daher kann für die Vergangenheit ein eher geringes Klimarisiko angesetzt werden.

Durch den Klimawandel kann es zu einer Veränderung der Faktoren kommen, die ein Hochwasser und eine damit verbundene Gefährdungslage auslösen. Hier stehen vor allem die Verteilung und Intensität der Niederschläge im Fokus. Andere Aspekte wie Veränderungen der Landschaft oder Veränderungen der Sachwerte in Überschwemmungsgebieten bleiben an dieser Stelle zunächst unberücksichtigt. In einem optimistischen Fall führen diese zukünftigen (rein klimatischen) Einflüsse zu keinen nennenswerten Veränderungen in Bezug auf fluviale Überflutungen

und dementsprechend auch zu keiner Verschärfung des Klimarisikos. In einem pessimistischen Fall hingegen nehmen sowohl die Abflussscheitel als auch die Anzahl der Hochwasserereignisse (> MHQ) bereits zur Mitte des Jahrhunderts zu, so dass hier von einem mittleren Risiko ausgegangen werden muss. Zum Ende des Jahrhunderts kommt es in vielen Flussgebieten zu einer weiteren Verschärfung der Situation (stellenweise eine Verdopplung der Zunahmen gegenüber der Mitte des Jahrhunderts), so dass hier von einem hohen Risiko auszugehen ist. Eine Einschätzung von ausschließlich extremen Ereignissen (z. B. HQ100) lassen die vorliegenden Analysen allerdings nicht zu.

Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von (Hochwasser auslösenden) Niederschlagsereignissen sind auf Basis aktueller Klimaprojektionen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, je weiter man in die Zukunft blickt. Dementsprechend nimmt die Gewissheit der Einschätzung des Klimarisikos im Hinblick auf die Hochwasserverhältnisse zum Ende des Jahrhunderts ab.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Gering	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 44: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hochwasser“.

4.3.2 Starkregen

Starkregen kann überall in Niedersachsen auftreten. Die Folgen von Überflutungen durch Starkregen sind abhängig von der Art des auslösenden meteorologischen Ereignisses, aber auch von den naturräumlichen und infrastrukturellen Gegebenheiten. Bei Starkregenereignissen fallen meist in kurzer Zeit erhebliche Niederschlagsmengen, die große Bereiche fluten und/oder Sturzfluten mit hohen Fließgeschwindigkeiten verursachen können. Kleinere Fließgewässer können bei Starkregen schnell anschwellen, sich in reißende Ströme verwandeln und großräumig über die Ufer treten. Vor allem in besiedelten Gebieten kann dies zu großen Schäden durch unkontrolliert abfließendes Wasser an Gebäuden, der Infrastruktur und auf landwirtschaftlichen Flächen führen. Nicht nur vom Wasserstand, sondern auch von der Fließgeschwindigkeit geht eine Gefahr aus. Schon bei niedrigen Wasserständen aber gleichzeitig hoher Fließgeschwindigkeit besteht erhöhtes Schadenspotenzial.

Hintergrund und Stand der Forschung

Eine Überflutung durch Starkregen entsteht durch ein Regenereignis, bei dem eine sehr hohe Menge Regen innerhalb kurzer Zeit fällt. Dabei kann es zu einer Überschreitung des Infiltrationsvermögens der Böden (KAPITEL 3.1.2) kommen (bzw. zu einer Überlastung der Kanalnetze im besiedelten Bereich) sowie zur Abflussbildung und -konzentration überwiegend direkt an der Oberfläche. Solche Starkregen sind meist lokale, auf kleine Gebiete beschränkte Ereignisse und können in kurzer Zeit große Flächen überfluten und ein hohes Schadenspotenzial aufweisen. Starkregenereignisse können aufgrund ihrer engen räumlichen Begrenzung teilweise nicht von Stationsmessungen (Punktmessung) erfasst werden. Auch ist eine Vorwarnung vor Ort aufgrund der komplexen meteorologischen Prozesse meist nur in einem sehr kurzen Zeitfenster möglich (oft weniger als 1-2 Stunden).

Starkregenereignisse können auch in Niedersachsen überall auftreten und sind nicht von der Topographie abhängig (Winterrath, 2017). Die Verwendung des sogenannten Starkregenindex hilft, derartige Ereignisse einfacher einzuordnen und einheitlicher zu bezeichnen (Schmitt et al., 2018). Die Hinweiskarten Starkregengefahren des Landes, die seit Ende 2024 auch für Niedersachsen verfügbar sind, geben eine erste generelle Einschätzung der Ausdehnung einer möglichen Überflutung durch Starkregen und ermöglichen eine Abschätzung der Gefahrensituation vor Ort. Auf diesen Karten sind u. a. Flächen dargestellt, die unter bestimmten Annahmen besonders von Überflutung betroffen sein können, sowie Fließgeschwindigkeiten und Wasserstände (BKG, 2023).

Für die Entstehung von Überflutungen durch Starkregen spielen sowohl meteorologische als auch Gebietsfaktoren eine wichtige Rolle. Zum einen sind vor allem Starkregenereignisse zu nennen, die in der Regel durch konvektive Bewölkung entstehen, d. h. vertikale Luftbewegungen, die zur Entstehung von Gewitterwolken führen. Zum anderen spielen Gebieteigenschaften wie Versiegelungs- bzw. Verdichtungsgrad, die Landnutzung sowie die Entwässerungsmöglichkeiten eine Rolle. Sie entscheiden mit darüber, in welchem Ausmaß Starkregen v. a. in Siedlungen zu Überlastungen und Überflutungen führt. Zunehmende Flächenversiegelung und eine hohe Bebauungsdichte sowie große Mengen an unkontrolliert oberflächlich zufließendem Wasser aus Außengebieten können zu Abflusskonzentrationen in urbanen Gebieten führen. Naturnahe Systeme ermöglichen stattdessen eine dezentrale Versickerung, Abflussvermeidung oder eine Abflussverzögerung. Weitere wichtige Einflussfaktoren bei der Infiltration von Niederschlag bzw. bei der Abfluss- oder Sturzflutbildung sind die Bodenart, die Verschläm- mung, die Bodenfeuchte bzw. die Oberflächenbeschaffenheit, die Hangneigung und das Relief.

Starkregenereignisse und dadurch verursachte Überflutungen können je nach naturräumlichen Gegebenheiten (Topographie, Bodenbeschaffenheit, fehlender Bewuchs, etc.) zu verstärkter **BODENEROSION DURCH WASSER** und dadurch zu Abtransport von Sediment/Schlamm und Treibgut führen (KAPITEL 3.1.2). Dies kann wiederum zu Verklausungen (Verschluss) von Brücken, Durchlässen und Einläufen führen und durch Rückstaueffekte die Gefahren durch Starkregen verstärken.

Von Überflutungen können Verkehrsgefährdungen ausgehen. Immer wieder führen Bodenerosionen in umliegenden Außengebieten zu Schlammlawinen, die Straßen überdecken und ganze Ortsteile überspülen (KAPITEL 3.1.4). Außerdem können unter der Wasseroberfläche nicht erkennbare Gegenstände, Hindernisse und Öffnungen sein. Mit stärker steigenden Wasserständen besteht die Gefahr des Eindringens von Wasser in die Gebäude. Besondere Gefahr besteht bei der Überflutung von Kellern. Überflutungen können u. U. zu lebensbedrohlichen Situationen für Menschen und Tiere sowie zu wirtschaftlichen Einbußen bei Industrie und Gewerbe führen, aber auch verheerende Folgen für Immobilienbesitzer haben. Extremwetterereignisse, die Überflutungen durch Starkregen verursachen, können auch gesundheitsrelevante Versorgungsinfrastrukturen wie beispielsweise die Gesundheits- und Nahrungsmittelversorgung, aber auch die Transport-, Elektrizitäts- und Kommunikationsinfrastruktur beeinträchtigen (z. B. Behinderung des Schienen- und Straßenverkehrs, Stromausfälle, Produktionsausfälle, Ertragsausfälle, etc.). (Fließ-)Gewässer sowie das Grund-

wasser können durch stoffliche Belastungen und durch Einträge gelöster Stoffe beeinträchtigt werden. Gesundheitliche Folgen können z. B. durch wasserbezogene Krankheiten sowie durch die Exposition gegenüber toxischen Substanzen entstehen (KAPITEL 5.1.6).

Informationen darüber, wie regional betroffenen Niedersachsen durch Überflutungen bei bestimmten Regenereignissen ist, geben die landesweit verfügbaren Hinweiskarten Starkregengefahren, bzw. detaillierte für die jeweilige Stadt/Gemeinde erstellte hydraulische 2-D Oberflächenabflussmodelle. Dabei sind die oben beschriebenen Gebietsfaktoren entscheidend für die Überflutungsgefahr.

Die Sensitivität bzw. Anpassungsfähigkeit gegenüber Überflutungen kann beeinflusst werden. Entscheidend hierfür ist, neben einer klimaresilienten Stadt-/Dorfentwicklung u. a. mit Veränderungen baulicher Bedingungen, auch ein kommunales Starkregenrisikomanagement. Es basiert auf Starkregengefahrenkarten bzw. auf den Hinweiskarten Starkregengefahr und umfasst die Aufstellung von Handlungskonzepten sowie die Verbreitung von Informationen über Gefahren und Risiken aufgrund von Überflutungen durch Starkregen aber auch Kommunikationsstrategien, die zur Sensibilisierung und damit Eigenvorsorge der Bevölkerung beitragen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Bedingt durch den Klimawandel wird davon ausgegangen, dass zukünftig mit einer Zunahme von Wetterextremen zu rechnen ist (DWA, 2022). Dabei gibt es Unterschiede in den Jahreszeiten (Bürger et al., 2021). Im Winter ist die Zunahme von Starkregen messbar (Bürger et al., 2021; DWD, 2018; Tradowsky et al., 2023). Hier treten regionale Unterschiede auf. Im Sommer (der Hauptstarkregensaison) kann bisher keine eindeutige Aussage zur Starkregenentwicklung getroffen werden (Becker et al., 2016; Bürger et al., 2021). Dennoch ist nachgewiesen, dass der Starkregenanteil am Gesamtniederschlag zunimmt (HKC, 2021).

Aussagen zur Entwicklung von Starkregenereignissen und damit verbundenen Überflutungen sind jedoch nur mit langen Zeitreihen oder hochauflösenden Daten bzw. Modellen möglich – beides befindet sich im Aufbau. Es ist in diesem Zusammenhang wichtig, zwischen den drei Größen Niederschlagsmenge über eine Saison (Summe), Intensität von Einzelereignissen und deren Häufigkeit zu unterscheiden. Diese drei Größen werden im Folgenden auf ihren Zukunftstrend mittels drei Datenquellen eingeordnet, wobei bei der Auswertung zu beachten wäre:

1. Radarmessungen, die wegen ihres lückenlosen Netzes für Starkregennmessung besonders wertvoll sind, werden erst seit 2001 erfasst. Diese Daten zeigen eine Starkregenvarianz, die aber meist unter 5 % liegt und in beide Richtungen abweicht. Für eine belastbare Aussage anhand der Radardaten, wie sich die Starkniederschläge entwickelt haben, reicht diese Länge der Messdauer jedoch noch nicht aus. Hierzu wären mindestens 30 Jahre nötig. Dennoch haben diese Daten jetzt schon zur Erkenntnis geführt: Starkregen tritt überall auf (Schweda, 2019). Eine fortlaufende Darstellung dieser Daten wird hier gezeigt: <https://lawa-starkregenportal.okeanos.ai/>.
2. Stationsmessungen liefern zum einen nur Punktmessungen und zum anderen in langen Zeitreihen nur vereinzelt Dauerstufen unter 24 Std. Starkregen zeichnet sich aber durch kurze, intensive und lokal sehr begrenzte Niederschläge aus.
3. Außerdem liegen bisher keine dynamischen, hochauflösten und globalen Klimasimulationen vor, die lokale konvektive Starkregenereignisse abbilden. Zum jetzigen Zeitpunkt werden hierfür globale Modelle räumlich und zeitlich herunterskaliert (Downscaling), was meist zu Fehlern führt (Bürger et al., 2021).

Eine Zunahme von Starkregen im Jahresverlauf ist zu beobachten. So konnte unter anderem eine Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Starkregen im Emscher-Lippe-Gebiet im letzten Jahrhundert nachgewiesen werden (Bürger et al., 2021).

Für den Winter wird übereinstimmend und unabhängig vom Analyseverfahren eine signifikante und robuste Zunahme von Intensitäten, Häufigkeiten und saisonalen Regensummen in den letzten Jahrzehnten festgestellt (Bürger et al., 2021; DWD, 2018; Tradowsky et al., 2023). Beispielsweise zeigt eine großangelegte Trendanalyse des Deutschen Wetterdienstes (Becker et al., 2016) einen Anstieg der Regenmengen von 25 % zwischen 1951 und 2006, mit einer Prognose ähnlicher Größenordnung bis 2100 für den Winter auf.

Trends im Sommer sind zwischen benachbarten Stationen und Zeiträumen gegenläufig oder variabel. In Niedersachsen zeigen Messdaten von Regenmengen im Mittel keinen Trend, sondern große Abweichungen zwischen den Jahren.

Bezogen auf die Niederschlagssumme ist eindeutig, dass der Starkregenanteil am Gesamtniederschlag zunehmen wird, wie Klimamodelle und Pegelanalysen zeigen (Bürger et al., 2021; HKC, 2021). Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist, dass Klimamodelle, wenn überhaupt, Zunahmen erst ab den 2020er-Jahren simulieren, was den fehlenden Trend bei Messdaten erklären könnte (Becker et al., 2016).

INFO

- Schäden entstehen sowohl durch hohe Wasserstände als auch durch hohe Fließgeschwindigkeiten.
- Überflutungen durch Starkregen können überall in Niedersachsen auftreten, und haben oft eine sehr kurze Vorwarnzeit.
- Schäden können durch Auf- und Rückstau des Wassers sowie durch Erosion entstehen.
- Die Empfindlichkeit gegenüber Überflutungen kann durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden.
- Aktuelle Entwicklungen zeigen bereits eine Zunahme der Starkniederschläge im Winter.
- Zukünftig muss mit einer Zunahme des Anteils von Starkregen am Gesamtniederschlag gerechnet werden.
- Alle Akteure (u. a. Städte/Gemeinden, Bürger, Unternehmen) müssen sich auf eine zunehmende Gefährdung aufgrund von Überflutungen durch Starkregenereignisse einstellen.

Bewertung des Klimarisikos

Überflutungen durch Starkregen gab es bereits in den vergangenen Dekaden in Niedersachsen und Deutschland. Auch wenn deutliche natürliche Schwankungen in den Zeitreihen erkennbar sind, gab es in Teilen Deutschlands in den letzten 10 Jahren vermehrt Starkregenereignisse, die in den Städten zu Überflutungen geführt haben (Rocks et al., 2015). Daher kann für die Gegenwart bereits ein mittleres Klimarisiko angesetzt werden.

Radarmessungen, sowie konvektionserlaubende Klimasimulationen deuten darauf hin, dass zukünftig mit einer Zunahme von Wetterextremen – wie Starkregen und damit verbundenen Überflutungen – zu rechnen ist (DWA, 2022; Rocks et al., 2015).

Entsprechende Ereignisse nehmen in dem pessimistischen Fall sowohl in der Mitte als auch am Ende des Jahrhunderts stark an Intensität zu. Denn zusammen mit der Änderung der mittleren Temperaturen und Niederschlags-

verhältnisse ist auch eine Änderung der Wetterextreme u. a. auch Starkregen für alle Jahreszeiten zu erwarten (Crocini-Maspoli et al., 2014). Daher gilt das Klimarisiko für Starkregen als hoch.

In dem optimistischen Fall nehmen die Temperaturen zwar nicht so deutlich zu, aber auch hier muss bis zur Mitte des Jahrhunderts mit einer zumindest gleichbleibenden Gefährdung (im Vergleich zur Gegenwart) aufgrund von Überflutungen durch Starkregen gerechnet werden. Da die Temperaturen aber selbst im optimistischen Fall zum Ende des Jahrhunderts weiter steigen werden, muss auch in diesem Fall mit einer erhöhten Gefährdung gerechnet werden.

Allerdings sind alle Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Starkregen mit großen Unsicherheiten verbunden, da aktuelle Klimamodelle noch keine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung besitzen, um Starkregen verlässlich abzubilden (Bürger et al., 2021).

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 45: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Überflutung durch Starkregen“.

4.3.3 Vernässung durch Grundwasser

Welche Relevanz hohe Grundwasserstände haben, haben die Menschen in Niedersachsen um den Jahreswechsel 2023/2024 erlebt. Durch die monatelangen Regenfälle kam es zu einer großflächigen Hochwasserlage und etwas zeitverzögert dann zu hochanstehendem Grundwasser, das in Keller drückte oder Wiesen und Ackerflächen vernässte. Der Gesamtschaden dieses Einzelereignisses liegt nach vorläufigen Schätzungen bei 161,5 Mio. €, davon fallen 20,5 Mio. € auf die Landwirtschaft und 12,4 Mio. € auf die Privathaushalte (Nds. Ministerium für Inneres und Sport, 2024). Für Landwirt:innen können durch Vernässung durch steigendes Grundwasser erhebliche Kosten entstehen.

Während das Klimarisiko „Vernässung durch Grundwasser“ die Vernässung auf Basis einer Perzentilbetrachtung der lokalen Grundwasserneubildung bewertet, betrachtet das Klimarisiko „Grundwasserhochstand“ die zu erwartenden Grundwasserstände an ausgewählten Messstellen, die sich als integrale Größe von vertikalen und horizontalen Wasserbewegungen im Untergrund einstellen. Der Fokus liegt dabei auf den jährlichen Grundwasserhochständen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Grundwasserstände durchlaufen in Niedersachsen im Allgemeinen ganz natürlich eine Saisonalität – sie steigen im Winter und sinken im Sommer. Durch die verminderte Verdunstung der Vegetation im Winterhalbjahr kann mehr versickerndes Niederschlagswasser den Grundwasserleiter erreichen. Während der Vegetationsperiode kommt durch die hohe Verdunstung weniger bis kein Niederschlag im Grundwasserkörper an und die Grundwasserstände sinken. Durch dieses Zusammenspiel können Vernässungssituationen vor allem in niederschlagsreichen Wintern auftreten und die Winterniederschlagsmenge ist seit 1932 im Trend fast linear gestiegen (Abbildung 39).

Steigt die Grundwasserneubildung nicht nur in extrem nassen Jahren, sondern auch im langjährigen Mittel, stützt das u. a. die Wasserversorgung sowie den Basisabfluss der Flüsse und Bäche (KAPITEL 4.3.5, 4.3.9) und wirkt gleichzeitig einer Grundwasserversalzung entgegen (KAPITEL 4.2.7). Jedoch kann insbesondere dann eine Entwässerung wichtig werden, um Schäden an Gebäuden zu reduzieren und landwirtschaftliche Flächen bewirtschaftbar zu halten. Die anfallenden erhöhten Abflussmengen können jedoch Siel- und Schöpfwerke an ihre Belastungsgrenzen führen. (KAPITEL 4.2.9).

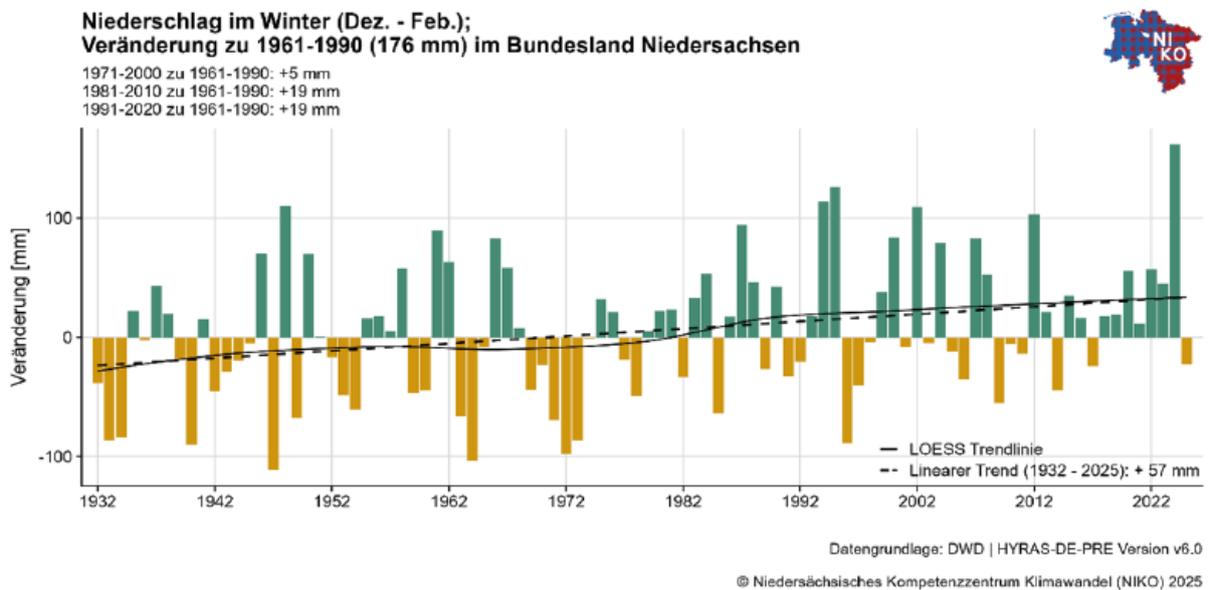


Abbildung 39: Jährliche Abweichung des Winterniederschlags zur Referenzperiode 1961-1990 in Niedersachsen. Eine lineare und eine LOESS Regression identifizieren die Trendentwicklung.

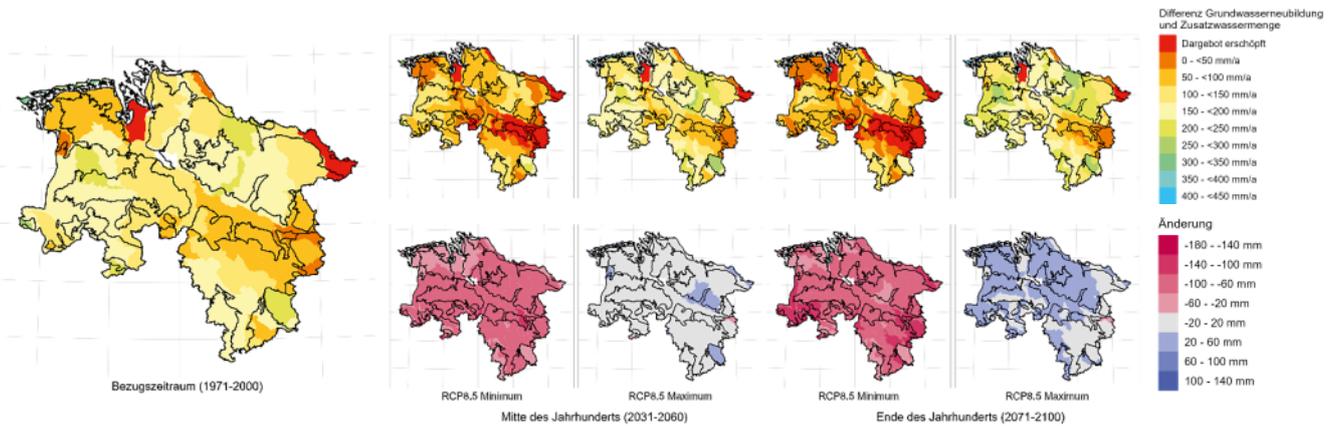


Abbildung 40: 90er-Perzentil der Grundwasserneubildung in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Je geringer der Flurabstand natürlich ausgebildet ist, desto höher ist das Risiko von Vernässung. Dies betrifft maßgeblich die Marschen und Niederungen (KAPITEL 2.3.3), deren Flächen zu 86,8 %, bzw. 72,5 % einen Flurabstand von maximal 100 cm aufweisen (mittlerer Grundwasserhochstand (mhgw) ≤ 100 cm). Aber auch das Sandmünsterland (35,9 %) und die Geest (33,1 %) haben einen relativ hohen Anteil von Flächen mit einem mhgw von maximal 100 cm. Wenn in diesen Flächen die Grundwasserneubildung höher ist als das 90er-Perzentil des Beobachtungszeitraums, besteht ein erhöhtes Potenzial zur Vernässung (Abbildung 39, Methodik siehe KAPITEL 2.2.5).

Grundwasserstände reagieren unterschiedlich sensitiv auf eine erhöhte Grundwasserneubildung und hängen von weiteren Eingriffen und Einflüssen innerhalb des Einzugsdem Grundwasser den positiven Effekt der Neubildung dämpfen, dagegen kann eine Interaktion mit Oberflächengewässern den Grundwasserstand stützen. Je geringer das Gefälle, desto langsamer wird das Wasser aus der Fläche abgeführt. Besonders sensitiv reagieren somit die Flächen an der Küste und in den Niederungen. Wenn das dichte Netz an Entwässerungsinfrastruktur (Drainagen, Gräben, Polder) gesättigt ist und durch die Siel- und Schöpfwerke abhängig vom Tidenhub nur eine bestimmte Menge in die Nordsee abgeführt werden kann, sind das Bedingungen, in denen das bereits schon oberflächennahe Grundwasser weiter ansteigt.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die größte Menge an Grundwasserneubildung und Drainageabfluss in Extremjahren (90er-Perzentil) wird in den Marschen (428 mm) und dem Sandmünsterland (442 mm) beobachtet (Abbildung 40 und Tabelle 46). Im Beobachtungszeitraum wurde diese Menge 3-mal erreicht. Zukünftig könnte diese Menge in dem optimistischen Fall 0-mal und in einem pessimistischen Fall 13,6-mal im Sandmünsterland erreicht werden, wobei lokal auch 20-mal in der Ostfriesischen Marsch erreicht werden können. Innerhalb der hydrogeologischen Teilräume ist die geringste Erhöhung des Vernässungspotenzials im Harz zu erwarten (7,5-maliges Überschreiten des 90er-Perzentils) und die höchste im Sandmünsterland (13,6-maliges Überschreiten des 90er-Perzentils). In den Niederungen und in der Marsch, den Flächen, die die höchste Sensitivität und Exposition haben, können sich diese Extremabflüsse zwischen 11,0-mal und 10,7-mal ereignen. Insgesamt zeigt sich eine Tendenz zu einem erhöhten Eintreten von Vernässungen durch Grundwasser.

Laut des IPCC befindet sich der Norden Deutschlands und damit Niedersachsen in einem Übergangsbereich: Der Norden Europas wird sehr viel nasser und der Süden Europas sehr viel trockener (IPCC, 2023b). Die Klimamodelle zeichnen ein sehr heterogenes Bild, ob Niedersachsen mehr auf der nassen oder der trockenen Seite liegt, auch weil der projizierte Niederschlag mit höheren Unsicherheiten behaftet ist als die Modellierung der Temperatur. Was beobachtet wird und was auch in den Klimamodellen abgebildet ist, ist die Verlagerung des Niederschlags aus dem Frühling/Sommer in den Winter. Wie stark sich diese Verlagerung zukünftig ausbildet, ist mit großen Unsicherheiten behaftet.

	mhgw ≤ 1 m	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Marschen	86,8 %	428 mm	-2,7 Jahre	+5,7 Jahre	-3 Jahre	+8,0 Jahre
Mitteldeutscher Buntsandstein	5,6 %	401 mm	-3 Jahre	+6,9 Jahre	-2,9 Jahre	+6,1 Jahre
Harz	8,5 %	584 mm	-3 Jahre	+4,5 Jahre	-3 Jahre	+4,5 Jahre
Münsterländer Kreidebecken	7,2 %	372 mm	-2,4 Jahre	+6,1 Jahre	-3 Jahre	+8,5 Jahre
Niederungen	72,5 %	326 mm	-2,8 Jahre	+5,2 Jahre	-2,8 Jahre	+7,7 Jahre
Geest	33,1 %	357 mm	-2,8 Jahre	+5,3 Jahre	-2,9 Jahre	+7,6 Jahre
Nordseeinseln	8,3 %	382 mm	-2,3 Jahre	+4,9 Jahre	-2,9 Jahre	+6,6 Jahre
Nordwestdeutsches Bergland	16,4 %	253 mm	-2,9 Jahre	+6,4 Jahre	-2,9 Jahre	+7,6 Jahre
Sandmünsterland	35,9 %	442 mm	-1,9 Jahre	+5,5 Jahre	-3 Jahre	+10,6 Jahre
Subherzyne Senke	15,9 %	142 mm	-2,9 Jahre	+5,6 Jahre	-2,9 Jahre	+6,1 Jahre
Thüringische Senke	8,1 %	320 mm	-3 Jahre	+5,8 Jahre	-3 Jahre	+6,3 Jahre

Tabelle 46: Anteil Flächen mit im Mittel hochanstehendem Grundwasser (mhgw ≤ 1 m), 90er Perzentil der Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen der Häufigkeit des Ereignisses (Anzahl Jahre die das 90er-Perzentil überschreiten) unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene hydrogeologische Räume (KAPITEL 2.3.3)

INFO

- Das Winterhochwasser 2023/2024 ist ein Beispiel dafür, welche Schäden durch hohe Grundwasserstände entstehen können.
- Grundwasserstände durchlaufen eine Saisonalität – sie steigen im Winter und sinken im Sommer. Dauerhaft hohe Niederschläge führen im Winter zu Vernässungen.
- Insgesamt zeigt sich eine Tendenz zu einem erhöhten Eintreten von Vernässungen durch Grundwasser.
- Die Vernässung durch Grundwasser birgt ein hohes ökonomisches Schadenspotenzial.
- Die Hochwasserlage 2023/2024 bleibt ein Extremereignis, das in Häufigkeit zunehmen könnte.
- In dem pessimistischen Fall könnte der mittlere Grundwasserhöchststand dauerhaft überschritten werden.

Bewertung des Klimarisikos

Heute schon erfahren Privathaushalte und landwirtschaftliche Betriebe immer wieder Schäden durch Vernässung durch Grundwasser. Das Extremereignis zum Jahreswechsel 2023/2024 hat deutlich gemacht, welche Auswirkungen auftreten können, wenn der Niederschlag im letzten Quartal des Jahres dauerhaft hoch ist (Nds. Ministerium für Inneres und Sport, 2024). Auch anhand der Klimaprojektionen bleibt dieses Ereignis ein Extremereignis und wird keine Normalität. Jedoch steigt die Möglichkeit, dass Grundwasserstände häufiger den mittleren Grundwasserhochstand überschreiten. Im optimistischsten Fall können diese Ereignisse jedoch auch seltener auftreten.

Da gleichzeitig der Nutzungsdruck auf die Ressource Grundwasser weiter steigen wird, insbesondere durch die Landwirtschaft (MU, 2022c), wird das Risiko für eine stärkere Vernässung durch Grundwasser in einem optimistischen Szenario als gering eingeschätzt. In dem pessimistischen Fall jedoch könnte der mittlere Grundwasserhöchststand lokal an zweidrittel der Jahre überschritten werden. Daher ist für den pessimistischen Fall das Risiko als hoch ausgewiesen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Gering	Hoch	Gering	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 47: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vernässung durch Grundwasser“.

4.3.4 Grundwasserhochstand

Grundwasserstände unterliegen natürlichen Schwankungen. Phasen mit hohen Wasserständen treten dabei vornehmlich im Winter bzw. Frühjahr auf (zu Beginn der Vegetationsperiode). Sie sind das Ergebnis von hohen Niederschlägen bei gleichzeitig geringer Verdunstung in Herbst und Winter, woraus eine höhere Grundwasserneubildung resultiert, sowie geringeren Wasserbedarfen bei Mensch und Natur in dieser Zeit. Aktuelle Beobachtungen sowie zukünftige Klimaprojektionen zeigen eine Verlagerung der Niederschläge in das Winterhalbjahr (DWD, 2018; NIKO, 2023b). Dadurch steigt u. a. das Risiko für Verhältnisse wie wir sie zuletzt im Winter 2023/2024 in Niedersachsen erlebt haben.

Während das Klimarisiko „Vernässung durch Grundwasser“ die Vernässung auf Basis einer Perzentilbetrachtung der lokalen Grundwasserneubildung bewertet, betrachtet das Klimarisiko „Grundwasserhochstand“ die zu erwartenden Grundwasserstände an ausgewählten Messstellen, die sich als integrale Größe von vertikalen und horizontalen Wasserbewegungen im Untergrund einstellen. Der Fokus liegt dabei auf den jährlichen Grundwasserhochständen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Grundwasser ist Teil des natürlichen Wasserkreislaufes. Es beschreibt nach DIN 4049-3 (1994) unterirdisches Wasser, das Hohlräume wie Poren oder Klüfte im Gesteinskörper zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. Dabei fließt es im Allgemeinen aus den höher gelegenen Neubildungsgebieten in die tiefer gelegenen Entlastungsgebiete (z. B. Niederungen), wo es zumeist einem Vorfluter zufließt. Somit beeinflussen die Menge und Qualität des Grundwassers auch die Oberflächengewässer. Die höchsten Grundwasserstände innerhalb des Jahres stellen sich in Niedersachsen im Normalfall vor Beginn der Vegetationsperiode am Anfang des Frühjahrs ein, da die Grundwasserneubildung im Verlauf des Winters aufgrund der jahreszeitlichen Verteilung von Niederschlag und Verdunstung am höchsten ist und der Wasserbedarf der Vegetation am geringsten. Auch Hochwasserereignisse an Fließgewässern (KAPITEL 4.3.1) können hohe Grundwasserstände durch Rückstau bzw. Infiltration begünstigen.

Die Situation der Grundwasserstände wird durch die klimatischen Verhältnisse (Niederschlag und Verdunstung) und die örtlichen Gegebenheiten (Beschaffenheit des Geländes sowie Bodenart und hydrogeologische Verhältnisse) beeinflusst (NLWKN, 2024a). In der Regel ist die Reaktionszeit von Grundwasser dabei deutlich langsamer als die von Oberflächenwasser, so dass hohe Grundwasserstände meistens erst zeitverzögert zu HOCHWASSER eintreten, aber entsprechend länger andauern können und zumeist weiträumiger wirken. Auch die Dichte des Fließgewässernetzes spielt eine Rolle, da Vorfluter in der Regel stabilisierend auf die Grundwasseroberfläche wirken können (Wriedt, 2023). Zum anderen spielen auch menschliche Aktivitäten eine wichtige Rolle. Neben der Versiegelung der Landschaft und der Veränderung von Landnutzungsformen, welche sich beide auf die Grundwasserneubildung auswirken, zählen hierzu vor allem Entnahmen aus dem Grundwasser (Holt et al., 2022). Diese werden nach Abschätzungen im Wasserversorgungskonzept Niedersachsen bis zur Mitte des Jahrhunderts zunehmen (MU, 2022c, 2022a).

Grundwasserstände weisen in der Regel eine deutliche Schwankung im Jahresverlauf auf. Die höchsten Grundwasserstände werden in der Regel im Frühjahr erreicht. Eine Veränderung der Situation der Grundwasserhochstände kann insbesondere dort erhebliche Auswirkungen auf verschiedene Bereiche haben, wo die Grundwasseroberfläche sich ohnehin nahe der Geländeoberfläche befindet (KAPITEL 4.3.3). Dies betrifft z. B. Siedlungsstrukturen (wie Wohngebäude), Verkehrsinfrastrukturen (wie Straßen oder Tunnel) sowie landwirtschaftliche Flächen, wo eine VERMINDERTE RETENTIONSLEISTUNG DER BÖDEN durch hohe Grundwasserstände zur Schädigung von Kulturen durch Staunässe führen können.

Gleichzeitig können Überschwemmungen durch hoch anstehendes Grundwasser auch außerhalb der eigentlichen Überflutungsräume von Flusshochwassern entstehen. Darüber hinaus können hohe Grundwasserstände aber auch die Entwicklung bzw. den Erhalt von grundwasserabhängigen Landökosystemen (positiv) beeinflussen, die ihren Wasserbedarf entsprechend vor allem aus dem Grundwasser decken. Hierzu zählen z. B. Auwälder, Niedermoore oder Feuchtgrünländer, deren Zustand laut §1a der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, 2000) geschützt und wenn möglich verbessert werden soll.

Regionen mit oberflächennahen Grundwasserständen sind vor allem im Bereich von oberflächennahen, geringmächtigen Grundwasserleitern sowie im Bereich von Niederungsgebieten oder Flusstälern zu finden (Schürch, 2008). Dementsprechend können in Niedersachsen vor allem Gebiete der Flussniederungen sowie der Marschen von den o. g. Auswirkungen im Hinblick auf Grundwasserhochstände betroffen sein (KAPITEL 4.3.3).

Die Charakterisierung der Situation der Hochstände des Grundwassers erfolgt anhand von zwei Indikatoren. Zum einen auf Basis der jährlichen Höchststände gemittelt über jeweils 30-jährige Betrachtungszeiträume. Zum anderen über die Anzahl der Hochstandsmonate, d. h. die Anzahl an Monaten im jeweiligen Betrachtungszeitraum mit einer Überschreitung des zuvor erwähnten mittleren Hochstands im Bezugszeitraum (1971–2000). Grundlage der Analysen bilden die Grundwassermessstellen des NLWKN-Messprogramms „Klima-Grundwasserstand“ (Holt et al., 2022), die Methodik ist in KAPITEL 2.2.5 beschrieben.

Analysen der bisherigen Entwicklung der Grundwasserstände in Niedersachsen zeigen, dass in vielen Regionen die winterlichen Hochstände in der Vergangenheit tendenziell eher abgenommen haben. Dies betrifft vor allem den Zeitraum seit 2009. In ähnlicher Weise hat sich auch die Dauer von Hochstandsphasen verringert (Wriedt, 2023).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Auswertungen der Simulationen auf Basis der Klimaprojektionen zeigen in allen betrachteten Naturregionen (KAPITEL 2.3.3) Bandbreiten in den Ergebnissen, die sowohl auf eine mögliche Entspannung der Situation (d. h. Abnahme der Hochstände) als auch auf eine mögliche Verschärfung (d. h. Zunahme der Hochstände) hindeuten. Dabei fallen die Veränderungen in Bezug auf die Entwicklungsrichtung bei den Grundwasserhochständen insgesamt etwas weniger eindeutig aus, während sie bei der Anzahl der Hochstandsmonate durchaus eine relativ klare Tendenz aufzeigen. Allerdings werden die Regionen in unterschiedlichem Maße von den jeweils betrachteten Messstellen repräsentiert.

Bei den Grundwasserhochständen (Abbildung 41 und Tabelle 48) liegen die Veränderungen im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971–2000) beim pessimistischen Fall in der Größenordnung von rund 0 bis +0,35 m, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts etwas größer ausfallen als zur Mitte. Die deutlichsten Zunahmen zeigen sich im Bereich der Geest sowie des Berglandes. Letzteres wird allerdings nur von relativ wenigen Messstellen repräsentiert. Im optimistischen Fall käme es zu einer geringfügigen Abnahme der Hochstände (außer im Bereich der Inseln, wobei hier nur eine Messstelle im o. g. Messprogramm existiert) in der Größenordnung von etwa 0 bis 0,10 m. Dabei gibt es kaum Unterschiede bei den Änderungsbeträgen zwischen der Mitte und dem Ende des Jahrhunderts. Die größten Abnahmen wären im Bereich der Börden sowie des Berglandes zu erwarten, beide Regionen werden allerdings nur durch wenige Messstelle repräsentiert.

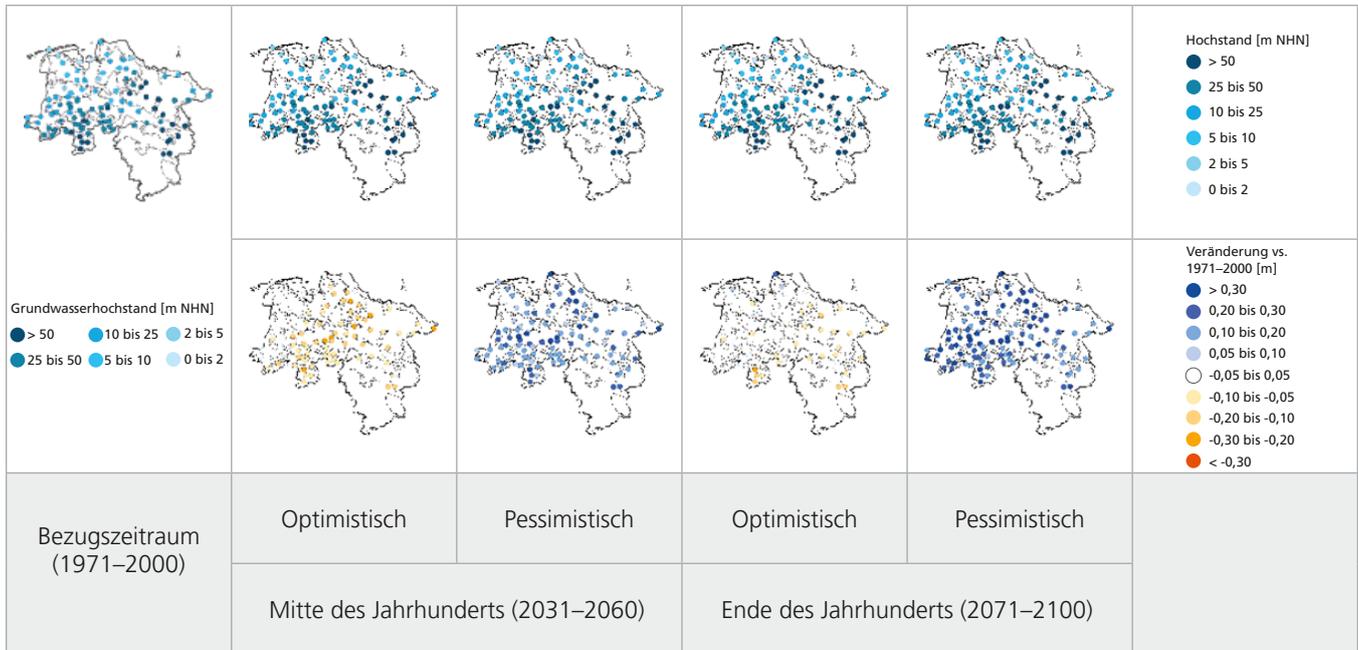


Abbildung 41: Mittlere Grundwasserhochstände in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Naturregion	Anzahl GWMS	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Inseln	1	2,07 mNHN	-0,04 m	+0,08 m	+0,04 m	+0,16 m
Marschen	9	0,09 mNHN	-0,04 m	+0,03 m	-0,07 m	+0,05 m
Niederungen	41	28,09 mNHN	-0,07 m	+0,15 m	-0,03 m	+0,26 m
Geest	53	28,90 mNHN	-0,09 m	+0,20 m	-0,02 m	+0,31 m
Börden	3	85,43 mNHN	-0,08 m	+0,18 m	-0,09 m	+0,20 m
Bergland	6	73,01 mNHN	-0,10 m	+0,24 m	-0,09 m	+0,33 m

Tabelle 48: Mittlere Grundwasserhochstände im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).

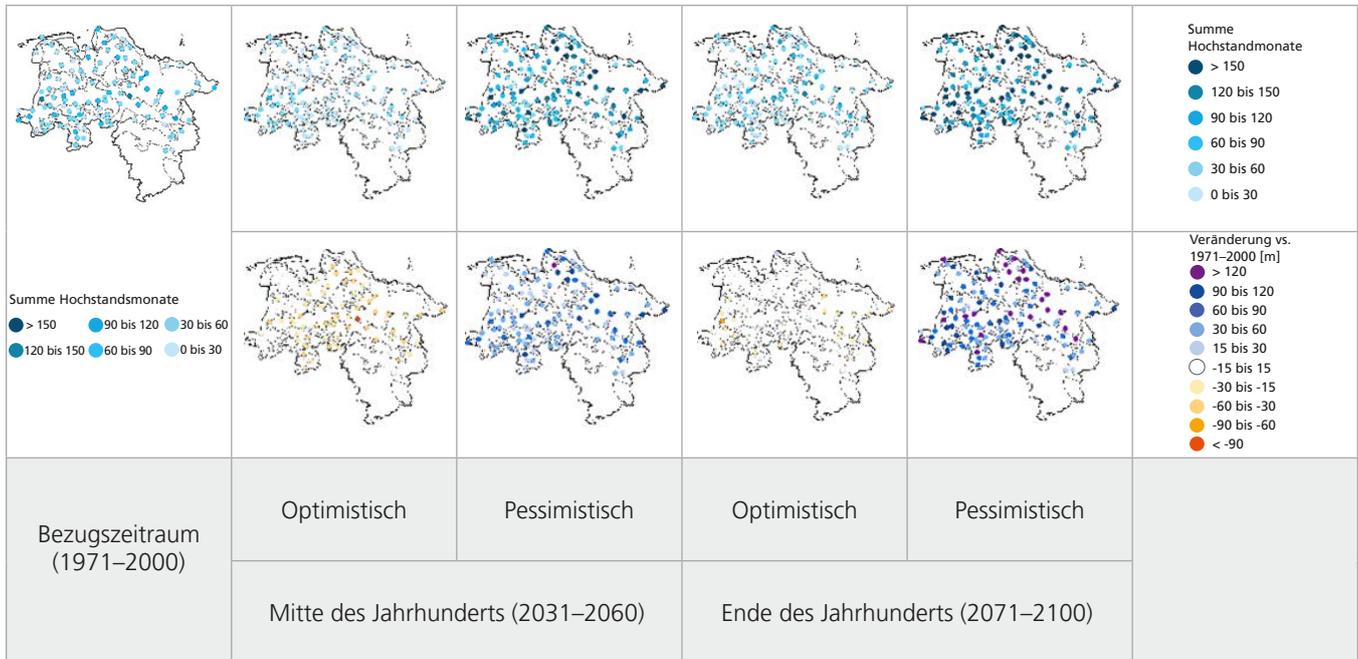


Abbildung 42: Summe der Monate mit Grundwasserhochstand in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Naturregion	Anzahl GWMS	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Inseln	1	46 Monate	+2 Monate	+48 Monate	+7 Monate	+153 Monate
Marschen	9	28 Monate	-7 Monate	+24 Monate	-1 Monate	+60 Monate
Niederungen	41	41 Monate	-17 Monate	+38 Monate	-9 Monate	71 Monate
Geest	53	52 Monate	-25 Monate	+53 Monate	-8 Monate	+100 Monate
Börden	3	36 Monate	-16 Monate	+36 Monate	-8 Monate	+44 Monate
Bergland	6	35 Monate	-16 Monate	+41 Monate	-7 Monate	+58 Monate

Tabelle 49: Summe der Monate mit Grundwasserhochstand im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).

Bei der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochständen (vgl. Abbildung 42 und Tabelle 49) käme es zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall zu einer Zunahme, die in den Marschen im nördlichen Niedersachsen mit 24 zusätzlichen Monaten am geringsten ausfällt und im Bereich der Geest mit 53 zusätzlichen Monaten am größten ist. Im optimistischen Fall käme es insgesamt zu einer Abnahme der Hochstandsmonate, die in der Geest den

maximalen Wert von 25 Monaten weniger erreicht. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen alle Regionen im pessimistischen Fall nochmals eine weitere Zunahme gegenüber der Jahrhundertmitte. Dabei weisen die Inseln und die Geest mit Zunahmen von 100 Monaten und mehr die deutlichsten Veränderungen auf. Das optimistische Szenario zeigt in allen Regionen nur wenig Veränderungen gegenüber dem Bezugszeitraum.

INFO

- Zunehmende Niederschlagsmengen im Winter steigern das Risiko für hohe Grundwasserstände und Vernässungen.
- Die Situation der Grundwasserstände wird durch klimatische Verhältnisse, die örtlichen Gegebenheiten sowie menschliche Aktivitäten beeinflusst.
- Grundwasserstände weisen Schwankung im Jahresverlauf auf – die höchsten Werte werden im Frühjahr erreicht.
- Die Ergebnisse zeigen zukünftig tendenziell eine Verschärfung der Situation der Grundwasserhochstände an.
- Die größten Zunahmen bei Grundwasserhochständen sind im Bereich der Geest zu erwarten.
- Winterliche Hochstände haben in der Vergangenheit eher abgenommen.
- Eine mögliche Zunahme der Grundwasserhochstände kann in Zukunft auch mehrjährige Nassphasen zur Folge haben.

Bewertung des Klimarisikos

Die zunehmende sommerliche Trockenheit, zum Teil in Verbindung mit niederschlagsarmen Wintern in den 2010er-Jahren sowie den o.g. anthropogenen Einflüssen haben dazu geführt, dass sich die Grundwasserstände in Niedersachsen seit 2009, insbesondere aufgrund der mehrjährigen Trockenphase 2018–2022, in vielen Regionen bereits auf einem unterdurchschnittlichen Niveau bewegen, im Vergleich zum langjährigen Mittel 1991–2020 (Wriedt, 2023). Gleichzeitig haben die überdurchschnittlich nassen Jahre 2023/2024 wieder zu einem deutlichen Anstieg der Grundwasserstände geführt (NLWKN, 2024d).

In wie weit sich diese Entwicklungen in den nächsten Jahren fortsetzen, bleibt abzuwarten. Aufgrund der langfristigen Tendenzen kann für die Vergangenheit in Bezug auf die Grundwasserhochstände bisher von einem geringen Klimarisiko ausgegangen werden.

Durch den Klimawandel werden die Temperaturen weiter steigen. Niederschläge können vor allem im Sommer häufiger als konvektive Starkniederschläge fallen (Kaspar et al., 2024) sowie im Winter generell zunehmen (DWD, 2018). Dies kann im pessimistischen Fall zu einer Verschärfung der Situation (d. h. Zunahme) in Bezug auf die Grundwasserhochstände führen. Nach den vorliegenden Ergebnissen würde sich dies zur Mitte des Jahrhunderts zunächst nur moderat bemerkbar machen. Am Ende des Jahrhunderts jedoch käme es zu einer deutlichen Zunahme der Hochstände und vor allem der Anzahl von Monaten mit Hochständen, was möglicherweise auch mehrjährige Nassphasen zur Folge haben kann. Im opti-

mistischen Fall würden die zunehmenden Defizite des Niederschlags im Sommer die Überschüsse im Winter ausgleichen, so dass es bzgl. der Hochstände zu keinen nennenswerten Veränderungen bzw. sogar zu einer leichten Entspannung der Situation kommen könnte. Daher kann das zukünftige Klimarisiko in diesem Fall als gleichbleibend gegenüber den aktuellen Zuständen angesehen werden.

Die für die Grundwasserneubildung maßgeblichen Niederschlagsprojektionen zeigen gewisse Unsicherheiten. So deuten zum einen Vergleiche zwischen beobachteten und modellierten Werten darauf hin, dass die Zukunftsprojektionen die Dynamik der sinkenden Niederschläge gegenüber den Messdaten der letzten ein bis zwei Jahrzehnte bisher zum Teil unterschätzen, d. h. es kommt zu einer Überschätzung der Gesamtniederschlagsmengen (NLWKN, 2021a). Zum anderen kommt es aufgrund der relativ groben räumlichen und zeitlichen Auflösung von Klimaprojektionsdaten zu einer Unterschätzung von Extremen wie z. B. von konvektiven STARKREGEN-Ereignissen (Frei, 2021). Außerdem deuten dekadische Klimavorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bis zu Beginn der 2030er-Jahre auf weiterhin steigende Temperaturen und eine Fortsetzung der trockenen Verhältnisse im Vergleich zur Klimaausprägung im Zeitraum 1991–2020 (DWD, 2024c) hin. Gleichzeitig reichen die Abschätzungen für den anthropogenen Nutzungsbedarf nur bis zur Mitte des Jahrhunderts (MU, 2022a, 2022c). Daher kann für diesen Zeithorizont noch von einer mittleren Gewissheit der Aussagen ausgegangen werden, die zum Ende des Jahrhunderts aber geringer einzuschätzen ist.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Gering	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 50: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserhochstand“.

4.3.5 Niedrigwasser

Analysen von Abflussdaten der Vergangenheit zeigen für Niedersachsen bereits in den letzten Jahrzehnten (1960–2017) eine deutliche Zunahme von Tagen mit Niedrigwasser an niedersächsischen Fließgewässerpegeln (NIKO, 2023b). Auch die Entwicklungen der Abflussmengen bei Niedrigwasser weisen auf eine signifikante Verschärfung, d. h. einen Rückgang an vielen Pegeln hin, vor allem in den südöstlichen Landesteilen (NLWKN, 2019a). Die entsprechenden Untersuchungen umfassen allerdings noch nicht die Trockenjahre 2018 bis 2020 und 2022. Daher muss bis heute von einer langfristig sich kontinuierlich verschärfenden Situation in Bezug auf die Niedrigwassersituation an Fließgewässern ausgegangen werden. Gleichzeitig deuten Klimaprojektionen auf eine weitere Zunahme der Temperaturen und eine Verlagerung der Niederschläge in das Winterhalbjahr hin (KAPITEL 2.2.1).

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Nach DIN 4049-3 (DIN 4049-3, 1994) beschreibt Niedrigwasser einen Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand bzw. der Durchfluss einen bestimmten Schwellenwert erreicht oder unterschreitet. Es repräsentiert also eine Situation geringer (unterdurchschnittlicher) Abflussmengen bzw. damit einhergehender niedriger Wasserstände in einem Fluss. Diese Verhältnisse entstehen zumeist über längere Zeiträume von Wochen bis zu Monaten und sind in der Regel Teil der natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen der Abflüsse in einem Gewässer.

Niedrigwasser ist ein Phänomen, das grundsätzlich witterungs- bzw. jahreszeitlich bedingt ist. Aus klimatischer Sicht sind hierbei vor allem die Niederschlagsverhältnisse und die Verdunstung von Bedeutung. Letztere spielt insbesondere im Sommer eine entscheidende Rolle. Beide Faktoren haben einen Einfluss auf die Wasservorräte im Grundwasser (GRUNDWASSERTIEFSTAND, GRUNDWASSERDÜRRE, MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER) und in Seen, welche laut LAWA (2007) im Zuge länger andauernder Trockenperioden reduziert werden. Dadurch kommt es wiederum zu einer Abnahme der Abflüsse im Gewässerbett, da diese bei Niedrigwasser vor allem durch Zuflüsse aus dem Grundwasser gespeist werden (Holt et al., 2022). Als Weiteres hat auch die Beschaffenheit des Geländes einen Einfluss auf die Niedrigwassersituation. So kann es beispielsweise je nach Vegetation (und damit verbundener Verdunstung), der Porosität der Böden (und damit verbundener Versickerung) sowie der Neigung des Geländes (und damit verbundener Abflussbildung an der Oberfläche) bei gleicher Niederschlagsmenge zu mehr oder weniger Neubildung von Grundwasser kommen. Gleichzeitig

spielt auch die Beschaffenheit des Grundwasserleiters (u. a. Mächtigkeit und Ergiebigkeit) eine wichtige Rolle. Menschliche Aktivitäten können die Niedrigwasserverhältnisse zusätzlich beeinflussen. Zu nennen ist hier etwa die Bewirtschaftung von Speichern (vgl. z. B. KAPITEL 4.3.9), welche in der Regel eine ausgleichende Wirkung auf die Abflüsse haben. Hinzu kommen Einleitungen aus Kläranlagen oder Entnahmen, z. B. für industrielles Kühl- und Brauchwasser oder für die landwirtschaftliche Beregnung.

Niedrigwasserereignisse können prinzipiell an jedem Fließgewässer in Niedersachsen auftreten, wobei einerseits kleinere Flüsse (mit kleinen Einzugsgebieten) tendenziell eher betroffen sein können, da sie in der Regel in Kontakt mit Grundwasserleitern stehen, die über geringere Grundwasserspeicher verfügen. Andererseits spielen aber auch Faktoren eine Rolle, welche das Ausmaß der Grundwasserneubildung und das Speichervermögen im zugehörigen Grundwasserkörper beeinflussen (s. o.). Niedrigwasser kann unterschiedliche ökologische und nutzungsbezogene Auswirkungen haben. Ökosysteme und Lebensgemeinschaften an Fließgewässern sind an wechselnde Phasen der Überschwemmung und des Trockenfallens angepasst. Allerdings wird diese natürliche Dynamik des Abflussverhaltens durch verschiedene Faktoren beeinflusst bzw. verschärft. Zum einen bewirkt der Klimawandel durch steigende Temperaturen und sinkende Niederschläge im Sommer eine Intensivierung und Verlängerung von Niedrigwasserphasen. Zum anderen trägt auch der Mensch direkt dazu bei, dass durch erhöhte Entnahmen (z. B. für die öffentliche Wasserversorgung oder Feldberegnung; MU (2022c, 2022a)) der Nutzungsdruck auf die Ressource Grundwasser und damit auf die Niedrigwassersituation zunimmt. Gleichzeitig käme es u. a. zu einer Verringerung der Wasserführung mit sinkender Fließgeschwindigkeit und zunehmender Sedimentation, steigenden Wassertemperaturen und (Schad-)Stoffkonzentrationen sowie einem sinkenden Sauerstoffgehalt im Wasser. Aber auch menschliche Nutzungsansprüche selbst werden durch die sich wandelnden Rahmenbedingungen im Zuge des Klimawandels beeinträchtigt. So werden Kühlwasserentnahmen aufgrund steigender Temperaturen im Fließgewässer erschwert, gleichzeitig kann der Bedarf an industriellem Brauchwasser ggf. nicht mehr gedeckt werden. Nicht zuletzt wird auch die Schifffahrt durch sinkende Wasserstände beeinträchtigt.

Die Charakterisierung der Niedrigwasserverhältnisse erfolgt anhand von zwei verschiedenen Indikatoren. Zum einen geht es um den niedrigsten Abflusswert gemittelt über sieben aufeinanderfolgende Tage (NM7Q). Dieser stellt die kleinste Abflussmenge im Zuge eines Niedrigwasserereignisses dar, welches innerhalb des Niedrigwasserjahres

(von April bis März) stattfindet. Zum anderen wird die Anzahl der Niedrigwassertage (NWT) betrachtet. Ein Tag wird hierbei als NWT definiert, wenn der Tagesabflusswert den mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ) unterschreitet (NIKO, 2023a). Der MNQ wird wiederum berechnet über das Mittel der niedrigsten Tagesabflüsse pro Niedrigwasserjahr innerhalb des Bezugszeitraumes (1971–2000). Grundlage der Analysen bilden die Tageswert-Zeitreihen der Abflüsse von 45 ausgewählten Pegeln an niedersächsischen Fließgewässern. Die Datenbasis für den Bezugszeitraum sind gemessene Abflusswerte aus der **Landesdatenbank des NLWKN**. Die Abflüsse der Zukunft stammen aus der Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell Panta Rhei (NLWKN, 2019a, 2021a), welches durch ein Ensemble aus Klimaprojektionen (KAPITEL 2.2.1) angetrieben wurde.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Auswertungen der Simulationen auf Basis der Klimaprojektionen zeigen in allen betrachteten Flusseinzugsgebieten mehr oder weniger ausgeprägte Bandbreiten in den zukünftigen Veränderungen des NM7Q (Abbildung 43 und Tabelle 51). Dabei ergibt sich zur Mitte des Jahrhunderts im optimistischen Fall eine landesweite Entspan-

nung der Situation in Form einer Zunahme der Niedrigwasserabflüsse in der Größenordnung von rund 20 bis 40 %. Dies betrifft vor allem die zur Elbe entwässernde Ilmenau im Nordosten, aber auch die Aller im Osten und die Große Aue im zentralen Süden von Niedersachsen (beide entwässern in die Weser). Im pessimistischen Fall käme es an allen Gewässern zu einer Reduzierung der Abflüsse zwischen 20 und 50 %. Besonders betroffen davon sind die Leine und die Große Aue im südöstlichen bzw. südlichen Niedersachsen, die geringsten Abnahmen zeigt die Ilmenau.

Am Ende des Jahrhunderts wären an einigen Gewässern im optimistischen Fall noch deutlichere Zunahmen der Abflussmengen im Niedrigwasserfall von 20 bis 50 % zu erwarten. Dies betrifft insbesondere die Ilmenau und die Wümme im Norden sowie die Große Aue. An Leine und Vechte sind dagegen nur noch geringe Zunahmen von rund 10 % zu erkennen. An den Pegeln im Harz gäbe es keine nennenswerte Entspannung der Niedrigwasserverhältnisse. Im pessimistischen Fall käme es an einigen Gewässern zu einer weiteren Verschärfung der Situation. Dies betrifft vor allem die Aller und Leine im Südosten sowie die Vechte im Westen (Abflussreduzierung um rund 40 bis knapp 60 %). Auch hier zeigt die Ilmenau wiederum die geringsten Abnahmen.

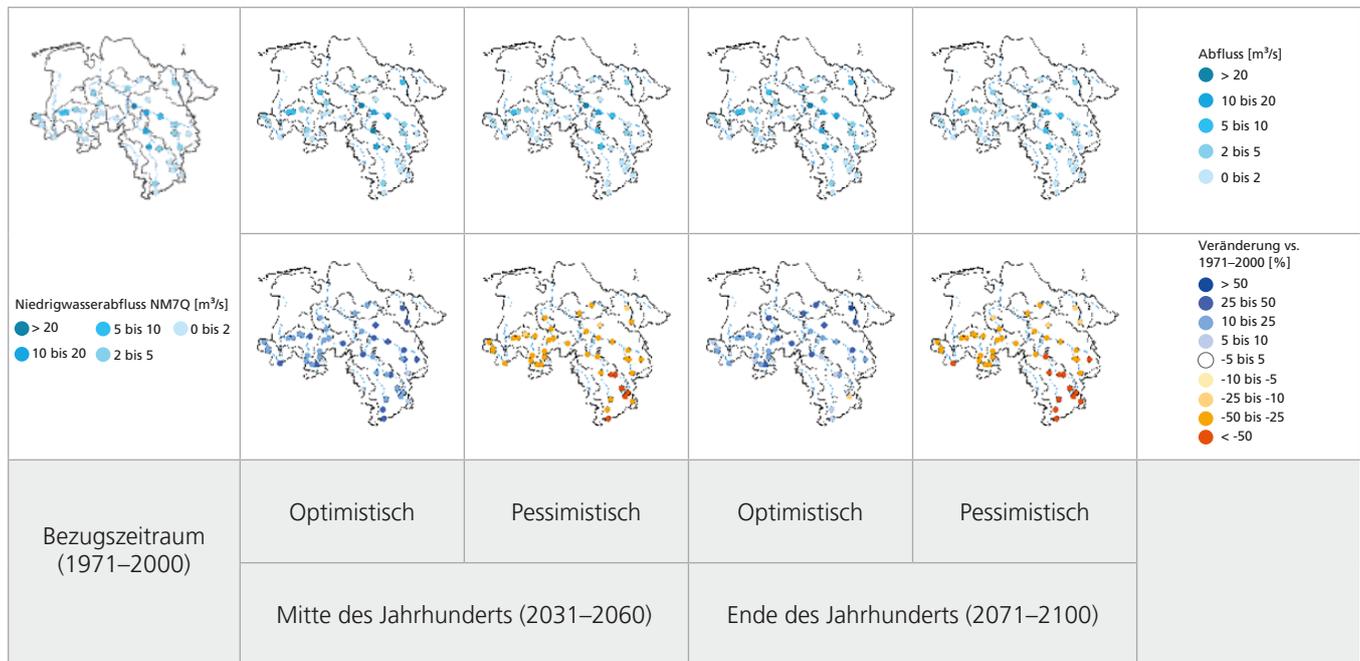


Abbildung 43: Mittlere Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Flussgebiet	Anzahl Pegel	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Aller	10	13,9 m³/s	+27 %	-34 %	+20 %	-41 %
Große Aue	1	0,8 m³/s	+31 %	-47 %	+39 %	-39 %
Hase	9	3,6 m³/s	+19 %	-31 %	+18 %	-32 %
Hunte	6	2,3 m³/s	+19 %	-34 %	+25 %	-32 %
Ilmenau	2	4,9 m³/s	+42 %	-21 %	+48 %	-20 %
Leine	11	10,8 m³/s	+22 %	-49 %	+8 %	-57 %
Vechte	4	1,3 m³/s	+24 %	-38 %	+10 %	-45 %
Wümme	2	1,9 m³/s	+20 %	-36 %	+30 %	-36 %

Tabelle 51: Mittlerer Niedrigwasserabfluss (NM7Q) im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).

Auch die zukünftigen Entwicklungen der Anzahl der Niedrigwassertage (NWT) zeigen ausgeprägte Bandbreiten mit möglichen Zu- bzw. Abnahmen (vgl. Abbildung 44 und Tabelle 52). Diese weisen zur Mitte des Jahrhunderts im optimistischen Fall auf eine leichte Abnahme der NWT in der Größenordnung von 5 bis 15 Tagen, mit leichten Schwerpunkten an Ilmenau, Hunte und Großer Aue. Im pessimistischen Szenario käme es an allen Gewässern wenigstens zu einer Verdopplung der NWT gegenüber dem Bezugszeitraum. Besonders deutlich tritt diese Verschärfung an Aller und Leine im südöstlichen Niedersachsen auf.

Zum Ende des Jahrhunderts liegt die Anzahl der NWT im optimistischen Fall an fast allen Gewässern in einer ähnlichen Größenordnung wie zur Mitte des Jahrhunderts. Im pessimistischen Szenario wäre die Zunahme der NWT an fast allen Gewässern (mit Ausnahme der Ilmenau) nochmals deutlich höher, so dass es in vielen Bereichen von Niedersachsen zu einer Verdreifung der NWT gegenüber dem Bezugszeitraum käme. Auch hier wäre die Situation an Aller und Leine am gravierendsten.

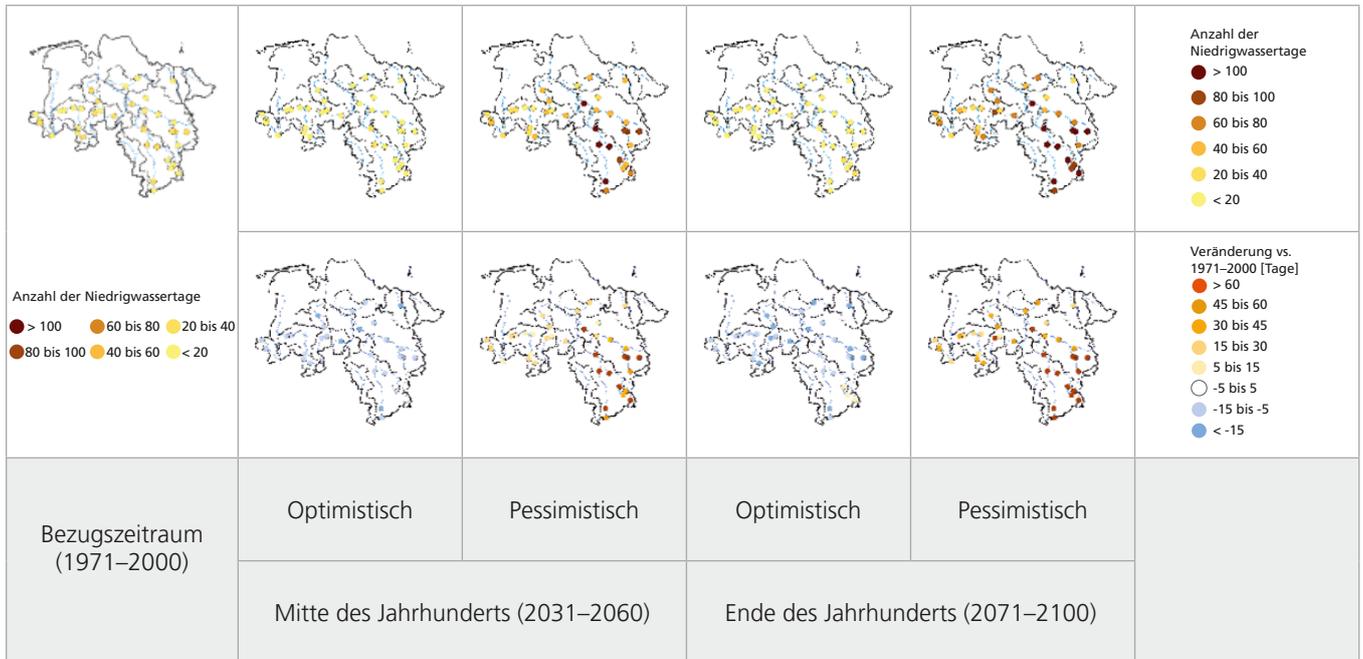


Abbildung 44: Anzahl der Niedrigwassertage NWT (mit Abfluss < MNQ (1971–2000)) pro Jahr in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Flussgebiet	Anzahl Pegel	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Aller	10	19 Tage	-9 Tage	+42 Tage	-14 Tage	+56 Tage
Große Aue	1	26 Tage	-16 Tage	+26 Tage	-21 Tage	+48 Tage
Hase	9	12 Tage	-7 Tage	+13 Tage	-8 Tage	+27 Tage
Hunte	6	23 Tage	-15 Tage	+22 Tage	-17 Tage	+45 Tage
Ilmenau	2	15 Tage	-15 Tage	+25 Tage	-15 Tage	+23 Tage
Leine	11	29 Tage	-9 Tage	+88 Tage	-12 Tage	+112 Tage
Vechte	4	16 Tage	-6 Tage	+15 Tage	-6 Tage	+29 Tage
Wümme	2	15 Tage	-8 Tage	+25 Tage	-13 Tage	+44 Tage

Tabelle 52: Anzahl der Niedrigwassertage (mit Abfluss < MNQ) pro Jahr im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.2).

INFO

- Niedrigwasser repräsentiert eine Situation geringer Abflussmengen und damit einhergehender niedriger Wasserstände in einem Fluss.
- Die Verhältnisse bei Niedrigwasser sind abhängig von der klimatischen Situation, den Eigenschaften im Einzugsgebiet sowie menschlichen Einflüssen.
- Mit Niedrigwasser einhergehen z. B. sinkende Fließgeschwindigkeiten und Sauerstoffgehalte sowie steigende Wassertemperaturen und Stoffkonzentrationen im Gewässer.
- Niedrigwasserverhältnisse werden anhand des niedrigsten Abflusswertes gemittelt über sieben Tage und die Anzahl der Niedrigwassertage pro Jahr charakterisiert.
- Die Situation der Niedrigwasserverhältnisse kann sich zukünftig relativ deutlich verschärfen, vor allem in Bezug auf die Anzahl der Tage mit Niedrigwasser.
- Die größten Verschärfungen zeichnen sich im Bereich von Leine und Aller im Südosten sowie an der Vechte im Westen von Niedersachsen ab.
- Bereits heute stellen Niedrigwasser eine besondere Herausforderung für Ökosysteme wie auch menschliche Nutzungsansprüche dar. Im optimistischen Fall bleibt das Risiko relativ unverändert gegenüber heutigen Verhältnissen.
- Im pessimistischen Fall kommt es zu einer Verschärfung des Risikos von Niedrigwasser, selbst ohne Berücksichtigung steigender Bedarfe.

Bewertung des Klimarisikos

Niedrigwasser sind ein Teil des natürlichen Wasserkreislaufes. Vor allem in den Sommermonaten kommt es in Niedersachsen bei wärmeren Temperaturen und längeren Phasen ohne nennenswerten Niederschlag immer wieder zu entsprechenden Verhältnissen in Fließgewässern. Gleichzeitig herrscht in diesen Zeiten häufig ein erhöhter Bedarf an Wasser bei Mensch und Natur. Neben den rein quantitativen Aspekten (Wassermangel) spielen während dieser Zeiten aber auch qualitative Aspekte (z. B. Wassertemperatur, Sauerstoffgehalt, Konzentration gelöster Stoffe) eine wichtige Rolle. Diese Kombination von Stressoren stellt bereits heute eine besondere Herausforderung sowohl für Ökosysteme wie auch menschliche Nutzungsansprüche dar (NLWKN, 2019b, 2023b). Daher wird für die Vergangenheit bereits ein mittleres Klimarisiko gesehen.

Der Klimawandel kann durch steigende Temperaturen und unregelmäßigere bzw. abnehmende Niederschläge im Sommer zu einer weiteren Verschärfung der Situation führen. Im optimistischen Fall kann dieses zunehmende Defizit im Sommer durch zunehmende Wasserüberschüsse im Winter ausgeglichen werden. Sofern diese in wesent-

lichen Teilen auch dem Grundwasser zugutekommen, kann dadurch der Niedrigwasserabfluss im Sommer gespeist und stabilisiert werden. Dementsprechend bliebe das Klimarisiko sowohl zur Mitte wie zum Ende des Jahrhunderts verhältnismäßig unverändert. Im pessimistischen Fall würden die Überschüsse (aus dem Grundwasser) im Winter nicht ausreichen, um die Defizite im Sommer auszugleichen. Selbst bei einem gleichbleibenden Bedarf, wovon laut Wasserversorgungskonzept für Niedersachsen (MU, 2022c, 2022a) nicht auszugehen ist, würde sich dadurch das Klimarisiko aufgrund abnehmender Wasserressourcen und damit abnehmender Niedrigwasserabflüsse in Zukunft deutlich verschärfen, was zu einem hohem Klimarisiko führt.

Die aktuell zu beobachtende und für die Zukunft projizierte Zunahme der Temperaturen lässt ein erhöhtes Wasserdefizit (aufgrund steigender Verdunstung und Bedarfe) für die Sommermonate erwarten. Inwiefern mögliche Überschüsse im Winter diese Verhältnisse ausgleichen können, lässt sich aufgrund der mit den Niederschlagsprojektionen verbundenen Unsicherheiten (vor allem zum Ende des Jahrhunderts) nicht mit Gewissheit sagen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 53: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Niedrigwasser“.

4.3.6 Grundwasserdürre

Grundwasser ist die wichtigste Ressource, die Niedersachsen mit Frischwasser versorgt: Mit einem 86%igen Anteil ist es die wichtigste Quelle für die öffentliche Wasserversorgung (747 Mio. m³), garantiert gerade im Nord-Osten Niedersachsens durch Feldberegnung (254 Mio. m³) den Ertrag der Landwirtschaft und versorgt die Industrie mit Wasser (205 Mio. m³) (MU, 2022c). Grundwasserdürren werden durch anhaltende trockene klimatische Bedingungen von mehreren Jahren ausgelöst, wodurch weniger Grundwasser gebildet wird und für Mensch und Natur zur Verfügung steht. Durch die Trägheit des Grundwassersystems dauert die Ausbildung einer Grundwasserdürre im Vergleich zu einer agrarischen Dürre erheblich länger (Liu et al., 2023) und gleichzeitig dauert es auch erheblich länger, bis sich die Grundwasserkörper von der Dürre wieder erholen.

Während das Klimarisiko „Grundwasserdürre“ Dürren auf Basis einer Perzentilbetrachtung der lokalen Grundwasserneubildung bewertet, betrachtet das Klimarisiko „Grundwasserniedrigstand“ die zu erwartenden Grundwasserstände an ausgewählten Messstellen, die sich als integrale Größe von vertikalen und horizontalen Wasserbewegungen im Untergrund einstellen. Der Fokus liegt dabei auf den jährlichen Grundwassertiefständen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Gekennzeichnet sind Grundwasserdürren durch fallende Grundwasserstände, welche wiederum die anthropogenen Wasserbedarfe und grundwasserabhängigen Landökosysteme negativ beeinflussen (Bug et al., 2021), da eine Nutzung durch Brunnen oder Wurzeln eingeschränkt wird. Grundwasserdürren werden durch einen länger anhaltenden Rückgang der Grundwasserneubildung ausgelöst und sind in der Ausprägung abhängig von der regionalen Hydrologie, weshalb feste Grenzwerte und Definitionen schwierig sind. Ursächlich hierfür ist ein Zusammenspiel von Niederschlagsrückgang und Verdunstungsanstieg durch wärmere Temperaturen, aber auch unter anderem der Flurabstand, das Fließgewässernetz und Grundwassernutzungen.

Die jährlich und saisonal variierenden Niederschlags- und Verdunstungsmengen führen ganz natürlich zu schwankenden Grundwasserneubildungsraten (Abbildung 45) und somit auch zu schwankenden Grundwasserständen. Bei aufeinanderfolgenden Jahren mit geringen Niederschlagsmengen, insbesondere im Winter (geringere Grundwasserneubildung), und mit hohen Temperaturen, insbesondere im Sommer (erhöhte Verdunstung), kann es zu Grundwasserdürre kommen. Daher wird hier das Risiko wie folgt definiert: Je länger die Grundwasserneubildung unterhalb des 25er-Langzeitperzentils liegt, desto eher herrscht das Risiko einer Grundwasserdürre vor (Methodik in KAPITEL 2.2.5).

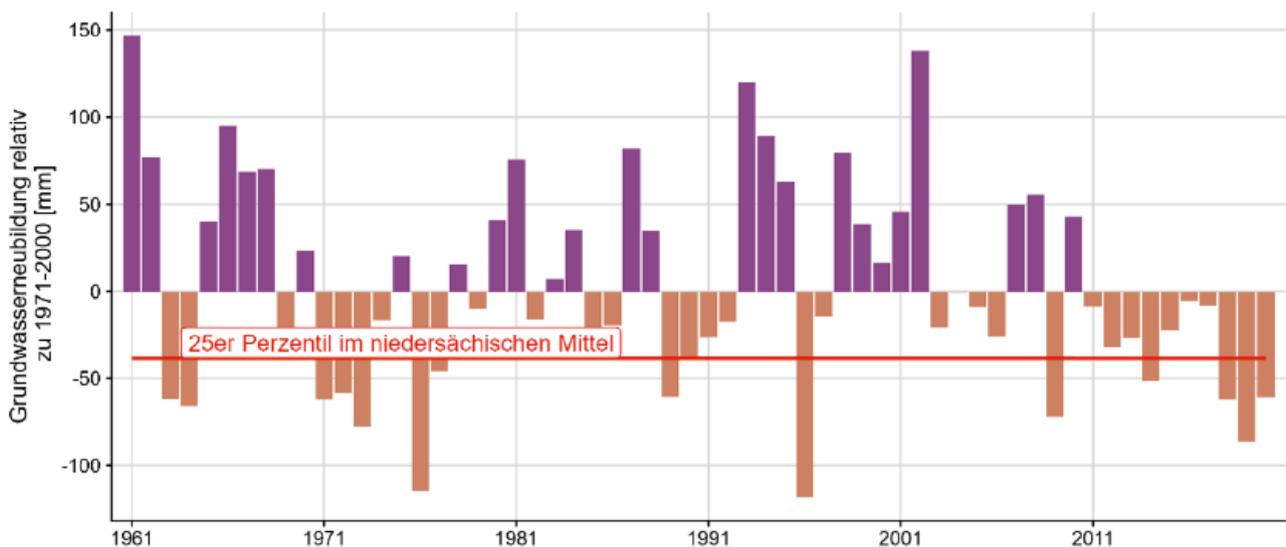


Abbildung 45: Jährliche Abweichung der Grundwasserneubildung relativ zum Bezugszeitraum 1971–2000 in Niedersachsen berechnet mit mGROWA22 (Ertl et al., 2024). Die rote Linie zeigt das 25er-Langzeitperzentil (1961–2020). Je länger die Grundwasserneubildung unterhalb des Langzeitperzentils ist, desto höher ist das Risiko einer Grundwasserdürre.

Dabei verstärken sich Dürren in wasserarmen Zeiten durch intensivere anthropogene Nutzungen durch z. B. mehr Wasserbedarf zur menschlichen Abkühlung bei Hitzebelastung, mehr Feldberegnung durch trockene Böden (agrarische Dürre), höheren industriellen Kühlungsbedarf durch wärmere Temperaturen. Dies alles kann zu einem weiteren Absinken der Grundwasserstände führen und so die Grundwasserdürre verschärfen (Han et al., 2019; Van Lanen & Peters, 2000). Gleichzeitig sichert Grundwasser in Trockenzeiten Fließgewässern einen Mindestabfluss. Sinken die Grundwasserstände, führt das zu einer Verringerung des Abflusses in Wasserstraßen, aber auch zum Trockenfallen kleinerer Bäche und Flüsse, was für betroffene Ökosysteme gravierende Folgen hat und die Naherholung oder ein Abkühlen der Umgebung negativ beeinträchtigt (KAPITEL 4.3.5).

In der jüngeren Vergangenheit führten zwar die feuchten 1990er-Jahre dazu, dass die Periode 1991–2020 sogar 2 mm feuchter war als der Bezugszeitraum 1971–2000, jedoch war die von 2011 bis 2020 anhaltende Trockenperiode der im gesamten Beobachtungszeitraum (1961–2020) am längsten anhaltender Zeitraum mit unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildungsraten. Insbesondere die 3-jährige Periode von 2018 bis 2020 lag durchgehend unterhalb des 25er-Langzeitperzentils und führte so lokal zu Grundwasserdürren. Wie lange die klimatischen Bedingungen zu durchgängigen Dürreperioden führten, ist regional sehr unterschiedlich. So hielt diese je nach Region im Bezugszeitraum (1971–2000) 2,3 Jahre auf den Nordseeinseln bis 3,5 Jahre im mitteldeutschen Buntsandstein an (Abbildung 46 links und Tabelle 54).

Die Grundwasserneubildung ist neben den klimatischen Bedingungen maßgeblich durch die hydrogeologischen Eigenschaften beeinflusst. Die Nordseeinseln haben

aufgrund ihrer durchlässigen sandigen Böden und des feuchten maritimen Klimas gute Voraussetzungen, Trockenperioden gut zu überstehen. Dagegen haben die Marschen und die Niederungen durch die bindigen Deckschichten, die eine Grundwasserneubildung verlangsamen, und gleichzeitig die geringen flurnahen Grundwasserstände, welche die sommerlichen Verluste durch die Verdunstung der Vegetation steigern, schlechte Voraussetzungen, in trockenen Wintern und Sommern Grundwasserneubildung zu generieren. Die durchlässigen Schmelzwasserablagerungen der Geest begünstigen die Grundwasserneubildung, auch weil es hier weniger Entwässerungsstrukturen gibt, die potenzielle Neubildung abführen. Jedoch stützen die Grundwasserneubildungsraten der Geest die Grundwasserstände in den Niederungen und Marschen, was im Gesamtsystem eines Grundwasserkörpers dazu führt, dass sich die Grundwasserstände nivellieren und insbesondere die Böden der Geest (anders als das Grundwasser) ein höheres Risiko haben, unter Dürre zu leiden. Die Festgesteinsgebiete vom Bergland bis in den Harz haben durch die komplexe, heterogene Hydrogeologie, je nach strukturellem Aufbau der Festgesteinseinheiten und Landnutzung, regional ein sehr unterschiedliches Risiko der Grundwasserdürre.

Wie schnell eine klimatische Reduzierung des verfügbaren Wassers (meteorologische Dürre) lokal zu Grundwasserdürre führt, hängt neben den Boden- und hydrogeologischen Eigenschaften auch von der Landnutzung, bzw. der Vegetation ab. Je tiefer die Wurzeln der Vegetation reichen und je dichter das Blattwerk, desto höher ist die pflanzliche Aufnahme von Boden- und Grundwasser, was die Grundwasserneubildung reduziert und Grundwasserdürre wahrscheinlicher macht (Adane et al., 2018; Liu et al., 2023; Maitre et al., 1999).

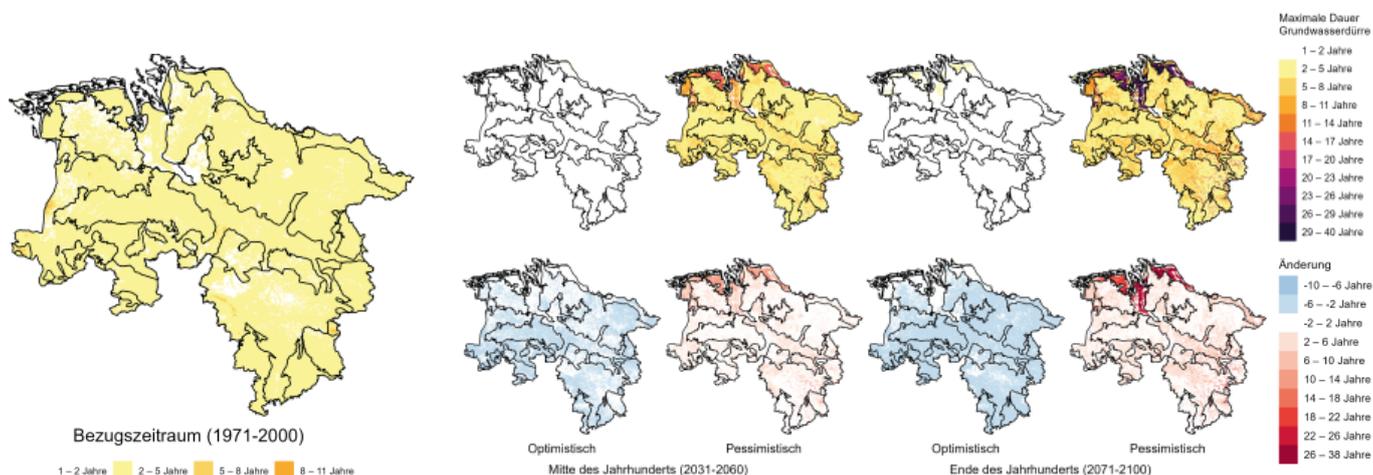


Abbildung 46: Maximale Dauer der Grundwasserdürre in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Der Klimawandel wirkt sich auf den Wasserhaushalt und somit auch auf die Intensität von Grundwasserdürren aus. So sind die Sommer im Mittel bereits niederschlagsärmer und die Winter niederschlagsreicher geworden (NIKO, 2023b). Dieser Effekt soll sich weiter verstärken (DWD, 2018). Niederschlagsreichere Winter könnten die Grundwasserneubildung erhöhen, wobei die Ergebnisbandbreite zwischen den einzelnen Modellprojektionen sehr hoch ist: Es kann zu einer Zunahme der mittleren Grundwasserneubildung in 2031–2060 von bis zu 20 % oder Abnahme von bis zu 30 % führen (Hajati et al., 2024).

Gleichzeitig sollen alle anthropogenen Bedarfe an Grundwasser bis 2030 steigen, insgesamt um +15 % (MU, 2022c), was eine verstärkte Nutzung der Grundwasservorräte insbesondere im Sommer wahrscheinlich macht. Ob die steigende Niederschlagsmenge des Winters den erhöhten Nutzungsbedarf ausgleichen kann ist nicht nur wegen der großen Ergebnisbandbreite der Klimaprojektionen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Doch deutet der ansteigende Nutzungsdruck wirdarauf hin dass sich die Verfügbarkeit des Grundwassers weiter reduzieren wird.

Grundwasserdürren können den insgesamt steigenden Nutzungsdruck weiter erhöhen, jedoch ist auch hier die Ergebnisbandbreite zwischen den einzelnen Modellprojektionen sehr hoch: Die maximale Anzahl an aufeinanderfolgenden Jahren, in der die Grundwasserneubildung unterhalb des 25er-Langzeitperzentils der Vergangenheit liegt, nimmt im pessimistischen Fall insbesondere in den Marschen drastisch zu und verdoppelt sich in etwa im Bergland und in der Geest. Das gilt sowohl für die Mitte als auch das Ende des Jahrhunderts. Eine Zunahme der Grundwasserdürren in den Marschen bedeutet zusätzlich einen Anstieg des Risikos der Grundwasserversalzung (KAPITEL 4.2.7). Wirken Grundwasserdürren auf die gut durchlässigen Geestgebiete, hat das auch negative Effekte auf die gesamte Hydrogeologie des Nordens, da diese die Grundwasserstände in den Marschen und Niederungen stützen und es bei einem Absinken der Grundwasserstände zu einer Verschärfung des NIEDRIGWASSER-Risikos, einer Verschärfung der GRUNDWASSERTIEFSTANDE und der GRUNDWASSERQUALITÄT an der Küste kommen kann.

	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Marschen	3,0 Jahre	-1,1 Jahre	+8,0 Jahre	-0,9 Jahre	+18,3 Jahre
Mitteldeutscher Buntsandstein	3,5 Jahre	-1,8 Jahre	+0,7 Jahre	-2,3 Jahre	+2,0 Jahre
Harz	3,0 Jahre	-1,1 Jahre	+2,4 Jahre	-1,9 Jahre	+3,7 Jahre
Münsterländer Kreidebecken	3,0 Jahre	-1,6 Jahre	+1,8 Jahre	-2,0 Jahre	+2,8 Jahre
Niederungen	3,4 Jahre	-1,8 Jahre	+2,3 Jahre	-2,2 Jahre	+3,3 Jahre
Geest	3,1 Jahre	-1,9 Jahre	+1,9 Jahre	-2,0 Jahre	+2,4 Jahre
Nordseeinseln	2,3 Jahre	-0,7 Jahre	+3,4 Jahre	-1,1 Jahre	+3,0 Jahre
Nordwestdeutsches Bergland	3,2 Jahre	-1,6 Jahre	+2,1 Jahre	-2,1 Jahre	+3,2 Jahre
Sandmünsterland	3,4 Jahre	-1,7 Jahre	+1,7 Jahre	-2,3 Jahre	+2,8 Jahre
Subherzyne Senke	3,5 Jahre	-1,9 Jahre	+2,7 Jahre	-2,4 Jahre	+3,3 Jahre
Thüringische Senke	3,2 Jahre	-1,6 Jahre	+1,9 Jahre	-2,1 Jahre	+2,4 Jahre

Tabelle 54: Maximale Dauer der Grundwasserdürre im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Flusseinzugsgebiete (KAPITEL 2.3.1).

INFO

- Grundwasserdürren gefährden die wichtigste Ressource an Frischwasser für Niedersachsen.
- Mehrjährig anhaltende trockene klimatische Bedingungen führen zu weniger Grundwasserbildung und damit zu Grundwasserdürren.
- Das Risiko zeigt extrem große Ergebnisbandbreiten. Sowohl eine extreme Zunahme als auch Abnahme ist möglich.
- Ein Zusammenspiel aus Niederschlagsrückgang und Verdunstungsanstieg sorgt für den anhaltenden Rückgang der Grundwasserneubildung, intensive menschliche Nutzung verstärkt das Problem.
- Von 2011 bis 2020 gab es die bisher längste anhaltendste Trockenperiode im Beobachtungszeitraum.
- Die Grundwasserneubildung wird auch von den hydrogeologischen Eigenschaften beeinflusst: Die Nordseeinseln haben bessere Voraussetzungen als die Marschen und Niederungen.
- Die große Spannweite zwischen dem optimistischen Fall und dem pessimistischen Fall ergibt sich aus den hohen Unsicherheiten bei der zukünftigen Niederschlagsentwicklung.

Bewertung des Klimarisikos

Grundwasserdürren gab es bereits in den 1970er-Jahren (Abbildung 45), wie auch in den 2010er-Jahren (Hellwig, 2019). Beide Trockenperioden hatten zu einem teils starken Absinken der Grundwasserstände geführt und die letzte Dürre war bereits mit Nutzungseinschränkungen für Privathaushalte durch einige niedersächsische Kommunen begleitet. Daher ist hier das Klimarisiko für die Gegenwart bereits mit mittel gesetzt. Grundwasserdürren nehmen in dem pessimistischen Szenario sowohl in der Mitte als auch am Ende des Jahrhunderts stark an Intensität zu. Daher gilt hier das Klimarisiko jeweils als hoch. In dem optimistischen Fall nehmen die Dürren durch den klimatischen Einfluss zwar ab, jedoch wird sich die anthropogene Nutzung der Ressource Grundwasser im Mittel durch niederschlagsärmere und wärmere Sommer verändern. Grundwasserstände können im Sommer durch eine verstärkte Entnahme aus dem Grundwasser, aber auch durch eine

verstärkte Verdunstung weiter sinken (KAPITEL 4.3.7). Daher ist hier das Klimarisiko mit „mittel“ gesetzt.

Je weiter wir in die Zukunft blicken, desto unsicherer werden die Klimaprojektionen. Die große Spannweite zwischen dem optimistischen und pessimistischen Fall hängt auch damit zusammen, dass insbesondere die zukünftige Niederschlagsentwicklung mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Im Gegensatz zu der Temperatur zeigen die derzeitigen Klimamodelle beim Niederschlag noch größere Unsicherheiten. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung sind auch weitere Informationen wichtig, deren zukünftige Entwicklung kaum abzuschätzen ist. Diese sind z. B. Grundwasserstände, Landnutzungen oder zukünftige Änderungen im Wasserhaushalt wie Drainagen. Daher sinkt die Gewissheit von „mittel“ zu „gering“ von 2031–2060 zu 2071–2100.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 55: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserdürre“.

4.3.7 Grundwassertiefstand

Grundwasserstände unterliegen natürlichen Schwankungen. Phasen mit niedrigen Wasserständen treten dabei vornehmlich im Sommer bzw. Herbst auf (am Ende der Vegetationsperiode). Sie sind das Ergebnis von höherer Verdunstung im Sommerhalbjahr, woraus eine geringere Grundwasserneubildung resultiert, sowie einem höheren Wasserbedarf bei Mensch und Natur in dieser Zeit. Aktuelle Beobachtungen sowie zukünftige Klimaprojektionen zeigen eine deutliche Zunahme der Temperaturen (und damit der Verdunstung) bei etwa gleichbleibenden bzw. leicht abnehmenden Niederschlägen im Sommerhalbjahr (DWD, 2018; NIKO, 2023b). Dadurch steigt das Risiko für längere und intensivere Trockenperioden, wie wir sie zuletzt in den Trockenjahren 2018–2022 in Niedersachsen erlebt haben.

Während das Klimarisiko „Grundwasserdürre“ Dürren auf Basis einer Perzentilbetrachtung der lokalen Grundwasserneubildung bewertet, betrachtet das Klimarisiko „Grundwasserniedrigstand“ die zu erwartenden Grundwasserstände an ausgewählten Messstellen, die sich als integrale Größe von vertikalen und horizontalen Wasserbewegungen im Untergrund einstellen. Der Fokus liegt dabei auf den jährlichen Grundwassertiefständen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Grundwasser ist Teil des natürlichen Wasserkreislaufes. Es beschreibt nach DIN 4049-3 (1994) unterirdisches Wasser, das Hohlräume wie Poren oder Klüfte im Gesteinskörper zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. Dabei fließt es aus den höher gelegenen Neubildungsgebieten in die tiefer gelegenen Entlastungsgebiete (z. B. Niederungen), wo es zumeist einem Vorfluter zufließt. Somit beeinflusst die Menge und Qualität des Grundwassers auch die Oberflächengewässer. Die tiefsten Grundwasserstände innerhalb des Jahres stellen sich in Niedersachsen im Normalfall am Ende der Vegetationsperiode zu Beginn des Herbstes ein, da die Grundwasserneubildung im Verlauf des Sommers aufgrund von Verdunstungsprozessen (durch höhere Temperaturen und einen erhöhten Wasserbedarf der Vegetation) am geringsten ist.

Die grundsätzlichen Einflussfaktoren auf die Situation der Grundwasserstände werden im KAPITEL 4.3.4 beschrieben.

Grundwasserstände weisen in der Regel eine deutliche Schwankung im Jahresverlauf auf. Die tiefsten Grundwasserstände werden im Spätsommer bzw. Herbst erreicht.

Eine Veränderung der Situation der Grundwassertiefstände kann erhebliche Auswirkungen auf grundwasserabhängige Landökosysteme haben, die in Kontakt mit dem Grundwasser stehen und ihren Wasserbedarf im Wesentlichen daraus decken. Hierzu zählen z. B. Auwälder, Niedermoore oder Feuchtgrünländer. Laut §1a der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, 2000) soll der Zustand dieser Ökosysteme geschützt und wenn möglich verbessert werden. Ein Absinken der Tiefstände kann zu einer Schädigung dieser Landökosysteme führen. Auch mit dem Grundwasser in hydraulischer Verbindung stehende Fließgewässer sind vom Grundwasserstand abhängig, da diese bei Grundwasserführung quasi ausschließlich durch Zuflüsse aus dem Grundwasser (in Form des Basisabflusses) gespeist werden (Holt et al., 2022). Ein Absinken der Tiefstände kann zu einer Verringerung des Grundwasserzustroms führen, den Mindestabfluss von Fließgewässern negativ beeinflussen und ein (temporäres) Trockenfallen herbeiführen. Auch menschliche Nutzungsansprüche können durch veränderte Grundwassertiefstände beeinflusst werden. Da zukünftig mit einer Zunahme des Bedarfs an Grundwasser in Niedersachsen gerechnet wird (MU, 2022c, 2022a), können sinkende Grundwassertiefstände eine zusätzliche Herausforderung für Wassernutzungen darstellen (z. B. für die öffentliche Wasserversorgung, die landwirtschaftliche Feldberegnung oder die industrielle Brauchwassernutzung).

Entsprechende Regionen in Niedersachsen mit einer erhöhten Sensibilität gegenüber sinkenden Grundwassertiefständen sind z. B. durch grundwasserabhängige Landökosysteme gekennzeichnet. Diese sind landesweit zu finden (Federolf et al., 2013). Daneben sind Regionen mit landwirtschaftlicher Feldberegnung zu nennen, die sich bisher vor allem im Nordosten Niedersachsens befinden (MU, 2014). Auch Wasserschutz- und Trinkwassergewinnungsgebiete weisen prinzipiell eine erhöhte Sensibilität auf. Sie sind auf dem **Umweltkartenserver** des MU zu finden.

Die Charakterisierung der Situation der Tiefstände beim Grundwasser erfolgt anhand von zwei Indikatoren. Zum einen auf Basis der jährlichen Tiefstände gemittelt über jeweils 30-jährige Betrachtungszeiträume. Zum anderen über die Anzahl der Tiefstandsmonate, d. h. die Anzahl an Monaten im jeweiligen Betrachtungszeitraum mit einer Unterschreitung des zuvor erwähnten mittleren Tiefstands im Bezugszeitraum (1971–2000). Grundlage der Analysen bilden die Grundwassermessstellen des NLWKN-Messprogramms „Klima-Grundwasserstand“ (Holt et al., 2022), die Methodik ist in KAPITEL 2.2.5 beschrieben.

Analysen der Entwicklung der Grundwasserstände in Niedersachsen weisen seit 2009 auf eine vermehrt sinkende Tendenz in vielen Regionen, vor allem in den Geestbereichen, hin (Wriedt, 2023). Diese Entwicklungen wurden durch die Trockenjahre 2018–2022 nochmals verstärkt (Holt et al., 2022). Nach einer Bewertung gemäß Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, 2000) für den Bewirtschaftungsplan 2021 bis 2027 wurden alle Grundwasserkörper in Niedersachsen noch in einem mengenmäßig guten Zustand eingestuft (MU, 2021).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Auswertungen der Simulationen auf Basis der Klimaprojektionen zeigen in allen betrachteten Naturregionen (KAPITEL 2.3.4). Bandbreiten in den Ergebnissen, die sowohl auf eine mögliche Entspannung der Situation als auch auf eine mögliche Verschärfung hindeuten. Dabei fallen die

Veränderungen in Bezug auf die Grundwassertiefstände zumeist gering aus, während sie bei der Anzahl der Tiefstandsmonate durchaus deutlicher werden.

Bei den Grundwassertiefständen (vgl. Abbildung 47 und Tabelle 56) liegen die Veränderungen im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971–2000) beim pessimistischen Szenario in der Größenordnung von 0 bis -0,15 m, wobei es kaum Unterschiede zwischen der Mitte und dem Ende des Jahrhunderts gibt. Die deutlichsten Absenkungen zeigen sich im südlichen Niedersachsen im Bereich der Börden und des Berglandes. Allerdings werden diese Regionen nur von relativ wenigen Messstellen repräsentiert. Beim optimistischen Szenario käme es zu einem Anstieg der Tiefstände in der Größenordnung von etwa 0,05 bis knapp über 0,15 m. Diese Anstiege wären zur Mitte des Jahrhunderts etwas schwächer ausgeprägt als zum Ende und würden sich vor allem in der Geest und im Bergland bemerkbar machen.

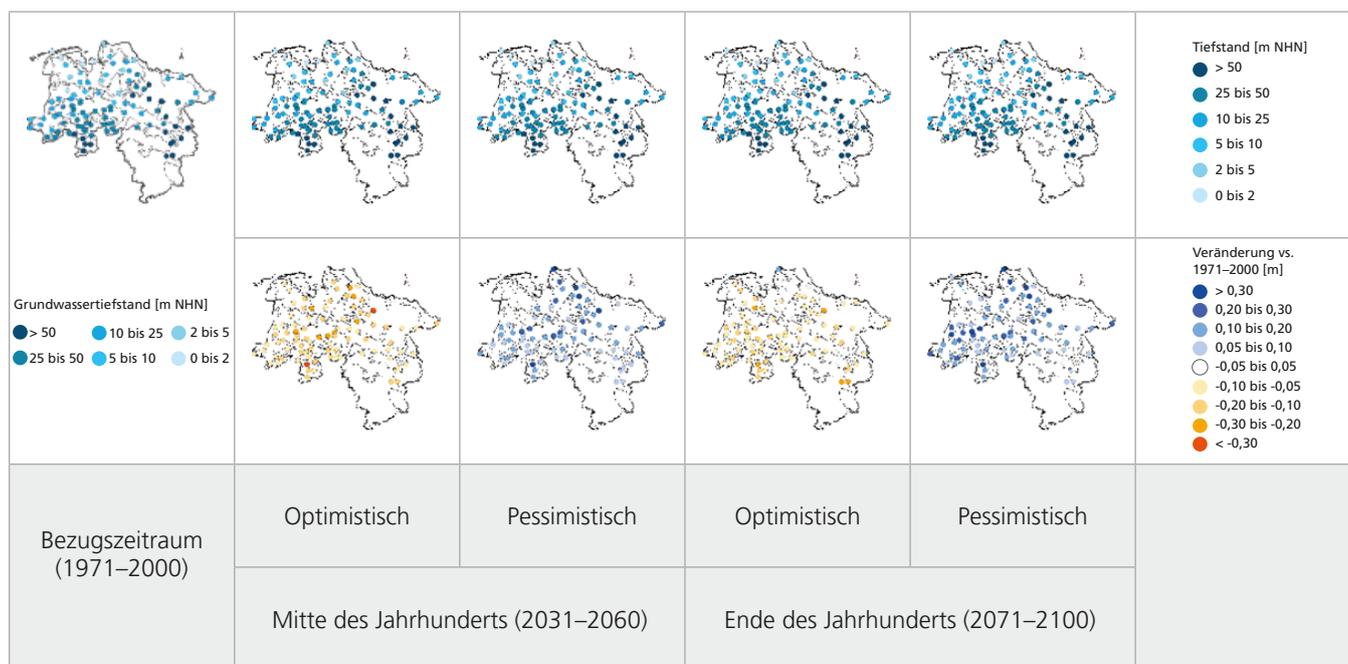


Abbildung 47: Mittlere Grundwassertiefststände in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Naturregion	Anzahl GWMS	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch
Inseln	1	1,49 mNHN	-0,04 m	+0,03 m	-0,04 m	+0,07 m
Marschen	9	-0,36 mNHN	-0,02 m	+0,03 m	-0,03 m	+0,04 m
Niederungen	41	27,30 mNHN	-0,08 m	+0,09 m	-0,07 m	+0,10 m
Geest	53	28,02 mNHN	-0,12 m	+0,14 m	-0,08 m	+0,17 m
Börden	3	84,48 mNHN	-0,12 m	+0,07 m	-0,16 m	+0,05 m
Bergland	6	71,95 mNHN	-0,15 m	+0,13 m	-0,14 m	+0,14 m

Tabelle 56: Mittlere Grundwassertiefstände im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).

Bei der Anzahl der Monate mit Grundwassertiefständen (vgl. Abbildung 48 und Tabelle 57) käme es zur Mitte des Jahrhunderts beim pessimistischen Szenario zu einer Zunahme, die im nördlichen Niedersachsen (Inseln und Marschen) und in den Niederungen mit 12 bis 28 Monaten geringer ausfällt als im südlichen Niedersachsen mit 38 bis 54 Monaten. Beim optimistischen Szenario käme es zu einer Abnahme der Tiefstandsmonate, die wiederum im Norden am geringsten in Erscheinung tritt und in der Geest den höchsten Wert von 37 Monaten erreicht. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen alle Regionen außer die Geest im pessimistischen Szenario eine weitere Zunahme gegenüber der Jahrhundertmitte. Dabei zeigen sich auch hier die deutlichsten Veränderungen im südlichen Niedersachsen (Börden und Bergland).

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist darauf hinzuweisen, dass der nasse Winter 2023/2024 zwar kurzzeitig an vielen Messstellen wieder zu einem Anstieg der Grundwasserstände geführt hat (NLWKN, 2024d). Ob sich diese Entwicklungen fortsetzen und den bisher langfristig sinkenden Trend umkehren, bleibt jedoch abzuwarten. Zudem zeigen die für die Grundwasserneubildung maßgeblichen Niederschlagsprojektionen gewisse Unsicherheiten (KAPITEL 4.3.4). Daher dürfen die Ergebnisse trotz bzw. wegen der Bandbreiten nicht als Anlass zur Entwarnung gesehen werden, sondern es sollte im Sinne des Vorsorgeprinzips gehandelt werden.

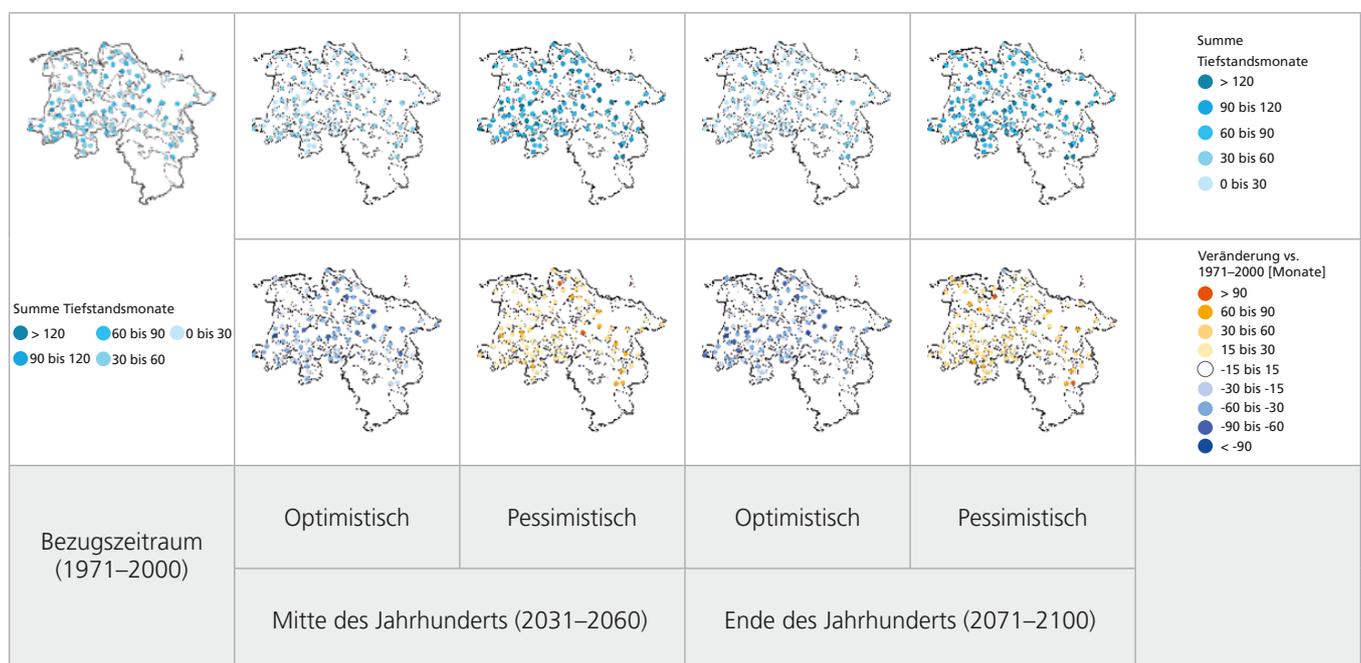


Abbildung 48: Summe der Monate mit Grundwassertiefstand in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

Naturregion	Anzahl GWMS	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Inseln	1	48 Monate	-19 Monate	+12 Monate	-30 Monate	+34 Monate
Marschen	9	40 Monate	-11 Monate	+23 Monate	-13 Monate	+41 Monate
Niederungen	41	51 Monate	-27 Monate	+28 Monate	-29 Monate	+31 Monate
Geest	53	62 Monate	-37 Monate	+38 Monate	-41 Monate	+27 Monate
Börden	3	55 Monate	-22 Monate	+54 Monate	-9 Monate	+79 Monate
Bergland	6	52 Monate	-24 Monate	+42 Monate	-22 Monate	+56 Monate

Tabelle 57: Summe der Monate mit Grundwassertiefstand im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene Naturregionen (KAPITEL 2.3.4).

INFO

- Zunehmende Temperaturen bei gleichbleibenden bzw. sinkenden Niederschlägen steigern das Risiko für längere und intensivere Trockenperioden.
- Die Menge und Qualität des Grundwassers beeinflusst auch die Oberflächengewässer.
- Vor allem Regionen mit grundwasserabhängigen Landökosystemen sind besonders sensibel gegenüber sinkenden Grundwassertiefständen.
- Die Ergebnisse zeigen keine eindeutige Entwicklungsrichtung im Hinblick auf die zukünftigen Grundwassertiefstände.
- Veränderungen der Anzahl der Monate mit Tiefständen sind stärker ausgeprägt als die der Grundwassertiefstände selbst. Die Ergebnisse zeigen jedoch keine eindeutige Entwicklungsrichtung.
- Im pessimistischen Fall könnte die Anzahl der Monate mit Grundwassertiefständen deutlich zunehmen.
- Die Ergebnisse geben keinen Anlass zur Entwarnung, sondern sollten im Sinne des Vorsorgeprinzips interpretiert werden.
- Der Bedarf an Grundwasser in Bezug auf ökologische Aspekte und menschliche Nutzungen wird zunehmen.

Bewertung des Klimarisikos

In den letzten Jahrzehnten konnte eine Zunahme der Temperaturen und der damit einhergehenden Verdunstung sowie eine Verlagerung der Niederschläge in das Winterhalbjahr beobachtet werden (DWD, 2018; NIKO, 2023b). Diese Entwicklungen haben neben menschlichen Einflüssen (KAPITEL 4.3.6) dazu geführt, dass sich die Grundwasserstände in Niedersachsen seit 2009, insbesondere aufgrund der mehrjährigen Trockenphase 2018–2022, in vielen Regionen bereits auf einem niedrigen Niveau bewegen, im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1991–2020 (Wriedt, 2023). Dadurch kam es bereits zu extrem niedrigen Wasserständen in Fließgewässern (BfG, 2019; NLWKN, 2019b). Daher wird für die Vergangenheit in Bezug auf die Grundwassertiefstände ein mittleres Klimarisiko gesehen.

Durch den Klimawandel werden die Temperaturen weiter steigen. Niederschläge werden vor allem im Sommer häufiger als konvektive Starkniederschläge fallen sowie im Winter generell zunehmen (Kasper et al., 2024; Bürger et al., 2021; DWD, 2018). Dies kann im pessimistischen Fall zu einer weiteren Verschärfung der Situation führen. Nach den vorliegenden Ergebnissen würde sich dies zwar nur moderat bzgl. der Absenkung des Niveaus der Grundwassertiefstände bemerkbar machen. Jedoch käme es zu einer deutlichen Steigerung der Anzahl von Monaten mit Tiefständen, was möglicherweise auch eine Zunahme mehrjähriger Dürrephasen bedeuten kann. Im optimistischen Fall würden die zunehmenden Überschüsse des Nie-

derschlags im Winter die Defizite im Sommer ausgleichen, so dass es bzgl. der Tiefstände zu keinen nennenswerten Veränderungen bzw. sogar zu einer leichten Entspannung der Situation kommen könnte. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass nach aktuellen Einschätzungen der Bedarf an Grundwasser, dessen mögliche Änderung bei den vorliegenden Analysen nicht betrachtet wurde, sowohl in Bezug auf ökologische Aspekte als auch menschliche Nutzungen bei fortschreitendem Klimawandel weiter zunehmen wird (MU, 2022a, 2022c). Des Weiteren unterschätzen die maßgeblichen Klimaprojektionen die aktuellen Entwicklungen der letzten zwei Jahrzehnte im Hinblick auf die sinkenden Niederschläge, v. a. im Frühjahr, sowie konvektive Starkregenereignisse, welche kaum einen Beitrag zur Grundwasserneubildung leisten (Kapitel 4.3.4). Daher kann das zukünftige Klimarisiko bestenfalls als gleichbleibend gegenüber den aktuellen Zuständen angesehen werden. Im pessimistischen Fall, wenn die Winterüberschüsse keinen Ausgleich der Sommerdefizite bewirken, käme es zum Ende des Jahrhunderts zu einer weiteren Verschärfung der Situation.

Die für die Grundwasserneubildung maßgeblichen Niederschlagsprojektionen zeigen gewisse Unsicherheiten (s. o.). Gleichzeitig reichen die Abschätzungen für den anthropogenen Nutzungsbedarf nur bis zur Mitte des Jahrhunderts. Daher kann für diesen Zeithorizont noch von einer mittleren Gewissheit der Aussagen ausgegangen werden, die zum Ende des Jahrhunderts aber geringer einzuschätzen ist.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 58: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwassertiefstände“.

4.3.8 Mangel an Bewässerungswasser

Fast die Hälfte der bewässerbaren landwirtschaftlichen Fläche (358.776 ha und damit 47 %) von Deutschland liegt in Niedersachsen und insgesamt sind 14 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche und sogar 19 % der Ackerfläche in Niedersachsen für die Feldberegnung erschlossen (MU, 2022c). Das sichert landwirtschaftlichen Betrieben eine höhere Wertschöpfung (de Witte, 2017). Zudem konnte ein Anstieg der Bewässerungsfläche von 8 % innerhalb der letzten drei Jahre verzeichnet werden (DESTATIS, 2024). Der Osten Niedersachsens ist seit vielen Jahrzehnten erschlossenes Beregnungsland, da hier die Kartoffel als wichtige Kultur, aber auch Getreide der Bewässerung bedarf. Weitere Kulturen, die bewässert werden, sind z. B. Gemüse, Obst, Mais, Zuckerrüben und Sonderkulturen wie Spargel oder Erdbeeren.

Da immer häufiger Frühlings- und Sommerniederschläge ausbleiben und die erhöhte Lufttemperatur zu einer erhöhten Verdunstung führt, ist das Risiko von zu trockenen Böden in der Vegetationsperiode bereits gestiegen und kann zukünftig weiter steigen (WASSERMANGEL IM BODEN und Abbildung 49). Wurde in 2015 noch mit 254 Mio. m³/Jahr zur Bewässerung bewilligt, könnte sich dieser Verbrauch bis 2050 mehr als verdoppeln (MU, 2022c). Die Entnahme von Wasser zur Beregnung bedarf jedoch einer behördlichen Erlaubnis nach Wasserhaushaltsrecht durch die untere Wasserbehörde. Dabei wird geprüft, ob genügend Wasser (Bestimmung des Grundwasserdargebots) im jeweiligen Grundwasserkörper zur Verfügung steht (MU, 2024b).

Für die Gabe von Zusatzwasser, das aus Grundwasser gewonnen und z. B. für die Beregnung verwendet wird, sprechen einige gute Gründe (Bug & Harders, 2024b): Eine optimierte Bewässerung führt zu höheren und stabileren Erträgen durch eine bedarfsgerechte Wasserversorgung, gleichmäßigere Nährstoffaufnahme und damit auch zu einem geringeren Stoffaustrag (KAPITEL 3.1.3). Zur Beregnung wird in Niedersachsen fast ausschließlich Grundwasser verwendet. In Zeiten von geringerer Wasserverfügbarkeit steht die Nutzung von Grundwasser zur Bewässerung in immer stärkerer Konkurrenz zu dem sonstigen Bedarf von Natur und Mensch, insbesondere falls GRUNDWASSERDÜRREN und GRUNDWASSERTIEFSTAND zunehmen.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Die Gabe von Zusatzwasser kann notwendig sein, um die Erträge aus der Landwirtschaft zu garantieren (KAPITEL 3.2.6). Das sichert lokale Wertschöpfung und Arbeitsplätze, dient aber auch der Kultur- und Landschaftspflege. Nährstoffe werden zudem effizienter genutzt, so dass die Austräge insbesondere von nicht sorbierbaren Stoffen, wie Nitrat, verringert werden (Schimmelpfennig et al., 2018). Eine gleichmäßig gute Wasserversorgung führt auch zu einem erhöhten Wurzelwachstum und zu erhöhten Stroh-mengen nach der Ernte. Diese sind wichtig, um den Humusgehalt der Böden zu stabilisieren und ggf. Kohlenstoff im Boden zu binden. Die Entnahme von Zusatzwasser, die auch einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedarf, erfolgt maßgeblich aus dem Grundwasser und ist ein Eingriff in den Landschaftswasserhaushalt. So kann diese

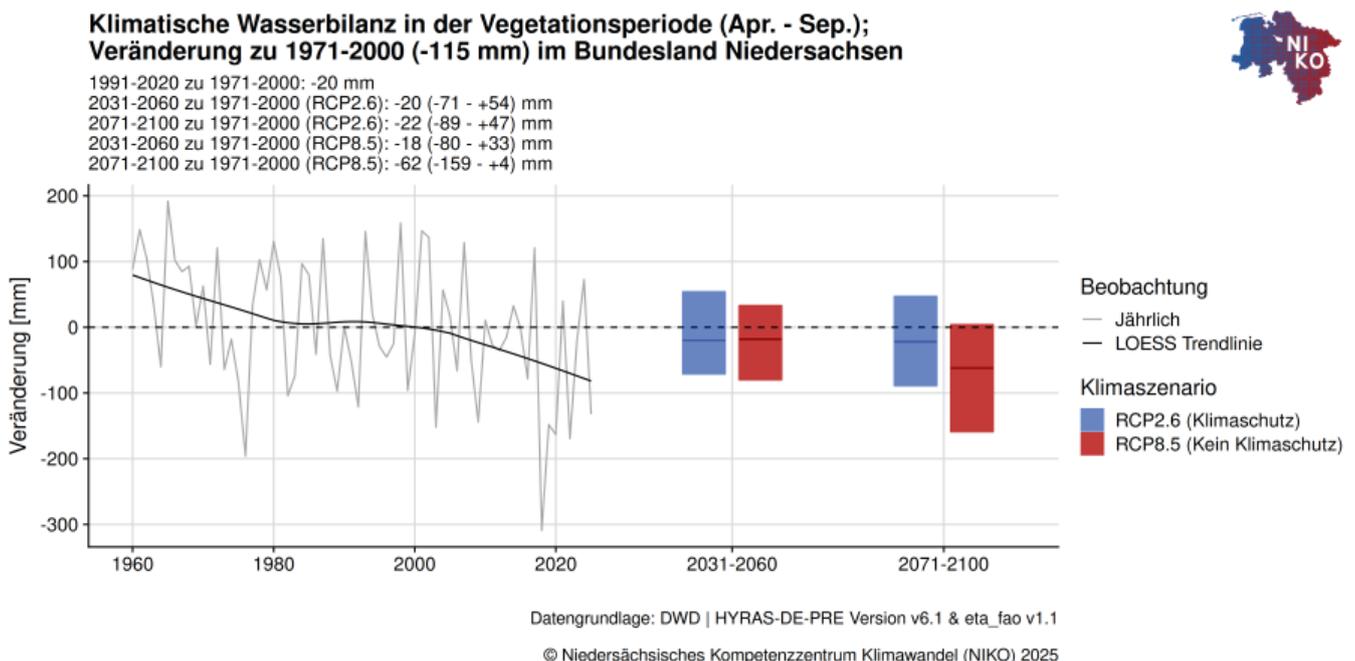


Abbildung 49: Jährliche Abweichung der Klimatischen Wasserbilanz zum Bezugszeitraum 1971–2000 in Niedersachsen. Eine LOESS Regression identifiziert die Trendentwicklung für die Vergangenheit und die Balken in der Mitte und dem Ende des Jahrhunderts die Ergebnisbandbreite der Klimamodelle für zwei Zukunftsszenarien.

je nach Bodeneigenschaften räumlich ausgedehnt den Grundwasserspiegel senken. Dies kann zu einer geringeren Verfügbarkeit von Grundwasser führen, welches neben der Bewässerung noch für die öffentliche Trinkwasserversorgung, für die Industrie und für eine ausreichende Wasserversorgung von grundwasserabhängigen Land-ökosystemen benötigt wird (Bug et al., 2021). In Extremjahren kann sich so die Niedrigwasserproblematik verschärfen.

Durch den Klimawandel, wie er bereits beobachtet wird, und auch aus den Projektionen der Klimamodelle für die Zukunft ist absehbar, dass gerade in den für die Vegetation relevanten Jahreszeiten Frühling und Sommer Niederschläge zurückgehen und durch die wärmeren Temperaturen der Wasserverbrauch der Pflanzen (Verdunstung) steigt. Die Wasserverfügbarkeit, ausgedrückt als Klimatische Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlag und potenzieller Verdunstung), hat in der Vegetationsperiode bereits im linearen Trend seit 1961 deutlich abgenommen (Abbildung 49). Die pessimistischsten Klimamodelle berechnen für die Vegetationsperiode eine um 159 mm reduzierte Klimatische Wasserbilanz am Ende des Jahrhunderts gegenüber der Bezugsperiode. Im optimistischsten Fall stagniert die Klimatische Wasserbilanz und steigt um 4 mm.

Der Zusatzwasserbedarf hängt neben der Kulturart (Kartoffeln haben z. B. einen höheren Wasserbedarf als Mais) und den klimatischen Bedingungen (Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode) auch vom am Standort vorherrschenden Boden ab.

Ein Boden kann in Abhängigkeit von seinen Eigenschaften (Körnung, Dichte, Humusgehalt) Wasser unterschiedlich gut pflanzenverfügbar speichern. Das oberflächlich nah anstehende Grundwasser kann zudem die Versorgung durch kapillaren Aufstieg stützen und damit den Zusatz-

wasserbedarf senken. Geringe Wasserverfügbarkeiten weisen die grundwasserfernen Sandböden der niedersächsischen Geest und die geringmächtigen Verwitterungsböden des Berglandes auf (Bug & Harders, 2024b).

Die Ackerflächen verteilen sich innerhalb Niedersachsens nicht gleichmäßig. Den geringsten Anteil an Ackerflächen in Niedersachsen gibt es im Harz, Münsterländer Kreisebecken und auf den Nordseeinseln, die höchsten Anteile an Ackerfläche in der Geest (41 %) und den Niederungen (29 %). Für diese Flächen weist der potenzielle mittlere Zusatzwasserbedarf die Wassermenge aus, die im Mittel innerhalb der Vegetationsperiode (April–September) zusätzlich auf den Boden ausgebracht werden müsste, um einen Bodenwassergehalt von mindestens 40 % der nFK permanent aufrechtzuerhalten.

Dann wäre eine gute Wasserversorgung für die Kulturpflanze gewährleistet und Trockenstress vermieden (Bug & Harders, 2024b). Dabei handelt es sich um eine potenzielle Menge, um das Bodenwasserdefizit auszugleichen und keine tatsächlich erfolgte Wassergabe. Wird dieser potenzielle Zusatzwasserbedarf von der Menge an Grundwasserneubildung abgezogen, zeigt sich, ob das Bodenwasserdefizit dieses Defizit potenziell durch Grundwasser abgedeckt werden könnte. Dabei werden die Bedarfe von anderer Nutzung wie z. B. durch die öffentliche Trinkwasserversorgung und Industrie und auch andere Wechselwirkungen im Landschaftswasserhaushalt nicht berücksichtigt. Es wird deutlich, dass heute schon im Bereich der unteren Weser und im äußersten Ostniedersachsens die Grundwasserkörper den Bedarf an potenziellem Zusatzwasser nicht decken können (Abbildung 50). Die nutzbare Dargebotsreserve dieser Grundwasserkörper ist im Mengenbewirtschaftungserlass mit den genehmigten Entnahmen als fast vollständig ausgeschöpft ausgewiesen, was auch in der geringen Neubildung in diesen Gebieten begründet ist (MU, 2024b).

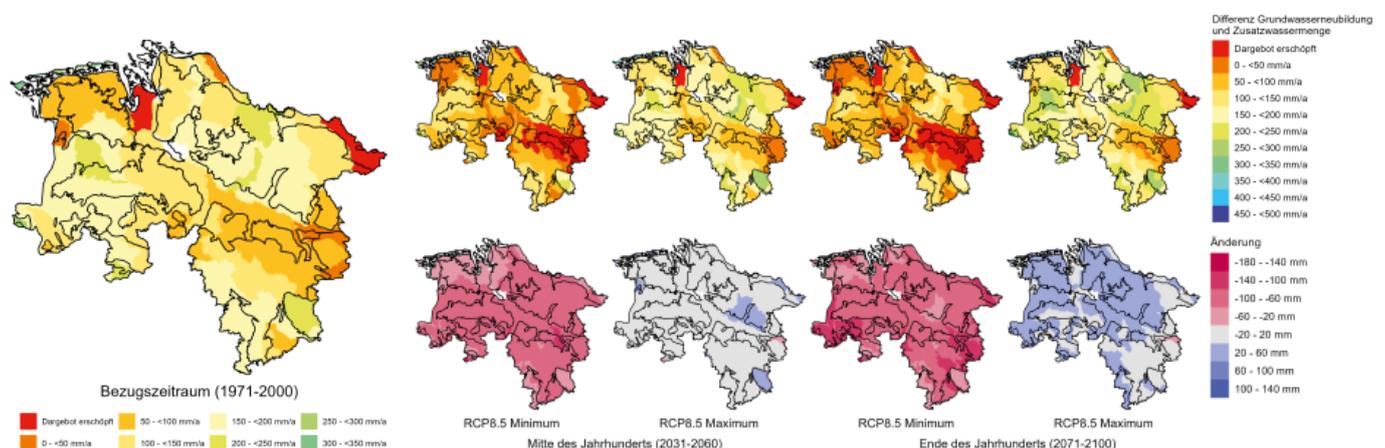


Abbildung 50: Differenz Grundwasserneubildung und Zusatzwasserbedarf in den Perioden 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 (oben) und deren Veränderung zu 1971–2000 (unten) (1971–2000: Beobachtungen, 2031–2060 und 2071–2100 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5).

	Anteil Ackerfläche	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
			Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Marschen	5 %	-18 mm	+4 mm	-35 mm	+4 mm	-64 mm
Mitteldeutscher Buntsandstein	1 %	204 mm	+19 mm	-51 mm	+26 mm	-50 mm
Harz	0 %	230 mm	+22 mm	-39 mm	+17 mm	-48 mm
Münsterländer Kreidebecken	0 %	192 mm	+13 mm	-50 mm	+32 mm	-44 mm
Niederungen	29 %	112 mm	0 mm	-75 mm	+34 mm	-89 mm
Geest	41 %	179 mm	-4 mm	-75 mm	+28 mm	-66 mm
Nordseeinseln	0 %	179 mm	+33 mm	-26 mm	+58 mm	-44 mm
Nordwestdeutsches Bergland	19 %	122 mm	+6 mm	-65 mm	+10 mm	-82 mm
Sandmünsterland	1 %	190 mm	-16 mm	-109 mm	+15 mm	-110 mm
Subherzyne Senke	3 %	55 mm	-13 mm	-83 mm	-20 mm	-102 mm
Thüringische Senke	2 %	140 mm	+7 mm	-75 mm	+13 mm	-89 mm

Tabelle 59: Anteil der Ackerfläche bezogen auf Niedersachsen, Differenz Grundwasserneubildung und Zusatzwasserbedarf im Bezugszeitraum (1971–2000) sowie die Veränderungen unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts für verschiedene hydrogeologische Räume (KAPITEL 2.3.3).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Der Wasserbedarf der Landwirtschaft ist derzeit nach dem Bedarf der öffentlichen Wasserversorgung der zweitgrößte in Niedersachsen. Das Wasserversorgungskonzept schätzt für ganz Niedersachsen zukünftig einen erhöhten Bedarf an Bewässerungswasser ab (MU, 2022c). Gleichzeitig weist der Mengenbewirtschaftungsplan bereits 11 Grundwasserkörper aus, deren nutzbare Dargebotsreserve fast vollständig erschöpft ist (MU, 2024b). Diese befinden sich im östlichen Niedersachsen, in der Wesermarsch und in Zentralniedersachsen. Hier kann ein erhöhter Bewässerungsbedarf nicht mehr durch Grundwasser gedeckt werden. Die Situation wird sich in der Mitte des Jahrhunderts in Regionen, in denen Ackerbau vorherrscht, verschärfen, da die Grundwasserneubildung relativ ähnlich ist zu der heutigen, der Bewässerungsbedarf jedoch weiter ansteigt. Am Ende des Jahrhunderts könnte sich die Situation im optimistischen Fall etwas entspannen, wenn die Grundwasserneubildungsraten durch stärkere Winterniederschläge steigen, im pessimistischen Fall zeigt sich je nach hydrologischer Einheit eine differenzierte

Veränderung der Situation (Abbildung 50). Insbesondere in der Subherzynen Senke, wo viel Ackerbau betrieben wird, übersteigt das Bodenwasserdefizit die Neubildung im pessimistischen Fall. In den für den Ackerbau relevanten Einheiten der Niederung und der Geest steigt das Defizit weiter an, bzw. sinkt leicht im Vergleich zum pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts, verbleibt aber auf einem relativ hohen Niveau.

Neben den hohen Unsicherheiten der Niederschlagsentwicklung aus Klimamodellen ist auch die Entwicklung der Landwirtschaft mit hohen Unsicherheiten versehen: Der Bewässerungsbedarf hängt neben den klimatischen Bedingungen auch von der Ausdehnung von Ackerflächen (auch durch die Aufgabe von Viehbetrieben), Umstellung auf ökologische Bewirtschaftung, bei der häufiger wasserintensive Obst- und Gemüsekulturen angebaut werden, der Auswahl an Anbaukulturen allgemein, der Verwendung von verschiedenen Bewässerungsmethoden und dem Pachtflächenanteil sowie damit dem Druck nach Rendite ab. All diese Faktoren wurden und können nicht adäquat berücksichtigt werden, da diese zu ungewiss sind.

INFO

- Die Feldberegnung nimmt in Niedersachsen stetig zu, da die Sommer wärmer und trockener geworden sind.
- 2015 wurde noch mit 254 Mio. m³ /Jahr bewässert – dieser Verbrauch könnte sich bis 2050 verdoppeln.
- Die Gabe von Zusatzwasser kann nötig sein, um Landwirtschaftserträge zu sichern.
- Die Entnahme von Zusatzwasser kann, je nach Bodeneigenschaften, räumlich ausgedehnt den Grundwasserspiegel senken.
- Die Klimatische Wasserbilanz hat in der Vegetationsperiode seit 1961 deutlich abgenommen und könnte bis Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall bei -188 mm gegenüber 1961–1990 liegen.
- Nutzungskonflikte könnten um die Ressource Grundwasser entstehen.
- Im pessimistischen Fall könnte nicht genügend Wasser in den Grundwasserkörpern zur Verfügung stehen, um den Zusatzwasserbedarf der Landwirtschaft zu decken.

Bewertung des Klimarisikos

Das Risiko von Mangel an Bewässerungswasser besteht bereits heute. Die Situation in den Grundwasserkörpern ist immer wieder angespannt. Kommunen haben durch Allgemeinverfügungen darauf reagiert und die Landwirtschaft aufgefordert, während Hitzeperioden das Bewässern in die Abendstunden zu verlegen (LK Lüneburg, 2023; Region Hannover, 2024). Die Entwicklungen in der Landwirtschaft sind nicht ohne Weiteres vorhersehbar, dennoch ist anhand der Klimaentwicklung klar, dass bei

Fortführung der heutigen Bewirtschaftungsweise der Bedarf an Zusatzwasser zunimmt und nicht überall aus dem Grundwasser abdeckbar ist. Daher ist für die Mitte des Jahrhunderts das Risiko auf für das optimistische Szenario als hoch ausgewiesen. Wenn im günstigsten Fall bis Ende des Jahrhunderts die Grundwasserneubildung steigt, kann der Mangel etwas abgefangen werden, daher ist im optimistischen Fall das Risiko nur als mittel ausgewiesen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 60: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Mangel an Bewässerungswasser“.

4.3.9 Talsperrenbewirtschaftung

Talsperren stellen in Niedersachsen mit Entnahmemenge von ca. 70 Mio. m³ pro Jahr einen wichtigen Baustein der öffentlichen Wasserversorgung dar. Darüber hinaus dienen sie dem Hochwasserschutz (KAPITEL 4.3.1), der Aufrechterhaltung ökologischer Mindestabflüsse (KAPITEL 4.3.5) in den Fließgewässern, der Naherholung, der Kühl- bzw. Brauchwasserversorgung sowie der regenerativen Stromproduktion. Sie sind damit zum einen in ihrer Funktion direkt von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen (z. B. Veränderungen des Trinkwasserdargebots) und können zum anderen durch Ihre Speicherwirkungen einen substantziellen Beitrag zur Abmilderung von hydrologischen Extremen in den nachfolgenden Fließgewässern liefern.



Abbildung 51: Große Talsperren mit Einzugsgebieten im Westharz.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Die Bewirtschaftung von Talsperren erfolgt im Allgemeinen nach festgelegten Regeln bzw. Strategien, um bestimmte wasserwirtschaftliche Anforderungen bzw. Ziele zu erfüllen. Diese Regeln orientieren sich einerseits an Randbedingungen, die zumeist klimatisch und hydrologisch bedingt sind, andererseits an den Bedarfen, für deren Erfüllung die Talsperren errichtet wurden. Wesentliche Randbedingung ist das Wasserdargebot, welches durch den Niederschlag und seine zeitliche Verteilung sowie die Evapotranspiration im Einzugsgebiet der Talsperren bestimmt wird.

Extreme Niederschlagsereignisse ziehen entsprechende Zuflussmengen nach sich, die den Stauraum innerhalb kürzester Zeit füllen können (KAPITEL 4.3.1, 4.3.2). Im Hochwasserfall wird Abfluss zurückgehalten, damit die Flüsse stromab weniger stark ausufern und Schaden für Anlieger reduziert wird. Hierfür wird in der Regel ein Teil des Stauraums als Hochwasserrückhalteraum vorgesehen, der ausschließlich dem Hochwasserschutz der Unterlieger dient. Wird dieser „gewöhnliche Hochwasserschutzraum“ während eines extremen Hochwasserereignisses vollständig gefüllt, erfolgt der Einstau des „außergewöhnlichen Hochwasserschutzraumes“ und es findet eine kontrollierte Abgabe über die Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre statt (wie z. B. an der Oker- und Innerstetalsperre während des „Weihnachtshochwassers“ im Dezember 2023).

Auf der anderen Seite können ausbleibende Niederschläge sowie hohe Verdunstungsverluste bei gleichzeitiger kontinuierlicher oder sogar steigender Wasserabgabe aus dem Betriebsraum der Talsperre für die verschiedenen o. g. Zwecke dazu führen, dass der Stauraum nach und nach entleert wird. Dadurch ist der Füllstand der Anlage in der Regel jahreszeitlich ständigen Veränderungen unterworfen.

Die sechs großen Talsperren im niedersächsischen Westharz (Söse-, Oder-, Ecker-, Oker-, Innerste- und Granetalsperre) dienen mit einem Gesamtstauraum von 182 Mio. m³ und einem bewirtschafteten Einzugsgebiet von 324 km² vor allem dem Hochwasserschutz, der Trinkwassergewinnung, der elektrischen Energieerzeugung und der Aufhöhung des Niedrigwasserabflusses im Unterlauf der Talsperren (Abbildung 51). Je nach räumlicher Verteilung der Niederschläge hat sowohl die Hochwasserschutzwirkung als auch die Niedrigwasseraufhöhung eine überregionale Bedeutung und erstreckt sich über die Flussgebiete der Oder-Söse-Rhume-Leine (Northeim), der Innerste-Leine (Hildesheim/Sarstedt/Hannover) und der Ecker-Oker-Aller (Wolfenbüttel/Braunschweig). Auch die Trinkwasserversorgung im geographischen Dreieck Göttingen-Wolfsburg-Bremen besitzt mit ca. 1,4 Mio. versorgten Bürgern deutlich überregionale Auswirkungen. Daneben betreiben die Harzwasserwerke zwölf Wasserkraftwerke, die mit einer Leistung von etwa 35 Mio. kWh/Jahr rund 39.000 t/Jahr CO₂ einsparen (bezogen auf fossile Energieträger).

Sämtliche dieser Funktionen sind stark durch eine Verstärkung von hydrologischen Extremen wie z. B. häufigeren Dürre- und Hochwasserereignissen, die durch den Klimawandel hervorgerufen wird, betroffen. Längere und teilweise intensivere Trockenphasen reduzieren das Wasserdargebot für die Trinkwasserversorgung und die erzielbare Stromproduktion durch Wasserkraft. Zugleich steigen hierdurch die Anforderungen der benötigten ökologischen Niedrigwasseraufhöhung durch geringere Abflüsse in den Fließgewässern unterhalb der Talsperren. Auf der anderen Seite führen extremere Hochwasserzuflüsse teilweise zu einem Bedarf der Vergrößerung von Hochwasserrückhalte-räumen und ggf. einhergehenden Reduzierung von Betriebsräumen (Meon et al., 2018).

Talsperren bieten zugleich durch Ihre Pufferfunktion den Vorteil, Extremniederschläge im Winter zwischenspeichern und während der nächsten Trockenphase für die

Trinkwasserversorgung und die Aufrechterhaltung ökologischer Mindestabflüsse nutzen zu können. Dieser Ausgleich von hydrologischen Extremen kann somit helfen, die Auswirkungen des Klimawandels abzumindern. Bauliche und operative Anpassungen an den Talsperren können diese Ausgleichswirkung weiter verstärken (Beck & Zum Hingst, 2023, S. 20).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Schon jetzt ist in den Talsperreneinzugsgebieten eine verstärkte Saisonalität mit einer Zunahme von Winterniederschlägen und -abflüssen und einer Tendenz zur Abnahme im Sommer zu beobachten (Abbildung 52). Während gleichzeitig bei der langjährigen Jahressumme der Niederschläge bisher kein Rückgang zu beobachten ist, führte eine erhöhte Evapotranspiration zuletzt zu einer leichten Abnahme der Jahreszuflussmengen zu den Talsperren (Dietze et al., 2024).

Basierend auf den Ergebnissen von regionalen hydrologischen Impaktmodellierungen für das Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet kann für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts weiterhin von einer steigenden Saisonalität mit geringeren Sommerzuflüssen und längeren Dürreperioden ausgegangen werden (NLWKN, 2019a).

Zugleich sind regional bereits für die nächsten Jahrzehnte und verstärkt für das Ende des Jahrhunderts größere Hochwasserwellenvolumina möglich (NLWKN, 2021a). Diese würden die Hochwasserschutzräume der Talsperren weiter beanspruchen.

Die steigende Temperatur führt zudem zu einer geringeren Schneerücklage in den Einzugsgebieten und einem früheren Schmelzvorgang, was wiederum eine zusätzliche saisonale Verschiebung der Abflüsse nach sich zieht.

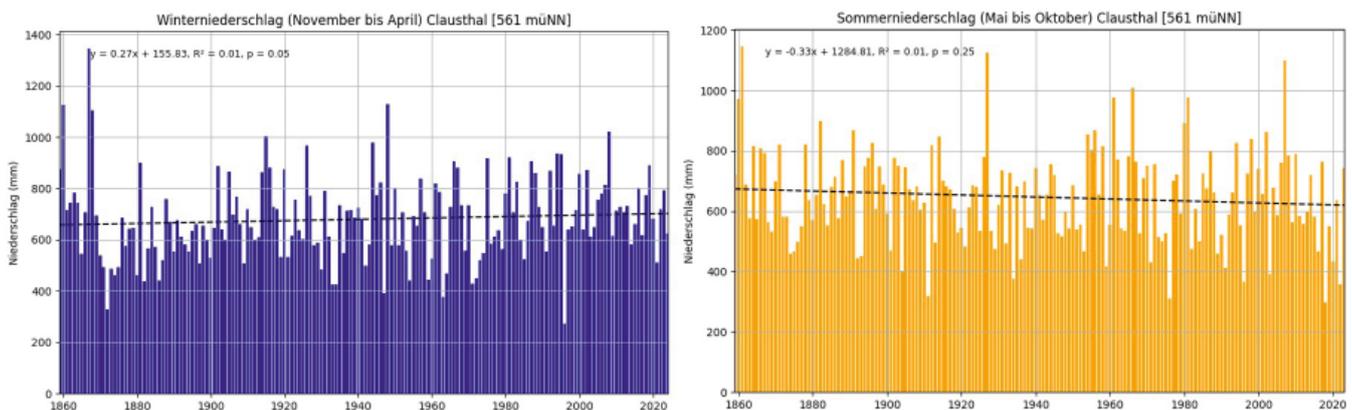


Abbildung 52: Jahresniederschläge der Station Clausthal im Westharz seit 1859 aufgeteilt nach Winterhalbjahr (links, blau) und Sommerhalbjahr (rechts, gelb).

INFO

- Talsperren dienen der öffentlichen Trinkwasserversorgung, dem Hochwasserschutz und dazu, ökologische Mindestabflüsse u. a. in Fließgewässern aufrechtzuerhalten.
- Die Funktionen der Talsperren sind durch Klimawandelfolgen wie hydrologische Extreme, z. B. Dürre- und Hochwasser, negativ betroffen und eingeschränkt.
- Die Wirkung des Klimawandels ist ein wesentlicher Faktor für die Bewirtschaftung der Talsperren im Harz, der sich auf alle zu erfüllenden Aufgaben und Funktionen der Speicheranlagen auswirkt.
- Momentan können zyklisch angepasste Betriebsregeln genutzt werden, um auf die Klimaänderungen zu reagieren – bis Ende des Jahrhunderts müssen zur Daseinsvorsorge andere Maßnahmen ergriffen werden.

Bewertung des Klimarisikos

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Wirkung des Klimawandels einen wesentlichen Faktor bei der Bewirtschaftung der Talsperren im Harz darstellt, da er sich auf alle zu erfüllenden Aufgaben bzw. Funktionen der Speicheranlagen auswirkt (Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Trinkwasserversorgung, Energiegewinnung, Gewässerökologie). Bereits in der jüngeren Vergangenheit haben sich Veränderungen in der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung ergeben. Während bei Betrachtung von 30-Jahres-Zeitscheiben in den Beobachtungen bisher keine Abnahme der Jahresniederschläge festzustellen ist, führte eine erhöhte Evapotranspiration zu einer leichten Abnahme von Talsperrenzuflüssen.

Es ist von einer eher geringen bis mittleren Bedeutung des Klimawandels für die Talsperrenbewirtschaftung auszugehen. Aktuell kann auf die sich abzeichnenden Veränderungen durch zyklisch angepasste Betriebsregeln reagiert werden. Für das Ende des Jahrhunderts müssen jedoch (vor allem bei räumlicher Verschiebung von Niederschlägen) alternative Maßnahmen ins Auge gefasst werden, um die Daseinsvorsorge zu gewährleisten. Die Einschätzungen für die Mitte des Jahrhunderts erfolgten mit einer eher hohen Gewissheit, die für das Ende des Jahrhunderts mit einer eher geringen bis mittleren Gewissheit.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 61: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Talsperrenbewirtschaftung“.

4.3.10 Grundwasserqualität

Der Niederschlag beeinflusst die Grundwasserneubildung, und damit auch den Stoffeintrag ins Grundwasser aus überlagernden Schichten. Extreme Trockenheit führt zu einer verringerten Stoffmigration während extreme Niederschlagsereignisse eine Auswaschung der Sickerhorizonte zur Folge haben. Steigende Oberflächentemperaturen beeinflussen außerdem die Temperaturen der flachen Grundwasserleiter direkt unter der Erdoberfläche, was zu einer Veränderung von temperatursensitiven Prozessen führen kann.

Hintergrund und Stand der Forschung (Bezugszeitraum 1971–2000)

Der Klimawandel wird direkte und indirekte Einflüsse auf das Grundwasser und seine Qualität in Niedersachsen haben. Der Effekt der Oberflächentemperatur auf das Grundwasser hängt von den Boden- und Gesteinseigenschaften ab, beschränkt sich aber im Wesentlichen auf die oberen 20 Meter des Untergrundes, unterhalb dieser Grenze steigt die Temperatur in Abhängigkeit vom geo-

thermischen Gradienten aus dem Erdinneren (Kurylyk & Irvine, 2019). Die mittlere jährliche Grundwassertemperatur liegt in Niedersachsen bei circa 10 °C (Rivett et al., 2008; Benz et al., 2017).

In weiten Teilen Niedersachsens, vor allem in Küstennähe und in den Niederungen, liegt die Grundwasseroberfläche weniger als 20 Meter unter der Geländeoberkante, so dass hier klimawandelbedingte Veränderungen der Sickerwasser- und Grundwasserbeschaffenheit zu erwarten sind.

Von 1990 bis Ende 2014 stieg die mittlere Grundwassertemperatur in Niedersachsen in den oberen 20 m um circa 0,5 °C an. Während sie in den 1990er-Jahren noch saisonal bedingt zwischen 9 und 11 °C schwankte, fiel die mittlere Temperatur im Grundwasser seit 2005 nur einmal unter 10 °C und stieg immer öfter auf über 11 °C. Insgesamt 8.755 Messungen sind in der Grafik Abbildung 53 berücksichtigt, pro Quartal wurde ein Mittelwert gebildet und eine Trendlinie über den Zeitraum erstellt.

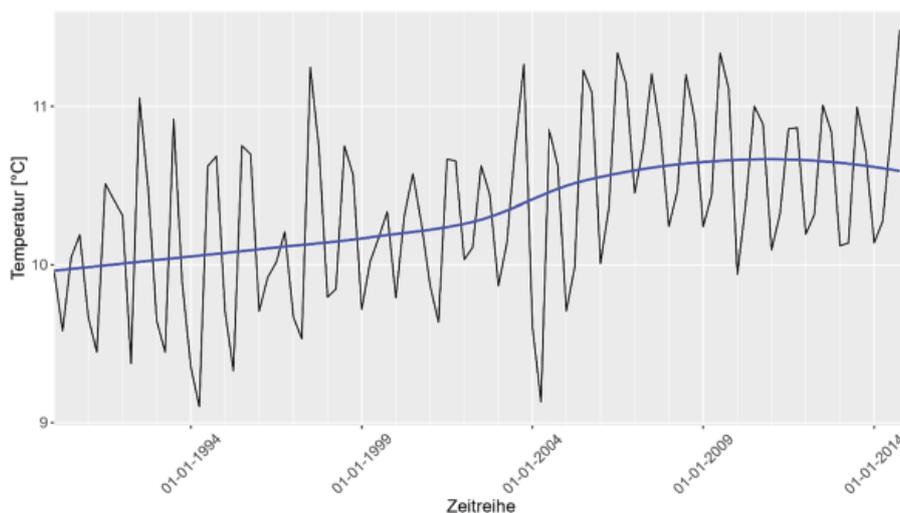


Abbildung 53: Mittlere Grundwassertemperatur pro Quartal in Niedersachsen von 1990 bis 2014 in einer Tiefe von 2–20 m.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Ein Anstieg der Temperatur kann verstärkend oder hemmend für biologische, chemische und physikalische Prozesse im Wasser und an der Aquifermatrix wirken wie z. B. Sorption, Abbau und Mobilisation von (Schad-) Stoffen, Fließigenschaften sowie Fällung und Lösung von Stoffen. Benz et al. (2024) haben mit Modellrechnungen einen linearen Anstieg der globalen Grundwassertemperatur bis 2100 um 2,1 bis 3,5 °C projiziert, bis zu 588 Mio. Menschen könnten dann von Grundwasser abhängig sein, welches die Richtlinien für Grundwassertemperatur überschreitet. Ein Anstieg der Grundwassertemperatur von bereits 1 °C kann zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration von 4 % und einer pH-Abnahme um 0,02 (T. Riedel, 2019), sowie einer Anreicherung von Stoffen wie z. B. Arsen, Mangan, Salzen und Fluorid im Wasser führen (Benz et al., 2024; Steinel et al., 2012). Sinkt die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser, verschieben sich biogeochemische Prozesse von aeroben zu anaeroben Bedingungen. Als Folge verstärken sich die Bildung von Schwefelwasserstoff (H₂S) und Methan (CH₄) und die Lösung von Eisen- und Manganverbindungen von der Aquifermatrix ins Grundwasser. Der Abbau von Nitrat im Grundwasser ist neben diversen Faktoren auch von der Temperatur abhängig, ein Anstieg der Temperatur würde sich positiv auf die Denitrifikation auswirken, da die Mikroorganismen aktiver sind (Rivett et al., 2008).

Ein Anstieg der Temperatur an der Oberfläche führt zu einer höheren Verdunstungsrate und ggf. zu einer verringerten Grundwasserneubildungsrate (KAPITEL 4.3.6), was für einige Bereiche Niedersachsens zu erwarten ist. Dies kann den Konzentrationsanstieg von gelösten Stoffen im Grundwasser noch verstärken (Amanambu, 2015). Durch die ebenfalls für weite Teile Niedersachsens zu erwartende Intensivierung von Niederschlägen kann z. B. die Auswaschung von Nährstoffen und Pestiziden aus Ackerflächen erhöht werden (Steinel et al., 2012).

Auch indirekt kann der Klimawandel die Qualität von Grundwasser beeinflussen. Amanambu et al. (2020) nennen besonders Küstenaquifere gefährdet, welche für den Ausgleich von z. B. saisonalen Trockenzeiten übermäßig genutzt werden. Diese Übernutzung führt zu einer Senkung der Grundwasseroberfläche und fördert die Versalzung der Aquifere durch Meerwasser.

Die Forschung zu den Folgen des Klimawandels auf die Grundwasserqualität ist noch sehr jung und konzentriert sich zumeist auf lokale oder globale Systeme, welche keine zwingenden Rückschlüsse auf das Grundwasser in Niedersachsen zulassen oder sie beschäftigt sich mit Grundwasserspeicherung und -neubildung und wenig mit den Auswirkungen auf die Qualität des Grundwassers (Green et al., 2011). Regionale Folgen auf die Grundwasserqualität sind daher auf Grundlage der aktuellen Datengrundlage schwer abzuschätzen und bedürfen weiterer Forschung: Interessant ist z. B., wie drastisch die Auswaschung von Stoffen bei intensiven Niederschlägen aus Böden ist oder wie stark sich die Mobilisierung oder Anreicherung von Stoffen im Grundwasser verändert.

Da der Einfluss der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung vor allem die oberen 20 m des Untergrundes betrifft, ist die Trinkwassergewinnung aktuell nicht direkt betroffen, da die meisten Brunnen deutlich tiefer sind. Allerdings können die zu erwartenden Veränderungen langfristig erheblichen Einfluss auf die Trinkwasserqualität haben.

Bewertung des Klimarisikos

Die mit dem Klimawandel eintretenden Änderungen der Atmosphärentemperatur werden sich auch auf Prozesse im oberflächennahen Grundwasser auswirken. Art und Umfang der Veränderungen hängen sehr stark von den lokalen Bedingungen ab, können aber erheblich sein.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Gering	Mittel
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 62: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Grundwasserqualität“.



5 Cluster Gesundheit

5.1

Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

- 5.1.1 Gesundheitsrisiken durch Hitzebelastung
- 5.1.2 Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung
- 5.1.3 Klimagerechtigkeit
- 5.1.4 Vektoren und Nagetiere: Übertragung klimasensibler Infektionskrankheiten
- 5.1.6 Cyanobakterien (Blualgen)
- 5.1.5 *Vibrio vulnificus*



5.1 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Der Klimawandel wirkt sich sowohl direkt als auch indirekt auf die menschliche Gesundheit aus.

Zu den **direkten Folgen** des Klimawandels zählen beispielsweise die steigende Zahl von Hitzetagen, Trockenheit, Starkregenereignisse oder Stürme. Besonders langanhaltende Hitzeereignisse, sogenannte Hitzewellen inklusive Tropennächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C fällt, gehen mit einer steigenden Zahl an hitzeassoziierten Erkrankungen und Sterbefällen einher.

Aber auch die kurzfristige Auswirkung von Hitze auf den menschlichen Körper ist facettenreich: Überhitzung bzw. Wärmestau sowie Flüssigkeits- und Elektrolytverlust belasten vor allem das Herz-Kreislauf-System, das Gehirn und die Nieren. Menschen mit Vorerkrankungen, die das Herz, die Lunge und die Nieren betreffen, sind deshalb besonders gefährdet, da sich ihr Gesundheitszustand bei Hitze drastisch verschlechtern kann.

Letztlich können extreme Hitzeereignisse zu einem Anstieg der Sterbefälle in den Sommermonaten führen. Zusätzlich zur hohen Temperatur können weitere Faktoren wie erhöhtes bodennahes Ozon, Pollenflug, Luftverschmutzung und intensive UV-Strahlung die Gesundheit während heißer Perioden beeinträchtigen. Bodennahes Ozon, welches in der bodennahen Luftschicht unter Sonneneinstrahlung aus den sogenannten Ozon-Vorläufersubstanzen (Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid und Methan) gebildet wird (sog. Sommersmog), kann zu Kopfschmerzen sowie

zu Reizungen der Augen und Atemwege führen und ist vor allem für Menschen mit chronischen Atemwegserkrankungen wie Asthma sehr belastend. Durch die erhöhte UV-Exposition durch häufigere und längere Aufenthalte im Freien ist auch eine Erhöhung der Anzahl an UV-assoziierten Erkrankungen wie Augenentzündungen, Linsentrübung, Sonnenallergie und langfristig auch Krebserkrankungen zu erwarten.

Der Klimawandel kann auch **indirekte Folgen** auf unsere Gesundheit haben, zum Beispiel durch Veränderungen in der Umwelt wie eine steigende Zahl an Vektoren (also Lebewesen, die Krankheiten übertragen können wie beispielsweise Mücken), vermehrte lebensmittelasoziierte Erkrankungen, eine Verminderung der Wasserqualität mit steigender Zahl an wasserbürtigen Erkrankungen, aber auch Biodiversitätsverlust, Migration von Menschen (z. B. hervorgerufen durch Desertifikation, Überflutung und Nahrungsmangel). Wie stark sich diese Folgen des Klimawandels auf unsere Gesundheit auswirken, hängt von Faktoren wie Alter, Umwelt, Gesundheitsstatus und dem sozioökonomischen Status sowie von der Kapazität und Resilienz unsere Gesundheitssystems ab. Da die Zunahme an klimaassoziierten Gesundheitsrisiken eine Vielzahl von medizinischen Fachdisziplinen (Innere Medizin, Infektiologie, Allergologie und Psychiatrie) betrifft und auch Gesundheitseinrichtungen klimaresilient umgestaltet werden müssen, wird der Klimawandel eine zunehmende Herausforderung für das öffentliche Gesundheitssystem darstellen.

— INFO —

- Überhitzung sowie Flüssigkeits- und Elektrolytverlust haben negative Folgen für das Herz-Kreislauf-System, das Herz und die Nieren und gehören zu den direkten Klimawandelfolgen.
- Indirekte Folgen des Klimawandels können steigende Zahlen an krankheitsübertragenden Lebewesen, Verminderung von Wasser- und Lebensmittelqualität und Biodiversitätsverlust sein.
- Die Folgen sind ungleich verteilt: Belastung ist von Alter, Umwelt, Gesundheits- und sozioökonomischem Status beeinflusst.

5.1.1 Gesundheitsrisiken durch Hitzebelastung

Hintergrund und Stand der Forschung

Besonders langanhaltende Hitzeereignisse, sogenannte Hitzewellen, inklusive Tropennächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C fällt, gehen mit einer steigenden Zahl an hitzeassoziierten Erkrankungen und Sterbefällen einher. Durch versiegelte Böden, den geringeren Anteil an blauen oder grünen Flächen (Verschattung durch Bäume, Gewässer zum Abkühlen) gibt es große Unterschiede in der Temperaturentwicklung zwischen ländlichen Regionen und Städten. Sogenannte Hitzeinseln entstehen vor allem in Innenstädten, wo viele versiegelte Flächen und wenig Baumbestände sind sowie wichtige Frischluftschneisen durch enge Bebauung fehlen.

Die kurzfristige Auswirkung von Hitze auf den menschlichen Körper ist facettenreich: Überhitzung bzw. Wärmestau (sogenannter Hitzschlag) sowie Flüssigkeits- und Elektrolytverlust belasten vor allem das Herz-Kreislauf-System, das Gehirn und die Nieren. Menschen mit Vorerkrankungen, die das Herz, die Lunge und die Nieren

betreffen, sind deshalb besonders gefährdet, da sich ihr Gesundheitszustand bei Hitze drastisch verschlechtern kann. Letztlich können extreme Hitzeereignisse zu einem Anstieg der Sterbefälle in den Sommermonaten führen. Wie stark sich diese Folgen des Klimawandels auf unsere Gesundheit auswirken, hängt von Faktoren wie Alter, Umwelt, Gesundheitsstatus und dem sozioökonomischen Status sowie von der Kapazität und Resilienz unseres Gesundheitssystems ab.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Anzahl an heißen Tagen und extremen Temperaturperioden wird in den nächsten Jahren weiter steigen und mit einer Zunahme an temperaturassoziierten Erkrankungen und Sterbefällen einhergehen. Da die Zunahme an klimaassoziierten Gesundheitsrisiken eine Vielzahl von medizinischen Fachdisziplinen (Innere Medizin, Infektiologie, Allergologie und Psychiatrie) betrifft und auch Gesundheitseinrichtungen wie Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen klimaresilient umgestaltet werden müssen, wird der Klimawandel eine immer größer werdende Herausforderung für das Gesundheitssystem darstellen.

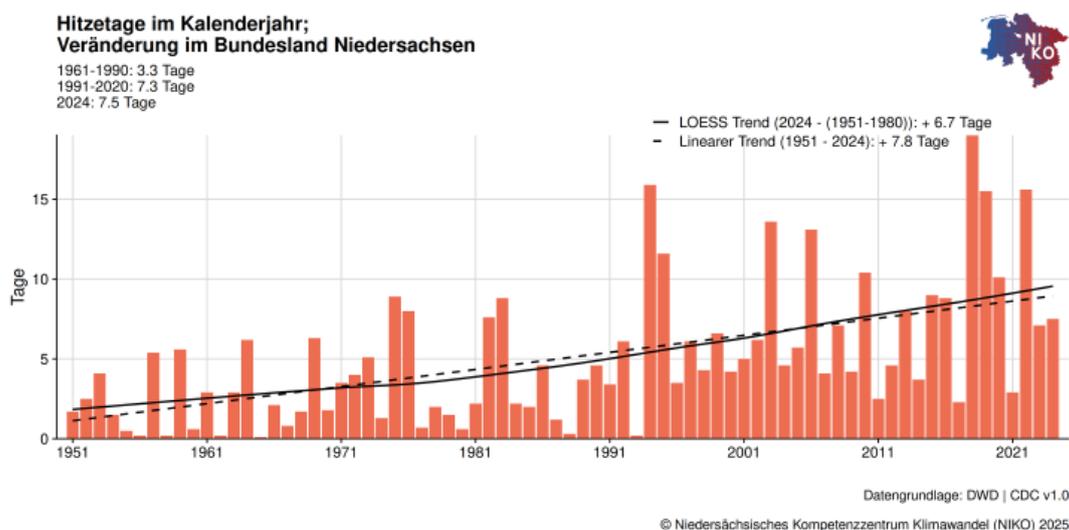


Abbildung 54: Anomalie der Hitzetage ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) (NIKO, 2024).

INFO

- Versiegelte Böden, weniger Verschattung und weniger Gewässer zum Abkühlen führen vor allem in Innenstädten zu Hitzeinseln.
- Mit dem Anstieg von Hitzewellen steigt auch die Belastung für das Gesundheitssystem und die Notwendigkeit, Krankenhäuser klimaresilient zu gestalten.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 63: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Hitzebelastung“.

5.1.2 Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Sonnenstrahlung besteht aus sichtbarem Licht, Infrarotstrahlung und ultravioletter Strahlung, kurz UV-Strahlung genannt. Je nach Wellenlänge dringt die UV-Strahlung unterschiedlich tief in die Haut des Menschen ein. UV-A-Strahlen dringen in tiefere Hautschichten ein und verursachen langfristige Schäden, wie Hautalterung und Hautkrebs. UV-B-Strahlen stimulieren die Melanozyten in der Haut und tragen dazu bei, dass die Haut sich bräunt (Schutzmechanismus der Haut). Überschreitet die Bestrahlung jedoch einen individuellen Schwellenwert, so treten akute Schäden wie Sonnenbrand auf, die zunächst noch reversibel sind. Nach jahrelanger Belastung der Haut mit UV-Strahlen kann es schließlich zu dauerhaften Veränderungen und Spätfolgen an der Haut kommen. Die schwerwiegendste Folge der UV-Bestrahlung ist der Hautkrebs.

Eine weitere Gefahr durch direkte Sonneneinstrahlung ist der Sonnenstich. Ein Sonnenstich entsteht durch längere und direkte Sonneneinstrahlung auf den ungeschützten Kopf, erkennbar am geröteten und heißen Kopf. Symptome sind insbesondere Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen, Schwindel sowie Fieber. Bei einem schweren Sonnenstich kann es auch zu einem steifen Nacken bzw. Nackenschmerzen und sogar zu Bewusstseinsstörungen kommen. Besonders gefährdet sind Kleinkinder, aber auch Erwachsene mit lichter werdendem Haar. Auch das Auge ist von der Einwirkung der UV-Strahlung betroffen. Als akute Folge zu starker UV-Bestrahlung können Hornhaut- und Bindehautentzündung auftreten, insbesondere unter dem Einfluss einer stark reflektierenden Umgebung (weiße Oberflächen).

Des Weiteren kann UV-Strahlung zur Bildung von bodennahem Ozon (Reizgas) beitragen. Dieses wird in der bodennahen Luftschicht unter Sonneneinstrahlung aus den sogenannten Ozon-Vorläufersubstanzen (Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid und Methan) gebildet (sog. Sommersmog) und kann zu Kopfschmerzen sowie zu Reizungen der Augen und Atemwege führen. Somit ist es vor allem für Menschen mit chronischen Atemwegserkrankungen wie Asthma sehr belastend.

Zeitlicher Verlauf der Inzidenz von Hautkrebs in Niedersachsen

Die Erkrankungsrate des Malignen Melanoms („schwarzer Hautkrebs“) liegt seit Jahren konstant auf hohem Niveau: bei Frauen an vierter, bei Männern an fünfter Stelle der häufigsten Krebserkrankungen. Die Anzahl der Erkrankungsfälle ist zwar von 2.257 im Jahr 2008 auf 2.588 Fälle im Jahr 2022 um 14,7 % gestiegen (EKN, 2024), wird jedoch das zunehmende Alter der Bevölkerung berücksichtigt, so bleibt die Erkrankungsrate über die Jahre nahezu stabil (Abbildung 55). Die altersstandardisierte Rate bei den Frauen lag 2008 bei 22,6 (Männer 22,5), im Jahr 2022 bei 21,3 (Männer 22,0). Dieser Verlauf entspricht auch den deutschlandweiten Daten (ZFKD 2022). Der sprunghafte Anstieg in 2008 ist auf die Einführung des Hautkrebsfrüherkennungsprogramms für alle gesetzlich Versicherten ab 35 Jahren zurückzuführen.

Die Entwicklung der Fallzahlen anderer bösartiger Hautkrebserkrankungen (ICD-10 C44) in den letzten 15 Jahren ist hingegen nicht eindeutig interpretierbar. So ist auch hier ein Anstieg der Erkrankungsfälle mit Einführung des Hautkrebscreening in 2008 um 28,6 % von 15.568 im Jahr 2008 auf 20.032 Fälle im Jahr 2022 zu beobachten (EKN, 2024). Die altersstandardisierten Raten bei Frauen zeigen einen leichten Anstieg von 107,9 in 2008 auf 116,9 in 2022. Bei den Männern bleiben die Raten auf vergleichbar hohem Niveau zwischen den Jahren 2008 und 2022 mit 145,1 bzw. 146,3 (Abbildung 56).

INFO

- UV-A-Strahlen dringen tief in die Haut ein und verursachen langfristige Schäden; UV-B-Strahlen können Schäden verursachen, die zunächst noch reversibel sind.
- Direkte Sonneneinstrahlung kann zu einem Sonnenstich führen, auch die Augen können negativ betroffen sein.
- Die Erkrankungsrate für das Maligne Melanom ist seit fünf Jahren konstant hoch, bei anderen bösartigen Hautkrebserkrankungen sind die Fallzahlen weniger eindeutig.

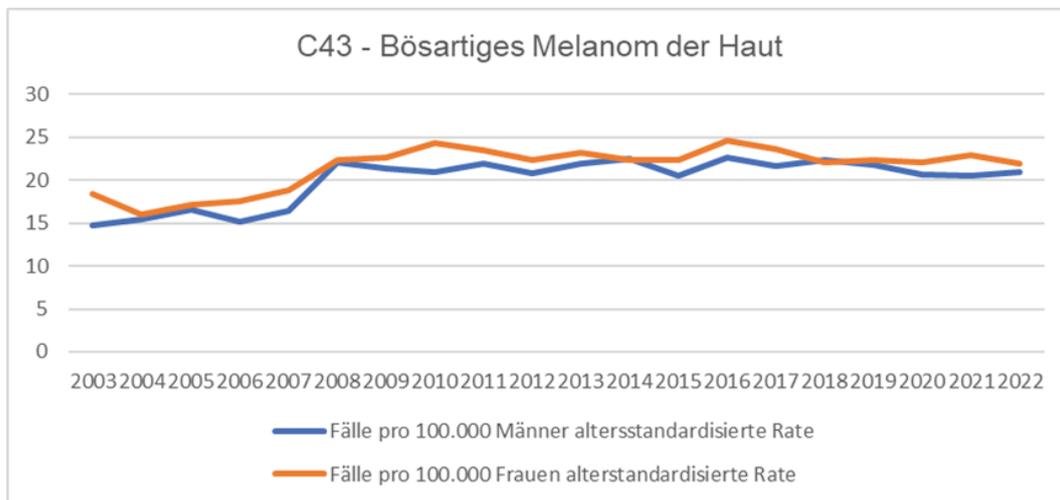


Abbildung 55: Inzidenz Bösartiges Melanom der Haut (ohne DCO) (EKN, Datenstand von 10.04.2024).

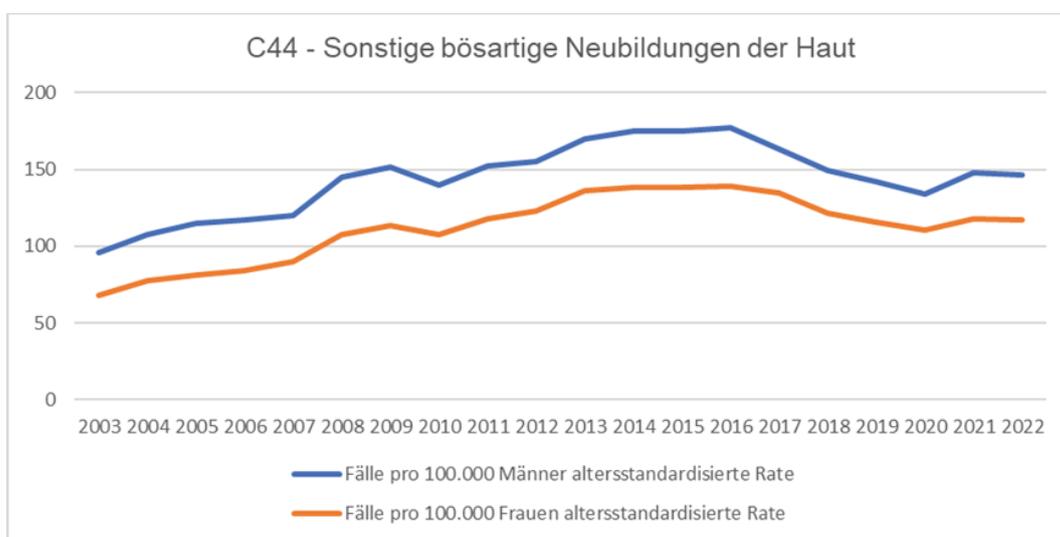


Abbildung 56: Inzidenz Sonstige bösartige Neubildungen der Haut (EKN, Datenstand 10.04.2024).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

In die Entwicklung der Hautkrebsfallzahlen gehen verschiedene Einflüsse ein. Die Interpretation der Zahlen wird auch erschwert durch nicht trennscharfe Klassifikationen bzw. Klassifikationsänderungen innerhalb der Hauterkrankungen.

Aufgrund der Vielzahl von Hautkrebsfällen, die in den nächsten Jahren auch allein aufgrund der zunehmend alternden Bevölkerung noch steigen werden, besteht aus

epidemiologischer Sicht insgesamt auf jeden Fall Handlungsbedarf. Krebserkrankungen sind in vielen Fällen durch individuell vorbeugendes Verhalten vermeidbar.

Risikofaktoren, die die Entstehung von Hautkrebs begünstigen, sind unter anderem wiederholte intensive Sonneneexposition, Sonnenbrände in jedem Alter, künstliche UV-Strahlung in Solarien oder auch UV-Strahlung am Arbeitsplatz sowie genetische Faktoren (RKI, 2023, S. 64ff).

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Gering	

Tabelle 64: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „UV-Strahlung“.

5.1.3 Klimagerechtigkeit

Soziale Ungleichheiten in der Belastung und Anpassungsfähigkeit an direkte und indirekte Folgen des Klimawandels

Die gesundheitlichen Belastungen in Folge des Klimawandels verstärken bestehende soziale Ungleichheiten, wodurch sozial marginalisierte Bevölkerungsgruppen besonders betroffen sind. Diese Gruppen sind aufgrund ihrer sozialen Lage und des breiteren Entwicklungskontexts weniger resilient gegenüber den vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels, wie die IPCC-Berichte (IPCC, 2022, 2023c) und eine Vielzahl an weiteren wissenschaftlichen Studien übereinstimmend darlegen (Romanello et al., 2022; Van Daalen et al., 2022). Die Belastungen steigen und Anpassungskapazitäten sinken, sobald mehrere soziale Dimensionen zusammenkommen. Beispielsweise sind wohnungslose Personen mit geringen sozialen und monetären Ressourcen besonders vulnerabel bei Extremwetterereignissen. Auch ältere Menschen mit niedrigen Renten, die in unzureichend sanierten Wohnungen in Ballungsvierteln leben, sind deutlich stärker von Hitze-, Lärm- und Feinstaubbelastungen betroffen. Auch die Anpassungskapazitäten und Gesundheitsressourcen sind ungleich nach sozialer Lage verteilt, wie z. B. ungleicher Zugang zu Bildung auf Basis von sozioökonomischen Status (European Environment Agency & European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation, 2018; Hornberg & Maschke, 2017; Levy & Patz, 2015; WHO, 2019).

Hintergrund und Stand der Forschung

Klimagerechtigkeit betont die ungleiche Verteilung der gesundheitlichen Folgen des Klimawandels (Buse & Patrick, 2020). Während unterschiedliche Definitionen diskutiert werden, ist die grundlegende Analyseperspektive das Ungleichgewicht zwischen den Verantwortlichkeiten und den verursachten Schäden sowie Maßnahmen gegen dieses Ungleichgewicht (Buse & Patrick, 2020). Damit rückt für Public Health die gesundheitliche Lage vulnerabler Bevölkerungsgruppen in mehrfachbelasteten Lebenswelten und deren Handlungsmacht in lokalen und lokalpolitischen Prozessen in den Vordergrund.

Klimagerechtigkeit gilt mittlerweile als handlungsleitende Strategie für die Analyse von Klimawirkungen, sowie die Gestaltung und Implementierung der sozial ökologischen Transformationsprozesse als Antwort auf den Klimawandel (Bolte et al., 2023; IPCC, 2022; Newell et al., 2021). Auch auf politischer Ebene empfiehlt sowohl der Deutsche Ethikrat (Deutscher Ethikrat, 2024), der Sachverständigenrat für Umweltfragen (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2023) als auch das Umweltbundesamt Klimagerechtigkeit auf der Landesebene (und Bundesebene)

politisch und rechtlich zu verankern (Böhme et al., 2022; Hertig et al., 2023). Dieses Kapitel zu Klimagerechtigkeit und Vulnerabilität der Klimarisikoanalyse Niedersachsen stellt damit als politisches Instrument einen ersten Schritt dar, diese Empfehlungen umzusetzen. Während dieser Ansatz sowohl auf eine Verringerung von potenziellen Gesundheitsrisiken bzw. Stärkung von Gesundheitsressourcen abzielt, können durch die gerechtigkeitsorientierte Ausrichtung zugleich gesellschaftliche Akzeptanz und lokale Demokratie gestärkt werden (Böhme et al., 2022).

Die Public-Health-Forschung nutzt **Intersektionalität** (Crenshaw, 1991) zunehmend als Analyserahmen für gesundheitliche Ungleichheiten. Intersektionalität konzeptualisiert, wie sich multiple Diskriminierungsformen gegenseitig verstärken und überlagern können (Bowleg, 2012; Crenshaw, 1991). Folglich können soziale Determinanten von Gesundheit aus intersektionaler Perspektive nicht einzeln und losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern vielmehr in ihrem Zusammenwirken in den sie bedingenden Systemen von Marginalisierung und Diskriminierung (wie z. B. Rassismus, Kolonialismus und Sexismus) (Bauer et al., 2021; Bolte et al., 2023; Bowleg, 2012; Gkiouleka et al., 2018; Krieger, 2020).

Intersektionalität bietet für die Betrachtung von Klimagerechtigkeit und sozial bedingten gesundheitlichen Ungleichheiten einen bedeutenden Mehrwert. Zudem eignet sich Intersektionalität als Analyse- und Handlungsrahmen für Klimagerechtigkeit und Gesundheit, da 1) sich überlappende oder gegenseitig verstärkende Ungleichheiten sichtbar gemacht werden können, 2) Verteilungsfragen adressiert werden, die für die sozial ökologische Transformation als Antwort auf den Klimawandel und gesundheitliche Chancengleichheit essentiell sind und 3) ein integriertes Vorgehen im Sinne von Health in all Policies stärkt (Amorim-Maia et al., 2022; Anguelovski et al., 2020; Böhme et al., 2022; Bolte et al., 2023; Levy & Patz, 2015; Mlinarić et al., 2023). Somit verspricht die intersektionale Perspektive eine umfassendere, gerechtere und effektivere Analyse und zielgerechtere Maßnahmen zum Abbau sozialbedingter, gesundheitlicher Ungleichheiten im Kontext des Klimawandels.

Aktuell liegen keine spezifischen Studien für Niedersachsen vor, die den Zusammenhang zwischen sozial bedingten gesundheitlichen Ungleichheiten und Klimawirkungen umfassend untersuchen. Daher stützen wir uns auf nationale und internationale Forschungsdaten, um den aktuellen Forschungsstand zu beschreiben und relevante Erkenntnisse für Niedersachsen abzuleiten.

Ein Abgleich mit der Klimawirkungsstudie des Bundes (Wolf et al., 2021) zeigt, dass Klimagerechtigkeit und soziale Ungleichheit bisher unzureichend berücksichtigt werden. Die Umweltgerechtigkeitsstrategie des Landes Berlin zeigt hingegen, wie sozial gerechter Klimaschutz umgesetzt werden kann. Berlin nutzt Praxisleitfäden für sozialraumorientiertes Verwaltungshandeln und gestaltet das Quartiersmanagement partizipativ und vernetzt (SENMVKU, 2024).

Die Verfügbarkeit und Qualität von Daten zu Klimawirkungen und sozial bedingten gesundheitlichen Ungleichheiten in Deutschland und Niedersachsen ist begrenzt. In einem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes zur Datenverfügbarkeit sozialer Aspekte der Umweltpolitik zeigen sich an der niedersächsisch-niederländischen Grenze überdurchschnittlich hohe Mehrfachbelastungen durch Kombinationen von Stickstoffdioxid, Ozon, Feinstaub, Ressourcenverbrauch, Lärm und heißen Tagen. Diese Belastungen variieren nach Haushaltstyp (Single- oder Paarhaushalte), Kaufkraft und Migrationshintergrund und zeigen deutliche Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Gebieten (Moore et al., 2024). Insgesamt sind Klimawirkungs-Indikatoren jedoch häufig aggregiert und wenig aussagekräftig für kleinräumige Betrachtungen. Soziale Unterschiede werden seltener untersucht als biologische Vulnerabilität, und es fehlen kumulative Belastungsanalysen sowie intersektionale Untersuchungen gesundheitlicher Ungleichheiten (Bolte et al., 2023). Zudem erlauben die verfügbaren Daten keine Analyse mehrdimensionaler Merkmalskombinationen, wie zum Beispiel Einkommensverteilung nach Migrationshintergrund und Geschlecht (Moore et al., 2024).

Um die Klimawirkungen im Themenfeld Klimagerechtigkeit und Gesundheit für Niedersachsen dennoch zu betrachten, diskutieren wir auf Basis der Klimarisikoanalyse (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019; Spiekermann & Franck, 2014) im Folgenden Beispiele intersektionaler Dimensionen von Gesundheit und Klimawandel. Gesundheitliche Auswirkungen schließen hier meist a) direkte gesundheitliche Folgen, wie z. B. Verletzungen, b) möglicherweise zeitlich verzögert auftretende, langfristige Auswirkungen, wie z. B. psychische Belastungen sowie c) Anpassungskapazitäten der Betroffenen ein.

Beispiele intersektionaler Dimensionen von Gesundheit und Klimagerechtigkeit in Niedersachsen Überschwemmungen und Sturzfluten (Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft)

In den meisten Regionen Niedersachsens ist mit einer deutlichen Zunahme der Abflusshöhen sowie einer erheblichen Verschärfung der Hochwassersituation in Folge von

Extremwetterereignissen wie Starkregen oder Sturzfluten, insbesondere in flachen Gebieten, zu rechnen (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019).

Besonders hohes Risiko im Fall von Überschwemmungen und Sturzfluten trifft vor allem Schwangere, Kinder sowie ältere und/oder vorerkrankte Personen, immobile Personen, die auf die Hilfe Dritter angewiesen sind oder Einsatzkräfte (Butsch et al., 2023; Flores et al., 2024). Diese Vulnerabilität kann sich bei Mehrfachbelastungen verstärken. Bei Überschwemmungen, wie am Beispiel des Hurrikans Katrina gezeigt, sind sozial benachteiligte und marginalisierte Bevölkerungsgruppen besonders stark betroffen. Diese Gruppen leben häufig in stärker gefährdeten Wohngebieten und leiden unter unzureichendem Katastrophenmanagement sowie Verzögerungen bei der Hilfe (Morse, 2008).

Eine systematische und kontextspezifische Vulnerabilitäts- und Kapazitätsbewertung sozial benachteiligter Bevölkerungsgruppen ist zukünftig für eine effektive Planung der Prävention, Nothilfe und des Wiederaufbaus nach Überschwemmungen somit unerlässlich. Diese sollte sowohl soziodemografische Determinanten als auch systembezogene Wirkmechanismen, wie z. B. ein inklusives, sozial gerechtes Katastrophenmanagement, berücksichtigen (WHO, 2017).

Anstieg von Hitzetagen (Gesundheitsrisiken durch Hitzebelastung)

Die Auswirkungen von Hitze und die Fähigkeit, sich daran anzupassen, unterscheiden sich stark je nach sozialen Faktoren wie Alter, sozialem Status oder Geschlecht (Benmarhnia et al., 2015). Betroffen sind z. B. wohnungslose Menschen, die unter extremer Hitze besonders leiden und wenig Ressourcen zur Steigerung der Anpassungskapazität im Sinne von Schutzmaßnahmen oder Rückzugsmöglichkeiten zur Verfügung haben. Zu den besonders gefährdeten Gruppen gehören auch ältere und vorerkrankte Menschen, Schwangere, Kinder sowie Personen, die im Freien arbeiten (Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen, 2023). Auch das Risiko für hitzebedingte Mortalität steigt (Winklmayr et al., 2022), wobei hier insbesondere regionale Unterschiede zu beobachten sind in Deutschland [39]. Diese sozialen Ungleichheiten spiegeln sich zugleich in arbeitsbezogenen (Narocki, 2021) und geschlechtsspezifischen Ungleichheiten wider (Azoulay, 2024).

Hitzeaktionspläne können als primäres Handlungsfeld des (kommunalen) Öffentlichen Gesundheitsdienstes ein wesentliches Instrument zur Förderung der Klimagerechtigkeit darstellen, indem soziale Ungleichheiten kontextspezifisch von Beginn an in der Exposition sowie gesundheit-

lichen Folgen aus intersektionaler Perspektive betrachtet und angegangen werden (Bolte et al., 2023). Der Deutsche Städtetag betont ebenfalls, dass eine integrierte Herangehensweise an die Themen Gesundheit, Umwelt und Soziales notwendig ist, um Hitzeschutz und gesundheitliche Chancengleichheit miteinander zu verbinden (Deutscher Städtetag, 2023).

Landwirtschaft

Die Zunahme von Extremwetterereignissen, insbesondere Hitze, Sturzfluten und Überschwemmungen sowie die sinkende Grundwasserneubildung haben bedeutende Auswirkungen auf die Landwirtschaft, wie es bereits im HANDLUNGSFELD LANDWIRTSCHAFT beschrieben wurde. Während die Landwirtschaft von zunehmend erschwerten Anbaubedingungen belastet ist, verursacht der Agrarsektor auch einen erheblichen Anteil von Treibhausemissionen in Folge der Flächennutzung, industriellen Tierhaltung und des Einsatzes von Düngemitteln (Bentz-Hözl, 2014).

Während die Klimafolgen wie in den vorangegangenen Kapiteln ungleich in der Bevölkerung verteilt sind, lassen sich auch innerhalb des Landwirtschaftssektors ungleiche Auswirkungen und Anpassungskapazitäten beobachten. Die niedersächsische Landwirtschaft ist, wie auch in anderen Regionen Deutschlands und Westeuropa, durch Arbeitsmigration und teils prekäre Arbeitsverhältnisse geprägt (Caxaj et al., 2023). Relevante Ungleichheitsdimensionen, die sich stark überschneiden, sind zusätzlich zur Arbeitsmigration das Geschlecht, Sprachbarrieren, oder Wohnbedingungen (in Form von Sammelunterkünften) sowie Erfahrungen von Rassismus (Bogoeski, 2022; Caxaj et al., 2023; Fiałkowska & Matuszczyk, 2021; Urrego-Parra et al., 2022). Auch die Arbeit im Freien geht mit einer erhöhten Exposition gegenüber Hitze einher sowie einem erhöhten Risiko von UV-bedingten Gesundheitsschädigungen oder vektorübertragenen Erkrankungen (Hargreaves et al., 2019; Urrego-Parra et al., 2022).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Die Evidenzlage zu Klimawirkungen in sozial marginalisierten Bevölkerungsgruppen in Niedersachsen und insbesondere deren Mehrfachbelastungen ist eingeschränkt. Internationale Evidenz zeigt, dass sich bestehende sozialbedingte gesundheitliche Ungleichheiten in den Klimawirkungen – vor allem durch höhere Exposition, Vulnerabilität und geringere Resilienz – verstärken. Am Beispiel von drei exemplarischen, Niedersachsenspezifischen Kontexten lassen sich diese Wirkungen und Tendenzen auch für Niedersachsen erkennen. Um die Evidenzlage zu Klimawirkungen in mehrfach belasteten, sozial marginali-

sierten Bevölkerungsgruppen in Niedersachsen auszubauen und in zielgerichtetes politisches Handeln zu übertragen, sollten die folgenden drei Ansatzpunkte handlungsleitend sein:

- 1. Klimagerechtigkeit als Public Health Strategie:** Klimagerechtigkeit stellt für Public Health eine ganzheitliche Strategie dar, um Klimaschutz und Klimaanpassung sozial gerecht zu gestalten und das menschliche Wohlbefinden zu sichern (Böhme et al., 2022; Buse & Patrick, 2020; Hertig et al., 2023; Mlinarić et al., 2023). Es ist essenziell, soziale Gerechtigkeit und gesundheitliche Chancengleichheit systematisch in die (wissenschaftliche) Analyse sowie die Planung, Umsetzung und Evaluation politischer Programme und Maßnahmen einzubeziehen.
- 2. Intersektionales Erfassen und Bewerten von Mehrfachbelastungen:** Sich überschneidende und gegenseitig verstärkende Mehrfachbelastungen im Kontext von Klimawirkungen auf Gesundheit gilt es systematisch zu erfassen sowie deren Auswirkungen zu bewerten. Dies erfordert kontinuierliches Monitoring und Berichterstattung, um evidenzbasierte Entscheidungen treffen zu können (Bolte et al., 2023; Moore et al., 2024).
- 3. Intersektorale Verhältnis- und Verhaltensprävention:** Eine intersektorale und abgestimmte Präventionsstrategie ist erforderlich, die sowohl verhältnispräventive als auch verhaltenspräventive Maßnahmen umfasst (Hertig et al., 2023; Mlinarić et al., 2023). Diese Maßnahmen sollten evidenzbasiert und zielgruppenspezifisch sein, um die Bedürfnisse sozial benachteiligter Bevölkerungsgruppen zu adressieren und deren Teilhabechancen sowie Anpassungskapazitäten zu erhöhen (Bolte et al., 2023; Moore et al., 2024).

Klimagerechtigkeit in Transformationsmaßnahmen zu integrieren, erhöht die gesundheitliche Chancengleichheit und stärkt die Demokratie, indem sie gesellschaftliche Teilhabe, Sozialverträglichkeit, eine höhere Resilienz vulnerabler Gruppen und Zugehörigkeit fördert. Intersektorale Verhältnis- und Verhaltensprävention (Health Equity in all Policies) ist ein potenziell sehr geeigneter Lösungsansatz für die Schaffung von Klimagerechtigkeit. Beispielsweise können konkrete Verbesserungen in der grünen Infrastruktur, im Wohnumfeld, in der Mobilität, bei der Arbeit im Freien und in der sozialen Wohnpolitik herbeigeführt werden und somit Folgen des Klimawandels sozialverträglich abgebaut werden. Sozialverträgliche Transformationsprozesse sind folglich ein zentraler Baustein für erfolgreichen Klimaschutz mit hohen Potenzialen; ihre endgültige Wirksamkeit hängt jedoch von vielfältigen sozioökonomischen und politischen Faktoren ab (s. Tabelle 67).

INFO

- Soziale Ungleichheiten führen zu einer unterschiedlichen Belastung durch und Anpassung an direkte und indirekte Folgen des Klimawandels.
- Die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels treffen insbesondere sozial marginalisierte Gruppen. Die Belastungen steigen und Anpassungsmöglichkeiten sinken, wenn mehrere Formen sozialer Benachteiligung zusammenkommen.
- Intersektionalität konzeptionalisiert, wie sich mehrere Diskriminierungsformen gegenseitig verstärken und überlagern können und dient der Betrachtung der komplexen Wechselwirkungen von Klimafolgen für marginalisierte Gruppen.
- Für Niedersachsen liegen keine spezifischen Studien vor, die den Zusammenhang zwischen gesundheitlichen Ungleichheiten und Klimawirkungen umfassend untersuchen.
- Besonders hohe Risiken durch Überschwemmungen und Sturzfluten treffen vor allem Schwangere, Kinder, ältere, vorerkrankte und mobilitätseingeschränkte Personen.
- Alter, sozialer Status und Geschlecht beeinflussen, wie sehr Hitze uns trifft und wie gut wir uns an sie anpassen können.
- Die Klimafolgen durch Landwirtschaft treffen nicht nur außerhalb, sondern auch innerhalb des Landwirtschaftssektors verschiedene Gruppen unterschiedlich stark.
- Internationale Evidenz zeigt, dass sich bestehende sozialbedingte gesundheitliche Ungleichheiten in den Klimawirkungen verstärken.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 65: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Klimagerechtigkeit“.

5.1.4. Vektoren und Nagetiere: Übertragung klimasensibler Infektionskrankheiten

Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit führen zu veränderten Häufigkeiten von Infektionskrankheiten (Klimasensibilität). Ein mögliches Beispiel stellt die aufgrund eines temperaturbedingt stärkeren Bakterienwachstums steigende Gefahr für lebensmittelassoziierte Erkrankungen dar, wenn bei höheren Außentemperaturen Hygienegrundsätze oder Kühlketten weniger eingehalten werden. Die Infektionsmeldungen der letzten Jahre zeigen hierzu noch keinen eindeutigen Trend. Die Daten zu lebensmittelassoziierten Infektionen werden im Rahmen der Meldepflicht gemäß dem Infektionsschutzgesetz (IfSG) kontinuierlich beobachtet, um frühzeitig Maßnahmen ergreifen zu können.

Hintergrund und Stand der Forschung

In der Regel liegen bei klimasensiblen Infektionskrankheiten multiple Einflussfaktoren vor, deren komplexes Zusammenspiel noch nicht in Gänze erforscht wurde. Dies ist insbesondere bei vektorübertragenen Erkrankungen der Fall. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass viele Zecken- und Mücken-Arten vom Klimawandel profitieren und daraus auch eine erhöhte Gefahr durch die von ihnen übertragenen Krankheitserreger resultiert. Die für Deutschland gesundheitlich relevanteste Schildzeckenart, der gemeine Holzbock *Ixodes ricinus* (u. a. Überträger von *Borrelia burgdorferi* s.l. oder des Frühsommermeningoencephalitis-Virus), ist auch in Niedersachsenflächendeckend verbreitet (NLGA, 2024c). Mildere Winter verlängern die Aktivitätsperiode der Zecken und erhöhen so die Chance der Entwicklungsstadien, auf geeignete Wirte zu treffen. Zudem verkürzt sich die Gesamtentwicklungszeit und die Zeckendichte kann sich erhöhen. Für Niedersachsen ist inzwischen eine ganzjährige Zeckenaktivität nachgewiesen. Fälle der vom Holzbock übertragenen Borreliose werden in ganz Niedersachsen diagnostiziert (NLGA, 2024c). Im Rahmen der NAKO Gesundheitsstudie wurden in der Region Hannover (2014–2028) 3,1 % der 8.009 Studienteilnehmer:innen seropositiv für Borrelien-IgG Antikörper getestet.

Der Erreger der nach IfSG meldepflichtigen Frühsommermeningoencephalitis (FSME) war bislang überwiegend im Süden, Südosten und eher vereinzelt im Norden Deutschlands verbreitet. So sind in den Jahren 2002 bis 2015 zehn, in den Jahren 2016 bis 2019 22 und in den Jahren 2020 bis 2024 18 FSME-Erkrankungen bekannt geworden, bei denen die Infektion in Regionen Niedersachsen erfolgte (sogenannte autochthone Infektionen). 2019 wurden der Landkreis Emsland und 2025 der Landkreis Celle zu Risikogebieten erklärt. Die fehlende Ausweisung von Landkreisen als Risikogebiet schließt die Verbreitung

des FSME-Virus in den Zeckenpopulationen in weiteren Gebieten nicht aus. Bestätigt wird dies durch ein Zeckenmonitoring, das seit 2008 vom NLGA und seit 2018 in Kooperation mit der Tierärztlichen Hochschule Hannover (TiHo) durchgeführt wird. Schwerpunkte bei den Sammelaktionen sind unter anderem die niedersächsischen Regionen, aus denen autochthone FSME-Fälle berichtet wurden. Mehr als 70.000 *Ixodes* spp. Zecken an über 500 Stellen in ganz Niedersachsen sind mittlerweile untersucht worden. Das FSME-Virus konnte in wenigen Zecken in den niedersächsischen Regionen LK Cuxhaven, Celle, Nienburg, Emsland und Region Hannover nachgewiesen werden. Mit Borrelien waren je nach Sammelregion bis zu 40 % der Zecken infiziert, was der allgemeinen Prävalenz der Durchseuchung der Zeckenpopulation bundesweit entspricht (NLGA, 2024d).

Zeckenlarven und -nymphen stechen für ihre Blutmahlzeit überwiegend Kleinsäuger wie z. B. Mäuse, deren Populationsdichten ebenfalls vom Klima beeinflusst werden. Ist der Juli warm und trocken, begünstigt dies eine Eichen- und Buchenmast im Folgejahr mit einer erhöhten Nagerdichte aufgrund des gestiegenen Nahrungsangebotes. Mäuse spielen jedoch nicht nur als Wirtstiere für Zecken und als Reservoir für zeckenübertragene Erkrankungen eine Rolle, sondern sind auch wichtige Reservoirs für zoonotische Infektionserreger, die ohne einen weiteren Vektor auf Menschen übertragen werden können. Hierzu zählt das Hantavirus, für das in den vergangenen Jahren regelhaft Ausbruchsjahre verzeichnet wurden. Hierbei ist zu beobachten, dass sich parallel zu einer erhöhten Frequenz von Buchenmastjahren auch die Abstände zwischen Ausbruchsjahren mit dem Hantavirus verkürzt haben (NLGA, 2024a; Schmitz et al., 2023).

Das ebenfalls von Mäusen übertragene Bakterium der Gattung *Leptospira* führte in Deutschland im Zusammenspiel von heißen Sommertemperaturen und Starkregenereignissen zu Leptospiroseausbrüchen unter Erdbeerpflückern (Dreesman et al., 2016) und unter Teilnehmern von Sportereignissen (Brockmann et al., 2010). Im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojekts „Rodent Borne Diseases and Public Health (RoBoPub) wurde ein Prognosemodell für Hantavirus-Erkrankungen in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen entwickelt. Das auf Grundlage von Meldedaten (IfSG) und Umweltparametern entwickelte Modell erlaubt eine Prognose für das Folgejahr und ist über die NLGA-Homepage abrufbar.

Klimaveränderungen begünstigen außerdem die Etablierung von invasiven Vektoren, die bislang ausschließlich in wärmeren Regionen verbreitet waren. Exemplare der in Afrika, Asien und Südeuropa beheimateten und von Zug-

vögeln eingeschleppten **Hyalomma**-Zecke (**Hyalomma marginatus**, **Hyalomma rufipes**) wurden bis vor wenigen Jahren lediglich sporadisch in Deutschland gefunden. Seit 2018 erlaubten die klimatischen Bedingungen den von Zugvögeln abfallenden Nymphen, sich in größerer Zahl zu erwachsenen Zecken zu häuten und sich auf Wirtssuche zu begeben. In Niedersachsen wurden erwachsene **Hyalomma**-Zecken z. B. an Pferden und Schafen in den Landkreisen Aurich, Leer, Grafschaft Bentheim, Oldenburg, Harburg und in der Region Hannover gefunden. Eine Etablierung dieser Zeckengattung wurde in Deutschland bislang jedoch nicht bestätigt.

Unter den Stechmücken finden sich in Deutschland inzwischen ebenfalls invasive Arten. Aufgrund ihrer ausgeprägten Vektorkompetenz für Dengue-, Chikungunya- und Zikaviren ist hierbei die asiatische Tigermücke **Aedes albopictus** von besonderer Bedeutung. Seit ihrem Erstnachweis 2007 in Deutschland konnte sich diese wärme-liebende Art entlang des Oberrheins ausbreiten. Neben einer lokalen Ausbreitung unter günstigen klimatischen Bedingungen spielt der Personen- und Warenverkehr eine große Rolle für die Verschleppung von Tigermücken über größere Distanzen, z. B. per Auto, Flugzeug oder Container-Schiffen. Hierauf sind vermutlich auch zwei Einzelfunde im Stadtgebiet Hannover in 2023 zurückzuführen. Eine weitere invasive Stechmückenspezies, die asiatische Buschmücke **Aedes japonicus**, ist an ein gemäßigttes Klima angepasst und wird bereits seit 2012 in Niedersachsen nachgewiesen. Experimentell überträgt die asiatische Buschmücke ebenfalls diverse Arboviren. Ihre epidemiologische Bedeutung ist jedoch noch nicht geklärt (NLGA, 2024b).

Auch heimische Stechmückenspezies können von warmen, regenreichen Sommern profitieren, da sich ihre Generationszeit bei höheren Temperaturen verkürzt und für viele Spezies mehr potenzielle Bruthabitate entstehen. Dies könnte unter anderem für die gemeine Hausmücke **Culex pipiens** von Bedeutung sein, die als Hauptüberträger für das in östlichen Bundesgebieten bereits als endemisch eingestufte West-Nil-Virus (WNV) fungiert. Im Jahr 2024 traten in Niedersachsen die ersten autochthonen, d. h. in Niedersachsen erworbenen, Humaninfektionen mit dem WNV auf. Die drei Fallmeldungen erfolgten in zeitlichem Zusammenhang mit einem erstmals großflächigen Auf-

treten von WNV-Infektionen bei Pferden und Vögeln in Niedersachsen. Von August bis November 2024 wurden insgesamt 68 Infektionen bei Pferden und vier WNV-positive Wildvögel ausgewiesen (Klier et al., 2025; TSIS, 2025).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Waldumbauten auf Grundlage des Programms zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten (LÖWE+) erhöhen in Niedersachsen den Anteil an Laub- und Mischwäldern. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der Buche zu. Hier von könnten Mäusepopulationen profitieren, insbesondere lokal in Regionen mit bislang vorherrschendem Nadelbaumbestand. Ein größeres Angebot an Wirtstieren sowie günstige Mikrohabitate in Eichen-Buchen-Mischwäldern könnten **Ixodes ricinus**-Populationen weiter fördern und damit auch die Gefahr für zeckenübertragene Infektionskrankheiten erhöhen. Aufgrund der in Niedersachsen vorhandenen ausgedehnten Vogelzuggebiete ist mit einer weiteren Einschleppung und eventuell auch Etablierung neuer Zeckenarten zu rechnen.

Temperaturmodellierungen lassen eine Ausweitung der Gunsträume für Tigermücken auch auf Niedersachsen erwarten (L. K. Koch et al., 2016). Andere Stechmückenarten und die von ihnen übertragenen Erreger profitieren ebenfalls von steigenden Temperaturen. Bis in die 1950er Jahre war Niedersachsen Malariagebiet. Die Überträgermücke *Anopheles* spp. ist nach wie vor in Niedersachsen heimisch und Klimamodelierungen zeigen, dass der jährliche Zeitraum für eine potentielle Übertragung des Malariaparasiten bis zum Jahr 2100 auf sechs Monate steigen könnte (Schröder & Schmidt, 2014). Im Einzelfall wäre also ein Wiederauftreten autochthoner Malariainfektionen im Umfeld infizierter Reiserückkehrer denkbar, aber eher unwahrscheinlich, da betroffene Personen schnell hospitalisiert werden und somit nicht mehr als Infektionsquelle für *Anopheles*-Mücken fungieren können.

Inwieweit Programme zur Wiedervernässung der Moore die Stechmückenfauna und das Auftreten von stechmückenübertragenen Erkrankungen beeinflussen könnten, ist zurzeit Gegenstand der Forschung (Projekt „Culimoor“, BMFTR (2025)).

INFO

- Im Rahmen des Klimawandels nehmen mildere Winter und extreme Wetterereignisse zu, die die Epidemiologie vektorübertragener und zoonotischer Infektionskrankheiten zunehmend beeinflussen.
- Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass viele Zecken- und Mückenarten vom Klimawandel profitieren.
- Veränderte klimatische Bedingungen begünstigen die dauerhafte Ausbreitung und Etablierung invasiver Vektoren und vektorassoziierter Infektionserreger (z. B. Dengue-Virus, West-Nil-Virus, Chikungunya-Virus oder Malaria (Plasmodium))
- Veränderungen in der Landnutzung und im Verhalten erhöhen die Exposition mit Vektoren bzw. den vektorübertragenen Krankheitserregern. Mit dem Auftreten der bislang mit Reisen assoziierten Infektionskrankheiten (z. B. Dengue, West-Nil, Chikungunya) ist zu rechnen.

Bewertung des Klimarisikos

Aufgrund des bereits ausgedehnten Vorkommens von **Ixodes ricinus** in Niedersachsen und einer schon vorhandenen Grundsensibilisierung für zeckenübertragene Erkrankungen in der Bevölkerung wird das aus einer Abundanzveränderung der Zeckenvektoren resultierende Risiko als mittel eingestuft. Auch in Niedersachsen ist mit dem vermehrten Auftreten von autochthonen FSME-Infektionen zu rechnen.

Für die Etablierung neuer Stechmückenvektoren, wie z. B. der asiatischen Tigermücke, besteht aktuell ein mittleres Risiko. Mit der Einschleppung einzelner Individuen über den Personen- und Warenverkehr ist zu rechnen. In

wieweit sich unter günstigen Temperaturbedingungen lokal Populationen ansiedeln werden, wird maßgeblich vom Erfolg ergriffener Eindämmungsmaßnahmen bestimmt. Nach dem Auftreten der ersten autochthonen humanen West-Nil-Virus-Infektionen im Jahr 2024 ist, wie schon in den östlichen Bundesländern beobachtet, auch in Niedersachsen mit einer weiteren Ausbreitung und Endemisierung zu rechnen.

Für die zoonotischen Erreger Hantavirus und Leptospiren ist im Zusammenspiel von Landnutzung und klimatischen Bedingungen ebenfalls von einer Zunahme von Infektionen auszugehen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Gewissheit		Hoch		Mittel	

Tabelle 66: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vektoren und Nagetiere“.

5.1.5 *Vibrio vulnificus*

Vibrio vulnificus gehört zu einer Gruppe von Bakterien, den Vibrionen, die natürlicherweise in Brackwasser und Meerwasser vorkommen. Bei hohen Wassertemperaturen (> 20 °C) kann sich die Konzentration dieser Vibrionen in Meerwasser deutlich erhöhen. Erkrankungen durch *Vibrio vulnificus* sind in Deutschland zwar selten, zeichnen sich jedoch durch einen sehr ernsthaften Verlauf in Form von schweren Wundinfektionen und Blutvergiftungen (Sepsis) aus. Besonders gefährdet sind Menschen mit chronischen Vorerkrankungen und offenen Wunden.

Hintergrund und Stand der Forschung

Infektionen kommen in Deutschland hauptsächlich an der Ostsee vor. Setzt man die aktuellen Fallzahlen zur Zahl der Besucher an der gesamten Ostsee ins Verhältnis, so wird deutlich, dass diese Erkrankungen sehr seltene Ereignisse sind.

Vibrionen können auch in Nordseeegewässern vorkommen. Nachweise gibt es vor allem im Bereich der großen Flussmündungen von Ems, Weser und Elbe. Die Infektionswahrscheinlichkeit an der Nordsee ist allerdings wesentlich geringer als in der Ostsee, da *Vibrio vulnificus* in der Nordsee nicht so häufig und wenn, dann in geringeren Konzentrationen vorkommt. Dies liegt zum einen am höheren Salzgehalt der Nordsee und zum anderen an den vielen großflächigen Gewässerbereichen mit geringem Wasseraustausch an der Ostseeküste (z. B. Boddengewässer und Haffe). In den letzten zehn Jahren wurden keine *Vibrio*-Infektionen mit Ursprung in Niedersachsen gemeldet. Dies bestätigt, dass die Infektionswahrscheinlichkeit in Niedersachsen als sehr gering einzustufen ist.

Da Vibrionen natürlicherweise in Meer- und Brackwasser vorkommen und eine Vermehrung maßgeblich vom Salzgehalt und der Temperatur abhängig ist, gibt es keine nachhaltigen Maßnahmen um das Vorkommen von Vibrionen direkt im Gewässer zu reduzieren. Daher zielen Maßnahmen eher darauf ab, die Ärzteschaft sowie die Öffentlichkeit zu informieren und für das Thema zu sensibilisieren, um bei einer Infektion eine schnelle zielgerichtete Behandlung zu ermöglichen.

Das NLGA führt am Standort Aurich seit mehr als zehn Jahren ein Monitoring an der Nordseeküste durch, das sich überwiegend auf Bereiche mit Süßwassereinfluss, also die Flussmündungsgebiete konzentriert, die eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Vibrionen aufweisen.

In den letzten zehn Jahren konnte kein Anstieg der *Vibrio vulnificus*-positiven Proben an den ausgewählten Probenahmestellen beobachtet werden (Abbildung 57).

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Da *Vibrio vulnificus* häufiger und in höheren Konzentrationen vorkommt, wenn die Wassertemperaturen über 20 °C steigen, könnte der Klimawandel in Zukunft zu einem häufigeren Vorkommen von *Vibrio vulnificus* und somit auch zu einer Zunahme von *Vibrio*-Infektionen führen.

Weitere Untersuchungen, wie z. B. die Analyse von Pathogenitätsfaktoren der gewonnenen Isolate, könnten weitere wichtige Erkenntnisse zu dem Vorkommen von pathogenen Vibrionen in Niedersachsen liefern.

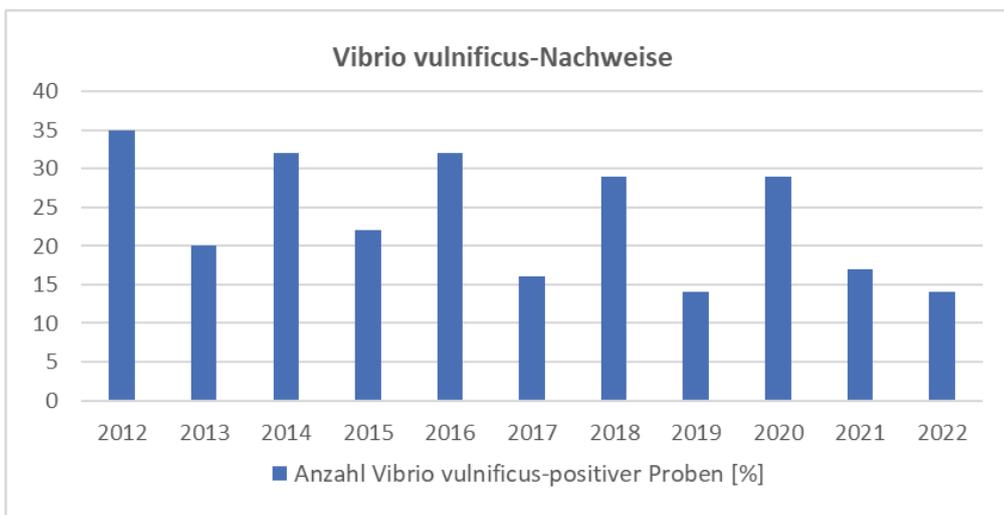


Abbildung 57: Anteil der Proben, in denen *Vibrio vulnificus* nachgewiesen wurde (Datengrundlage: NLGA, 2024).

INFO

- Vibrio vulnificus können bei hohen Temperaturen deutlich erhöht im Meerwasser vorkommen.
- Der Klimawandel macht das Vorkommen von Vibrio vulnificus in Zukunft wahrscheinlicher.
- In den letzten zehn Jahren konnte kein Anstieg der Vibrio vulnificuspositiven Proben an den ausgewählten Probenahmestellen beobachtet werden.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
Gewissheit		Mittel		Mittel	

Tabelle 67: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Vibrio vulnificus“.

5.1.6 Cyanobakterien (Blaualgen)

Cyanobakterien sind Bakterien, die natürlicherweise in vielen Gewässern vorkommen und Photosynthese betreiben. Weil ihre Färbung oft blau-grün ist, werden sie auch Blaualgen genannt. Massenvermehrungen von Cyanobakterien treten vor allem in nährstoffreichen Gewässern bei hoher, langandauernder Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen auf. Die niedersächsischen Daten zeigen, dass in den sehr heißen, trockenen und langen Sommern 2018 und 2022 signifikant mehr Gewässer betroffen waren und auch im Vergleich zu den anderen Jahren eine erhöhte Anzahl von Meldungen und Badeverboten ausgesprochen wurde. Der mögliche Einfluss des Klimawandels auf das Vorkommen von Cyanobakterienblüten ist sehr komplex und kann von Gewässer zu Gewässer unterschiedlich sein. Daher ist eine verallgemeinerte Aussage zur Auswirkung des Klimawandels auf die Massenvermehrung von Cyanobakterien nicht möglich.

Hintergrund und Stand der Forschung

Bei durch den Klimawandel wärmer und länger werdenden Sommern ist u. U. in einigen Gewässern mit einer häufigeren Massenvermehrung von Cyanobakterien zu rechnen.

Cyanobakterien produzieren verschiedene Toxine, vor allem Leber- und Neurotoxine. Diese Toxine können bei starker Exposition zu Schädigungen der Nieren, Leber und der Nerven führen. Symptome wie Übelkeit, Erbrechen, Durchfälle, Bindehautentzündungen und Atemwegserkrankungen werden häufiger in Zusammenhang mit dem Kontakt mit Cyanobakterienblüten beschrieben. Auch Haut- und Schleimhautreizungen sowie allergische Reaktionen können durch Zellbestandteile der Cyanobakterien ausgelöst werden. Besonders gefährdet sind im Flachwasser spielende Kleinkinder, Hunde und Wildtiere, da sie die größten Wassermengen aufnehmen.

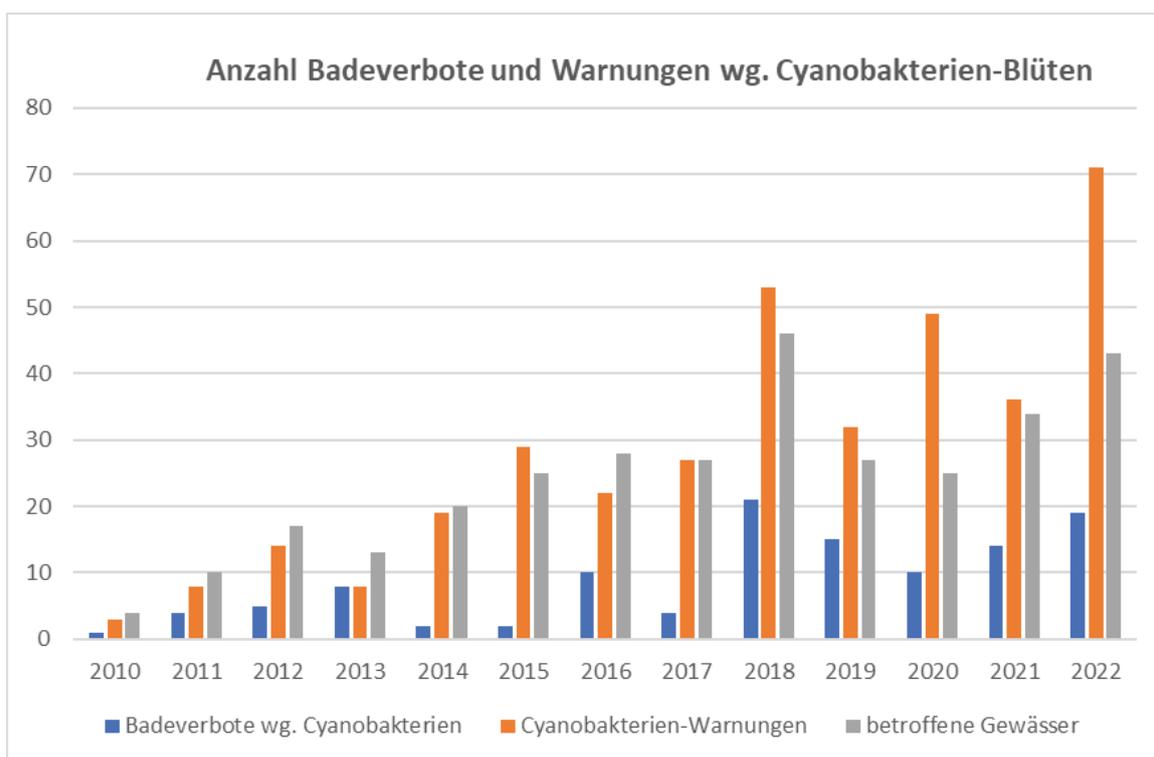


Abbildung 58: Anzahl der von den Gesundheitsämtern in Niedersachsen ausgesprochenen Badeverbote und Warnungen wegen der Massenvermehrung von Cyanobakterien in EU-Badegewässern (Datengrundlage: NLGA, 2024).

Als erfolgreichste und nachhaltigste Maßnahme wird grundsätzlich die Reduktion von Nährstoffen im Gewässer beschrieben. Dazu müssen Eintragspfade identifiziert und die Einträge minimiert werden. Auch eine Phosphat-Fällung im Gewässer kann ggfls. als Maßnahme sinnvoll sein. Gewässersanierungen und auch Zufluss-Regulierungen sind in der Regel jedoch mit sehr hohen Investitionen verbunden.

EU-Badegewässer werden gemäß der niedersächsischen Badegewässerverordnung von den Gesundheitsämtern mindestens alle vier Wochen zur Probenahme für mikrobiologisch-hygienische Parameter aufgesucht. Dabei werden die Gewässer auch optisch auf die Massenentwicklung von Cyanobakterien geprüft. Beim Vorkommen von Cyanobakterien wird die Überwachung intensiviert und ggfls. die Cyanobakterien-Arten bestimmt um abzuschätzen, ob es sich um toxinbildende Arten handelt. Wenn dies der Fall ist, wird eine Warnung ausgesprochen oder ggfls. ein Badeverbot verhängt.

In der Abbildung 58 sind die in Niedersachsen ausgesprochenen Badeverbote und Warnungen wegen der Massenvermehrung von Cyanobakterien in EU-Badegewässern, sowie die Anzahl der betroffenen Badegewässer dargestellt.

Die Abbildung deutet an, dass es seit 2010 zu einem Anstieg der Cyanobakterienblüten gekommen ist. Allerdings ist hier mit einem starken Meldeeffekt der Gesundheitsämter zu rechnen, da die Überwachung auf Cyanobakterien mit den Jahren eine größere Aufmerksamkeit bekommen hat. So wurde z. B. im Jahr 2015 die Empfehlung des Umweltbundesamtes „Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen“ veröffentlicht, in der ein für die Gesundheitsämter hilfreiches Überwachungsschema dargestellt ist und auch insgesamt nochmal für das Thema sensibilisiert wurde.

Aus den Daten kann also nicht direkt eine Zunahme der Massenvermehrung von Cyanobakterien in den EU-Badegewässern abgeleitet werden. Auffällig ist jedoch, dass in den sehr heißen, trockenen und langen Sommern 2018 und 2022 signifikant mehr Gewässer betroffen waren und auch im Vergleich zu den anderen Jahren eine erhöhte Anzahl von Meldungen und Badeverboten ausgesprochen wurde. Das zeigt, dass es in durch den Klimawandel bedingten heißer und länger werden Sommern häufiger zu Cyanobakterienblüten kommen könnte.

Erwartete Entwicklung bis Mitte (2031–2060) und Ende (2071–2100) des Jahrhunderts

Der Einfluss des Klimawandels auf das Vorkommen von Cyanobakterienblüten in niedersächsischen Gewässern lässt sich insgesamt schwer vorhersagen und kann nicht verallgemeinert werden, da das Wachstum von Cyanobakterium von verschiedenen Faktoren wie z. B. Wetterverhältnissen, Schichtungen und Nährstoffgehalt der Gewässer abhängig ist. Nach einem Review von Chorus et al. (2021) ist davon auszugehen, dass einige Gewässer bezogen auf das Vorkommen von Cyanobakterienblüten vom Klimawandel beeinflusst werden und andere wiederum nicht oder weniger. Möglich ist auch ein Effekt in beide Richtungen, also dass der Klimawandel bei bestimmten Gewässern günstigere Bedingungen, bei anderen wiederum ungünstigere Bedingungen für das Auftreten von Cyanobakterienblüten schaffen könnte. Das zeigt, dass der Einfluss des Klimawandels auf das Vorkommen von Cyanobakterienblüten sehr komplex ist und von Gewässer zu Gewässer unterschiedlich sein und daher nicht verallgemeinert werden kann.

Um solidere Daten zum Einfluss des Klimawandels auf das Vorkommen von Cyanobakterienblüten in Niedersachsen zu bekommen, wären umfangreiche Messprogramme an vielen verschiedenen Gewässern über einen langen Zeitraum notwendig.

INFO

- Wie sich der Klimawandel auf die Bildung von Cyanobakterien auswirkt, kann von Gewässer zu Gewässer unterschiedlich sein.
- Der Kontakt mit den durch Cyanobakterien produzierten Toxinen kann zu diversen Symptomen führen; bei starker Exposition können die Toxine Nieren, Leber und Nerven schädigen.
- Aus den Daten kann nicht direkt eine Zunahme der Cyanobakterien-Massenvermehrung abgeleitet werden. Auffällig sind aber die Sommer 2018 und 2022, in denen mehr Gewässer betroffen waren.
- Der Einfluss des Klimawandels auf Cyanobakterien-Vorkommen lässt sich insgesamt schwer vorhersagen.

	Gegenwart	2031–2060		2071–2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel
Gewissheit		Gering		Gering	

Tabelle 68: Das Klimarisiko für die Klimawirkung „Cyanobakterien“.



6 Integrierte Auswertung

Für die drei Cluster Land, Wasser und Gesundheit werden die Klimarisiken zusammenfassend betrachtet. Dies erfolgt zunächst innerhalb der jeweiligen Handlungsfelder über alle betrachteten Klimawirkungen, anschließend dann handlungsfeldübergreifend anhand der klimatischen Wirkung und räumlichen Exposition. Anschließend werden Handlungserfordernisse abgeleitet und ein abschließendes Fazit gezogen.



6.1 Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne zukünftige Anpassung

Sowohl das Ausmaß der Klimarisiken als auch die Gewissheit für das Eintreten der Risiken unterscheiden sich für die betrachteten Klimawirkungen teilweise erheblich, sowohl innerhalb eines Handlungsfeldes als auch über alle Handlungsfelder hinweg. Dies gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass je nach Klimawirkung sehr unterschiedliche Handlungsbedarfe im Hinblick auf die notwendige Anpassung an den Klimawandel und seine Folgen erforderlich sind.

So gibt es einige wenige Bereiche, in denen bereits heute ein hohes Klimarisiko besteht (STOFFAUSTRAG AUS DEM BODEN IN DAS GRUNDWASSER, GESUNDHEITSRISIKEN DURCH HITZEBELASTUNG). Andere Klimawirkungen weisen heute noch ein eher geringes Risiko auf, da sich hier entweder der Klimawandel noch nicht bemerkbar gemacht hat oder Maßnahmen zur Anpassung bereits in der Vergangenheit umgesetzt wurden, bzw. aktuell werden.

Im optimistischen Fall ändert sich das Klimarisiko bei den meisten Klimawirkungen zukünftig eher wenig bzw. verringert sich gegenüber den gegenwärtigen Verhältnissen sogar. Nur in Einzelfällen kommt es hier schon zu einer Verschlechterung, dies aber häufig erst am Ende des Jahrhunderts (z. B. HITZESTRESS BEI UND LEISTUNGEN VON NUTZTIEREN, MEERESPIEGELANSTIEG, ENTWÄSSERUNG DER KÜSTENNIEDERUNGEN, STARKREGEN, MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER). Im pessimistischen Fall ergeben sich hingegen für viele Klimawirkungen eher hohe Klimarisiken, vor allem am Ende des Jahrhunderts.

Ein besonderes Augenmerk ist auf Klimarisiken zu richten, die eine hohe Gewissheit haben und ein hohes Risiko aufweisen. Das sind die Klimarisiken MEERESPIEGELANSTIEG, ENTWÄSSERUNG DER KÜSTENNIEDERUNGEN, GESCHÜTZTE NIEDERUNGSGEBIETE DER FESTLANDSKÜSTE und GESUNDHEITSRISIKEN DURCH HITZEBELASTUNG.

6.1.1 Handlungsfeld Boden

Die Böden von Niedersachsen werden in ihren Eigenschaften und Leistungen durch den Klimawandel beeinflusst. Insbesondere die Bodenfunktionen, also die Leistungen, die die Böden für die Gesellschaft und die Ökosysteme bereitstellen, unterliegen Veränderungen. Zudem steigt das Gefahrenpotenzial für die Ressource Boden durch Degradationsprozesse an. Diese Auswirkungen des Klimawandels sind jedoch nicht in ganz Niedersachsen einheitlich zu bewerten, sondern fallen aufgrund der unterschiedlichen Böden und Standorteigenschaften variabel aus. Daher müssen die Klimarisiken im Handlungsfeld Boden räumlich differenziert betrachtet und bewertet werden.

Die im Handlungsfeld Boden betrachteten Klimarisiken sind maßgeblich durch die Klimawirkungen der Temperaturzunahme (und der damit einhergehenden gesteigerten Verdunstung) und einer saisonalen Verschiebung der Niederschläge sowie die Änderungen in der Häufigkeit und Dauer von extremen Wetterlagen (Trockenperioden, Hitzeperioden, niederschlagsreiche Perioden etc.) begründet. Dabei ist die Temperaturzunahme sehr sicher, die Veränderungen beim Niederschlag sind für Niedersachsen hingegen mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Die hier vorliegende Analyse konzentriert sich auf die Klimarisiken mit Bezug auf den Bodenwasserhaushalt und auf den Bodenabtrag. Durch die klimawandelbedingte Veränderung des Niederschlagsregimes und die Erhöhung der Verdunstung steht den Böden im Frühjahr und Sommer zukünftig meist weniger Wasser zur Verfügung. Erhöhte Niederschläge in den Wintermonaten verstärken gleichzeitig das Risiko, dass die Retentionsleistung der Böden nicht mehr ausreicht, um Hochwasserrisiken zu verringern. Auch der Stoffaustrag kann durch mehr Niederschlag und Sickerwasser im Winter erhöht werden.

Das Klimarisiko für Bodenabtrag durch Wasser steigt aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit von extremen Niederschlägen an. Die Bewertung ist jedoch mit hohen Unsicherheiten belegt, da hier kein Ensemble für die Betrachtung zur Verfügung steht, und die Bewertung nur auf Basis eines Klimamodells durchgeführt wurde. Bei der Winderosion sind die Projektionen mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Aufgrund von zunehmender Trockenheit im Frühjahr steigt das Risiko von Bodenabtrag durch Winderosion, eine gesicherte Aussage zu den Veränderungen der Windgeschwindigkeiten und damit zum Ausmaß der Zunahme des Erosionsrisikos lassen die Modelle aber bislang nicht zu.

Die große Bandbreite möglicher Klimawirkungen zeigt die große Unsicherheit der Projektionen auf und macht dennoch deutlich, dass die Risiken erheblich sein können.

Durch die zu erwartenden höheren Temperaturen und die erwartete verstärkte Sommertrockenheit können vor allem hydromorphe Böden (Moore, Marschen, Gleye) in den Sommermonaten stärker entwässert werden, so dass die durch Wasserüberschuss konservierte organische Substanz dem oxidativen Abbau ausgesetzt wird. Humusabbau und CO₂-Freisetzung sind die Folge. Die erwartete Zunahme der Temperaturen im Winterhalbjahr und eine ausreichende Bodenfeuchte beschleunigen die Mineralisierungsprozesse der organischen Substanz im Winter. Dem gegenüber steht allerdings möglicherweise durch die erwarteten verstärkten Niederschläge im Winter eine konservierende Wirkung durch Wasserübersättigung und in nicht hydromorphen Böden eine verringerte Mineralisation in trockenen Sommermonaten. Durch einen Humusabbau können weitere Bodeneigenschaften wie die Wasserhaltefähigkeit und Infiltrationsleistung verringert werden (Engel et al 2024). Da die Modellierung der Humusdynamik sehr komplex ist, konnte dieses Klimarisiko nicht tiefer betrachtet werden.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Wassermangel im Boden	Mittel	Gering	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Verminderte Retentionsleistung der Böden	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Bodenerosion durch Wasser	Mittel	Mittel		Gering	Hoch		Gering
Bodenerosion durch Wind	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch	Gering

Tabelle 69: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Boden“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.2 Handlungsfeld Landwirtschaft

Die im Handlungsfeld Landwirtschaft beschriebenen Klimarisiken stellen die Auswirkungen dar, die durch den Klimawandel sowohl in der Tierhaltung als auch im Pflanzenbau hervorgerufen werden und sich zukünftig verstärken können (Tabelle 70).

Vor allem der Anstieg der Temperatur kann im Bereich der Tierhaltung zu einem Gesundheitsrisiko werden, wenn die Tiere unter Hitzestress leiden. Dies wird durch Bewertung des Klimarisikos HITZESTRESS BEI UND LEISTUNGEN VON NUTZTIEREN als hoch im pessimistischen Fall zur Mitte des Jahrhunderts und sowohl im optimistischen als auch im pessimistischen Fall zum Ende des Jahrhunderts unterstrichen.

Weiterhin können abiotische Stressfaktoren wie Hitze, Kälte oder Starkniederschläge ein erhebliches Klimarisiko im Pflanzenbau darstellen, da sie die Pflanze direkt schädigen, aber auch indirekt über die Entstehung ungünstiger Bodenbedingungen. So können z. B. unter Staunässe oder Dürre Schädigungen und Ertragsverluste auftreten. Dies begründet das als hoch eingestufte Risiko indem pessimistischen Fall im KAPITEL ABIOTISCHER STRESS (PFLANZEN) mit einer mittleren Gewissheit zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts. In dem pessimistischen Fall

wird zudem das Risiko für Ertragsausfälle, insbesondere hervorgerufen durch Dürreperioden, bis Mitte des Jahrhunderts als Hoch eingestuft. Diese Projektion geht jedoch mit einer geringen Gewissheit einher. Teilweise werden für bestimmte Kulturen auch positive Ertragsentwicklungen projiziert, sodass das Risiko in dem optimistischen Fall als gering eingeschätzt wird. Auch eine verminderte Qualität der Ernteprodukte sowie Stress der Pflanzen durch Schädlinge und Krankheiten werden durch steigende Temperaturen und anhaltende Trockenperioden bzw. Starkniederschlagsereignisse begünstigt. Die jeweiligen Standorte und ihre regionalen Fruchtfolgen sorgen jedoch lokal für sehr verschiedene Bedingungen in Bezug auf das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten und damit dem Risiko für das Eintreten solcher Ereignisse.

Ein Temperaturanstieg führt zudem zu einer verlängerten Vegetationsperiode, was für das Pflanzenwachstum zunächst als positiv zu bewerten ist. Zunehmende Extremwetterereignisse können diesen Effekt jedoch wieder ausgleichen, daher wird hier das Risiko sowohl bis Mitte und Ende des Jahrhunderts als hoch eingestuft. Das Risiko, dass sich Anbauregionen für verschiedene Pflanzenbaukulturen verschieben, ist für die Gegenwart gering und wird auch zukünftig als gering bis mittel bewertet.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
Abiotischer Stress (Pflanzen)	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
Verschiebung von Anbaugebieten	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Gering
Verschiebung von Vegetationsperioden	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
Stress durch Schädlinge/ Krankheiten (Pflanzen)	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch	Gering
Ertragsausfälle	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Gering	Hoch	Gering
Qualität der Ernteprodukte	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Gering	Hoch	Gering

Tabelle 70: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.3 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Das Klimarisiko im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft beschreibt das Risiko, welches durch eine mangelnde Bodenwasserverfügbarkeit dauerhaft oder während Extremereignissen für die Wälder Niedersachsens schon besteht oder in Zukunft zu erwarten ist (Tabelle 71).

Dieses Klimarisiko Trockenstressrisiko im Wald wird maßgeblich durch die Temperaturzunahme und die Verlängerung der Vegetationsperiode, die stärkere Verluste durch Verdunstung bedingen, sowie ein verändertes Niederschlagsregime begründet. Mehrjährige Dürreereignisse mit einer unzureichenden Auffüllung der Bodenwasserspeicher während der Vegetationsruhe, die in Zukunft häufiger erwartet werden, stellen ein besonderes Klimarisiko für die Wälder Niedersachsens dar.

Schon heute besteht ein mittleres Risiko bezüglich des Trockenstresses für die Wälder in Niedersachsen, für trockenheitsempfindliche Baumarten sogar ein hohes Risiko. In der Mitte und zum Ende des Jahrhunderts ist das Risiko im optimistischen Fall weiterhin als mittel einzustufen während es im pessimistischen Fall bei zunehmender Sommertrockenheit hoch sein wird. Während die Annahmen über die Temperaturzunahme und die Verlängerung der Vegetationsperiode als sehr sicher einzustufen sind, besteht hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung eine größere Unsicherheit. Insgesamt wird für die Projektionen der Standortwasserbilanz von einer mittleren Gewissheit ausgegangen.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Trockenstressrisiko im Wald	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel

Tabelle 71: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.4 Handlungsfeld Fischerei

Die Klimarisiken im Handlungsfeld Fischerei beschreiben das Risiko, das durch veränderte klimatische Bedingungen auf die Kleine Hochsee- und Küstenfischerei und auf die Binnenfischerei und Aquakulturen zukommen könnte (Tabelle 72). Die Klimarisiken sind insbesondere durch einen Anstieg der Wassertemperatur und eine saisonale Verschiebung der Niederschläge beeinflusst.

Die Temperaturerhöhung der Nordsee wirkt sich auf das gesamte Ökosystem und damit auf alle wechselwarmen Organismen, wie zum Beispiel Fische aus. Ein Temperaturanstieg kann die Hydrodynamik und das Nahrungsnetz der Nordsee verändern. Daraus ergibt sich ein als hoch eingeschätztes Risiko in einem pessimistischen Fall für die kommerzielle Fischbestandsänderung in der südlichen Nordsee. Eine weitergehende Abschätzung möglicher Folgen ist bisher mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet, sodass für Ende des Jahrhunderts keine valide Risikoeinschätzung abgegeben werden kann.

Ebenso kann die Erwärmung die bestehenden Interaktionen zwischen etablierten Arten entkoppeln, wodurch sich unter anderem bestehende Räuber-Beute Dynamiken auflösen können. Weiterhin können kälteliebende Arten von wärmeliebenden, nicht heimischen Arten, verdrängt werden, was weitere Veränderungen im Nahrungsnetz und damit im Ökosystem verursachen kann. Damit haben sowohl die direkten klimatischen Veränderungen, wie Meeresspiegelanstieg, Erwärmung und veränderte Hydrodynamik einen signifikanten Einfluss auf den Fischereisektor, wie auch die indirekten Veränderungen des Nahrungsnetzes durch zum Beispiel das begünstigte Einwandern von nichtheimischen Arten.

Kurzfristig führen extreme Hitze und Dürre im Bereich der Binnenfischerei zu einem Verlust von Lebensräumen und Laichhabitaten durch das temporäre Trockenfallen von Gewässerabschnitten. Zudem führen Sauerstoffdefizite zu lokalem Fischsterben. Langfristig werden kaltsteno-therme (an kühlere Temperaturen angepasste) Arten, wie Salmoniden, Niederungsregionen verlassen und sich weiter in höher gelegene Gewässerabschnitte zurückziehen, sofern dies nicht durch Querverbauungen unterbunden wird. Bereits heute führt die Erderwärmung nachweislich zu einer regionalen Verschiebung der Fischarten innerhalb eines Flusssystemes. Je nach Fischart gibt es solche, die von der Erwärmung des Wassers in den Binnengewässern profitieren und solche, die verdrängt werden. Negativ ist die Zunahme kurzfristiger und starker Niederschlagsereignisse (Starkregen) zu werten, welche zu vermehrter Bodenerosion und dem Eintrag von Sediment in ein Gewässer führt sowie in Folge biologischer oxidativer Abbauprozesse in einer Sauerstoffzehrung resultiert. Das klimabedingt größte Problem in Aquakulturen besteht in der Wasserverfügbarkeit zum Anstauen von Teichen und Haltungseinheiten und deren kontinuierlicher Versorgung, gefolgt von der Wasserqualität.

Die Bewertung der Klimarisiken mit Hoch im pessimistischen Fall bis Mitte und Ende des Jahrhunderts deutet auf ein erhebliches potenzielles Risiko für die Hochsee- und Küstenfischerei sowie für die Binnenfischerei und Aquakulturen hin.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Kommerzielle Fischbestandsänderung in der südlichen Nordsee	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	-	-	-
Auswirkung des Klimawandels auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland	Mittel	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Mittel	Gering
Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel

Tabelle 72: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Fischerei“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.5 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Die Klimarisiken im Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz beschreiben erwartete klimawandelbedingte Veränderungen, die sowohl auf die niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer wirken, als auch auf die unter dem Meeresspiegel liegenden Niederungsgebiete (Tabelle 73).

Der Meeresspiegelanstieg stellt die Region vor besondere Herausforderungen. Als direkte Reaktion auf die Erderwärmung dehnen sich die Ozeane bei steigenden Temperaturen aus und die Wasserstände steigen an. Die Geschwindigkeit, mit der die Wasserstände ansteigen, hängt dabei von der Geschwindigkeit der Temperaturentwicklung ab – ein beschleunigter Anstieg gilt jedoch als „praktisch sicher“ (IPCC, 2023b).

Die Entwicklung des Meeresspiegels hat direkte Auswirkungen auf die Strömungen (KAPITEL 4.2.4) und den Seegang (KAPITEL 4.2.3) in den niedersächsischen Küstengewässern, wodurch die Belastung auf die Küstenschutzbauwerke zunehmen könnte (KAPITEL 4.2.10). Das Wattenmeer ist bislang in der Lage, die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf die Hydrodynamik durch eine morphologische Anpassung zu kompensieren (KAPITEL 4.2.5). Wie lange das Wattenmeer jedoch mit dem Meeresspiegelanstieg mitwachsen kann, ist unklar.

Das Wattenmeer ist gleichzeitig ein wertvolles Ökosystem und CO₂-Speicher, das zusätzlich durch eine Erhöhung der Wassertemperatur und des CO₂-Gehalts, dessen An-

stieg ebenfalls als gewiss eingestuft wird, unter Druck gerät (KAPITEL 4.2.5). Weitere, auch nicht klimawandelbedingte Einflüsse wie z. B. anthropogen bedingte Nährstoffeinträge wirken auf die Wasserqualität und das empfindliche und komplexe Ökosystem, was bei einer Risikobewertung berücksichtigt werden muss.

Auch die Süßwasserressourcen auf den Inseln und in den Küstenregionen am Festland sind betroffen, indem der steigende Meeresspiegel die Süß-/Salzwassergrenze landeinwärts verschiebt (KAPITEL 4.2.7).

Sturmfluten bedeuten ein enormes Schadenspotenzial für die niedrig liegenden Regionen hinter der Deichlinie (KAPITEL 4.2.2). Das Ausgangsniveau der Sturmflut wird mit dem steigenden Meeresspiegel ansteigen, aber ob eine zusätzliche Intensivierung der Sturmfluten durch erhöhte Windgeschwindigkeiten erwartet werden muss, ist noch ungewiss. Bei der Bemessung der Küstenschutzbauwerke werden diese Aspekte bereits berücksichtigt, weswegen das klimawandelbedingte Risiko bis 2100 als gering eingestuft wird (KAPITEL 4.2.4).

Nicht nur Salzwasser birgt eine Überflutungsgefahr in den Küstenniederungen. Überschüssige Niederschlagsmengen müssen durch die Deichlinie in die Küstengewässer abgeführt werden, was aufgrund steigender Außenwasserstände erschwert wird (KAPITEL 4.2.9). Auch wenn die Entwicklung der Starkregenereignisse noch ungewiss ist (KAPITEL 4.3.2) werden vermutlich langanhaltende Niederschläge und Sturmfluten zukünftig häufiger zusammen auftreten.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Meeresspiegelanstieg	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Sturmflut	Mittel	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Mittel	Gering
Seegang	Gering	Gering	Mittel	Gering	Mittel	Mittel	Gering
Küstennahe Strömungen	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Gering
Entwicklung des Wattenmeers	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch	Gering
Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch	Gering
Küstennahe Grundwasserversalzung	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
Geschützte Niederungsgebiete der Festlandsküste	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Entwässerung der Küstenniederungen	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Belastung auf den Insel- und Küstenschutz*)	Gering	Gering	Gering	Hoch	Gering	Gering	Hoch

Tabelle 73: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.6 Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

Die Klimarisiken im Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft entstehen entweder durch zu viel oder zu wenig Wasser, was sowohl durch einzelne Extremereignisse als auch dauerhafte Änderungen im Klimasystem hervorgerufen werden kann (Tabelle 74). Die Klimarisiken sind maßgeblich durch die Klimawirkungen der Temperaturzunahme (stärkere Wasserverluste durch Verdunstung, Atmosphäre kann in wärmerer Luft mehr Wasserdampf speichern) und eine Zunahme bzw. saisonale Verschiebung der Niederschläge begründet. Dabei ist die Temperaturzunahme sehr sicher. Die Veränderungen beim Niederschlag sind für Niedersachsen zwar mit größeren Unsicherheiten behaftet, gleichwohl deuten sowohl Messdaten der jüngeren Vergangenheit als auch Klimaprojektionen der Zukunft auf eine Zunahme extremer Ereignisse im Winter hin (Bürger et al., 2021; DWD, 2018; Tradowsky et al., 2023). Im Sommer (der Hauptstarkregensaison) kann bisher keine eindeutige Aussage zur Starkregenentwicklung im Hinblick auf Häufigkeit und Intensität getroffen werden (Becker et al., 2016; Fischer & Knutti, 2016). Beide Faktoren verschärfen die Risiken für fast alle betrachteten Klimawirkungen im Handlungsfeld im pessimistischen Fall bereits zur Mitte des Jahrhunderts. So beeinflussen sie z. B. die TALSPERRENBEWIRTSCHAFTUNG, deren Risiko mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits zur Mitte des Jahrhunderts zunehmen könnte.

Steigende Temperaturen und sommerliche Niederschlagsausfälle sind gerade für die Verschärfung von Klimarisiken durch zu wenig Wasser maßgeblich. Dies betrifft vor allem die Klimawirkungen NIEDRIGWASSER, GRUNDWASSERDÜRRE, GRUNDWASSERTIEFSTAND und MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER. Dabei deuten die Projektionen für den Mangel an Bewässerungswasser für die Mitte des Jahrhunderts ein hohes Risiko auch im optimistischen Fall an, jedoch mit geringer Gewissheit. Bei den anderen Klimawirkungen bleibt das Risiko im optimistischen Fall gleich oder steigt im pessimistischen Fall.

Eine Zunahme des Jahresniederschlags bzw. die saisonale Verlagerung in den Winter ist gerade für die Verschärfung von Klimarisiken durch zu viel Wasser maßgeblich. Dies betrifft vor allem die Klimawirkungen Hochwasser und STARKREGEN, VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER, GRUNDWASSERQUALITÄT und GRUNDWASSERHOCHSTAND. Dabei deuten die Projektionen und statistischen Auswertungen insbesondere bei Starkregen für das Ende des Jahrhunderts auch für den optimistischen Fall ein hohes Risiko an, wenn auch hier die Gewissheit gering ist. Bei den anderen angesprochenen Risiken deutet sich durchgehend im optimistischen Fall ein geringes und im pessimistischen Fall ein hohes Risiko an (Tabelle 74). Die große Bandbreite zeigt die große Unsicherheit der Projektionen auf und macht dennoch deutlich, dass die Risiken erheblich sein können.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Hochwasser	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Gering	Hoch	Gering
Starkregen	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Hoch	Hoch	Gering
Vernässung durch Grundwasser	Mittel	Gering	Hoch	Mittel	Gering	Hoch	Gering
Grundwasserhochstand	Mittel	Gering	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Niedrigwasser	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Grundwasserdürre	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Grundwassertiefstand	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Mangel an Bewässerungswasser	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Talsperrenbewirtschaftung	Gering	Gering	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel
Grundwasserqualität	Gering	Gering	Mittel	Gering	Gering	Mittel	Gering

Tabelle 74: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.1.7 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Die Klimarisiken sind maßgeblich durch die Klimawirkung der Temperaturzunahme begründet, welche sowohl primäre als auch sekundäre Folgen für die menschliche Gesundheit aufweist. Die beschriebenen Klimawirkungen zeigen, dass sich die Zahl an temperaturassoziierten Krankheitsfällen erhöhen könnte. Zudem könnten Extremwetterereignisse zu einer zunehmenden Belastung für

Gesundheitseinrichtungen führen, wenn diese nicht resilient aufgestellt sind oder kritische Infrastrukturen ganz ausfallen. Der Klimawandel erfordert Investitionen in allen Bereichen des Gesundheitssystems, insbesondere in Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten in Gesundheits- und Sozialberufen, Präventions- und Interventionskampagnen und Forschung sowie die Förderung von resilienteren Infrastrukturen.

	Gegenwart	2031–2060		Gewissheit	2071–2100		Gewissheit
		Opt.	Pes.		Opt.	Pes.	
Gesundheitsrisiken durch extreme Hitze	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel
Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Klimagerechtigkeit	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch	Gering
Vektoren und Nagetiere: Übertragung klimasensibler Infektionskrankheiten	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel
Cyanobakterien (Blualgen)	Gering	Gering	Mittel	Gering	Mittel	Mittel	Gering
Vibrio vulnificus	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel

Tabelle 75: Das Gesamt-Klimarisiko für das Handlungsfeld „menschliche Gesundheit“ für die Mitte (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für einen optimistischen Fall (Opt.) und einen pessimistischen Fall (Pes.).

6.2 Handlungsfeldübergreifende Auswertung

Das Klima hat sich bereits vielfältig in Niedersachsen geändert (NIKO, 2023b). Dadurch entstehen Risiken für Menschen, Tiere und Natur. Treiber dieser Risiken sind die Klimaeinflüsse, also die Veränderungen der CO₂-Konzentrationen in der Luft und den Ozeanen, der Strahlungsbilanz, der Temperatur, der Meeresspiegelhöhe, des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit, die durch den Klimawandel hervorgerufen werden und sich gegenseitig beeinflussen. Bei der Ausweisung des jeweiligen Klimarisikos erfolgt auch immer die Betrachtung der Unsicherheit der klimatischen Wirkung, da die Klimamodelle beispielsweise die Änderung der Lufttemperatur wesentlich besser projizieren können als die Änderungen beim Wind oder beim Starkregen.

Im Folgenden wird auf die Zusammenhänge der einzelnen klimatischen Einflüsse und resultierenden Klimarisiken übergreifend über alle betrachteten Handlungsfelder für Niedersachsen eingegangen.

6.2.1 CO₂-Konzentration

Ursächlich für die menschengemachten Klimaänderungen sind die Treibhausgasemissionen, bei denen das Treibhausgas CO₂ der größte Einzelposten ist (IPCC, 2023a). Das verursacht Änderungen in der globalen Strahlungsbilanz, indem mehr Energie in Form von Wärme in der Erdatmosphäre zurückgehalten wird. Aber auch die CO₂-Konzentrationen an sich, sowohl in der Atmosphäre als auch in Oberflächengewässern und im Ozean, verändern Gleichgewichte und erzeugen Risiken.

Die Ozeane nehmen große Mengen an CO₂ auf und verzögern dadurch die Erderwärmung, so auch die Nordsee. Je höher der CO₂-Gehalt der Luft, desto mehr wird derzeit noch von der Nordsee aufgenommen. Dadurch sinkt der pH-Wert der Gewässer (infolge der Bildung von Kohlensäure), was die WASSERQUALITÄT DER ÜBERGANGS- UND KÜSTENGEWÄSSER verändert. Das Wasser wird saurer. Diese chemische Veränderung beeinträchtigt insbesondere die Lebewesen, die ein Skelett oder Schalen aus Kalk besitzen, in ihrer Entwicklung und kann damit auch das Nahrungsnetz bzw. die Nahrungsverfügbarkeit für u. a. marine Säugetiere, Seevögel und den Fischbestand beeinflussen (KAPITEL 4.1.1).

Ähnliche Prozesse wie in den Ozeanen wirken auch in Flüssen oder Seen. Hier wird das CO₂ aus der Atmosphäre durch Pflanzenwachstum gebunden und (die abgestorbenen Pflanzen) nachfolgend vor allem im Sediment eingelagert. Extreme Ereignisse, die im Zuge des Klimawan-

dels sehr wahrscheinlich zunehmen werden, können dazu führen, dass das CO₂ wieder vermehrt freigesetzt wird – z. B. bei Niedrigwasser durch Zersetzungsprozesse, etwa in trockenfallenden Auenbereichen, oder bei Hochwasser durch Verlagerung und Aufwirbelung des Sediments.

Auch die Ökosysteme an Land nehmen durch die Photosynthese der Pflanzen große Mengen an CO₂ auf. Wenn der aufgenommene Kohlenstoff in der lebenden oder abgestorbenen organischen Substanz langfristig gespeichert wird, kann sich dadurch die Erderwärmung verzögern. Ein höherer CO₂-Gehalt der Luft kann die Wassernutzungseffizienz von Pflanzen verbessern, damit die Photosyntheserate im Verhältnis zum Wasserverbrauch steigern und zu geringerem Trockenstress und einem besseren Pflanzenwachstum führen. Demzufolge sinkt das Risiko für ERTRAGSAUSFÄLLE. Mehr Biomasse kann auch zu einer erhöhten Humusbildung im Böden führen und damit zur Sequestrierung von Kohlenstoff. Eine langfristige zusätzliche Speicherung von Kohlenstoff im Humus ist aber an vielen Standorten unwahrscheinlich, da der Humusabbau durch höhere Temperaturen und ggf. sinkende Grundwasserstände auch beschleunigt werden kann. Eine erhöhte CO₂-Einfuhr über das Sickerwasser kann zu einer Versauerung des Grundwassers durch die Bildung von Kohlensäure führen. Damit einhergehend ist von einer höheren Auflösung von Karbonaten als Puffer (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht) auszugehen.

6.2.2 Temperatur

Der Temperaturanstieg ist die bekannteste, am besten erfasste und mit Klimamodellen am besten abbildbare und damit für die Zukunft projizierbare Klimawirkung, die aus der anthropogenen Veränderung des Strahlungshaushalts, bzw. der Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre, resultiert. Sowohl die ansteigende Temperatur insgesamt als auch die Häufung von Extremereignissen wie Hitzetagen oder Hitzewellen, erhöhen die Klimarisiken. Dies betrifft sowohl die menschliche Gesundheit, das Tierwohl, das Pflanzenwachstum, die Pflanzengesundheit, den Boden als auch den Wasserkreislauf. So führt der Temperaturanstieg bereits in der Gegenwart zu einer Erhöhung der Klimarisiken in allen Handlungsfeldern.

Das Risiko durch erhöhte Durchschnittstemperaturen und Hitze wirkt sich direkt auf die Gesundheit und die Lebensqualität der Menschen aus. So erhöht die gestiegene Lufttemperatur und die Zunahme der Hitzewellen das Risiko der Menschen direkt und indirekt durch GESUNDHEITSRISIKEN DURCH HITZEBELASTUNG UND VEKTOREN UND NAGETIERE: ÜBERTRAGUNG

KLIMASENSIBLER INFZEKTIONSKRANKHEITEN, aber auch durch die Gesundheitsrisiken der Massenvermehrungen von CYANOBAKTERIEN (BLAUALGEN) und VIBRIO VULNIFICUS (Bakterien im Brack- und Meerwasser).

Eine erhöhte Durchschnittstemperatur der Luft steigert außerdem das Risiko für ein vermindertes Wohlbefinden und Leistungseinbußen bei den Tieren, je nach Tierart können diese Auswirkungen unterschiedlich ausfallen. Genauso steigt das Risiko für HITZESTRESS BEI UND LEISTUNGEN VON NUTZTIEREN durch zunehmende Temperaturen. Mit der Erwärmung steigen auch die Wassertemperaturen, die sowohl auf die KOMMERZIELLE FISCHBESTANDSÄNDERUNG IN DER SÜDLICHEN NORDSEE wirken, als auch eine VERKNAPPUNG DER PRODUKTIONSRESSOURCEN FÜR DIE AQUAKULTUR hervorrufen. Die WASSERQUALITÄT DER ÜBERGANGS- UND KÜSTENGEWÄSSER wird dahingehend beeinflusst, dass charakteristische Lebensräume, Stoffumsätze und Entwicklungszyklen sich verändern, was Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem und dessen Funktionen hat.

Für die Landwirtschaft erhöhen sich im Zuge des Klimawandels die Risiken durch den ABIOTISCHER STRESS (PFLANZEN). Die Temperaturerhöhung beeinflusst sowohl das Pflanzenwachstum, einerseits durch veränderte Photosyntheseraten, andererseits durch eine Erhöhung der Pflanzenatmung, als auch die Anbausysteme. So könnten sich durch wärmere Bodentemperaturen Zeitpunkte für die Bodenbearbeitung und die Aussaat im Jahr nach vorne verlagern. Zudem kann eine VERSCHIEBUNG VON VEGETATIONS-PERIODEN und eine VERSCHIEBUNG VON ANBAUGEBIETEN eintreten. Auch die wärmeren Winter beeinflussen die Land- und Forstwirtschaft beispielsweise durch einen fehlenden Vernalisationsreiz (Kältereiz), bei ausbleibendem Frost kann es daher zu Wachstumsschwierigkeiten bei den Pflanzen kommen. Bei Obstbaukulturen können zunehmende Spätfrostereignisse verheerend sein, wenn die Kulturen bereits geblüht haben, da eine eingefrorene Blüte keine Frucht mehr bilden kann. Denn Spätfrost, Frühfrost oder Wechselfrost führen zu Schädigungen von Pflanzenorganen und können so Wachstumsraten, die Reproduktion sowie Abwehrreaktionen beeinträchtigen und Pflanzen zum Absterben bringen (KAPITEL 3.2.3 und 4.1.2). Diese Folgen verdeutlichen das Risiko für ERTRAGSAUSFÄLLE SOWIE geringere QUALITÄT DER ERNTEPRODUKTE.

Für den Boden bedeutet der Temperaturanstieg einen Anstieg der Aktivität des Bodenlebens, sofern die Böden nicht zu stark austrocknen. Dies kann positive Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben, es kann aber ohne Gegenmaßnahmen auch zum Abbau der organischen Substanz im Boden und damit eine Verringerung der Funktionalität der Böden führen. Für die Produktionsfunktion der Böden können höhere Temperaturen

auch durch WASSERMANGEL IM BODEN zu einer Verringerung der Funktionserfüllung führen. Durch höhere Temperaturen steigt auch die Verdunstung an, wodurch die Böden von Trockenheit betroffen sind, was zu Ertragseinbußen führen können.

Die Temperaturerhöhung beeinflusst den Wasserkreislauf maßgeblich. Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf speichern (was zu größeren Niederschlagsmengen und mehr Starkregen führen kann), fördert die Verdunstung und macht Dürren häufiger und intensiver. Daher findet sich die Veränderung im Wasserkreislauf als relevante Klimawirkung in folgenden Handlungsfeldern: HANDLUNGSFELD BODEN, HANDLUNGSFELD LANDWIRTSCHAFT, HANDLUNGSFELD WALD- UND FORSTWIRTSCHAFT und HANDLUNGSFELD WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT und HANDLUNGSFELD FISCHEREI. Neben den Dürren führt eine erhöhte Temperatur auch dazu, dass weniger Niederschlag als Schnee, sondern als Regen fällt. Durch die geringeren Schneerücklagen können HOCHWASSER, die typischerweise im Frühjahr durch Niederschläge in Kombination mit Schneeschmelzen hervorgerufen werden, geringer ausfallen, dafür aber ggf. im Winter häufiger auftreten. Gleichzeitig kann der GRUNDWASSERHOCHSTAND im Winter größer ausfallen, der zu VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER mit den entsprechenden wirtschaftlichen Schäden an Bauwerken und in der Landwirtschaft führen und auch länger andauern kann.

Die Böden sind ein zentraler Teil des Wasserkreislaufs der Landschaft und fungieren als Wasserspeicher, der zum einen Wasser für die Ökosysteme bereitstellt und zum anderen Abfluss vermindert. Bei zukünftig häufiger auftretenden Wassermangelsituationen können die Böden ihre Funktionen, z. B. als Lebensraum für Pflanzen und Tiere nur noch eingeschränkt wahrnehmen, weil weniger Bodenwasser zur Verfügung steht. Zudem können sich bei extremer Trockenheit die Eigenschaften der Böden verändern, indem sich wasserabweisende Schichten entwickeln. Als Folge vermindert sich die Infiltration von Niederschlagswasser in den Boden und Oberflächenabfluss nimmt zu, wodurch der Direktabfluss im Wasserkreislauf erhöht wird. Wenn gleichzeitig in Zukunft die Sommerniederschläge vermehrt oder / und als stärkere Starkregenereignisse auftreten, können die Böden Ihre Funktion als Zwischenspeicher für Wasser nur noch eingeschränkt wahrnehmen.

6.2.3 Meeresspiegelanstieg

Neben der Temperatur ist der MEERESSPIEGELANSTIEG die bekannteste und für die ausgedehnten Niederungsgebiete der Küstenregionen und -gewässer die relevanteste Klimawirkung. Als Folge der globalen Erwärmung führen steigende Wassertemperaturen zu einer Ausdehnung der Ozeane und damit zu einer Anhebung des Wasserstandes. Zusätzlich beschleunigen das Abschmelzen des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes sowie der Gletscher den Prozess.

Küstengewässer: Neben den großen Flussmündungen und der Nordsee ist insbesondere das Wattenmeer prägend für die niedersächsischen Küstengewässer. Das als Weltnaturerbe ausgezeichnete Ökosystem bietet einzigartige Lebensräume mit enormer Biodiversität und bildet einen natürlichen CO₂-Speicher. Die durch Gezeiten und Seegang bewegten Sedimente lagern sich auf den Wattflächen ab, wodurch diese dem bisherigen Meeresspiegelanstieg folgen. Der zu erwartende beschleunigt ansteigende Meeresspiegel könnte allerdings die KÜSTENNAHE STRÖMUNGEN und Seegangs-Belastung verändern und die ENTWICKLUNG DES WATTENMEERS SOWIE die KOMMERZIELLE FISCHBESTANDSÄNDERUNG IN DER SÜDLICHEN NORDSEE beeinflussen. Auch eine dadurch erhöhte Trübung wirkt sich nachteilig auf die Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer aus.

Küstenregionen: Gleichzeitig wirkt der Anstieg des Meeresspiegels auch auf verschiedene Klimarisiken am Festland (GESCHÜTZTE NIEDERUNGSGEBIETE DER FESTLANDSKÜSTE). So wird durch einen höheren Meeresspiegel das Ausgangsniveau von Sturmfluten erhöht, wodurch die BELASTUNG AUF DEN INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ zunimmt. Auch wenn die natürliche Anpassungsfähigkeit des Wattenmeeres den Meeresspiegelanstieg durch ein Mitwachsen zumindest zum Teil kompensieren kann, führen erhöhte SEEGANGS-BELASTUNGEN zu verstärkter Erosion der Strände und Vorküsten. Aber auch die ENTWÄSSERUNG DER KÜSTENNIEDERUNGEN, die durch ein historisch gewachsenes, künstlich angelegtes Kanalsystem erfolgt, wird beeinträchtigt. Überschüssiges Regenwasser wird durch das Kanalsystem in Richtung Nordsee geleitet und dort durch Siel- und Schöpfwerke in die Küstengewässer überführt. Durch den steigenden Meeresspiegel verkürzen sich die potenziellen Sielzeiten. Frischwasser, das bisher bei niedrigen Außenwasserständen in die Nordsee fließen kann, muss zukünftig unter erhöhtem Energieaufwand gepumpt werden. Einen weiteren Effekt hat der Meeresspiegelanstieg auf das Grundwasser. Die Erhöhung sorgt für ein landeinwärts gerichtetes Vordringen des Salzwassers, was zu einer fortschreitenden Versalzung der Süßwasservorkommen der Inseln und Küstenregionen führt (KAPITEL 4.2.7). Dadurch wird die Grundwasserqualität negativ beeinflusst, wodurch es zu einem MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER kommen kann.

6.2.4 Niederschlag

Der Klimawandel führt dazu, dass sich die Niederschlagsmengen und deren saisonale Verteilung verändern. Durch die Temperaturerhöhung erwärmt sich die Luft. Warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen, und zwar pro Grad Erwärmung rund 7 % mehr. Die Erklärung für diesen Vorgang liefert das Clausius-Clapeyron-Gesetz. Diese generelle Niederschlagszunahme wird jedoch nicht global stattfinden. Der Klimawandel führt in Europa dazu, dass das feuchte Nordeuropa feuchter und das trockene Südeuropa trockener wird. Niedersachsen befindet sich klimatisch gesehen zwischen dem feuchter werdenden Nordeuropa und dem trockener werdenden Südeuropa, weshalb eindeutige Aussagen zu der zukünftigen Entwicklung der Niederschläge unsicher sind. Daher weisen die verschiedenen Projektionen auch unterschiedlichen Richtungen bei der Entwicklung des Niederschlages aus. Bisher zeigten die Messdaten eine Zunahme des Jahresniederschlags. Dieser hat 1991–2020 im Vergleich zu 1961–1990 bereits um 22 mm zugenommen. Gleichwohl beobachten wir bereits heute eine Verlagerung der Niederschläge aus dem Frühling/Sommer in den Herbst/Winter, die von den Modellen für die Zukunft noch deutlicher abgebildet wird. Das bedeutet, dass in den Jahreszeiten, in denen die Vegetation mehr Niederschlag benötigt, dieser eher rückläufig ist und in den kühlen Jahreszeiten teils zu viel Niederschlag fällt. Sowohl der Überschuss als auch der Mangel an Niederschlag stellt ein Klimarisiko dar.

Zu wenig Wasser: Auch wenn mit einem erhöhten jährlichen Niederschlag zu rechnen ist, wird der bereits reduzierte Frühjahres- und Sommerniederschlag noch weiter abnehmen. Dadurch steht der Vegetation, den Böden, den Gewässern und dem Grundwasser weniger Niederschlag zur Verfügung. Diese sind zusätzlich durch erhöhte Temperaturen und einer daraus resultierenden erhöhten Verdunstung beeinträchtigt. Das betrifft die Klimarisiken WASSERMANGEL IM BODEN, BODENEROSION DURCH WIND, NIEDRIGWASSER, GRUNDWASSERDÜRRE, GRUNDWASSERTIEFSTAND, MANGEL AN BEWÄSSERUNGSWASSER UND TROCKENSTRESSRISIKO IM WALD und VERKNAPPUNG DER PRODUKTIONSRESSOURCEN für die AQUAKULTUR. Zudem verursachen die innerjährlichen Schwankungen zwischen nasserem Winter und trockenerem Sommer auch ein erhöhtes Risiko bei der TALSPERRENBEWIRTSCHAFTUNG, durch die Wasser in Zeiten mit hohem Dargebot zurückgehalten wird, um es in Trockenzeiten bei hohem Wasserbedarf zu nutzen. Lange Dürreperioden in der Vegetationszeit erhöhen zudem das Risiko für ABIOTISCHER STRESS (PFLANZEN), und für ERTRAGSAUSFÄLLE bzw. eine Verminderung der QUALITÄT DER ERNTEPRODUKTE.

Zu viel Wasser: Dadurch, dass der Niederschlag insgesamt bereits zugenommen hat und weiter zunehmen soll, werden sich die klimatischen Starkregen und Hochwasser erhöhen. Insbesondere durch den ansteigenden Winter-niederschlag bei verhältnismäßig geringer Verdunstung in dieser Jahreszeit, steigen auch die klimatischen VERMINDERTE RETENTIONSLEISTUNG DER BÖDEN, STOFFAUSTRAG AUS DEM BODEN IN DAS GRUNDWASSER, BODENEROSION DURCH WASSER, ENTWÄSSERUNG DER KÜSTENNIEDERUNGEN, VERNÄSSUNG DURCH GRUNDWASSER und Grundwasserhochstand. Als Folge davon ist die Befahrbarkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen eingeschränkt, wodurch sich das Zeitfenster für die Bearbeitung der Flächen deutlich verkürzt gleichzeitig steigt durch die erhöhte Verdichtungsempfindlichkeit nasser Böden das Risiko von Bodenverdichtungen bei der Befahrung noch nicht ausreichend abgetrockneter Böden. Zudem kann es durch Staunässe auf den Flächen zu Ernteeinbußen oder gar Ernteaussfällen kommen.

6.2.5 Sonnenscheindauer / UV-Strahlung

In Niedersachsen wird ein steigender Trend der Sonnenscheindauer (DWD, 2018) beobachtet, womit eine erhöhte Belastung durch UV-Strahlung einher geht. Die Sonnenscheindauer hängt mit den Bewölkungsverhältnissen zusammen, deren Zusammenhang mit dem Klimawandel derzeit noch Stand der Forschung ist (Goessling et al., 2025; Luo et al., 2024; Vogel et al., 2022).

Eine höhere Sonneneinstrahlung kann zu einer VERSCHIEBUNG VON ANBAUGEBIETEN, führen und das Risiko von ERTRAGSAUSFÄLLEN im Pflanzenbau bei gleichzeitig ausreichender Wasserverfügbarkeit reduzieren. Ebenso kann die längere Sonnenscheindauer zu einer Erhöhung der Verdunstung führen und somit zu einer Verringerung des Wasserangebots beitragen. Weiterhin erhöht eine hohe Sonneneinstrahlung das Risiko des Auftretens von CYANOBAKTERIEN (BLAUALGEN) UND GESUNDHEITSRISIKEN DURCH UV-STRALUNG. Die Lichtverfügbarkeit beeinflusst auch die Photosyntheseleistung in den Küstengewässern (WASSERQUALITÄT DER ÜBERGANGS- UND KÜSTENGEWÄSSER), allerdings könnten Veränderungen des Seegangs- und Strömungsregime die Trübung erhöhen und somit diesem Effekt entgegenwirken.

6.2.6 Wind

Starkwinde bzw. Sturmtage sind in Niedersachsen sehr unterschiedlich verteilt. Die höchsten Werte werden an der Nordseeküste beobachtet, die geringsten in der Lüneburger Heide und im Südosten des Landes (DWD, 2018; NIKO, 2023b). Die Ergebnisse der Klimamodelle zur zukünftigen Entwicklung der Windverhältnisse sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Darauf aufbauende Bewertungen der klimatischen sind schwierig zu treffen weshalb oft Statistiken der Gegenwart herangezogen werden.

Insbesondere in den Küstenregionen spielt die Entwicklung der Windverhältnisse eine große Rolle. Eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten aus nordwestlicher Richtung würde die Höhe der STURMFLUT-Wasserstände zusätzlich zum MEERESSPIEGELANSTIEG erhöhen. Auch der SEEGANG ist von den Windgeschwindigkeiten abhängig und daher eine wichtige Einflussgröße für die BELASTUNG AUF DEN INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ. Wind beeinflusst die KOMMERZIELLE FISCHBESTANDSÄNDERUNG IN DER SÜDLICHEN NORDSEE insofern, als dass sich mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten die Fangbedingungen verschlechtern, das Aus- bzw. Einlaufen in betroffene Häfen temporär eingeschränkt sein kann und Extremwetterlagen zusätzlich Risiken für küstennahe Produktionsstätten bergen.

Abhängig von einer Änderung des Windes ist auch die BODENEROSION DURCH WIND. Auch könnte eine Zunahme von Windgeschwindigkeiten im Binnenland zu einer erhöhten Verdunstung und dadurch auch zu einer Verringerung des Wasserangebotes führen. Dies hat auch Auswirkungen auf den ABIOTISCHER STRESS (PFLANZEN) der Pflanzen.

6.3 Räumliche Risikofaktoren

Niedersachsen besteht aus diversen Räumen, die sich klimatisch, ökologisch, geomorphologisch, geologisch und hydrologisch unterscheiden. Die Änderungen des klimatischen Einflusses führen durch diese heterogenen Verhältnisse zu räumlich unterschiedlich ausgeprägten Klimawirkungen, weshalb vier unterschiedliche räumliche Gliederungen genutzt wurden, um regional möglichst abgegrenzt das jeweilige Risiko abzuschätzen (KAPITEL 2.3). Für die integrierte Darstellung aller Handlungsfelder wird eine allgemeine Gliederung Niedersachsens in drei übergeord-

nete Landschaftsräume genutzt: Die **Küstenregion** mit der Nordsee, den Watten, der Küstenlinie und den Marschen, das **Flachland** mit Niederungen und Geest, das von der Nordseeregion nach Süden bis etwa zur Höhe von Hannover reicht und das **Bergland mit dem Harz** (Abbildung 59). Die räumliche Zusammenfassung der betrachteten Klimarisiken nutzt diese großräumigen Eigenschaften und ersetzt keine regionale, bzw. kommunale, Klimarisikoanalyse.

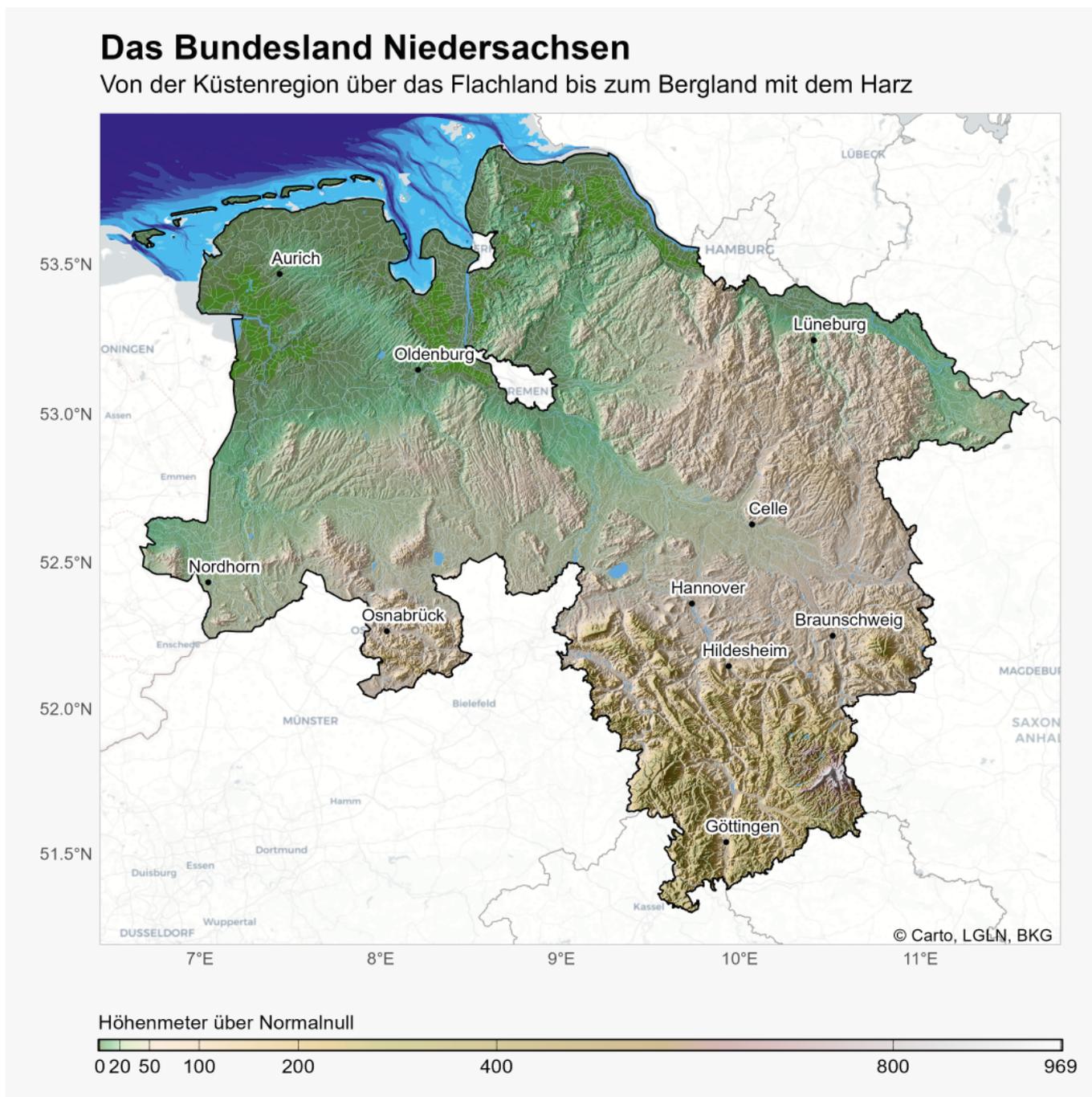


Abbildung 59: Dargestellt ist das Relief des Meeresbodens und des Festlands von Niedersachsen mit Gewässern, Flussläufen und Städten.

6.3.1 Küstenregion

Die Küstenregion umfasst sowohl die Küstengewässer Niedersachsens als auch das vor Sturmfluten geschützte Gebiet der Festlandsküste und der Inseln. Einmaßgebliche und regionsspezifische Risikogröße stellt der Meeresspiegelanstieg dar, der durch die Erderwärmung und die daraus resultierende Ausdehnung der Ozeane und das Abschmelzen der Eisschilde und Gletscher verursacht wird. Der Küstenschutz steht daher vor der Herausforderung das Festland und die Inseln vor den zukünftig höher auflaufenden Sturmfluten zu schützen, ohne dabei die Anpassungsfähigkeit des Wattenmeeres an den Meeresspiegel im Detail zu kennen. Gleichzeitig wirkt der Meeresspiegelanstieg auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft hinsichtlich der küstennahen Grundwasserqualität bzw. Grundwasserversalzung, indem die Süß-/Salzwassergrenze ins landesinnere verschoben wird.

Steigende Wassertemperaturen und CO₂-Konzentrationen beeinflussen die Ökosysteme und Nahrungsnetze der Küstengewässer und damit auch die Fischgründe. Die steigende Lufttemperatur hat insbesondere an der Küste zur Folge, dass eine ansteigende Verdunstung zu einer Zunahme der schwülen Tage führt das eine Belastung für die menschliche Gesundheit ist.

Das unter dem Meeresspiegel liegende Festland ist nicht nur durch Sturmfluten bedroht, sondern auch durch Hochwasserereignisse, die daher rühren, dass überschüssiges Regenwasser nicht schnell genug aus der Region in Richtung Nordsee abgeführt werden kann. Der steigende Meeresspiegel und zunehmende (winterliche) Regenereignisse verschärfen die Situation.

Handlungsfeld Boden

Im Handlungsfeld Boden werden in der Küstenregion hauptsächlich die Böden der Bodenregion Küstenholozän betrachtet. Darunter fallen die Böden der Küstenmarsch und der Nordseeinseln.

Die untersuchten Klimarisiken zeigen in der Nordseeregion eine unterschiedliche Ausprägung. Im landesweiten Vergleich fällt das Risiko von Wassermangel im Boden eher gering aus, da die Marschböden eine hohe Wasserspeicherfähigkeit aufweisen, Wasser aus dem Grundwasser kapillar aufsteigen kann und die Niederschläge im Sommer vergleichsweise weniger abnehmen als im Rest des Landes. Anders sieht dies bei den Klimarisiken aus, die durch höhere Niederschläge im Winterhalbjahr beeinflusst werden. Bei der Bewertung der Retentionsleistung (Wasseraufnahme) der Böden sowie der Stoffausträge aus dem Boden ist das Risiko in der Küstenregion größer als im Rest des Landes. Dabei wurde in den Bewertungen nicht der steigende Meeresspiegel berücksichtigt, der zu höheren Grundwasserständen führen kann. Dadurch

würde die Retentionsleistung der Böden noch stärker eingeschränkt werden als in den Projektionen dargestellt. Wassererosion spielt aufgrund des sehr gering ausgeprägten Reliefs nur eine untergeordnete Rolle in der Küstenregion. Winderosion ist ein Thema auf den Inseln, wobei es hier weniger um die Bodenerosion auf Ackerflächen geht als vielmehr um die Verlagerung von Sand im direkten Küstenbereich. Die Marschböden sind aufgrund ihren höheren Tonanteile weniger gefährdet.

Handlungsfeld Landwirtschaft

Die Küstenregion hat bisher im niedersächsischen Vergleich relativ wenig Hitzeextreme zu verzeichnen. In den vor allem milchviehhaltenden Küstenregionen traten Hitze-stress-Bedingungen um ca. 20 Tage weniger häufig auf als im niedersächsischen Binnenland. Diese werden jedoch zunehmen, insbesondere die schwülen Tage durch die Küstennähe, was zu gesundheitlichen Risiken bei den Nutztieren führen kann. Durch eine Zunahme von Hochwasserereignissen, steigt zudem das Risiko für Staunässe auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen, was mit einem erhöhten Risiko für ERTRAGSAUSFÄLLE oder verminderter QUALITÄT DER ERNTEPRODUKTE einhergehen kann.

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Die Nordseeregion ist die waldärmste Klimaregion Niedersachsens. Für die wenigen Wälder wird das Klimarisiko aufgrund des maritimen Klimas eher gering eingeschätzt.

Handlungsfeld Fischerei

Die Erwärmung der südlichen Nordsee führt u.a. zu einem Rückgang von kälteliebenden Arten, wie dem Kabeljau (*Gadus morhua*) und gleichzeitig zunehmend sind wärmeliebende Arten wie zum Beispiel der Wolfsbarsch (*Dicentrarchus labrax*) oder Kalmare (*Loligo spp.*). Es entstehen durch die ökologischen Veränderungen durch z. B. den Ausbau der erneuerbaren Energie auf See, zunehmende Nutzungskonflikte der Fischerei.

Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Im Gegensatz zu allen anderen Handlungsfeldern wirken die Klimarisiken des Handlungsfeldes Küsten- und Meeresschutz ausschließlich in der Nordseeregion, da sie unmittelbar von den Reaktionen der Nordsee und des Wattenmeeres auf den Klimawandel abhängig sind. Die Auswirkungen sich verändernder klimatischer Gegebenheiten sind vielfältig und stehen in Wechselwirkung zueinander. Insbesondere das Wattenmeer ist in der Lage, sich auf natürliche Weise an die sich verändernden Gegebenheiten anzupassen, allerdings in bislang unbekanntem Ausmaß.

Alle im Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz behandelten Klimarisiken sind von der Entwicklung des Meeresspiegelanstieg und größtenteils auch von den natürlichen Anpassungskapazitäten des Wattenmeeres abhängig.

Steigen die Wasserstände und Wattflächen in ähnlicher Größenordnung, würden die Auswirkungen auf die küstennahen Strömungen und den Seegang gering ausfallen. Davon würde auch der Küstenschutz profitieren, da die Wassertiefen vor den Bauwerken nahezu unverändert bleiben würden und die Seegangsbelastung hauptsächlich durch sich ändernde Windverhältnisse beeinflusst würde.

Die Ökosysteme der Nordsee und des Wattenmeers sind neben dem Meeresspiegelanstieg und den damit verbundenen veränderten Strömungsdynamiken zwischen Nordsee und Wattenmeer auch durch die Ozeanerwärmung und -versauerung bedroht. Das niedersächsische Wattenmeer hat sich in den letzten 50 Jahren bereits um 2° C erwärmt, was das Einwandern fremder Arten begünstigt und heimische Arten bedroht. Zusätzlich treten temporäre Hitzewellen häufiger auf, die Muschelbänke und die für den Klimaschutz wertvollen Seegraswiesen beeinflussen. Im niedersächsischen Wattenmeer ist ein massiver Rückgang der Seegrasbestände zu beobachten, wodurch zunehmend weniger CO₂ aufgenommen werden. Der pH-Wert des Wassers nimmt ab, was kalkbildende Organismen und damit das gesamte Nahrungsnetz verändert, welches insbesondere im Wattenmeer die Nahrungsgrundlage vieler mariner Säugetiere, Vögel und auch vom Menschen bildet.

Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

Die Wasserwirtschaft an der Küste ist geprägt durch den steigenden Meeresspiegel und ein flaches Relief, das von wenigen Metern über bis zu 2,5 m unter dem Meeresspiegel liegt. Dadurch ergibt sich die Aufgabe, überschüssiges Wasser in der Landschaft aus der Fläche zu bringen. Allerdings können die anfallenden Wassermassen aus den binnenländischen Niederungsbereichen nicht einfach abfließen, sondern müssen an den Seedeichen vorbei ins Meer transportiert werden. Der Klimawandel verschärft diese Situation insbesondere an der Küste, da hier der Jahresniederschlag im Vergleich zu den anderen Klimaregionen besonders stark zugenommen hat (Maritime Klimaregion: 14 % in 1991–2020 zu 1961–1990) und mit 16 % die stärkste Zunahme des Winterniederschlags verzeichnet.

Daher stellen Hochwasser, Überflutungen durch Starkregen und Vernässung durch Grundwasser besondere Herausforderungen dar. Aufgrund des steigenden Meeresspiegels sowie zunehmender Starkregenereignisse und erhöhter Abflüsse im Winter nehmen die Gefahr der Überlastung vorhandener, regelkonform auf bestimmte Jährlichkeiten ausgelegter Entwässerungssysteme und damit die Gefahren und Risiken von Überflutungen sehr wahrscheinlich deutlicher zu als in anderen Regionen des Landes. Hier sind die Grundwasserstände im Mittel generell nah an der

Geländeoberfläche und können zukünftig vermehrt zu Vernässungen und damit zu einem erhöhten Entwässerungsbedarf führen. Aufgrund des geringen Flurabstandes in diesen Regionen ist das obere Grundwasserstockwerk besonders den steigenden Temperaturen an der Oberfläche ausgesetzt. Kurze Sickerstrecken begünstigen zudem einen schnellen und ungefilterten Stoffeintrag in das Grundwasser. Beides kann zu einer Veränderung des Grundwasserchemismus führen. Die innerjährlichen Schwankungen der Grundwasserstände wie auch mittelfristige Schwankungen über mehrere Jahre sind an der Küste eher gering ausgeprägt und werden auch durch die weiträumig vorhandenen Entwässerungsstrukturen beeinflusst. Zukünftig kann die Jahresamplitude tendenziell geringfügig zunehmen und Tief- bzw. Hochstandsphasen können länger andauern, wodurch sich die Ausgangssituation und damit das Risiko vor allem für winterliche Hochwasser prinzipiell leicht erhöht. Gleichzeitig ist die Grundwasserneubildung hier aufgrund der Marschböden mit ihren oberflächennahen Grundwasserständen und der Entwässerung relativ gering. Dafür ist die Zehrung durch die gute Verfügbarkeit von Grundwasser für die Vegetation und die intensive Entwässerung der Landschaft besonders relevant. Das erhöht das Risiko von Grundwasserdürren und kann gleichzeitig dazu führen, dass es in Kombination mit dem steigenden Meeresspiegel zu einer küstennahen Grundwasserversalzung kommen kann. Beides erhöht den Druck auf die Verfügbarkeit von Grundwasser für die Bewässerung.

Handlungsfeld menschliche Gesundheit

Der höhere Wasserdampfgehalt der Luft führt wiederum zu einem höheren Wärmeempfinden (gefühlte Temperatur) der Außenlufttemperatur (NIKO, 2024). Die Zunahme an schwülen Tagen kann sich negativ auf die menschliche Gesundheit insbesondere auf die Thermoregulation des menschlichen Körpers auswirken. Zum einen kann die Haut aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit nicht mehr über die durch die Verdunstung des Schweißes entstehende Verdunstungskälte gekühlt werden (Evaporation), da die Verdunstung des Schweißes ausbleibt bzw. erschwert wird.

Zum anderen spielt die unterschiedliche Thermoregulationsfähigkeit in den verschiedenen Altersgruppen eine entscheidende Rolle. Insbesondere ältere Menschen und kleine Kinder sind von einer herabgesetzten Thermoregulation betroffen. Bei der Thermoregulation des Körpers spielt das Verhältnis zwischen Körperoberfläche und Körpergewicht eine entscheidende Rolle. Kinder (Personen zwischen 3 und 13 Jahren) haben ein größeres Verhältnis als Jugendliche und Erwachsene (Personen > 13 Jahre), sodass es Kindern aufgrund ihrer größeren Oberfläche im Verhältnis zum Körpergewicht schwerer fällt, Wärme nach außen abzugeben, da die Schweißproduktion erst bei einem höheren Schwellenwert im Vergleich zu Erwachsenen einsetzt.

6.3.2 Flachland

Das Flachland ist die größte Region, die hier diskutiert wird. Sie spannt von den Marschen bis zum Bergland ein Gebiet auf, das teils von einem maritimen, teils von einem subkontinentalen Klima geprägt ist. Prägend für diesen Raum ist das vergleichsweise flache Relief, das nur durch einige Endmoränenzüge gegliedert wird. Geologisch wird das Flachland durch die Ablagerungen der Eiszeiten geprägt, die Böden sind meist sandig. In den Niederungen sind zudem Moore und auch Flussmarschen mit lehmigen Böden anzutreffen. Im südlichen Flachland sind die Böden durch Lössablagerungen geprägt, was insgesamt zu einer sehr großen Diversität der Standortbedingungen im Flachland führt. Mit den Geestrücken und Niederungen spannt sich zudem eine komplexe Hydrogeologie auf.

Die subkontinentale Klimaregion, die sich als Gürtel von der Region um Hannover bis nach Ostniedersachsen zieht, gehört zu den wärmsten und niederschlagsärmsten Regionen Niedersachsens. Beides begünstigt sommerliche und fröhsommerliche Dürreereignisse. Gleichzeitig befinden sich im Flachland die für die Grundwasserneubildung relevanten Geestgebiete, deren durchlässiger Untergrund Grundwasser bis zu den Flussniederungen führt, die wiederum häufig durch schwere und undurchlässigere Böden gekennzeichnet sind.

Handlungsfeld Boden

Aufgrund der Vielfältigkeit der Standortbedingungen und auch der klimatischen Rahmenbedingungen im Flachland ist eine generelle Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld Boden für die Region komplex. Daher werden nur einzelne Aspekte regional fokussiert aufgegriffen.

So ist die Lüneburger Heide das Gebiet in Niedersachsen mit den meisten Flächen, die bereits innerhalb des Bezugszeitraums Wassermangel im Boden aufweisen. Dies kann sich im Zuge des Klimawandels weiter verstärken. Ein ansteigender Bewässerungsbedarf geht in dieser Region damit einher. Auch legen die Auswertungen nahe, dass sich im Flachland die Retentionsleistung (Wasseraufnahme) der Böden durch erhöhte Winterniederschläge am stärksten vermindern wird und hier das Klimarisiko am größten ist. Das Risiko von Stoffausträgen aus dem Boden ist auf den leichten Sandböden der Geest bereits hoch und kann im pessimistischen Fall noch einmal deutlich ansteigen. Wassererosion kann im Flachland trotz der eher geringen Hangneigungen zukünftig ein Problem werden. In Teilen der Region könnte durch die deutlich erhöhte Erosivität der sommerlichen Niederschlagsereignisse Gefährdungen auftreten, die bislang nicht bekannt waren. Insbesondere Gebiete mit Sandlössböden weisen ein hohes Risiko auf, aber auch die Lössböden der Börde.

Die Gefährdung durch Winderosion ist ein Klimarisiko, das insbesondere das Flachland betrifft. Durch trockenere Frühjahre erhöht sich hier das Risiko von Bodenabträgen, insbesondere bei den Sand- und Moorböden.

Handlungsfeld Landwirtschaft

Die vorher beschriebene zunehmende Wassermangelsituation wird sehr wahrscheinlich dazu führen, dass zukünftig mehr Wasser für die Bewässerung der Pflanzen benötigt wird. Gerade auf leichteren Böden im Flachland mit einer geringen Wasserspeicherkapazität und geringen Niederschlägen während der Vegetation, steigt das Risiko für Ertragsminderungen oder -ausfälle. Das betrifft die Region der Lüneburger Heide, aber auch die Geestregionen weiter südlich und die Regionen westlich bis ins Emsland.

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Die größten Waldflächen liegen im östlichen Bereich des Flachlands, in dem das Trockenstressrisiko aktuell am größten ist. Hier wird das Trockenstressrisiko vermutlich bis Ende des Jahrhunderts stark ansteigen. Im stärker maritim geprägten westlichen Flachland wird das Trockenstressrisiko für die Wälder ebenfalls zunehmen, jedoch in abgeschwächter Form.

Handlungsfeld Fischerei

Den größten Einfluss auf die Binnenfischerei- und Aquakulturproduktion stellt das Risiko eines Wassermangels in den Still- und Fließgewässern dar. Schwankende Wasserstände in den Stillgewässern führen zu Anomalien ihrer Schichtungen und gestörten Nährstoffkreisläufen. Dies bedingt u. a. eine Störung entwicklungsphysiologischer Prozesse aller aquatischen Lebewesen. In den Fließgewässern führen Wassermangelsituationen kurzfristig zum Verlust von Lebensräumen und Laichhabitaten durch ein temporäres Trockenfallen von Fließgewässerabschnitten. Verringerte Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einer schnelleren Erwärmung des Wassers, weswegen kälteliebende Fischarten wie die Bachforelle in höhere gelegene Gewässerabschnitte ausweichen. Sollten die Migrationskorridore durch Querverbauungen unterbrochen sein, kommt es zwangsläufig zu verringerten Reproduktions- bis hin zu steigenden Mortalitätsraten. Langfristig werden kälteliebende Fischarten das Flachland verlassen und nur noch in höher gelegenen Gewässerabschnitten zu finden sein.

Die Aquakulturproduktion ist ebenfalls auf eine ausreichende Wasserversorgung angewiesen. Einer Wassermangelsituationen in Oberflächenleitern kann nur durch die Substitution mit Grundwasser entgegnet werden, was den Druck auf diese Ressource erhöht.

Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

In diesem Handlungsfeld kann im Flachland zwischen den Prozessen in den Flussniederungen und den Geestrücken unterschieden werden, wobei die Prozesse und Risiken auch interagieren. So sind Hochwasserereignisse, Grundwasserhochstände und Vernässungen durch Grundwasser eher ein Phänomen der Niederungsgebiete, wo diese Risiken in Zukunft auch zunehmen können. Aufgrund des flachen Reliefs, in dem das anfallende Wasser nur langsam in die Nordsee abfließen kann, und durch die hohen Grundwasserstände, die durch die Flussläufe stabilisiert werden, können je nach Ausmaß mehr oder weniger weite Teile der Niederungen überflutet und ggf. auch Siedlungsbereiche bedroht werden. Maßnahmen zur Abwehr solcher Gefahren, wie z. B. Deiche, Rückhalteräume oder vorsorglich ausgewiesene Überschwemmungsgebiete bieten einen gewissen, aber keinen absoluten Schutz gegen Überflutungen. Zukünftig muss damit gerechnet werden, dass sich die Hochwasserverhältnisse im pessimistischen Fall in den entsprechenden Einzugsgebieten verschärfen können. Gründe hierfür sind die insgesamt steigenden Niederschlagsmengen, insbesondere im Winter und damit einhergehende höhere Grundwasserstände. Gleichzeitig kann es in Folge des Klimawandels prinzipiell immer und überall zu einer erhöhten Intensität von Regenereignissen kommen. Alle genannten Faktoren würden einerseits größeren Abflussscheitel hervorrufen, andererseits aber auch mehr Tage mit Hochwasserabflüssen, wodurch das Hochwasserrisiko und damit auch das Schadenspotenzial insgesamt erheblich zunehmen kann. Durch geringe Fließgeschwindigkeiten und/oder fehlender Entwässerungs- oder Abflussmöglichkeit im Flachland kann das Wasser darüber hinaus z. B. auf landwirtschaftlichen Flächen lange stehen und durch Staunässe

6.3.3 Bergland mit Harz

Das Bergland inklusive des Harzes ist eine Region, die südlich von Hannover beginnt. Hier herrscht ein submontanes, bzw. montanes Klima vor, das kühler, aber niederschlagsreicher ist. Insbesondere der Harz stützt mit seinen hohen, in Talsperren gespeicherten Niederschlägen die Wasserversorgung für größere Teile Niedersachsens. Die Talsperren bieten auch Hochwasserschutz. Ein steiles Relief führt Wasser schnell ab, in den höheren Lagen wird Niederschlag als Schnee zwar länger zurückgehalten jedoch im Frühjahr als Schneeschmelze schnell abgeführt. Neu gebildetes Grundwasser wird je nach hydrogeologischer Ausprägung des Untergrundes teils auch sehr schnell in

Schäden an den Pflanzen verursachen. Darüberhinaus können Starkregenereignisse indirekt auch zu erhöhten Stoffeinträgen ins Grundwasser führen.

Während die Niederungen durch die lehmigeren Böden, die besser Wasser halten können, und durch die insgesamt höheren und damit stabilisierenden Grundwasserstände widerstandsfähiger gegenüber Dürren sind, sind die Geestgebiete mit den gut durchlässigen sandigen Böden und tieferliegenden Grundwasserständen sensibler gegenüber Dürren, die durch zunehmende niederschlagsärmere Perioden ausgelöst werden. So wurden insbesondere hier vermehrt fallende Grundwasserstände beobachtet. Niedrige Grundwasserstände sind die Ursache für Niedrigwasserabflüsse. Diese können insbesondere das östliche Flachland, durch die warmen und tendenziell trockeneren Charakteristika dieser Region, treffen. Bei niedrigen Grundwasserneubildungsmengen und hohen Verdunstungsverlusten durch die wärmeren Temperaturen kann es zu einem Mangel an Bewässerungswasser kommen. Auch wenn die Bandbreiten der Projektionen für die Zukunft meist keine eindeutige Aussage zulassen, so zeigt die Mehrheit der Modelle tendenziell doch eine Verschärfung der Situation für trockene Verhältnisse an. Im pessimistischen Fall kann sich daher das Risiko häufig deutlich erhöhen, dass ökologische und menschliche Wasserbedarfe nicht mehr gedeckt werden.

Handlungsfeld menschliche Gesundheit

Nach Osten und Süden nehmen die Hitzetage stark zu, sodass in diesen Regionen vermehrt mit hitzeassoziierten Erkrankungen (z. B. Hitzschlag, Sonnenstich) gerechnet werden muss.

die Vorfluter abgegeben. Bodenkundlich wechseln sich im Bergland Böden mit unterschiedlich mächtigen Lössablagerungen in den Talbereichen und Unterhängen mit geringmächtigen Verwitterungsböden aus Festgesteinen an den Oberhänge und Kämmen ab.

Handlungsfeld Boden

Die geringmächtigen Verwitterungsböden im Harz weisen die mit Abstand geringste Retentionsleistung auf. Die hohen Winterniederschläge können meist nicht komplett durch die Böden aufgenommen werden. Durch die im pessimistischen Fall erhöhten Winterniederschläge erhöht sich hier das Klimarisiko noch weiter. Dies betrifft auch

die geringmächtigen Böden im sonstigen Bergland. Auch das Klimarisiko Bodenerosion durch Wasser ist im Bergland am stärksten ausgeprägt und wird sich nach den Projektionen auch noch weiter erhöhen. Der Wassermangel im Boden kann bis zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall ein Problem in der Region werden.

Hier ist jedoch keine eindeutige Richtung der Modelle zu verzeichnen. Winderosion spielt in der Region keine Rolle.

Handlungsfeld Landwirtschaft

Durch vermehrte Wasser-Erosionsereignisse im Bergland kann die landwirtschaftliche Flächennutzung eingeschränkt werden. Da die Böden häufig sehr tiefgründig sind und eine hohe Wasserhaltefähigkeit aufweisen, können vermehrte Winterniederschläge gut aufgenommen, pflanzenverfügbar gespeichert und im Vegetationsverlauf wieder freigesetzt werden. Auftretende Trockenphasen können somit gut überwunden werden und mögliche negative Folgen auf Ertrags- und Qualitätsbildung dürften geringer ausfallen als im Flachland mit Böden geringerer Wasserspeicherfähigkeit.

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Das Bergland und der Harz ist eine walddreiche Klimaregion, die aktuell aufgrund des Niederschlagsreichtums eine meist geringe Trockenstressgefährdung aufweist, die jedoch für die Fichte schon jetzt erhöht ist, wie die seit 2018 aufgetretenen starken Schäden in Fichtenbeständen zeigen. Allerdings wird im pessimistischen Fall bis zum Ende des Jahrhunderts die stärkste Zunahme des Trockenstressrisikos erwartet, so dass selbst in den höheren Lagen des Harzes für einige Baumarten kritische Wassermangelsituationen auftreten können. Aufgrund der erwarteten Temperaturzunahme könnten sich die Wachstumsbedingungen für wenig trockenheitsempfindliche Baumarten aber auch verbessern.

Handlungsfeld Fischerei

Ein langfristiger Wassermangel im Bergland, ist analog zum Flachland, das größte Risiko für die Binnenfischerei- und Aquakulturproduktion. Ausgedehnte Trockenphasen in Kombination mit steigenden Wassertemperaturen führen zu einer Lebensraumdegradation für kälteliebende Arten. Die klimabedingten Veränderungen der abiotischen Wasserparameter verlaufen jedoch langsamer als im Flachland, weswegen das Bergland langfristig als letzter Rückzugsort für diese Fischarten gilt. Ähnlich verhält es sich mit der Aquakulturproduktion, primär Durchflussanlagen zur Salmonidenerzeugung. Produktionsstandorte ohne Grundwasserzugang im Flachland werden langfristig, im Gegensatz zu Anlagen in höher gelegenen Regionen, nicht bestehen können.

Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

Ähnliche Risiken und Gefahren gehen im Bergland wie im Flachland auch von Sturzfluten im Zusammenhang mit Starkregen aus. Außerdem kann sich das abfließende Wasser, wenn es über die Ufer tritt, nicht so flächig ausbreiten, was gerade in schmalen Tälern zu hohen Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und dem Auftreten von Sturzfluten führen kann, dadurch erhöht sich die Überflutungsgefahr durch Starkregen. Durch die hohen Fließgeschwindigkeiten kann es zu verstärkter Erosion auf Feld-, Wald- und Wiesenflächen, dem Abtransport von Schlamm, Geröll und Treibgut und einer Erhöhung des Schadenspotenzials kommen.

Die hohen Fließgeschwindigkeiten tragen allerdings auch gleichzeitig zu einer schnelleren Entwässerung bei. Andererseits werden die Abflüsse in dieser Region an einigen Fließgewässern erheblich durch die Wirkung der Talsperren im Harz beeinflusst. Daher kann das zukünftige Risiko für Überschwemmungen hier nur begrenzt einheitlich eingeschätzt werden. Reichen die Speicherkapazitäten der Talsperren bei zunehmenden Winterniederschlägen oder höheren Niederschlagsintensitäten im Sommer aus, um die resultierenden Hochwasserabflüsse zu reduzieren, dann bleibt das Risiko in den unterhalb liegenden Gebieten eher moderat. Liegen aber bspw. die Niederschlagsschwerpunkte außerhalb der Einzugsgebiete der Talsperren, dann kann das Risiko insbesondere im Harzvorland zunehmen.

Im Bergland weisen die Grundwasserstände teilweise sehr hohe Amplituden auf. Dies ist u. a. bedingt durch die hydraulischen Verhältnisse und geringen Speichervolumina im klüftigen Untergrund, die zu einer schnellen Reaktion des Grundwasserstandes auf witterungsbedingte Veränderungen führen. Daher kommt es in höheren Lagen, trotz insgesamt hoher Niederschläge, kaum zu Vernässungen, aber in Trockenzeiten dennoch zu Wasserstress der Vegetation. Zukünftig zeigen sich in dieser Region tendenziell die größten Zunahmen im Hinblick auf die Amplitude der innerjährlichen Schwankungen beim Grundwasserstand, was zu einer (weiteren) Zunahme des Risikos für grundwasserabhängige Landökosysteme führen kann.

6.4 Ausblick

Niedersachsen verändert sich durch die vielfältigen Einflüsse des Klimawandels. Diese treffen die Küstenregion, das Flachland, das Bergland und den Harz auf teilweise unterschiedliche Art. Gleichzeitig sind einige absehbare Risiken durch das Klima heute schon als Hoch anzusehen. Diese Risiken können zukünftig sowohl im optimistischen als auch im pessimistischen Fall bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts weiter zunehmen. Dabei nimmt

die Gewissheit dieser Einschätzungen häufig ab je weiter in die Zukunft geblickt wird. Doch trotz dieser Unsicherheiten in den Erkenntnissen lassen sich aus den vorliegenden Auswertungen zum einen Handlungserfordernisse ableiten, zum anderen aber auch Forschungsbedarfe aufzeigen, um Klimafolgenanpassungsmaßnahmen auch zukünftig zielgerichtet planen und durchführen zu können.

6.4.1 Handlungserfordernisse

Im Folgenden wird eine Auswahl von wichtigen Handlungserfordernissen für die Handlungsfelder der KRANI 2025 genannt. Diese resultieren aus der Bewertung des Klimarisikos in Abhängigkeit von dessen Ausmaß, Bandbreite und Gewissheit.

Handlungsfeldübergreifend gilt zunächst, dass ohne konsequenten und globalen Klimaschutz die Klimafolgenanpassung schnell an die Grenzen kommen kann. Dabei ist das Beispiel des Meeresspiegelanstieg eindrucklich. Wie hoch kann man die Deiche an der Küste ökonomisch und physikalisch bauen? Daher gilt, dass Maßnahmen zum Klimaschutz die grundlegendste (und effektivste) Art der Vorsorge sind, um Auswirkungen und Risiken zu verringern.

Handlungsfeld Boden

Schutz der Böden gegenüber Bodenerosion

Bodenerosion durch Wind und Wasser wurden als maßgebliche Klimarisiken für die Böden in Niedersachsen identifiziert. Daher müssen bestehende Konzepte zum Schutz der Böden durch angepasste Bewirtschaftung (Pflugverzicht, Anpassung der Fruchtfolgen, Hanggliederung) in den betroffenen Regionen intensiviert und ggf. in Zukunft auf zusätzlich betroffene Regionen übertragen werden.

Schutz der Böden gegenüber Wassermangel

Durch länger anhaltende Trockenperioden werden die Böden in ihrer Funktion als Wasserspeicher für die Aufrechterhaltung der Lebensfähigkeit von Ökosystemen noch wichtiger. Deshalb sollte die Versiegelung von Böden auf ein Minimum reduziert und Maßnahmen zur Entsiegelung von Böden gefördert werden. Böden spielen durch

ihre Bereitstellung von Wasser zur Verdunstung durch die Pflanzen eine zentrale Größe bei der Kühlung von überhitzten Räumen, vor allem in Städten.

Schutz der Böden gegenüber weiteren Degradationsprozessen

Erhöhte Bodenfeuchten im Winter schränken die Befahrbarkeit der Böden stark ein. Falls die Böden trotzdem befahren werden, kann es zu schädlichen Bodenveränderungen durch Bodenverdichtung kommen, die zu einem Rückgang der Funktionalität führen. Wärmere Mitteltemperaturen (erhöhte Mineralisation) und durch Wassermangel ausgelöste Dürreperioden (geringer Eintrag an organischer Substanz in die Böden) können zum Humuschwund führen, welcher die Bodeneigenschaften stark beeinflussen kann. Zudem bedeutet der Schwund von Humus eine weitere Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre.

Schutz der Moore

Niedersachsen ist das moorreichste Bundesland. Moore spielen im Klimasystem eine wichtige Rolle, da sie einen enormen Kohlenstoffspeicher darstellen. Für die Klimaanpassung sind sie aufgrund ihrer Kühlungs- und Wasserrückhaltefunktion von besonderer Bedeutung. Aktuell sind die niedersächsischen Moore überwiegend entwässert und emittieren große Mengen an Treibhausgasen. Nur durch den Schutz und ein unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf umliegende Flächen geeignetes Wassermanagement (das auch die vollständige Wiedervernässung beinhalten kann) können die Freisetzung von Treibhausgasen verringert und die Funktionalität der Moorböden, zum Beispiel als Standort für seltene Tier- und Pflanzenarten gesichert werden.

Handlungsfeld Landwirtschaft

Schutz vor Hitze in der Tierhaltung

In der Tierhaltung sollte bei Hitzeereignissen auf einen temperaturangepassten Weidegang und eine hitzeangepasste Fütterung sowie Tiertransporte umgestellt werden. Zudem sollten im Stall und im Außenbereich Belüftungs- und Kühlsysteme etabliert werden. Die Haltung/Züchtung hitzetoleranter Rassen/Arten kann weiterhin helfen, den Auswirkungen dieser Extremereignisse entgegenzuwirken.

Züchtung im Pflanzenbau

Durch die Züchtung trockenheitstoleranter Sorten und resistenter Sorten gegenüber Schaderregern kann im Pflanzenbau das Risiko für Ertragsminderungen oder -ausfälle gemindert werden. Auch die Erprobung neuer Sorten und Arten kann einen Beitrag zur Risikominderung leisten, ist jedoch mit den aktuellen Züchtungsmethoden ein mittel- bis langfristiger Prozess.

Pflanzenbau allgemein

Durch Humusaufbau, die Förderung erosionsmindernder, bodenlebenfördernder und bodenfruchtbarkeitserhaltender (bodenkonservierender) Bearbeitungsverfahren und Anbautechniken (zum Beispiel innovative Fruchtfolgen, Dauerbewuchs, Direktsaat), die Anpassung von Aussaat- und Erntezeitpunkten und eine optimierte Düngung kann das Ausmaß der Klimawandelfolgen, die den Pflanzenbau betreffen, gemindert werden.

Bewässerungstechniken

Eine Weiterentwicklung der Bewässerungstechnik in Kombination mit einer noch besser an den Bedarf angepassten Bewässerungsmenge in der Landwirtschaft kann die Wasserverfügbarkeit und die Wassernutzungseffizienz im Pflanzenbau steigern und somit das Risiko von Ertragsausfällen oder Qualitätsminderungen senken.

Schaderregerpotenziale

Erkenntnisse über das Auftreten neuer Schaderreger sowie die Entwicklung von Methoden zur Bekämpfung von Schaderregern kann dazu beitragen, das Risiko durch Schädlinge und Krankheiten im Pflanzenbau zu reduzieren.

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Trockenstress

Die Trockenstressgefährdung wird als das größte durch den Klimawandel ausgelöste Risiko für die Wälder Niedersachsens angesehen. Durch zunehmenden Trockenstress werden gleichzeitig auch die meisten durch Schadorganismen ausgelösten Risiken verstärkt. Daraus ergeben sich folgende Erfordernisse einer klimaangepassten Wald- und Forstwirtschaft:

- Umbau von risikobehafteten Waldbeständen mit trockenheitstoleranten Baumarten
- Vermehrte Etablierung von klimarobusten Mischbeständen zur Streuung möglicher Risiken
- Angepasstes Durchforstungsregime zur Reduzierung des Trockenstresses
- Maßnahmen zur Wasserretention, um Folgen von Starkregenereignissen zu mildern und Trockenstressrisiken zu reduzieren

Waldbestand

Angepasstes Monitoring von Waldbeständen zur frühzeitigen Identifizierung von möglichen Risiken.

Handlungsfeld Fischerei

Durchgängigkeit der Gewässer

Die durch Querbauwerke unterbundene Durchgängigkeit von Fließgewässern hindert primär kälteliebende Fischarten wie z. B. Bachforellen am Aufstieg in höher gelegene und kühlere Gewässerabschnitte. Den Fischen fehlt es an Migrationskorridoren, um z. B. einem wachsenden pathogenen Erregerdruck zu entgehen.

Schutz vor solarer Strahlung

Zunehmende Beschattung der Produktionseinheiten zur Reduktion der Wassertemperatur und Prädatoren. Feste Überdachungen bieten Flächen zur Installation von PV-Modulen und tragen somit zur Dekarbonisierung des Sektors bei.

Implementierung von Filtertechnik

Eine reduzierte Wasserverfügbarkeit bedingt die Reduktion des Fischbestandes, sofern keine technischen Maßnahmen ergriffen werden. Geeignete Maßnahmen wären der Einsatz von Sauerstoffeintragungssystemen, eine effektive Feststoffseparation, sowie der Einsatz von Nitrifikationsstufen. Der Prozess der Technisierung führt jedoch immer zu einer Steigerung der Produktionskosten und reduziert somit u. U. die Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe.

Züchtung standortadaptierter Arten

Der überwiegende Teil niedersächsischer Aquakulturbetriebe erzeugt aus Jungfischen Speisefische, diese Betriebe sind demnach horizontal strukturiert. Im Laufe der letzten Jahrzehnte stellten immer mehr Betriebe die Laichfischhaltung und Setzlingsaufzucht ein und kauften vermehrt Jungfische zu. Dies bedingt den genetischen Verlust standortadaptierter Fische durch eigene Zuchtmaßnahmen. Die Wiederaufnahme vertikaler Strukturen von der Reproduktion bis zur Mast verkaufsfähiger Fische wäre angebracht.

Diversifizierung in der Fischerei

Um den ökologischen und klimatischen Veränderungen in der südlichen Nordsee zu begegnen, ist eine umfassende Neuausrichtung der Fischerei notwendig. Dabei steht die Anpassung der Zielarten im Fokus. Diese Entwicklung geht einher mit dem Übergang zu einer Mehr-Arten-Fischerei, die nicht nur die Resilienz der Betriebe stärkt, sondern auch auf ein breiteres ökologisches Spektrum setzt. Zudem geraten die bisherigen Quotenregelungen unter Druck. Klimadaten und sich verändernde Bestände verlangen nach einem flexiblen Quotenmanagement, das kurzfristig auf Verschiebungen reagieren kann. Auch die Integration neuer Fischarten in bestehende Regelwerke wird immer dringlicher, um eine rechtssichere und nachhaltige Bewirtschaftung zu ermöglichen.

Für den Fang neuer oder sich verändernder Fischarten infolge klimatischer Verschiebungen sind moderne und flexibel einsetzbare Kutter notwendig, die den Einsatz verschiedener Fangmethoden ermöglichen und mit herkömmlichen Umbauten für die niedersächsische Flotte nicht realisierbar sind. Der gezielte Neubau von Fischereifahrzeugen ermöglicht nicht nur emissionsarme Antriebssysteme, sondern auch die technische Ausstattung für eine diversifizierte und zukunftsfähige Fischerei. Um die wirtschaftliche Resilienz der Branche zusätzlich zu stärken, müssen bestehende Vermarktungsstrategien erweitert und an neue ökologische sowie marktwirtschaftliche Bedingungen angepasst werden.

Förderprogramme sollten daher nicht nur den Neubau unterstützen, sondern auch die Entwicklung regionaler Absatzmärkte und nachhaltiger Wertschöpfungsketten gezielt unterstützen.

Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Anpassung bestehender Küstenschutzbauwerke

Im Küstenschutz werden die vorhandenen Schutzbauten (Deiche, Sperrwerke, etc.) bereits an den Klimawandel angepasst. Einen Überblick über die erforderlichen Verstärkungen liefert die in Kürze verfügbare Fortschreibung des Generalplans Küstenschutz.

Naturbasierte Küstenschutzmaßnahmen

Naturbasierte Schutzsysteme bilden eine wertvolle Ergänzung zum traditionellen Küstenschutz. Intakte Ökosysteme bieten nachhaltige Anpassungskapazitäten und fördern gleichzeitig den Klimaschutz. Beispielsweise werden durch die Stärkung und Wiederansiedlung von Seegras und Salzwiesen die Seegangbelastungen reduziert, der Boden gegen Erosion geschützt und gleichzeitig die CO₂-Aufnahme gestärkt. Aber auch Sandaufspülungen sind essentiell um Strände und Dünen zu stabilisieren.

Sedimentmanagement

Voraussetzung für die Existenz des Wattenmeeres ist die Verfügbarkeit von genügend Sedimenten, die ein Mitwachsen der Watten an die steigenden Wasserstände fördern. Dazu werden ökologische Sedimentmanagementstrategien entwickelt, die den natürlichen Anwuchs des Meeresbodens unterstützen sollen und die Resilienz des Ökosystems steigern. Davon profitiert auch der Küstenschutz, indem der ansonsten erhöhte Energieeintrag aus der Nordsee vor den Küsten gedämpft wird.

Raumplanung

Das Integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM) ist als wichtiges Instrument für die Klimaanpassung der Küstenregion fortzuschreiben. Hier werden die verschiedenen Nutzungen und Interessen zusammengeführt. Mithilfe der Raumplanung werden die entwickelten Ziele frühzeitig in Projekte und Planungen integriert. Im Raumordnungskonzept für das niedersächsische Küstenmeer (ROKK) werden beispielsweise Flächen für den Deichbau und zur Kleigewinnung ausgewiesen und gesichert.

Grundwasserversalzung

Um der Grundwasserversalzung in den Küstenregionen zu reduzieren, ist eine nachhaltige Bewirtschaftung entscheidend. Dazu gehört nicht nur die Vermeidung von übermäßiger Grundwasserentnahme. Auch eine Optimierung der Entwässerungssysteme kann dazu beitragen, die Versalzung zu verlangsamen.

Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

Vorhersage und Warnsysteme

Durch die dargelegte zu erwartende Verschärfung der Hochwasserlagen und starkregenbedingten Überflutungen hinsichtlich Intensität und Häufigkeit sind dazu Informations-/Warn- und Vorhersagesysteme kontinuierlich zu optimieren und auf technisch aktuellem Stand zu halten (Kommunikationswege optimieren, Vorwarnzeiten durch Vorhersagen verlängern, Echtzeit-Visualisierung v.a. bei extremen Ereignissen) sowie regelmäßige Übungen abzuhalten. Der Gefahrenabwehr bzw. den Akteur:innen des Katastrophenschutzes kommt eine entscheidende Bedeutung im Hochwasser- und Starkregenfall zu, entsprechende Maßnahmen zur Schadensminderung umsetzen und koordinieren.

Hochwasserschutz

Optimierung des technischen Hochwasserschutzes (z. B. Deiche, Rückhaltebecken) sowie Erweiterung des vorsorgenden Hochwasserschutzes (z. B. Ausweitung festgesetzte Überschwemmungsgebiete) im Hinblick auf zukünftig sich verändernde Randbedingungen (Abflussscheitel, Wahrscheinlichkeiten, Wellenvolumen).

Starkregenvorsorge

Städte und Regionen müssen sich auf die durch Starkregen verursachten Überflutungen und Sturzfluten durch entsprechende Maßnahmen vorbereiten. Es müssen Informationen und Wissen über Ursachen, Gefahren und Risiken von Starkregenereignissen vermittelt werden, um neben den kommunalen Maßnahmen auch eine effektive (Eigen-)Vorsorge und einen effektiven Schutz vor nachteiligen Folgen dieser Ereignisse betreiben zu können. Wichtig in diesem Bereich ist auch, die Vorhersage und Warnung für lokale Starkregenereignisse und die Gefahrenabwehr (u. a. die Kommunikation im Ereignis, aber auch die Information betroffener Bürger:innen, Alarm- und Einsatzplanung) zu verbessern.

Wassermengenmanagement

Die bereits begonnenen Maßnahmen zur Verbesserung des Wassermengenmanagements müssen fortgesetzt werden. Damit wird die Resilienz gegenüber absehbar zunehmenden und extremeren Nass- und Trockenphasen verbessert. Dabei wirken viele Maßnahmen auf mehrere Handlungsfelder. So führt der Rückhalt und die Speicherung von Wasserüberschuss, z. B. bei Hochwasser, Starkregen oder viel Niederschlag im Winter, zur Abschwächung von Hochwasserspitzen, zur Grundwasseranreicherung und zur Verbesserung des Wasserdargebots (v. a. in Zeiten von Wassermangel) durch Nutzung des gespeicherten Wassers z. B. zur Beregnung oder als industrielles Brauchwasser.

Dürrevorsorge

Etablierung einer (mittelfristigen) Dürre- und Niedrigwasservorhersage. Warnungen können dann zu Anpassungen in der Landwirtschaft und Wasserwirtschaft (u. a. Tal-sperrenbewirtschaftung) genutzt werden, um Schäden zu vermeiden bzw. zu mindern.

Handlungsfeld menschliche Gesundheit

Hitzeschutz

Vor allem die vulnerablen Gruppen müssen durch Anpassungsmaßnahmen vor der extremen Hitze geschützt werden. Die Planung sollte kurzfristige Maßnahmen (wie z. B. Hitzewarnungen), aber auch langfristige Maßnahmen (wie z. B. klimaresiliente Gebäudeplanung) berücksichtigen.

Vektormonitoring

Um die Abundanz und Ausbreitung von Vektoren in Niedersachsen sichtbar zu machen und das Risiko besser abschätzen zu können, bedarf es der Etablierung eines Vektormonitorings. In Bezug auf die Tigermücke ist hierbei die Unterstützung der Bevölkerung besonders wichtig. Aufklärungskampagnen sollten das Wissen zur Erkennung und zu Maßnahmen gegen die Ansiedelung beinhalten. Der Bereich der Digitalisierung sollte unterstützend eingebunden werden, wie z. B. KI zur Identifizierung invasiver Arten oder die Einbindung von Softwareanwendungen zur kommunalen Etablierungseinschätzung invasiver Arten.

Klimagerechtigkeit

Es müssen spezifische Studien für Niedersachsen angefertigt werden, die den Zusammenhang zwischen sozial bedingten gesundheitlichen Ungleichheiten und Klimawirkungen umfassend untersuchen.

Cyanobakterien und Vibrionen

Die Reduktion und Kontrolle von Nährstoffen im Gewässer wird als erfolgreichste und nachhaltigste Maßnahme zur Vermeidung von Cyanobakterienblüten beschrieben. Gewässersanierungen sind in der Regel sehr schwierig, komplex und mit sehr hohen Investitionen verbunden. Eine wichtige Maßnahme zum Gesundheitsschutz ist die Sensibilisierung der Bevölkerung z. B. durch Warnungen vor Ort am Gewässer und durch die allgemeine Aufklärung zum Erkennen von Cyanobakterienblüten.

Um die Entwicklung des Vorkommens von Vibrionen in der Nordsee bzw. in den Mündungsgebieten der Nordsee zu beobachten, sollte weiterhin ein Monitoring an repräsentativen Stellen durchgeführt werden. Weitere Maßnahmen zielen auf die Sensibilisierung und Aufklärung der Ärzteschaft und der Risikopersonen ab.

6.4.2 Forschungsbedarf

Die Bearbeitung der Klimarisiken der KRANI 2025 war abhängig von den vorliegenden Ergebnissen der Fachbehörden und den bestehenden Forschungsergebnissen diverser Verbundprojekte. Dabei lagen einzelnen Handlungsfeldern mehr Erkenntnisse vor als anderen. Gleichzeitig waren die Cluster Infrastruktur (mit Bauwesen, Energiewirtschaft und Verkehr) und Wirtschaft (mit Industrie

und Tourismus) und im Cluster Land das Handlungsfeld Biologische Vielfalt thematisch bisher nicht vertreten. Diese können anhand der etablierten Methodik ergänzt werden.

Um die Risikoabschätzungen der betrachteten Handlungsfelder zu erweitern und bestehende Auswertungen zu vertiefen, ist im Folgenden der Forschungsbedarf aus Sicht der Autor:innen aufgeführt, der für eine Weiterentwicklung der KRANI hilfreich sein könnte.

Handlungsfeldübergreifend

- Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung von (Klima-) Modellen sowie Erweiterung des Prozessverständnisses im Klimasystem, mit dem Ziel, Unsicherheiten (Bandbreiten) in den Ergebnissen zu reduzieren und robustere Aussagen in der Entwicklung verschiedenen Themenfelder zu ermöglichen (z. B. Sturm, Wind, Starkregen).
- Ein Monitoring von z. B. Gesundheitsdaten, Grundwasserständen, Starkregenereignissen, Waldzustand, Bodenwassergehalten und Kohlenstoffgehalte der Böden muss sowohl räumlich als auch zeitlich hochauflösend ausgebaut werden. Nur so können die Folgen des Klimawandels bereits heute verlässlich identifiziert werden. Gleichzeitig ermöglichen bessere Messdaten auch eine Optimierung von Modellen zur Abschätzung der Klimaveränderungen und Klimafolgen in der Zukunft.
- Aussagen zu zukünftigen Extremereignissen sind weiterhin schwierig zu treffen, da diese per Definition nur selten vorkommen und ggf. erst durch Überlagerung verschiedener Prozesse entstehen können. Beobachtungs- bzw. Modellreihen erfassen diese nur bedingt (z. B. statistische Abschätzung des HQ100-Abflusses bei Hochwasser). Hier bedarf es neuer methodischer Ansätze, um entsprechende Datengrundlagen bereitstellen zu können, die robustere Aussagen zu Extremereignissen ermöglichen (z. B. Ansätze auf Basis künstlicher Intelligenz, statistische Wettergeneratoren).
- Veränderungen in den verschiedenen Handlungsfeldern können durch unterschiedliche Wirkmechanismen hervorgerufen werden. Um klimawandelbedingte Auswirkungen zu erkennen, bedarf es der Identifikation und Verwendung von (abgestimmten) Indikatoren (bzw. Messdaten), die einen (möglichst) eindeutigen Hinweis auf die Wirkung des Klimawandels zulassen und nicht (wesentlich) durch weitere Wirkfaktoren beeinflusst werden.

Handlungsfeld Boden

- Forschungsbedarf zu Auswirkungen des Klimawandels auf weitere Bodenfunktionen und Entwicklung neuer sowie Weiterentwicklung bestehender Wirkmodelle im Handlungsfeld Boden, um auch weitere Änderungen der Bodenfunktionen projizieren und höher zeitlich und räumlich aufgelöste Klima(projektions)daten berücksichtigen zu können. Auch Erkenntnisse aus weiteren Modellierungen, z. B. der Flurabstandsänderung, können die Aussagefähigkeit der Modelle verbessern.
- Aufrechterhaltung des Bodendauerbeobachtungsprogramms und dessen Weiterentwicklung hin zu einem Boden-Klima-Monitoring. Die Auswertungen der Bodendauerbeobachtung von Niedersachsen können wichtige Erkenntnisse zu den Veränderungen der Bodenfunktionalität im Klimawandel bringen.
- Forschungsbedarf zu Auswirkungen der Entwicklungen z. B. in der Land- und Forstwirtschaft in Hinblick auf den Wasserbedarf von Kulturen sowie Weiterentwicklung von Bodenwasserhaushaltsmodellen (konkret: BOWAB) in Hinblick darauf.
- Forschungsbedarf zum Wassermanagement in Mooren, mit dem Ziel eine Reduzierung der Treibhausgase zu erreichen, und zu an höhere Wasserstände angepasste Bewirtschaftungsformen (u. a. Freiflächen-PV auf Mooren).
- Forschungsbedarf zu Auswirkungen des Klimawandels auf die im Boden lebenden Arten und die Bodendiversität.
- Forschung zu Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt und Stoffumwandlungsprozesse im Boden. Hierbei insbesondere auch auf die organische Substanz im Boden.

Handlungsfeld Landwirtschaft

- Forschung zu der Wirksamkeit neuer diversifizierter Anbausysteme (erweiterte Fruchtfolgen, Integrierter Landbau, Anbau toleranter Kulturarten) als Maßnahmenoptionen zur Reduktion der Klimarisiken im Pflanzenbau.
- Forschung zu zunehmendem Bewässerungsbedarf der Pflanzen und der Wirksamkeit von Bewässerungssystemen.
- Forschung zu einem zunehmenden Bedarf an Kühl- und Belüftungssystemen in der Nutztierhaltung.
- Forschung zu Auswirkungen der Klimawandelfolgen auf die Haltungssysteme in der Nutztierhaltung.
- Forschung zu besseren Ertragsprognosemodellen im Pflanzenbau.
- Forschung zur Wirkung einer optimierten Ausbringung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln und Züchtung feuchte- bzw. hitzetoleranter Sorten.
- Forschung zur Entwicklung von Prognosemodellen und Entscheidungshilfen zum Auftreten neuer Schaderreger.
- Forschung zu Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf die pflanzenbauliche Produktion.

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

- Forschung zu kritischen Grenzwerten der Trockenstressgefährdung.
- Forschung zu alternativen trockenstressrobusten Baumarten.
- Forschung zu durch den Klimawandel verstärkten biotischen und abiotischen Risiken.
- Forschung zu Anpassungsmaßnahmen des Waldmanagements.
- Forschung zu klimawandelbedingten Änderungen von Ökosystemleistungen der Wälder (z. B. Kohlenstoffspeicherung, Wasserdienstleistungen, Sicherung der Biodiversität).

Handlungsfeld Fischerei

- Forschung bezüglich Anpassungsoptionen der Fischereiflotte an die veränderten Klimabedingungen sowie der Möglichkeit neuer Nutzungsformen.
- Forschung zu möglichen Anpassungen von bestehenden Fangquoten und Managementmodellen.
- Forschung zu Nahrungsnetzveränderungen und deren Auswirkungen auf kommerzielle Fischbestände.
- Forschung zu möglichen Verschiebungen von Fanggebieten.
- Forschungsbedarf zu genomischen Eigenschaften für die Weiterentwicklung standortadaptierter und klimaresilienter Arten.
- Forschung zur Entwicklung von nachhaltigen und effizienten Futtermittelzusatzstoffen aus regionalen Rohstoffen in der Aquakultur.
- Forschungsvorhaben zur technischen Weiterentwicklung von Haltungssystemen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit (z. B. Reduktion Wasserbedarf, Einsatz erneuerbarer Energie) und Effizienzsteigerung.
- Forschung zur Entwicklung zum Auftreten von Krankheiten und Parasiten in Aquakulturen und Entwicklung von Präventions- und Behandlungsmethoden.

Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

- Digitalisierung und Homogenisierung historischer Daten zur besseren Beschreibung der natürlichen Klimavariabilität.
- Weiterentwicklung der Messsysteme für eine kontinuierliche Überwachung der Klimaindikatoren.
- Verbesserung des Systemverständnisses hinsichtlich der komplexen Abhängigkeiten zwischen Hydro- und Morphodynamik unter Berücksichtigung biogeochemischer Prozesse.
- Weiterentwicklung mathematischer Wirkmodelle und Analysemethoden.
- Untersuchung nachhaltiger, ökosystemorientierter Managementlösungen für die Küstenressourcen, um klimawandelbedingte Veränderungen im Wattenmeer durch die Förderung natürlicher Prozesse zu reduzieren.
- Verbesserung des Verständnisses zu den Auswirkungen steigender Wassertemperaturen und Wasserstände auf das Ökosystem, um geeignete Maßnahmen zur Resilienzsteigerung entwickeln zu können.
- Entwicklung robuster und anpassungsfähiger Küstenschutzstrategien durch Nutzung natürlicher Prozesse in Kombination mit konventionellen Methoden.

Handlungsfeld Wasserwirtschaft und Wasserhaushalt

- Verbesserung der Vorhersage von hochwasserauslösenden Niederschlagsereignissen und der Frühwarnung vor lokal auftretenden Starkregen sowie der Ermittlung damit verbundener Folgen (z. B. Überschwemmungsflächen, Sturzfluten) mit Hilfe von KI-basierten Methoden.
- Erarbeitung von einheitlichen Grundlagen für die Analyse von Abflussvolumen-Statistiken unter dem Einfluss des Klimawandels.
- Forschung zu den Auswirkungen der Grundwassertemperaturerhöhung auf die Grundwasserqualität sowie temperaturbeeinflussten Prozesse im Grundwasser und damit auch die unmittelbare Auswirkung auf die Qualität des Trinkwassers.
- Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Klimamodelldaten zur Abschätzung der Veränderung der Hochwasserrisiken v. a. in kleinen Einzugsgebieten (mit kurzen Reaktionszeiten auf das Niederschlagsgeschehen).
- Kombination von Klimamodell, hydrologischem Abflussmodell und hydraulischem Modell (ggf. mit Schadensmodell) zur Ermittlung nicht nur der Veränderung extremer Abflüsse, sondern auch der damit verbundenen Veränderung auf Überschwemmungsflächen und Schadenspotenziale (prozessbasierte Hochwasserrisiko-Modellkette).

Handlungsfeld Gesundheit

- Forschung zu einem Monitoring, das den Zusammenhang zwischen sozial bedingten gesundheitlichen Ungleichheiten und Klimawirkungen umfassend untersucht und Handlungsmöglichkeiten aufzeigt.

6.4.3 Fazit

Die vorliegende Studie zeigt nachdrücklich, dass Niedersachsen in vielen Sektoren vom Klimawandel betroffen sein wird und dass es einen entsprechend großen Bedarf der Klimafolgenanpassung gibt. Dabei soll betont werden, dass Klimaschutz die wirksamste Maßnahme ist, um den Anpassungsbedarf zu reduzieren. Die mit dem Klimawandel einhergehenden ausgewerteten Risiken für Niedersachsen zeigen deutlich, dass großer Handlungsbedarf im Bereich der Landwirtschaft, der Waldwirtschaft, der Fischerei, des Küstenschutzes, der Wasserwirtschaft und der Gesundheit bereits besteht und sich weiter erhöhen kann. Dabei sind die diversen Ressourcen wie Wasser und Boden sowie die Gesundheit der Menschen und der vielfältigen Ökosysteme ein wertvolles Gut, das es zu schützen gilt. Bemühungen für den Erhalt und Schutz müssen künftig in allen Sektoren weiter vorangetrieben werden.

Um Niedersachsen effektiv an die Folgen des Klimawandels anzupassen, können Vereinheitlichungen von Eingangsdaten, Methoden, relevanten Indikatoren und Klimarisiken, wie in dieser Studie, helfen. Hierfür bedarf es sowohl einer kontinuierlichen und erweiterten Wissensgenerierung durch die Forschung als auch innerhalb der zuständigen Behörden, damit bestehende Erkenntnisse vertieft und gleichzeitig weitere Handlungsfelder und Klimarisiken zukünftig betrachtet werden können. Für eine verstetigte intersektorale Auswertung der Klimarisiken ist es unerlässlich, die Forschung zu den Themenfeldern Klimawandel, Klimaschutz und Klimafolgenanpassung fortzuführen

und zu intensivieren. Behördliche Netzwerke, wie das niedersächsische Klimakompetenznetzwerk, sind dabei für eine transdisziplinäre Integration unerlässlich und sollten die personellen Ressourcen dafür verfügbar haben. Gleichzeitig muss entsprechendes Wissen adressatengerecht an alle Akteur:innen der Klimaanpassung (Landespolitik, Kommunen, Bürger:innen) kommuniziert werden. Das Ziel ist dabei vom Wissen zum Handeln zu kommen. Vereinfachte Fördermöglichkeiten und Pilotvorhaben mit Vorbildcharakter können dabei helfen, Umsetzungshemmnisse zu reduzieren, Erkenntnisse in die Fläche zu tragen und diese in die Praxis zu überführen.

Die KRANI 2025 trägt den derzeitigen Stand der Forschung innerhalb der Wissenschaft und der Fachbehörden zusammen. Auf Basis dessen können vielfältige Risiken durch den Klimawandel und entsprechende Anpassungsbedarfe regional identifiziert werden, um konkrete Anpassungsmaßnahmen vorzubereiten. Die Klimawirkungen, bei denen bereits laufende Anpassungsbemühungen mitberücksichtigt wurden, zeigen sehr häufig geringere Klimarisiken (Belastung auf den Insel- und Küstenschutz). Das belegt den Nutzen und die Wirksamkeit von vorsorgenden Maßnahmen. Dabei ist es wichtig, den Anpassungsprozess so früh wie möglich zu starten und Maßnahmen so zu planen, dass sie bereits heute einen Nutzen bringen, auch wenn ggf. die Gewissheit für die Entwicklungen in Zukunft eher gering sind. Denn eine verspätete Anpassung oder die Beseitigung der Schäden von Klimafolgen (ohne Anpassung) kosten stets mehr Ressourcen als vorsorgendes Handeln im Sinne eines no-regret-Ansatzes.

7 Literatur

- Adane, Z. A., Nasta, P., Zlotnik, V., & Wedin, D. (2018). Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 171–183.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.001>
- Akamp, M., & Schattke, H. (2011). Regionale Vulnerabilitätsanalyse der Ernährungswirtschaft im Kontext des Klimawandels. Eine Wertschöpfungskettenbetrachtung der Fleischwirtschaft in der Metropolregion Bremen-Oldenburg (Werkstattbericht No. 8). Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
<https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-opus-165494>
- Albert, M., Nagel, R.-V., Nuske, R. S., Suttmöller, J., & Spellmann, H. (2017). Tree Species Selection in the Face of Drought Risk—Uncertainty in Forest Planning. *Forests*, 8(10), Article 10.
<https://doi.org/10.3390/f8100363>
- Albrecht, F., Wahl, T., Jensen, J., & Weisse, R. (2011). Determining sea level change in the German Bight. *Ocean Dynamics*, 61(12), 2037–2050.
<https://doi.org/10.1007/s10236-011-0462-z>
- Amanambu, A. C. (2015). Geogenic Contamination: Hydrogeochemical processes and relationships in Shallow Aquifers of Ibadan, South-West Nigeria. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 9, Article 9. <https://doi.org/10.2478/8248>
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A., & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>
- Amorim-Maia, A. T., Anguelovski, I., Chu, E., & Connolly, J. (2022). Intersectional climate justice: A conceptual pathway for bridging adaptation planning, transformative action, and social equity. *Urban Climate*, 41, 101053.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101053>
- Anguelovski, I., Brand, A. L., Connolly, J. J. T., Corbera, E., Kotsila, P., Steil, J., Garcia-Lamarca, M., Triguero-Mas, M., Cole, H., Baró, F., Langemeyer, J., Del Pulgar, C. P., Shokry, G., Sekulova, F., & Argüelles Ramos, L. (2020). Expanding the Boundaries of Justice in Urban Greening Scholarship: Toward an Emancipatory, Antisubordination, Intersectional, and Relational Approach. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(6), 1743–1769.
<https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1740579>
- Anhalt, M., Bindick, S., & Meyer, S. (2021). Das Juli-Hochwasser 2017 im südlichen Niedersachsen. NLWKN, Norden.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/124949>
- Anthony, M. A., Bender, S. F., & van der Heijden, M. G. A. (2023). Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33), e2304663120.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>

- Azoulay, C. (2024). Impacts de la crise environnementale et climatique sur la santé de la femme: Quelles spécificités ? Que peut-on faire ? *Gynécologie Obstétrique Fertilité & Sénologie*, 52(9), 524–532.
<https://doi.org/10.1016/j.gofs.2024.03.004>
- Bacanovic, J., Breitsameter, L., Bürger, J., Edler, B., Finkh, M., Gebauer, K., Gerowitt, B., Gummert, A., Hoffmann, H., Jörgensen, R. G., Juroszek, P., Kakau, J., Kleinhenz, B., Lukas, S., Märländer, B., Meyhöfer, R., Niere, B., Paustian, M., Peters, K., ... von Tiedemann, A. (2014). Forschungsthema 3: Pflanzenproduktion (FT3). In KLIF – Klimafolgenforschung in Niedersachsen. Abschlussbericht 2009 bis 2023.
https://www.wasserblick.net/servlet/is/157273/2014_Abschlussbericht_KLIF.pdf?command=downloadContent&filename=2014_Abschlussbericht_KLIF.pdf
- Basedow, H.-W., Bolze, I., Engel, N., Gunreben, M., Hammerschmidt, U., Palm, S., Sbresny, J., Stadtmann, R., & Steininger, A. (2021). Flächenneuanspruchnahme und Bodenversiegelung in Niedersachsen (No. GeoBerichte 14; S. 15, 17 MB). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_14_2021
- Basen, T., & Brinker, A. (2019). Klimawandel und Fischerei: Auswirkungen, Risiken, Chancen und Handlungsfelder (No. 98). Deutscher Fischerei-Verband e.V.
- Basen, T., Chucholl, C., & Brinker, A. (2022). Auf schmalem Grad°. Die Zukunft unserer Fische in der Klimakrise. Analysen, Vorhersagen, Handlungsmöglichkeiten. Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg.
- Bauer, G. R., Churchill, S. M., Mahendran, M., Walwyn, C., Lizotte, D., & Villa-Rueda, A. A. (2021). Intersectionality in quantitative research: A systematic review of its emergence and applications of theory and methods. *SSM - Population Health*, 14, 100798.
<https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.100798>
- Baumgarten, C., Christiansen, E., Naumann, S., Penn-Bressel, G., Rechenberg, J., & Walter, A.-B. (2012). Hochwasser—Verstehen, erkennen, handeln! [Broschüre]. Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_new.pdf
- Beck, H.-P., & Zum Hingst, J. (Hrsg.). (2023). Energie und Wasserspeicher Harz - Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen zur Energiespeicherung, zum Hochwasserschutz und zur Ressourcensicherung (EWAZ): Abschlussbericht: Laufzeit des Verbundprojektes 01.07.2019 bis zum 30.09.2022 (1. Auflage). Cuvillier Verlag.
- Becker, P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T., & Walter, A. (2016). Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Deutscher Wetterdienst (DWD).
https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/entwicklung_starkniederschlag_deutschland_pdf.html
- Behre, K.-E. (2005). Meeresspiegelanstieg – Marschentwicklung – Küstenlinien Die letzten 10 000 Jahre an der deutschen Nordseeküste im Zeitraffer. Schriftenreihe Des Landesmuseums Natur Und Mensch, Oldenburg, 25–36.
- Benmarhnia, T., Deguen, S., Kaufman, J. S., & Smargiassi, A. (2015). Review Article: Vulnerability to Heatrelated Mortality. *Epidemiology*, 26(6), 781–793.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000375>
- Bentz-Hözl, J. (2014). Klimagerechtigkeit. In J. Bentz-Hözl, *Der Weltklimavertrag* (S. 67–92). Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-04146-5_5
- Benz, S. A., Irvine, D. J., Rau, G. C., Bayer, P., Menberg, K., Blum, P., Jamieson, R. C., Griebler, C., & Kurylyk, B. L. (2024). Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*, 17(6), 545–551.
<https://doi.org/10.1038/s41561-024-01453-x>
- Berg, P., & Poulsen, J. W. (2012). Implementation details for HBM. Danish Meteorological Institute.
- Berkenbrink, C., & Wurpts, A. (2019). Aktuelle Bemessungspraxis für See- und Ästuardeiche in Niedersachsen [PDF/A]. *Die Küste*, 87.
<https://doi.org/10.18171/1.087107>

- Bernreuther, M., & Zimmermann, C. (2010). Klima und Kabeljau: Fehlt dem Nachwuchs das richtige Futter; über das fragile Beziehungsgeflecht in Nahrungsnetzen (No. 1/2010; Forschungsreport Ernährung, Landwirtschaft, Forsten). Senat der Bundesforschungsinstitute im Geschäftsbereich des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BfG. (2019). Das Niedrigwasser 2018 [Broschüre]. Bundesanstalt für Gewässerkunde.
https://doi.org/10.5675/BFG-NIEDRIGWASSERBROSCHUERE_2018
- Birchenough, S. N. R., Williamson, P., & Turley, C. M. (2017). Future of the sea: Ocean acidification. Government Office for Science.
<https://plymsea.ac.uk/id/eprint/7775/>
- BKG. (2023). Erfolgreicher Auftakt: Bundesweite Kartierung über die Gefahren durch Starkregen gestartet [Pressemitteilung].
https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM_2023/230511-Kickoff-Starkregen.html
- BMEL. (2018). Landwirtschaft verstehen—Fakten und Hintergründe. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- BMEL. (2023). Bericht an die europäische Kommission nach Artikel 22 der Verordnung (EU) Nr. 1380/2013 über das Gleichgewicht zwischen den Fangkapazitäten und den Fangmöglichkeiten der deutschen Fischereiflotte im Jahr 2022. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
<https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/0520200-2022.pdf>
- BMFTR. (2025). Erhebung der Stechmückenfauna (Diptera Culicidae) im Rahmen der Wiedervernässung von Mooren hinsichtlich der Bewertung des Auftretens von Zoonosen—DLR Gesundheitsforschung. Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. - DLR Gesundheitsforschung.
<https://www.gesundheitsforschung-bmfr.de/de/erhebung-der-stechmuckenfauna-diptera-culicidae-im-rahmen-der-wiedervernassung-von-mooren-16388.php>
- BMVI. (2015). KLIWAS : Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland [Abschlussbericht des BMVI]. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
<https://henry.baw.de/server/api/core/bitstreams/4e20255d-dcf7-4cc8-8ecc-91d8fea23052/content>
- Böckmann, D. T., Hansen, D. J., Hauskeller-Bullerjahn, D. K., Jensen, T., Nagel, D. J., Nagel, R.-V., Overbeck, D. M., Pampe, A., Petereit-Bitter, A., Schmidt, D. M., Schröder, M., Riefensbeek, N., Schulz, C., Spellmann, D., Stüber, D. V., Suttmöller, D. J., & Wollborn, P. (2019). Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten (No. Heft 61; Aus dem Walde – Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen). Niedersächsische Landesforsten und Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
https://www.ml.niedersachsen.de/download/141706/Klimaangepasste_Baumartenwahl_in_den_Niedersaechsischen_Landesforsten_-_Aus_dem_Walde_Heft_61-__Schriftenreihe_Waldentwicklung_in_Niedersachsen_ohne_Anhaenge_.pdf
- Bogoeski, V. (2022). Continuities of exploitation: Seasonal migrant workers in German agriculture during the COVID-19 pandemic. *Journal of Law and Society*, 49(4), 681–702.
<https://doi.org/10.1111/jols.12389>
- Böhme, C., Franke, T., Preuß, T., & Reimann, B. (2022). Umweltgerechtigkeit stärker verankern. Handlungsempfehlungen für Bund und Länder (Umwelt und Gesundheit).
- Bolte, G., Dandolo, L., Gepp, S., Hornberg, C., & Lumbi, S. L. (2023). Klimawandel und gesundheitliche Chancengerechtigkeit: Eine Public-Health-Perspektive auf Klimagerechtigkeit. *Journal of Health Monitoring*.
<https://doi.org/10.25646/11769>
- Bormann, H. (2024). Wasser an den Küsten Ostfrieslands (WAKOS): Maßgeschneiderte Klimaservices für die Anpassung. *Notfallvorsorge*, 55, 17–25.
- Bormann, H., & Keschull, J. (2023). Model based estimation of climate change impacts on the drainage demand of low lying coastal areas in Northwest Germany along the North Sea. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101451.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101451>

- Bormann, H., Kebschull, J., & Spiekermann, J. (2023). Quantifizierung der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Entwässerungskapazitäten an der Nordseeküste. *Wasser und Abfall*, 25, 24–31.
<https://doi.org/10.1007/s35152-023-1457-z>
- Bowleg, L. (2012). The Problem With the Phrase Women and Minorities: Intersectionality—An Important Theoretical Framework for Public Health. *American Journal of Public Health*, 102(7), 1267–1273.
<https://doi.org/10.2105/AJPH.2012.300750>
- Brämick, D. U., & Schiewe, S. (2023). Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2022. Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam - Sacrow.
- Brasseur, G., Jacob, D., & Schuck-Zöller, S. (Hrsg.). (2024). *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer Spektrum.
- Brinkman, A. G., & Jacobs, P. (2023). Gross pelagic primary production in the Ems-Dollard estuary. *Journal of Sea Research*, 192, 102362.
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102362>
- Brockmann, S., Piechotowski, I., Bock-Hensley, O., Winter, C., Oehme, R., Zimmermann, S., Hartelt, K., Luge, E., Nöckler, K., Schneider, T., Stark, K., & Jansen, A. (2010). Outbreak of leptospirosis among triathlon participants in Germany, 2006. *BMC Infectious Diseases*, 10(1), 91.
<https://doi.org/10.1186/1471-2334-10-91>
- Brockmann, U. H. (1997). Themen-97-02-21-Nährstoffe-im-Wattenmeer (No. SDN-Magazin 1/1997).
<https://sdn-web.de/wp-content/uploads/Themen-97-02-21-N%C3%A4hrstoffe-im-Wattenmeer.pdf>
- Brügemann, K., Gernand, E., König von Borstel, U., & König, S. (2012). Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems. *Archives Animal Breeding*, 55(1), 13–24. <https://doi.org/10.5194/aab-55-13-2012>
- BSH. (2024). BSH - DAS-Basisdienst.
https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Klima/DAS-Basisdienst/DAS-Basisdienst_node.html
- Bucher, B. (1999). Die Analyse von Grundwasserganglinien mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. *Grundwasser*, 4(3), 113–118.
<https://doi.org/10.1007/s767-1999-8615-z>
- Bug, J., & Harders, D. (2024a). Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im Klimawandel. In N. Engel, J. Bug, R. Stadtmann, & D. Harders, *Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen: Bd. Geofakten 46.2*. LBEG, Hannover.
https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/Geofakten_46_2_2024_Text_2.pdf
- Bug, J., & Harders, D. (2024b). Potenzieller mittlerer Zusatzwasserbedarf im Klimawandel. In N. Engel, J. Bug, R. Stadtmann, & D. Harders, *Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen: Bd. Geofakten 46.1*. LBEG, Hannover.
https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/Geofakten_46_1_2024_Text_4.pdf
- Bug, J., Heumann, S., Müller, Dr. U., & Waldeck, A. (2020). *Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®* (No. GeoBerichte 19, 9. Auflage). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_19_2020
- Bug, J., Kirchner, A., Ott, S., Thiermann, A., & Röder, C. (2025). Bodenerosion durch Wasser im Klimawandel. In N. Engel, J. Bug, R. Stadtmann, & D. Harders, *Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen: Bd. Geofakten 46.3*. LBEG, Hannover.
https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/Geofakten_46_3_2025_Text_3.pdf
- Bug, J., Plinke, A.-K., Affelt, L. T., & Harders, D. (2021). Standortpotenziale grundwasserabhängiger Landökosysteme in Niedersachsen: Erläuterung zur Kulissenerstellung und Bewertung der Vulnerabilität (No. GeoBerichte 43; Version 1. Auflage) [PDF]. LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/GEOBER_43_2021

- Bug, J., Stadtmann, R., Harders, D., & Scharun, C. (2022). Der Wasserhaushalt der Böden in Niedersachsen – Neue methodische Ansätze zur bodenfunktionalen Bewertung (No. Geofakten 36). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geofakt_36_1_2022
- Bürger, G., Pfister, A., & Bronstert, A. (2021). Increasing intensity of heavy rainfall caused by global warming: Data analysis and future projectionsZunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klima-erwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion.
https://doi.org/10.5675/HYWA_2021.6_1
- Buschbaum, C., Shama, L. N. S., Amorim, F. L. L., Brand, S., Broquard, C. M. A., Camillini, N., Cornelius, A., Dolch, T., Dummermuth, A., Feldner, J., Guignard, M. S., Habedank, J., Hoffmann, J. J. L., Horn, S., Konyssova, G., Koop-Jakobsen, K., Lauerburg, R., Mehler, K., Odongo, V., ... Wiltshire, K. H. (2024). Climate change impacts on a sedimentary coast—A regional synthesis from genes to ecosystems. *Marine Biodiversity*, 54(4), 64.
<https://doi.org/10.1007/s12526-024-01453-5>
- Buse, C. G., & Patrick, R. (2020). Climate change glossary for public health practice: From vulnerability to climate justice. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 74(10), 867–871.
<https://doi.org/10.1136/jech-2020-213889>
- Butsch, C., Beckers, L.-M., Nilson, E., Frassl, M., Brennholt, N., Kwiatkowski, R., & Söder, M. (2023). Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel.
<https://doi.org/10.25646/11646>
- Büttger, H., Christoph, S., Buschbaum, C., Gittenberger, A., Jensen, K., Kabuta, S., & Lackschweitz, D. (2022). Wadden Sea Quality Status Report. Common Wadden Sea Secretariat.
- Caxaj, C. S., Shkopi, E., Naranjo, C. T., Chew, A., Hao, Y. T., & Nguyen, M. (2023). Health, social and legal supports for migrant agricultural workers in France, Italy, Spain, Germany, Canada, Australia and New Zealand: A scoping review. *Frontiers in Public Health*, 11, 1182816.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1182816>
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Chmielewski, F.-M. (2016). Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, & E. Rachor, *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. (S. 158–163).
<https://doi.org/10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.26>
- Chorus, I., Fastner, J., & Welker, M. (2021). Cyanobacteria and Cyanotoxins in a Changing Environment: Concepts, Controversies, Challenges. *Water*, 13(18), 2463.
<https://doi.org/10.3390/w13182463>
- Crenshaw, K. (1991). Mapping the Margins: Intersectionality, Identity Politics, and Violence against Women of Color. *Stanford Law Review*, 43(6), 1241.
<https://doi.org/10.2307/1229039>
- Croci-Maspoli, D. M., Scherrer, D. S., Schlegel, T., & Zubler, D. E. (2014). Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht (Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 243).
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/publikationen/berichte-und-bulletins/2014/klimaszenarien-schweiz-eine-regionale-uebersicht.html>
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., & Walter, A. (2018). A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 477–491.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0141.1>
- Dardonville, M., Urruty, N., Bockstaller, C., & Therond, O. (2020). Influence of diversity and intensification level on vulnerability, resilience and robustness of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 184, 102913.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102913>

- de Witte, D. T. (2017). Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung. In Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg.
https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059750.pdf
- Degener, J. F., & Kappas, M. (2015). Differences in biomass yield development of early, medium, and late maize varieties during the 21st century in Northern Germany. *Environmental Sciences Europe*, 27(1), 10.
<https://doi.org/10.1186/s12302-015-0042-9>
- Dehner, U., Renger, M., Bräuning, A., Lamparter, A., Bauriegel, A., Burbaum, B., Hartmann, K.-J., Hennings, V., Idler, F., Krone, F., Martin, W., Meyer, K., & Waldmann, F. (2015, September). Neue Kennwerte für die Wasserbindung in Böden—Ergebnisse der Abstimmung zwischen dem Personenkreis Wasserhaushaltstabellen der Ad-hoc-AG Boden und dem DWA. *Unsere Böden – Unser Leben. Jahrestagung der DBG, München*.
https://eprints.dbges.de/1160/1/Neue_Kennwerte_f%C3%BCr_die_Wasserbindung_in_Boeden_DBG-Tagung_2015.pdf
- DESTATIS. (2024). Statistischer Bericht—Landwirtschaftliche Betriebe—Bewässerung—2023 (No. EVAS-Nummer 41121) [Dataset].
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/statistischer-bericht-betriebe-bewaesserung-5411205239005.xlsx?__blob=publicationFile
- Deutscher Ethikrat. (2024). Klimagerechtigkeit (Stellungnahme). Deutscher Ethikrat.
<https://www.ethikrat.org/publikationen/stellungnahmen/klimagerechtigkeit/>
- Deutscher Städtetag. (2023). Damit Hitze nicht krank macht: Wie Städte cool bleiben [Diskussionspapier]. Deutscher Städtetag.
https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Positionspapiere/2023/P89332_Staedtetag_Diskussionspapier_Hitzevorsorge_in_den_Staedten_12052023.pdf
- Di Cavalho, J. A., Rönn, L., Prins, T. C., & Hillebrand, H. (2023). Temporal change in phytoplankton diversity and functional group composition. *Marine Biodiversity*, 53(6), 72.
<https://doi.org/10.1007/s12526-023-01382-9>
- Diepenbrock, W., Ellmer, F., & Léon, J. (2016). *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: Grundwissen Bachelor* (4. Aufl.). utb GmbH.
<https://doi.org/10.36198/9783838546070>
- Dietze, M., Nistahl, P., & Möller, M. (2024). Klimawandel und Talsperrenbewirtschaftung im Harz. *wasser-praxis* 10, DVGW energie.
- DIN 4049-3 (No. Hydrologie-Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie). (1994). DIN Media GmbH.
<https://www.dinmedia.de/de/-/-/2387598>
- DIN 19706 (No. Bodenbeschaffenheit-Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind). (2013). DIN Media GmbH.
<https://doi.org/10.31030/1934215>
- DIN 19708 (No. Bodenbeschaffenheit-Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG). (2022). DIN Media GmbH.
<https://doi.org/10.31030/3365455>
- DIN 19732 (No. Bodenbeschaffenheit-Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbiebaren Stoffen). (2011). DIN Media GmbH.
<https://doi.org/10.31030/1813995>
- Drachenfels, O. von. (2010). Überarbeitung der Naturräumlichen Regionen Niedersachsens (No. 4/10; Inform.d. Naturschutz Niedersachs., S. 249–252).
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/54126>
- Drake, B. G., Gonzalez-Meler, M. A., & Long, S. P. (1997). MORE EFFICIENT PLANTS: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48, 609–639.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.609>

- Dreesman, J., Hamschmidt, L., Toikkanen, S., Runge, M., Lüsse, B., Freise, J., Ehlers, J., Nöckler, K., Knorr, C., Keller, B., & Mayer-Scholl, A. (2016). Leptospirose-Ausbruch bei Saisonarbeitern in der Erdbeerernte in Niedersachsen, 2014. *Das Gesundheitswesen*, 78(04), s-0036-1578892.
<https://doi.org/10.1055/s-0036-1578892>
- Durant, J. M., Hjermann, D. Ø., Ottersen, G., & Stenseth, N. C. (2007). Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *Climate Research*, 33(3), 271–283.
<https://doi.org/10.3354/cr033271>
- DWA. (2022). Hochwasser und Sturzfluten (DWA-Positionsbapier). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
https://de.dwa.de/files/media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Positionspapiere/Positionspapier_Hochwasser%20Sturzfluten_2022_Netz.pdf
- DWA-M 920-4 (Merkblätter No. Ableitung von Kennwerten des landwirtschaftlichen Ertragspotenzials nach dem Müncheberger Soil Quality Rating; Version Dezember 2018). (2018). DWA.
- DWD. (2024a). Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Produkte—Phänologische Uhr [Interaktive Grafik].
https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno_uhr/phaenouhr.html?nn=575800#buehneTop
- DWD. (2024b). Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Spurengase—Spurengase.
https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/spurengase.html
- DWD. (2024c, Juni 27). Dekadische Klimavorhersagen des DWD.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvhs_de/0_main/start_main.html
- DWD (with Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, & Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie). (2018). Klimareport Niedersachsen: Fakten bis zur Gegenwart - Erwartungen für die Zukunft (1. Auflage). Deutscher Wetterdienst, Abt. Klima- und Umweltberatung, Regionales Klimabüro Hamburg.
https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/132060/Klimareport_Niedersachsen_Juni_2018_.pdf
- Egli, L., Schröter, M., Scherber, C., Tschardt, T., & Seppelt, R. (2021). Crop diversity effects on temporal agricultural production stability across European regions. *Regional Environmental Change*, 21(4), 96.
<https://doi.org/10.1007/s10113-021-01832-9>
- EG-WRRRL, Pub. L. No. RL 2000/60/EG, Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie) (2000).
<https://www.bmu.de/GE23>
- EKN. (2024, Juni 27). Onlinebericht [Interaktiver Bericht].
<https://www.krebsregister-niedersachsen.de/Online-Jahresbericht/#/database/timeline>
- Elbracht, J., Meyer, R., & Reutter, E. (2016). Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen (No. Geoberichte 3). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_3_2016
- Engel, N., Bug, J., Stadtmann, R., & Harders, D. (2024). Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen: Bd. Geofakten 46. LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geofakt_46_1_2024
- Ernst, P., & von Loeper, E. (1976). Temperaturentwicklung und Vegetationsbeginn auf dem Gruenland. *Wirtschaftseigene Futter*, 22.
- Ertl, G., Bug, J., Hajati, M.-C., Herrmann, F., Waldeck, A., & Elbracht, J. (2024). Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA22 für den Beobachtungszeitraum 1961-2020. In *Grundwasserneubildung von Niedersachsen (Geoberichte 51)*. LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_51_2024

- Europäische Kommission & Generaldirektion Umwelt. (2020). Bericht der Kommission an das europäische Parlament über die Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/56/EG) [Document 52020DC0259]. <https://data.europa.eu/doi/10.2771/21854>
- European Environment Agency & European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation. (2018). Unequal exposure and unequal impacts: Social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe. (EEA Report). Publications Office. <https://doi.org/10.2800/324183>
- FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Federolf, C., Goens, J., Kehbein, E., Körtje, C., Scholtka, M., Wagener, & Weustink, A. (2013). Konzept zur Berücksichtigung direkt grundwasserabhängiger Landökosysteme bei der Umsetzung der EG-WRRRL (2. Bewirtschaftungszyklus) (S. 47). Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- Feigenwinter, Kotlarski, S., Casanueva, A., Fischer, A. M., Schwierz, C., & Liniger, M. A. (2018). Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland (No. No. 270; Technical Report MeteoSwiss). https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:1b810050-11a2-415d-b439-3b2eb75f9693/MeteoSchweiz_Fachbericht_270_final.pdf
- Fiałkowska, K., & Matuszczyk, K. (2021). Safe and fruitful? Structural vulnerabilities in the experience of seasonal migrant workers in agriculture in Germany and Poland. *Safety Science*, 139, 105275. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105275>
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2016). Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change*, 6(11), 986–991. <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>
- Flores, A. B., Sullivan, J. A., Yu, Y., & Friedrich, H. K. (2024). Health Disparities in the Aftermath of Flood Events: A Review of Physical and Mental Health Outcomes with Methodological Considerations in the USA. *Current Environmental Health Reports*, 11(2), 238–254. <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00446-7>
- Fokker, Peter. A., Van Leijen, Freek. J., Orlic, B., Van Der Marel, H., & Hanssen, Ramon. F. (2018). Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3), 129–181. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.9>
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Fragkoulidis, G. (2022). Decadal variability and trends in extratropical Rossby wave packet amplitude, phase, and phase speed. *Weather and Climate Dynamics*, 3(4), 1381–1398. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-1381-2022>
- Frei, C. (2021). DACH-Empfehlungen zu Unsicherheiten und Interpretation der Gitterpunktweite von stationsbasierten Gitterdaten. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/help/Empfehlungen_Gitterdaten_DACH.pdf
- Fricke, E. (2018). Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung – Stand und Trends. In S. Schimmelpfennig, J. Anter, C. Heidecke, S. Lange, K. Röttcher, & F. Bittner, *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Thünen-Institut für Ländliche Räume, Baunschweig. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059620.pdf

- Fritsch, U., Zebisch, M., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Porst, L., Hölscher, L., Wolff, A., Hardner, U., Schwartz, K., Wolf, M., Schmuck, A., Schönthaler, K., Nielson, E., Fischer, H., & Fleischer, C. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland | Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser. In Umweltbundesamt (Hrsg.), Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (S. 289). Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-3-Cluster-Wasser>
- Füllner, G. (2024a). Auswirkungen des Klimawandels auf Aquakultur und Fischerei im Freistaat Sachsen. Teil I. 75, 83–89.
- Füllner, G. (2024b). Auswirkungen des Klimawandels auf Aquakultur und Fischerei im Freistaat Sachsen. Teil II. Die heißtrockenen Jahre im Zeitraum 2014 bis 2023. 75, 128–133.
- Ganske, A. (2019). Analyse von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen. Themenfeld 1: Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen [Dissertation, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)].
<https://digitale-bibliothek.bsh.de/viewer//metadata/181689/1/>
- Gao, K., & Campbell, D. A. (2014). Photophysiological responses of marine diatoms to elevated CO₂ and decreased pH: A review. *Functional Plant Biology*, 41(5), 449.
<https://doi.org/10.1071/FP13247>
- Gaslikova, L., Grabemann, I., & Groll, N. (2013). Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. *Natural Hazards*, 66(3), 1501–1518.
<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0279-1>
- Gauly, M., Bollwein, H., Breves, G., Brügemann, K., Dänicke, S., Daş, G., Demeler, J., Hansen, H., Isstelstein, J., König, S., Lohölter, M., Martinsohn, M., Meyer, U., Potthoff, M., Sanker, C., Schröder, B., Wrage, N., Meibaum, B., von Samson-Himmelstjerna, G., ... Wrenzycki, C. (2013). Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe – a review. *Animal*, 7(5), 843–859.
<https://doi.org/10.1017/S1751731112002352>
- Gehrt, E., Benne, I., Evertsbusch, S., Krüger, K., & Langner, S. (2021). Erläuterung zur BK50 von Niedersachsen (No. GeoBerichte 40). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/GEOBER_40_2021
- Gkiouleka, A., Huijts, T., Beckfield, J., & Bambra, C. (2018). Understanding the micro and macro politics of health: Inequalities, intersectionality & institutions - A research agenda. *Social Science & Medicine*, 200, 92–98.
<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2018.01.025>
- Goessling, H. F., Rackow, T., & Jung, T. (2025). Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science*, 387(6729), 68–73.
<https://doi.org/10.1126/science.adq7280>
- Göhren, H. (1968). Triftströmungen im Wattenmeer [Dissertation]. Leibnitz Universität Hannover, Ludwig-Franzius-Institut.
- González, E., Deus, N., Elbracht, J., Azizur Rahman, M., & Wiederhold, H. (2021). Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. *Grundwasser*, 26(4), 343–356.
<https://doi.org/10.1007/s00767-021-00496-w>
- González, E., Deus, N., Elbracht, J., Siemon, B., Steuer, A., & Wiederhold, H. (2021). Modellierung der küstennahen Grundwasserversalzung in Niedersachsen abgeleitet aus aerelektromagnetischen Daten. *Grundwasser*, 26(1), 73–85.
<https://doi.org/10.1007/s00767-020-00472-w>
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H., & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3), 532–560.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- Grizzetti, B., Bouraoui, F., & Aloe, A. (2012). Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas. *Global Change Biology*, 18(2), 769–782.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02576.x>

- Grossmann, J., & Skowronek, F. (2005). Quantifizierung anthropogener Veränderungen der Grundwasserstände mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. *Grundwasser*, 10(3), 157–166.
<https://doi.org/10.1007/s00767-005-0092-9>
- Haan, M., Scheiffarth, G., & Freund, H. (2021). Herzmuschel und Plattmuschel im Südwatt von Mellum im Sommer 2020. *Der Mellumrat e.V. - Natur- und Umweltschutz*, 20(1).
<https://www.mellumrat.de/wp-content/uploads/2021/11/Herzmuschel-und-Plattmuschel-im-Suedwatt-von-Mellum-im-Sommer-2020.pdf>
- Hajati, M.-C., Ertl, G., & Elbracht, J. (2024). Die Grundwasserneubildung in Niedersachsen für zwei Zukunftsszenarien berechnet bis 2100 (Methodik: mGROWA22, AR5-NI Version 2.1). In *Grundwasserneubildung von Niedersachsen (Geoberichte 51)*. LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_51_2024
- Hajati, M.-C., Harders, D., Petry, U., Elbracht, J., & Engel, N. (2022). Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1 (No. Geofakten 39). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/GEOFAKT_39_1_2022
- Hajati, M.-C., Harders, D., Scharun, C., Elbracht, J., & Engel, N. (2023). Neuausweisung der Klimaregionen Niedersachsens (Version 2.0) (No. Geofakten 43). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geofakt_43_1_2023
- Hallmann, J., Quadt-Hallmann, A., & Von Tiedemann, A. (2009). *Phytomedizin: Grundwissen Bachelor* (2. Aufl.). utb GmbH.
<https://doi.org/10.36198/9783838528632>
- Han, Z., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Wang, H., Bai, Q., Zhao, J., Ma, L., Wang, L., & Du, M. (2019). Propagation dynamics from meteorological to groundwater drought and their possible influence factors. *Journal of Hydrology*, 578, 124102.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124102>
- Hargreaves, S., Rustage, K., Nellums, L. B., McAlpine, A., Pocock, N., Devakumar, D., Aldridge, R. W., Abubakar, I., Kristensen, K. L., Himmels, J. W., Friedland, J. S., & Zimmerman, C. (2019). Occupational health outcomes among international migrant workers: A systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 7(7), e872–e882.
[https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30204-9](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30204-9)
- Hellwig, J. (2019). Grundwasserdürren in Deutschland von 1970 bis 2018. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10(12), 567–572.
<https://doi.org/10.3243/kwe2019.10.001>
- Hempel, S., Menz, C., Pinto, S., Galán, E., Janke, D., Estellés, F., Müschner-Siemens, T., Wang, X., Heinicke, J., Zhang, G., Amon, B., del Prado, A., & Amon, T. (2019). Heat stress risk in European dairy cattle husbandry under different climate change scenarios – uncertainties and potential impacts. *Earth System Dynamics*, 10(4), 859–884.
<https://doi.org/10.5194/esd-10-859-2019>
- Heron, S. F., Day, J. C., Zijlstra, R., Engels, B., Weber, A., Marencic, H., & Busch, J. A. (2020). Workshop report: Climate Risk Assessment for Wadden Sea World Heritage property. Common Wadden Sea Secretariat.
https://www.waddensea-worldheritage.org/sites/default/files/2020_CVI%20Workshop%20Report.pdf
- Hertig, E., Hunger, I., Kaspar-Ott, I., Matzarakis, A., Niemann, H., Schulte-Droesch, L., & Voss, M. (2023). Klimawandel und Public Health in Deutschland—Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.
<https://doi.org/10.25646/11391>
- Hillebrand, H., Antonucci Di Carvalho, J., Dajka, J.-C., Dürselen, C.-D., Kerimoglu, O., Kuczynski, L., Rönn, L., & Ryabov, A. (2022). Temporal declines in Wadden Sea phytoplankton cell volumes observed within and across species. *Limnology and Oceanography*, 67(2), 468–481.
<https://doi.org/10.1002/lno.12005>

- Hintz, N. H., Schulze, B., Wacker, A., & Striebel, M. (2022). Ecological impacts of photosynthetic light harvesting in changing aquatic environments: A systematic literature map. *Ecology and Evolution*, 12(3), e8753.
<https://doi.org/10.1002/ece3.8753>
- HKC. (2021). Umgang mit hydrologischen Belastungsgrößen in Zeiten des Klimawandels—Hochwasser und Starkregen [HKC Werkstattbericht 2021]. HKC HochwasserKompetenzCentrum e. V.,.
https://www.hkc-online.de/Projekte/HydroBelastung/ePaper%20WSB%202021/epaper/HKC_Werkstattbericht_2021.pdf
- Holt, T., Körtje, C., Wriedt, G., te Gempt, R., & Hartung, T. (2022). Niedersächsisches Messprogramm Klima-Grundwasserstand (Grundwasser Band 53). Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/185278>
- Homeier, H., Niemeyer, H. D., & Stephan, H. J. (2010). Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste (No. 43/2010; Berichte der Forschungsstelle Küste). Niedersächs. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- Hornberg, C., & Maschke, J. (2017). Soziale Vulnerabilität im Kontext von Umwelt, Gesundheit und sozialer Lage. *UMID* 2, 1–7.
- Houben, G. J., Koeniger, P., & Sültenfuß, J. (2014). Freshwater lenses as archive of climate, groundwater recharge, and hydrochemical evolution: Insights from depth-specific water isotope analysis and age determination on the island of Langeoog, Germany. *Water Resources Research*, 50(10), 8227–8239.
<https://doi.org/10.1002/2014WR015584>
- HS Emden-Leer. (2022). Energieeffiziente zukunftsweisende Küstenfischerei [Projekte der Hochschule].
<https://www.hs-emden-leer.de/studierende/fachbereiche/seefahrt-und-maritime-wissenschaften/forschung-labore-projekte/projekte/energieeffiziente-zukunftsweisende-kuestenfischerei>
- Hübener, H., Spekat, A., Bülow, K., Früh, B., Keuler, K., Menz, C., Radtke, K., Ramthun, H., Rathmann, T., Steger, C., Toussaint, F., & Warrach-Sagi, K. (2017). ReKliEs-De Nutzerhandbuch.
https://doi.org/10.2312/WDCC/REKLIESDE_NUTZERHANDBUCH
- IfZ. (2018). Jahresbericht 2016/2017. Institut für Zuckerrübenforschung.
https://www.ifz-goettingen.de/assets/images/publikationen/jb-ifz-2016_17-09.08.2018-fur-homepage.pdf
- InVeKoS. (2023). Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem [Interne Daten].
- IPCC. (2019a). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- IPCC. (2019b). *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (S. 321–411).
- IPCC. (2019c). *Summary for Policymakers*. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- IPCC. (2021a). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl., S. 1211–1362). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2021b). *Regional fact sheet—Europe*. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

- IPCC. (2022). Poverty, Livelihoods and Sustainable Development. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC. (2023a). Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2023b). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IPCC. (2023c). Health, Wellbeing and the Changing Structure of Communities. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC (with Masson-Delmotte, V., A., P. Z., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B.). (2021c). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A., Fuchs, K., Guarin, J. R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A. K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., ... Rosenzweig, C. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2(11), 873–885.
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>
- Juroszek, P., & Tiedemann, A. von. (2013a). Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: A short review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120(2), 49–56.
<https://doi.org/10.1007/BF03356454>
- Juroszek, P., & Tiedemann, A. von. (2013b). Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 163–188.
<https://doi.org/10.1017/S0021859612000500>
- Juroszek, P., & von Tiedemann, A. (2013). Climate change and potential future risks through wheat diseases: A review. *European Journal of Plant Pathology*, 136(1), 21–33.
<https://doi.org/10.1007/s10658-012-0144-9>
- Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil Physics*. John Wiley & Sons.
- Kahlenborn, W., Porst, L., Voß, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schönthaler, K., & Schauser, I. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland | Kurzfassung. In Umweltbundesamt (Hrsg.), *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland* (S. 127). Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>
- Kaiser, R., & Niemeyer, H. D. (1996). Strömungen. In *Umweltatlas Wattenmeer*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltatlas-wattenmeer-0>
- KAnG, Pub. L. No. BGBl. 2023 I Nr. 393, S. 7, Bundes-Klimaanpassungsgesetz (2023).
<https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2023/393/VO>

- Karrasch, L., Siebenhüner, B., & Seibert, S. L. (2023). Groundwater salinization in northwestern Germany: A case of anticipatory governance in the field of climate adaptation? *Earth System Governance*, 17, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2023.100179>
- Kaspar, F., Deutschländer, T., Junghänel, T., Lengfeld, K., Palarz, A., Rauthe, M., Walawender, E., Winterrath, T., & Ziese, M. (2024). Warnsignal Klima: Entwicklung der Starkniederschläge. In J. L. Lozán, H. Graßl, D. Kasang, M. Quante, & J. Sillmann (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Herausforderung Wetterextreme—Ursachen, Auswirkungen & Handlungsoptionen* (S. 91–97). Wissenschaftliche Auswertungen. <https://doi.org/10.25592/warnsignal.klima.wetterextreme.17>
- Klier, C., Beyrer, K., Monazahian, M., & Dreesman, J. (2025). Fälle mit West-Nil-Fieber in Niedersachsen. *Niedersächsisches Ärzteblatt*, 9.
- Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen. (2019). *Klimawirkungsstudie Niedersachsen*. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
- Koch, L. K., Cunze, S., Werblow, A., Kochmann, J., Dörge, D. D., Mehlhorn, H., & Klimpel, S. (2016). Modeling the habitat suitability for the arbovirus vector *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Germany. *Parasitology Research*, 115(3), 957–964. <https://doi.org/10.1007/s00436-015-4822-3>
- Koch, M., & Niemeyer, H. (1978). Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats (No. 29; Jahresbericht, S. 91–108). Forschungsstelle f. Insel und Küstenschutz.
- Kolbe, K. (2021). Jährliche Untersuchungen ausgewählter Seegrasbestände im niedersächsischen Wattenmeer. Stand 2020. [Unveröffentlicht]. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- Koop-Jakobsen, K., & Dolch, T. (2023). Future climate conditions alter biomass of salt marsh plants in the Wadden Sea. *Marine Biodiversity*, 53(3), 41. <https://doi.org/10.1007/s12526-023-01347-y>
- Krähenmann, S., Walter, A., & Klippel, L. (2021). Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung (No. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 254). DWD, Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/downloads/publikation_dwd_band_254.pdf;jsessionid=2B3699FDACEF813973A6D5014CB6C764.live31082?_blob=publicationFile&v=1
- Kramer, J. (1989). *Kein Deich - Kein Land - Kein Leben: Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee*. Rautenberg.
- Krampf, K. (2021). Niedersachsens Landwirtschaft verändert sich – ein Überblick. *Statistische Monatshefte Niedersachsen*, 11/2021, 632–644.
- Kreienkamp, F., Früh, B., Kotlarski, S., Linke, C., Olefs, M., Schauer, I., Schinko, T., Schwierz, C., Walter, A., & Zimmer, M. (2022). Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/17944/1/Szenariennamen-Stand_20220315.pdf
- Kreienkamp, F., Philip, S. Y., Tradowsky, J. S., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S. C., Ciavella, A., De Cruz, L., de Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E. M., Fowler, H. J., Goergen, K., Heinrich, D., ... Wanders, N. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>
- Krengel-Horney, S., Adler, C., Berger, B., Feike, T., Flath, K., Hausmann, J., Herrmann, D., Jehle, J., Joachim, C., Karpinski, I., Maixner, M., Möller, M., Paap, M., Schittenhelm, S., Schrader, G., Seidel, P., Stahl, A., Strassemeyer, J., Ulber, L., ... Kehlenbeck, H. (2021). Klimawandel und mögliche Herausforderungen für den Pflanzenschutz – Gestern, heute, morgen. *Journal für Kulturpflanzen*, 292-305 Seiten. <https://doi.org/10.5073/JFK.2021.07-08.14>

- Kreye, P. (2017). Detaillierte Nachbildung der Niedrigwasserverhältnisse in der hydrologischen Modellierung für die Ermittlung von Klimafolgen im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet, Niedersachsen [PDF]. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG – Jahrgang: 61.2017*, 4/ISSN 1439.
https://doi.org/10.5675/HYWA_2017.4_1
- Kreye, P., & Meon, G. (2016). Subgrid spatial variability of soil hydraulic functions for hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2557–2571.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-2557-2016>
- Krieger, N. (2020). Measures of Racism, Sexism, Heterosexism, and Gender Binarism for Health Equity Research: From Structural Injustice to Embodied Harm—An Ecosocial Analysis. *Annual Review of Public Health*, 41(1), 37–62.
<https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040119-094017>
- Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., & Gattuso, J. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19(6), 1884–1896.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- KÜFOG GmbH, & Steuwer, J. (2020). Eulitorale Seegrassbestände im niedersächsischen Wattenmeer 2019. Gesamtbestandserfassung und Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie. Unveröffentl. Gutachten im Auftrag des NLWKN.
- Kurylyk, B. L., & Irvine, D. J. (2019). Heat: An Overlooked Tool in the Practicing Hydrogeologist's Toolbox. *Groundwater*, 57(4), 517–524.
<https://doi.org/10.1111/gwat.12910>
- Langer, G. J., Busskamp, J., & Langer, E. J. (2020). Absterberscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit und Wärme. In *AFZ/Der Wald 4/2020* (S. 24–27). Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Lassen, H., & Siefert, W. (1991). Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee—Säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. *Die Küste*, 85–137.
- LAWA. (2007). Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2007_14.pdf
- LAWA & LABO. (2021). Degradation von Böden – Bodenerosion durch Wasser – [Positionspapier]. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) & Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).
https://www.lawa.de/documents/lawa-labo-positionspapier-degradation-von-boede-bodenerosion-durch-wasser-barrierefrei_1689855168.pdf
- LBEG. (2021). Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1: 500 000—Grundwasserkörper (Vektordatensatz No. HUEK500GWK) [Shp]. Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS).
<https://nibis.lbeg.de/net3/public/ikxcms/default.aspx?pgid=56>
- LBEG. (2024). Erosionsgefährdung durch Wasser.
https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/landwirtschaft/bodenerosion/wassererosion/erosionsgefaehrung-durch-wasser-607.html
- Levy, B. S., & Patz, J. A. (2015). Climate Change, Human Rights, and Social Justice. *Annals of Global Health*, 81(3), 310.
<https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.008>
- Ley, A., Haehnel, P., & Bormann, H. (2023). Addressing the challenges of climate scenario-based impact studies in modelling groundwater recharge on small barrier islands at the German North Sea coast. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101578.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101578>
- Lieth, H. (1974). Purposes of a Phenology Book. In H. Lieth (Hrsg.), *Phenology and Seasonality Modeling* (S. 3–19). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8_1

- Linke et al., C. (2024). Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten. Bund- Länder- Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“.
<https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klimamodelldaten.pdf>
- Liu, Y., Shan, F., Yue, H., Wang, X., & Fan, Y. (2023). Global analysis of the correlation and propagation among meteorological, agricultural, surface water, and groundwater droughts. *Journal of Environmental Management*, 333, 117460.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117460>
- LK Lüneburg. (2023). Allgemeinverfügung des Landkreises Lüneburg zur Beschränkung der Bewässerung und Beregnung aus dem Grundwasser und aus der Trinkwasserversorgung.
<https://www.landkreis-lueneburg.de/Resources/Persistent/b/8/2/c/b82cc3873cbde7b6334fd357a82fc749285748f8/Allgemeinverf%C3%BCgung%20zur%20Beschr%C3%A4nkung%20der%20Bew%C3%A4sserung%20und%20Beregnung.pdf>
- Lobell, D., & Burke, M. (Hrsg.). (2010). *Climate Change and Food Security* (Bd. 37). Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-2953-9>
- Lorenz, H., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2020). Does the Admixture of Forage Herbs Affect the Yield Performance, Yield Stability and Forage Quality of a Grass Clover Ley? *Sustainability*, 12(14), Article 14.
<https://doi.org/10.3390/su12145842>
- LSN. (2023). Ergebnisse der Agrarstrukturhebung Niedersachsen 2023 | Landesamt für Statistik Niedersachsen. Landesamt für Statistik Niedersachsen.
https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/landwirtschaft_in_niedersachsen/agrarstrukturhebung_landwirtschaftliche_betriebe/ergebnisse-der-agrarstrukturhebung-niedersachsen-2023-232819.html
- LSN. (2024a). Erntestatistik online—Archiv der Ernteberichte Niedersachsen | Landesamt für Statistik Niedersachsen [Landesamt für Statistik Niedersachsen].
https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/erntestatistik_online/-192533.html
- LSN. (2024b). Erntestatistik online—Ernteergebnisse in Niedersachsen seit 1991 | Landesamt für Statistik Niedersachsen [Landesamt für Statistik Niedersachsen; Xls].
https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/erntestatistik_online/ernteergebnisse_seit_1991/erntestatistik-online-ernteergebnisse-in-niedersachsen-seit-1991-152870.html
- Lüders, K. (1957). Wiederherstellung der Deichsicherheit an der deutschen Nordseeküste von der holländischen Grenze bis zur Elbe. *Wasser und Boden*, 9(2).
- Lüders, K., & Leis, G. (1964). *Niedersächsisches Deichgesetz: Kommentar*. Verlag Wasser u. Boden Lindow.
- Luo, H., Quaas, J., & Han, Y. (2024). Decreased cloud cover partially offsets the cooling effects of surface albedo change due to deforestation. *Nature Communications*, 15(1), 7345.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-51783-y>
- Lüscher, A., Barkaoui, K., Finn, J. A., Suter, D., Suter, M., & Volaire, F. (2022). Using plant diversity to reduce vulnerability and increase drought resilience of permanent and sown productive grasslands. *Grass and Forage Science*, 77(4), 235–246.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12578>
- Maitre, D. C. L., Scott, D. F., & Colvin, C. (1999). A review of information on interactions between vegetation and groundwater.
- Menzel, A. (1997). Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen: Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung der Univ. München.

- Menzel, A., Sparks, T., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., ... Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10), 1969–1976.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Meon, G., Müller, T., Koch, A., Eggelsmann, F., Unger, L., & Lange, A. (2018). Klimatischbedingte Anpassungsstrategien für ein Talsperrenverbundsystem im Harz. In S. Heimerl (Hrsg.), *Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz* (S. 51–56). Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-21839-3_8
- Mesterharm, M. (2011). Die regionale Vulnerabilitätsanalyse der Ernährungswirtschaft im Kontext des Klimawandels— Eine Wertschöpfungskettenbetrachtung der Milchwirtschaft in der Metropolregion Bremen-Oldenburg (Nos. nordwest2050-Werkstattbericht Nr. 9). Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
<https://edoc.sub.uni-hamburg.de/klimawandel/frontdoor/index/index/year/2014/docId/792>
- ML. (2020, Dezember 22). Düngeverordnung: Karten für „Rote Gebiete“ liegen vor | Nds. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz [Pressemitteilung]. Ministerin für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
<https://www.ml.niedersachsen.de/presse/pressemitteilungen/dungeverordnung-karten-fur-rote-gebiete-liegen-vor-195780.html>
- ML. (2023, Juli 3). Nitratbelastete Gebiete: Änderungsverordnung geht in die Verbandsbeteiligung.
https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/pflanzen_und_dungemanagement/nitratbelastete-gebiete-kabinett-gibt-anderungsverordnung-fur-die-verbandsbeteiligung-223510.html
- ML. (2024a). Der Wald in Zahlen. Ergebnisse der Bundeswaldinventur 4 für Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
https://www.ml.niedersachsen.de/download/90884/Download_Broschuere_Der_Wald_in_Zahlen_-_Ergebnisse_der_BWI_4_in_Niedersachsen.pdf
- ML. (2024b). Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen 2021. Einschließlich Ergänzungen und Aktualisierungen Stand Juni 2024. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
https://www.ml.niedersachsen.de/download/208161/Die_niedersaechsische_Landwirtschaft_in_Zahlen_2021_mit_Ergaenzungen_Stand_Juni_2024.pdf
- Mlinarić, M., Moebus, S., Betsch, C., Hertig, E., Schröder, J., Loss, J., Moosburger, R., Van Rūth, P., Gepp, S., Voss, M., Straff, W., Kessel, T.-M., Goecke, M., Matzarakis, A., & Niemann, H. (2023). Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Synthese der Handlungsoptionen des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit 2023. *Journal of Health Monitoring*, S6.
<https://doi.org/10.25646/11771>
- Mockus, V. (1972). Chapter 21: Design Hydrographs. In *Soil Conservation Service (Hrsg.), SCS national engineering handbook, section 4, hydrology*.
- Moore, N. aus dem, Brehm, J., Breidenbach, P., Eilers, L., Gruhl, H., Kaeding, M., & Thiel, P. (2024). Soziale Aspekte der Umweltpolitik. Teilvorhaben II: Gewinnung von Daten (Endbericht No. 82; Texte). Umweltbundesamtes.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/82_2024_texte_soziale_aspekte_der_umweltpolitik.pdf
- Morse, R. (2008). Environmental justice through the eye of hurricane katrina. Joint Center for Political and Economic Studies, Inc.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756.
<https://doi.org/10.1038/nature08823>

- MU. (2014). Zukunftsfähige Sicherung der Feldberegnung [Gesamtkonzept]. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz.
- MU. (2021). Niedersächsischer Beitrag zu den Bewirtschaftungsplänen 2021 bis 2027 der Flussgebiete Elbe, Weser, Ems und Rhein. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
- MU. (2022a). Hintergrunddokument zum Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/183415/Hintergrunddokument_zum_Wasserversorgungskonzept_Niedersachsen.pdf
- MU. (2022b). Niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (S. 252). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
<https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/178371>
- MU. (2022c). Wasserversorgungskonzept Niedersachsen (S. 99). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
- MU. (2024a). Umweltkarten Niedersachsen [Kartenserver].
<https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/Umweltkarten/>
- MU. (2024b). Mengenmäßige Bewirtschaftung des Grundwassers (No. Nds. MBl. 223).
<https://www.verkuendung-niedersachsen.de/api/ndsmb/2024/223/0/mbl-2024-223.pdf> (Runderlass)
- Mueller, P., Ladiges, N., Jack, A., Schmiedl, G., Kutzbach, L., Jensen, K., & Nolte, S. (2019). Assessing the long-term carbon-sequestration potential of the semi-natural salt marshes in the European Wadden Sea. *Ecosphere*, 10(1), e02556.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.2556>
- Müller, Dr. U., Engel, N., Heidt, L., Schäfer, Dr. W., Kunkel, R., Wendland, F., Roehm, H., & Elbracht, Dr. J. (2012). Klimawandel und Bodenwasserhaushalt (No. GeoBerichte 20; Version 1. Auflage, S. 2,59 MB). LBEG, Hannover.
https://doi.org/10.48476/geober_20_2012
- Narocki, C. (2021). Heatwaves as an occupational hazard: The impact of heat and heatwaves on workers' health, safety and wellbeing and on social inequalities. European Trade Union Institute.
- Nds. Ministerium für Inneres und Sport. (2024, April 12). Zwischenbilanz zum Weihnachtshochwasser: Vorläufige Gesamtschäden in Höhe von mehr als 161 Millionen Euro ermittelt - Notwendige Mittel werden bereitgestellt [Presseinformation]. www.mi.niedersachsen.de.
<https://www.mi.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presseinformationen/zwischenbilanz-zum-weihnachtshochwasser-vorlaufige-gesamtschaden-in-hohe-von-mehr-als-161-millionen-euro-ermittelt-notwendige-mittel-werden-bereitgestellt-231282.html>
- Newell, P., Srivastava, S., Naess, L. O., Torres Contreras, G. A., & Price, R. (2021). Toward transformative climate justice: An emerging research agenda. *WIREs Climate Change*, 12(6), e733.
<https://doi.org/10.1002/wcc.733>
- Niemeyer, H. D. (1983). Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste (BMFT-Forschungsbericht No. MF0203). Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4948.5683>
- Niemeyer, H. D. (1986). Changing of Wave Climate Due to Breaking on a Tidal Inlet Bar. *Coastal Engineering Proceedings*, 20, Article 20.
<https://doi.org/10.9753/icce.v20.105>
- NIKO. (2023a). Indikatorenkenblätter zum Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023. Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO), Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz.
<https://niko-klima.de/wp-content/uploads/2023/12/Indikatorenkennblaetter-zum-Klimafolgenmonitoringbericht-Nds.-2023.pdf>

- NIKO. (2023b). Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023. Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO), Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz.
- NLGA. (2024a). Projekt RoBoPub: Durch Nagetiere übertragene Krankheiten und Erreger [Niedersächsisches Landesgesundheitsamt].
<https://www.nlga.niedersachsen.de/robopub/uebersicht-205134.html>
- NLGA. (2024b). Stechmücken und durch Stechmücken übertragene Erkrankungen [Niedersächsisches Landesgesundheitsamt].
<https://www.nlga.niedersachsen.de/bev/krankheiten-erreger/stechmucken-und-durch-stechmucken-ubertragene-erkrankungen-229309.html>
- NLGA. (2024c). Vektorübertragbare Infektionen [Niedersächsisches Landesgesundheitsamt].
<https://www.nlga.niedersachsen.de/klima/vektorerubertragbare-infektionen-227294.html>
- NLGA. (2024d). Zecken. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt.
https://www.nlga.niedersachsen.de/download/203702/Zecken_Vektorassoziierte_Erkrankungen_als_Auswirkungen_des_Klimawandels_Stand_Maerz_2024_.pdf
- NLWKN. (2007). Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/ Bremen -Festland- (No. 1; Küstenschutz). NLWKN, Norden.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/22925/Generalplan_Kuestenschutz_Niedersachsen_Bremen_Teil_1_-_Festland.pdf
- NLWKN. (2010). Generalplan Küstenschutz Niedersachsen—Ostfriesische Inseln (No. 2; Küstenschutz). NLWKN, Norden.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/59866/Generalplan_Kuestenschutz_Teil_2_-_Ostfriesischen_Inseln.pdf
- NLWKN. (2019a). Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Themenbereich Niedrigwasser (Oberirdische Gewässer Band 42) [Abschlussbericht KliBiW Phase 5]. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/143085/KliBiW_-_Abschlussbericht_Phase_5_August_2019.pdf
- NLWKN. (2019b). Jahresbericht 2018/2019 des NLWKN (S. 52).
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/143399/Jahresbericht_2018_2019.pdf
- NLWKN. (2021a). Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Vertiefende Hochwasseranalysen (Oberirdische Gewässer Band 45) [Abschlussbericht KliBiW Phase 6]. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/170566/KliBiW_Abschlussbericht_Phase_6_Dezember_2021_.pdf
- NLWKN. (2021b). Parameterblatt Sauerstoff (Oberirdische Gewässer). Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/192331>
- NLWKN. (2023a). Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für die Grundwasserstände in Niedersachsen. (Grundwasser Band 60) [Abschlussbericht KliBiW Phase 7]. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/201932/KliBiW_Abschlussbericht_Phase_7_Dezember_2023_.pdf
- NLWKN. (2023b). Trockenheit: Gewässer und Umwelt unter Druck [Pressemitteilung].
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presse_und_offentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/trockenheit-gewasser-und-umwelt-unter-druck-223049.html
- NLWKN. (2024a). Wasserwirtschaftliche Messnetze – wozu? Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/215032/Wasserwirtschaftliche_Messnetze_-_wozu_-_Grundwasser_und_Oberflaechenwasser_beobachten_untersuchen_und_bewerten.pdf
- NLWKN. (2024b, Juli 18). Winterhochwasser 2023/2024.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/jb2023/winterhochwasser-2023-2024-229709.html>

- NLWKN. (2024c, Juli 24). Landesdatenbank NLWKN.
www.wasserdaten.niedersachsen.de
- NLWKN. (2024d, August 7). Jahresbericht 2023 des NLWKN.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/jb2023>
- Oberrecht, D., Nordhaus, I., Merk, V., Galiforni, F., Persichini, G., Kunde, T., Shiravanii, G., Herbst, G., Scheiffarth, G., Winter, C., & Wurpts, Andreas, D. (2024). Erstellung von Grundlagen für eine Strategie zum ökologischen Sedimentmanagement an der Ems [Abschlussbericht SediEms, Reg.-Nr. 276 03 452 019 0154/2024].
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/209905>
- Ogden, J. (2006). Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. *Marine Ecology*, 27(4), 431–432.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2006.00138.x>
- Ossó, A., Allan, R. P., Hawkins, E., Shaffrey, L., & Maraun, D. (2022). Emerging new climate extremes over Europe. *Climate Dynamics*, 58(1), 487–501.
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05917-3>
- Oude Essink, G. H. P. (2001). Saltwater intrusion in a three-dimensional groundwater system in The Netherlands: A numerical study. *Transport in Porous Media*, 43(1), 137–158.
<https://doi.org/10.1023/A:1010625913251>
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., & De Louw, P. G. B. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46(10), 2009WR008719.
<https://doi.org/10.1029/2009WR008719>
- Overbeck, M., & Schmidt, M. (2012). Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management*, 266, 115–125.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.011>
- Paldor, A., & Michael, H. A. (2021). Storm Surges Cause Simultaneous Salinization and Freshening of Coastal Aquifers, Exacerbated by Climate Change. *Water Resources Research*, 57(5), e2020WR029213.
<https://doi.org/10.1029/2020WR029213>
- Paulsen, M., Clemmesen, C., & Malzahn, A. M. (2016). Size Dependent Growth in Larval Fish Is Not an Issue in a World of Plenty (No. 41; Rapports et Proces-Verbaux Des Reunions Conseil International Pour l'Ex-Ploration de La Mer, S. 331–331).
- Peters, T., Taube, F., Kluß, C., Reinsch, T., Loges, R., & Fenger, F. (2021). How Does Nitrogen Application Rate Affect Plant Functional Traits and Crop Growth Rate of Perennial Ryegrass-Dominated Permanent Pastures? *Agronomy*, 11(12), Article 12.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11122499>
- Philippart, C. J. M., Baptist, M. J., Bastmeijer, C. J., Bregnballe, T., Buschbaum, C., Hoekstra, P., Laursen, K., van Leeuwen, S. M., Oost, A. P., Wegner, M., & Zijlstra, R. (2024). Wadden Sea Quality Status Report. Common Wadden Sea Secretariat.
<https://qsr.waddensea-worldheritage.org/climate-change-2024>
- Plückhahn, B., Brömser, A., Janssen, W., & Krauthan, E. (2023). Globale Erwärmung – höheres Risiko für Spätfrostschäden? Deutscher Wetterdienst (DWD).
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/230406/spaetfrost_download.pdf?blob=publicationFile&v=1
- Pocock. (2020, März 27). The Future Rotations Explorer from the PREAR project.
<https://projects.au.dk/facesurplus/currently/news/nyhed/artikel/the-future-rotations-explorer-from-the-prear-project/>
- Post, V. E. A., & Houben, G. J. (2017). Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood. *Journal of Hydrology*, 551, 689–702.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.007>

- Racca, P., Kakau, J., Kleinhenz, B., & Kuhn, C. (2015). Impact of Climate Change on the Phenological Development of Winter Wheat, Sugar Beet and Winter Oilseed Rape in Lower Saxony, Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122(1), 16–27.
<https://doi.org/10.1007/BF03356526>
- Region Hannover. (2024). Allgemeinverfügung der Region Hannover zur zeitlichen Beschränkung der Nutzung von Bewässerungsanlagen und Rasensprengern im Regionsgebiet.
- Renger, M., & Strebel, O. (1983). Berechnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen-Nutzfläche in Niedersachsen.
- Renner, K., Fritsch, U., Zebisch, M., Wolf, M., Schmuck, A., Ölmez, C., Schönthaler, K., Porst, L., Voß, M., Wolff, A., & Jay, M. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland | Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land. In Umweltbundesamt (Hrsg.), *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland* (S. 359). Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-2-Cluster-Land>
- Richardson, S., Irvine, E., Froend, R., Boon, P., Barber, S., & Bonneville, B. (2011). Australian groundwater dependent ecosystems toolbox part 1: Assessment framework. *Waterlines report*, National Water Commission, Canberra.
- Riedel, G. (2004). Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete [Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig].
https://web.archive.org/web/20201212125535id_/https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00001644/Document.pdf
- Riedel, T. (2019). Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, 572, 206–212.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>
- Ritzmann, A., & Niemeyer, H. D. (2011). Gebietsverluste bei der Strategie Rückzug als Reaktion auf Klimaänderungsfolgen im niedersächsischen Küstengebiet (No. 02/11; Forschungsbericht). Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Forschungsstelle Küste.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/86753>
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N., & Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, 42(16), 4215–4232.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.07.020>
- Rivière, G. (2011). A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(6), 1253–1272.
<https://doi.org/10.1175/2011JAS3641.1>
- RKI. (2023). Krebs in Deutschland für 2019/2020. Robert Koch-Institut, Zentrum für Krebsregistrierdaten, Gesellschaft des epidemiologischen Krebsregisters in Deutschland.
https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/krebs_in_deutschland_2023.pdf?_blob=publicationFile
- Rocks, K., Völker, V., & Illgen, M. (2015). Starkregen und Sturzfluten in Städten. Eine Arbeitshilfe. Deutscher Städtetag.
<https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Weitere-Publikationen/Archiv/arbeitshilfe-starkregen-2015.pdf>
- Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Arnell, N., Ayebe-Karlsson, S., Ford, L. B., Belesova, K., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., ... Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619–1654.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9)
- Rönn, L., Di Carvalho, J. A., Blauw, A., Hillebrand, H., Kerimoglu, O., Lenhart, H., Prins, T., Gholamreza Shiravani, Tack, L., Thewes, D., & Troost, T. (2023). Harmonisation of the Phytoplankton Assessment in the German and Dutch Wadden Sea. Interreg V A project “Wasserqualität—Waterkwaliteit”—Synthesis Report. NLWKN und Rijkswaterstaat.
<https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.15539.81446>

- Röper, T., Kröger, K. F., Meyer, H., Sültenfuss, J., Greskowiak, J., & Massmann, G. (2012). Groundwater ages, recharge conditions and hydrochemical evolution of a barrier island freshwater lens (Spiekeroog, Northern Germany). *Journal of Hydrology*, 454–455, 173–186.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.011>
- Roßberg, D., Michel, V., Graf, R., & Neukampf, R. (2007). Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland.
- Roßberg, D., & Recknagel, J. (2017). Untersuchungen zur Anbaueignung von Sojabohnen in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen*, 69(4), 137–145.
<https://doi.org/10.1399/JfK.2017.04.02>
- Roth, D., Günther, R., Knoblauch, S., & Michel, H. (2005). Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen (Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thürungen). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
<https://www.yumpu.com/de/document/view/9417974/wasserhaushaltsgrossen-von-kulturpflanzen-unter-tll>
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (2023). Umwelt und Gesundheit konsequent zusammendenken: Sondergutachten. Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU).
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen (Hrsg.). (2023). Resilienz im Gesundheitswesen: Wege zur Bewältigung künftiger Krisen: Gutachten 2023. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Sake, B., Volkmann, N., Kemper, N., & Schulz, J. (2024). Heat Stress Trends in Regions of Intensive Turkey Production in Germany—A Challenge in Times of Climate Change. *Animals*, 14(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/ani14010072>
- Saxony, L., Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B., & Hau, B. (2011). Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118(5), 168–177.
<https://doi.org/10.1007/BF03356400>
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856), 591–596.
<https://doi.org/10.1038/35098000>
- Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., & Peter, Ch. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1–2), 41–51.
<https://doi.org/10.1007/s00704-002-0704-6>
- Schmidt, G., Schönrock, S., & Schröder, W. (2014). Phenological Trends in Germany. In *Plant Phenology as a Biomonitor for Climate Change in Germany*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-0909-0>
- Schmitt, T. G. (2016). Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zum Anwendungskontext Risikokommunikation in DWA-M 119.
- Schmitt, T. G., Krüger, M., Pfister, A., Becker, M., Mudersbach, C., Fuchs, L., Hoppe, H., & Lakes, I. (2018). Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex*, 2018(2), 113–120.
<https://doi.org/10.3242/kae2018.02.002>
- Schmitz, S. R., Klier, C., Princk, C., Meyer-Schlinkmann, K., Mylius, M., Dressel, K., Kleele, S., Winter, F., Campe, A., Rissland, J., Sternjakob, A., Dobler, G., Oehme, R., Ulrich, R. G., & Dreesman, J. (2023). ÖGD-Expertise in die Forschung bringen: Eine Workshop-Reihe zu vektorübertragenen und weiteren zoonotischen Erkrankungen. *Das Gesundheitswesen*, 85(10), 955–958.
<https://doi.org/10.1055/a-2110-6597>
- Schöl, A. (2015). Sauerstoffverhältnisse in der Tideelbe. Untersuchung im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtamtes Hamburg. Bundesanstalt für Gewässerkunde.
<https://doi.org/10.5675/BfG-1855>

- Schröder, W., Pesch, R., & Schmidt, G. (2010). Projektion jahreszeitlicher Pflanzenentwicklungen im Klimawandel. Beiträge zum 22. Agit-Symposium, 687–696.
- Schröder, W., & Schmidt, G. (2014). Case Study 1: Modelling Potential Transmission Gates of Malaria Tertiana in Lower Saxony. In W. Schröder & G. Schmidt, Modelling Potential Malaria Spread in Germany by Use of Climate Change Projections (S. 7–28). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-03823-0_2
- Schulla, J. (2024). Description WaSiM (Water balance Simulation Model) [Hydrology Software Consulting].
http://www.wasim.ch/en/products/wasim_description.htm
- Schürch, M. (2008). Schadenspotenzial und Verletzlichkeit von Grundwasser: Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen. Schadenspotenzial und Verletzlichkeit von Grundwasser: Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen, 88(6), 459–469.
- Schweda, S. (2019). Forschungsprojekt Starkregen. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
<https://www.gdv.de/resource/blob/52868/c6d7ffceab5d13fc0f7659496ced6421/forschungsprojekt-starkregen-summary-download-data.pdf>
- Seibert, S. L., Greskowiak, J., Bungenstock, F., Freund, H., Karle, M., Meyer, R., Oude Essink, G. H. P., Van Engelen, J., & Massmann, G. (2023). Paleo-Hydrogeological Modeling to Understand Present-Day Groundwater Salinities in a Low-Lying Coastal Groundwater System (Northwestern Germany). *Water Resources Research*, 59(4), e2022WR033151.
<https://doi.org/10.1029/2022WR033151>
- Seibert, S. L., Greskowiak, J., Oude Essink, G. H. P., & Massmann, G. (2024). Understanding Climate Change and Anthropogenic Impacts on the Salinization of Low-Lying Coastal Groundwater Systems. *Earth's Future*, 12(8), e2024EF004737.
<https://doi.org/10.1029/2024EF004737>
- Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J. B., Dunshea, F. R., & Lacetera, N. (2018). Review: Adaptation of animals to heat stress. *Animal*, 12, s431–s444.
<https://doi.org/10.1017/S1751731118001945>
- SENMMVKU. (2024, September 4). Umweltgerechtigkeit.
<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/nachhaltigkeit/umweltgerechtigkeit/>
- Siebold, M., & Tiedemann, A. von. (2012). Potential effects of global warming on oilseed rape pathogens in Northern Germany. *Fungal Ecology*, 5(1), 62 – 72.
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.04.003>
- Sieck, K., Nam, C., Bouwer, L. M., Rechid, D., & Jacob, D. (2021). Weather extremes over Europe under 1.5 and 2.0°C global warming from HAPPI regional climate ensemble simulations. *Earth System Dynamics*, 12(2), 457–468.
<https://doi.org/10.5194/esd-12-457-2021>
- Söder, M., Berg, M., Golla, B., Jänicke, C., & Romanova, V. (2022). Klimawandelbedingte Ertragsveränderungen und Flächennutzung (KlimErtrag) (No. 198; Thünen Working Paper). Thünen-Institut.
- Southworth, J., Randolph, J. C., Habeck, M., Doering, O. C., Pfeifer, R. A., Rao, D. G., & Johnston, J. J. (2000). Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 139–158.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00223-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00223-1)
- Spellmann, H. (2017). Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. In Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (S. 83–98). Göttingen University Press.
<https://doi.org/10.17875/gup2018-1073>
- Spellmann, H., Suttmöller, J., & Meesenburg, H. (2007). Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels: Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ-DerWald*, 23/2007, 1246–1249.

- Spiekermann, J., Ahlhorn, F., Bormann, H., & Kebschull, J. (2018). Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Universität Oldenburg.
<https://uol.de/klever/ergebnisbroschuere>
- Spiekermann, J., Bormann, H., Kebschull, J., & Kramer, N. (2023). Management von Binnenhochwasserrisiken im Küstenraum.
https://uol.de/fileadmin/user_upload/proj/klever/KLEVER-Risk/KLEVER-Risk-Ergebnisbroschuere.pdf?v=1682611847
- Spiekermann, J., & Franck, E. (2014). Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung: Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene Ergebnisse aus dem Projekt: KLIF IMPLAN. ARL, Akademie für Raumforschung und Landesplanung.
- Steinel, A., Houben, G., & Himmelsbach, T. (2012). Auswirkungen auf das Grundwasser. In V. Mosbrugger, G. Brasseur, M. Schaller, & B. Stribrny, Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland (Online-Ausg., S. 57–90). WBG - Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
https://www.researchgate.net/profile/Anke_Steinel/publication/324692139_Auswirkungen_auf_das_Grundwasser/links/5add78dbaca272fdaf86ce67/Auswirkungen-auf-das-Grundwasser.pdf
- Steinel, A., Houben, G., & Himmelsbach, T. (2013). Auswirkungen auf das Grundwasser. In Klimawandel und Biodiversität—Folgen für Deutschland (S. 57–90). Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
https://www.researchgate.net/profile/Anke_Steinel/publication/324692139_Auswirkungen_auf_das_Grundwasser/links/5add78dbaca272fdaf86ce67/Auswirkungen-auf-das-Grundwasser.pdf
- Steinhoff-Knopp, B. (2021). Jährliche Variabilität und räumliche Muster der Bodenerosion – Erkenntnisse aus der niedersächsischen Bodenerosionsdauerbeobachtung [PDF]. In H. Höper & H. Meesenburg, 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen (Version 1. Auflage, S. 244–253). LBEG, Hannover.
https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_39_2021
- Steinhoff-Knopp, B., & Bug, J. (2019). Aktualisierte K-Faktoren für Niedersachsen. Bodenschutz, 3, 3.
<https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2019.03.03>
- Streif, H. (1990). Das ostfriesische Küstengebiet: Nordsee, Inseln, Watten und Marschen (2. völlig Neubearb. Aufl). Borntraeger.
- Sulzbacher, H., Wiederhold, H., Siemon, B., Grinat, M., Igel, J., Burschil, T., Günther, T., & Hinsby, K. (2012). Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods. Hydrology and Earth System Sciences, 16(10), 3621–3643.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-3621-2012>
- Sutmöller, J., Meesenburg, H., Evers, J., & Wagner, M. (2017). Auswirkungen der Trockenheit 2015 auf den Bodenwasserhaushalt und das Baumwachstum von Waldstandorten in Nordwestdeutschland. In Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt.
- Sutmöller, J., Schönfelder, E., & Meesenburg, H. (2021). Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft.
https://doi.org/10.5676/DWD_PUB/PROMET_104_07
- Taube, F., Vogeler, I., Kluß, C., Herrmann, A., Hasler, M., Rath, J., Loges, R., & Malisch, C. S. (2020). Yield Progress in Forage Maize in NW Europe—Breeding Progress or Climate Change Effects? Frontiers in Plant Science, 11.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01214>
- Thissen, L., Greskowiak, J., Gaslikova, L., & Massmann, G. (2024). Climate change impact on barrier island freshwater lenses and their transition zones: A multi-parameter study. Hydrogeology Journal.
<https://doi.org/10.1007/s10040-024-02800-3>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2021). Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. Global Change Biology, 27(22), 5762–5772.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15825>

- Tradowsky, J. S., Philip, S. Y., Kreienkamp, F., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S. C., De Cruz, L., de Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E. M., Fowler, H. J., Goergen, K., Heinrich, D., Henrichs, Y., Kaspar, F., ... Wanders, N. (2023). Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change*, 176(7), 90.
<https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>
- Troost, K., & Asch, M. van. (2018). Herziene schatting van het kokkelbestand in de Waddenzee en Oosterschelde in het najaar van 2018 (CVO rapport). Centrum voor Visserijonderzoek (CVO).
<https://doi.org/10.18174/460535>
- TSIS. (2025, September 5). TierSeuchenInformationsSystem [Friedrich-Loeffler-Institut].
<https://tsis.fli.de/cadanza/>
- UBA. (2016). Böden als Wasserspeicher [Position]. Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU).
- UBA. (2024). Glossar.
<https://www.umweltbundesamt.de/service/glossary/h#tag-Hitzestress>
- Uber, M., Haller, M., Brendel, C., Hillebrand, G., & Hoffmann, T. (2024). Past, present and future rainfall erosivity in central Europe based on convection-permitting climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 87–102.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-87-2024>
- Umweltkarten Niedersachsen. (2024). Hydrographische Karte Niedersachsen [Dataset].
<https://urls.niedersachsen.de/eh5a>
- Urrego-Parra, H. N., Rodriguez-Guerrero, L. A., Pastells-Peiró, R., Mateos-García, J. T., Gea-Sanchez, M., Escrig-Piñol, A., & Briones-Vozmediano, E. (2022). The Health of Migrant Agricultural Workers in Europe: A Scoping Review. *Journal of Immigrant and Minority Health*, 24(6), 1580–1589.
<https://doi.org/10.1007/s10903-022-01330-y>
- van Beusekom, J. E. E., Carstensen, J., Dolch, T., Grage, A., Hofmeister, R., Lenhart, H., Kerimoglu, O., Kolbe, K., Pätsch, J., Rick, J., Rönn, L., & Ruiter, H. (2019). Wadden Sea Eutrophication: Long-Term Trends and Regional Differences. *Frontiers in Marine Science*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00370>
- Van Daalen, K. R., Romanello, M., Rocklöv, J., Semenza, J. C., Tonne, C., Markandya, A., Dasandi, N., Jankin, S., Achebak, H., Ballester, J., Bechara, H., Callaghan, M. W., Chambers, J., Dasgupta, S., Drummond, P., Farooq, Z., Gasparyan, O., Gonzalez-Reviriego, N., Hamilton, I., ... Lowe, R. (2022). The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: Towards a climate resilient future. *The Lancet Public Health*, 7(11), e942–e965.
[https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00197-9)
- van der Molen, J., Groeskamp, S., & Maas, L. R. M. (2022). Imminent reversal of the residual flow through the Marsdiep tidal inlet into the Dutch Wadden Sea based on multiyear ferry-borne acoustic Doppler current profiler (ADCP) observations. *Ocean Science*, 18(6), 1805–1816.
<https://doi.org/10.5194/os-18-1805-2022>
- Van der Veer, H., Tulp, I., Witte, J., Poiesz, S., & Bolle, L. (2022). Changes in functioning of the largest coastal North Sea flatfish nursery, the Wadden Sea, over the past half century. *Marine Ecology Progress Series*, 693, 183–201.
<https://doi.org/10.3354/meps14082>
- Van Lanen, H. A. J., & Peters, E. (2000). Definition, Effects and Assessment of Groundwater Droughts. In J. V. Vogt & F. Somma (Hrsg.), *Drought and Drought Mitigation in Europe* (S. 49–61). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_4
- Vogel, R., Albright, A. L., Vial, J., George, G., Stevens, B., & Bony, S. (2022). Strong cloud–circulation coupling explains weak trade cumulus feedback. *Nature*, 612(7941), 696–700.
<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05364-y>

- Wachler, B., Seiffert, R., Rasquin, C., & Kösters, F. (2020). Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics*, 70(8), 1033–1052.
<https://doi.org/10.1007/s10236-020-01383-3>
- Wagner, M., Scheler, B., Suttmöller, J., Dammann, I., Paar, U., Meesenburg, H., & Eichhorn, J. (2019). Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 1. In *AFZ-DerWald* 6/2019 (S. 47–50). Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH.
https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfv/publikationen/pdf/sutmoller_2019_die_extreme_trockenheit.pdf
- Wahl, T., Jensen, J., & Frank, T. (2010). On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), 171–179.
<https://doi.org/10.5194/nhess-10-171-2010>
- Wegner, K., Lambertz, C., Das, G., Reiner, G., & Gauly, M. (2016). Effects of temperature and temperature-humidity index on the reproductive performance of sows during summer months under a temperate climate. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho*, 87(11), 1334–1339.
<https://doi.org/10.1111/asj.12569>
- Weisse, R., Gaslikova, L., Hagemann, S., Heinrich, P., Berkenbrink, C., Chen, J. J., Bormann, H., Keschull, J., Ley, A., Massmann, G., Greskowiak, J., Thissen, L., Karrasch, L., Schoppe, A., Ratter, B. M. W., & Wessels, A. (2024). Zusammenwirken von Naturgefahren im Klimawandel ist für die Nordseeküste zunehmend eine Herausforderung. *Wasser und Abfall*, 26(5), 38–45.
<https://doi.org/10.1007/s35152-024-1854-y>
- Weisse, R., & Meinke, I. (2023). Mittlerer Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 95–108). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-66696-8_9
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- Wetthey, D. S., & Woodin, S. A. (2022). Climate change and *Arenicola marina*: Heat waves and the southern limit of an ecosystem engineer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 276, 108015.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108015>
- WHG, Pub. L. No. BGBl. I 2009 S. 2585 (2009).
http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl109s2585.pdf
- White, I., & Falkland, T. (2010). Management of freshwater lenses on small Pacific islands. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 227–246.
<https://doi.org/10.1007/s10040-009-0525-0>
- WHO. (2017). Überschwemmungen: Beherrschung von Gesundheitsrisiken in den Mitgliedstaaten der europäischen Region der who.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/329520/9789289053006-ger.pdf?sequence=1>
- WHO. (2019). Environmental health inequalities resource package. WHO Regional Office for Europe;
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346223/WHO-EURO-2019-3505-43264-60635-eng.pdf?sequence=3>
- Wiederhold, H., & Elbracht, J. (2013). Salzwasserintrusion – Gefahr für unser Trinkwasser? In *GMIT Geowissenschaftliche Mitteilungen* (S. 6–13).
<https://e-docs.geo-leo.de/server/api/core/bitstreams/56b0f818-dd0a-45e9-a605-0e1c9c8d73d5/content>
- Wilpert, K. von. (1990). Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde: Ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition. Selbstverlag des Instituts für Bodenkunde und Waldernährungslehre.

- Winklmayr, C., Muthers, S., Niemann, H., Mücke, H.-G., & An Der Heiden, M. (2022). Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Deutsches Ärzteblatt international*.
<https://doi.org/10.3238/arztebl.m2022.0202>
- Winterrath, T. (2017). Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- Wolf, M., Ölmez, C., Schönthaler, K., Porst, L., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Dorsch, L., & Dudda, L. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland | Teilbericht 5: Risiken und Anpassung in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. In Umweltbundesamt (Hrsg.), *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland* (S. 261). Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-5-Wirtschaft-Gesundheit>
- World Weather Attribution. (2018). Heatwave in northern Europe, summer 2018.
<https://www.worldweatherattribution.org/attribution-of-the-2018-heat-in-northern-europe/>
- Wriedt, G. (2023). Grundwasserbericht Niedersachsen—Sonderausgabe zur Grundwasserstands- entwicklung im Jahr 2022 (Grundwasser Band 58). Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- Wurbs, D., & Steininger, M. (2017). Bodenerosion durch Wind. Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr. Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/merkblatt_bodenerosion_durch_wind_web.pdf

Anhang

A.1 Niedersächsische Klimakompetenz

Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO)

Das Niedersächsische Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) ist 2021 als Service- und Beratungsstelle zu den Themen Klimawandel und Klimafolgenanpassung gegründet worden. Seitdem informiert und berät das NIKO zu den Ursachen des Klimawandels, den Folgen des Klimawandels und zu Klimaanpassung in Niedersachsen.

Das NIKO:

- ... bereitet Klimadaten der Vergangenheit und der projizierten Zukunft kostenfrei auf.
- ... begleitet Projekte zum Klimawandel und zur Klimaanpassung.
- ... unterstützt den Aufbau des niedersächsischen Klimakompetenznetzwerks.
- ... organisiert regelmäßig Treffen des Kommunalen Klimaanpassungsnetzwerks Niedersachsen.
- ... informiert zum Klimawandel, zu Klimafolgen und zur Anpassung an den Klimawandel in Niedersachsen.

Das NIKO betreibt das [Niedersächsische Klimainformationssystem \(NIK LIS\)](#). Im NIK LIS finden Sie Karten und Informationen zum Klima der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft – wie z. B. Temperatur, Eistage und vieles mehr. Eine Abgabe der Daten ist ebenfalls möglich. Das NIK LIS ist seit August 2022 kostenfrei für alle Interessierten online verfügbar.

Das NIKO hat die Erstellung dieser Veröffentlichung koordiniert.



Kontakt zum NIKO:

Telefon: 0511/120-3500

E-Mail: niko@mu.niedersachsen.de

Webseite: www.niko-klima.de

Kommunale Umwelt-Aktion UAN

Die Kommunale Umwelt-Aktion UAN hat sich als erster und einziger kommunaler Umweltverband in Deutschland zum Ziel gesetzt, Kommunen, kommunalen Verbänden und kommunalen Unternehmen bei der Lösung örtlicher Umwelt- und Nachhaltigkeitsaufgaben zu helfen.

Die UAN ist ein gemeinnütziger Verein, eng verbunden mit dem Niedersächsischen Städte- und Gemeindebund.

Seit 40 Jahren ist die UAN mit finanzieller Unterstützung ihrer fördernden Mitglieder sowie verschiedenster Förderinstitutionen im Bereich der kommunalen Umwelt und Nachhaltigkeit aktiv.

Sie bietet Wissensvermittlung, fachliche Beratung, Projektmanagement, Prozessbegleitung und Öffentlichkeitsarbeit im kommunalen Umfeld. Sie ist vernetzt mit vielen staatlichen, verbandlichen und privatwirtschaftlichen Fachinstitutionen. Die UAN verbindet die Kommunen untereinander, mit dem Land sowie mit ihren Bürger:innen und weiteren Akteuren in einer kooperativen Herangehensweise.

Seit 2021 existiert bei der UAN das Starkregen-Netzwerk Niedersachsen. Über das Starkregen-Netzwerk werden derzeit (Stand Januar 2025) über 550 Mitglieder zu aktuellen Themen der Starkregenvorsorge erreicht, die sich auf über 200 Kommunen und Institutionen quer über Niedersachsen verteilen.

Aktuelle Themenschwerpunkte bei der UAN sind:

- Starkregenvorsorge
- Hoch-/Wasserpartnerschaften
- Kommunale Nachhaltigkeit
- Klimafolgenanpassung
- Fließgewässer



Kontakt zur Kommunalen Umwelt-Aktion UAN:

Telefon: 0511 / 302 85-60

E-Mail: info@uan.de

Webseite: www.uan.de

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)

Das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ist eine dem niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung (MW) nachgeordnete obere Landesbehörde. In den Bereichen Grundwasser und Bodenschutz arbeitet das LBEG auch dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz zu. Als Geologischer Dienst für Niedersachsen zählen zu den Aufgaben des LBEG die Erhebung, Aufbereitung und Auswertung von Geofachdaten. Damit unterstützen und beraten die Expert:innen des LBEG die Landesregierung zu den Themen Boden, Geologie, Geothermie, Grundwasser und Rohstoffe. Im NIBIS®-Kartenserver, dem Online-Kartendienst des LBEG, werden die Geofachdaten der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. In den hauseigenen Schriftenreihen, den GeoBerichten und den GeoFakten, werden fortlaufend aktuelle Themen veröffentlicht. Darüber hinaus ist das LBEG als Bergbehörde für Niedersachsen, Hamburg, Bremen und Schleswig-Holstein zuständig für die Sicherung und nachhaltige Nutzung von Rohstoffen und Ressourcen.

Seit mehreren Jahren untersucht das LBEG im Rahmen von umfassenden und vielseitigen Projekten den Klimawandel in Niedersachsen und dessen Auswirkungen auf den Boden und das Grundwasser. Als Teil des Klimakompetenznetzwerkes findet ein enger Austausch mit anderen Fachdisziplinen und Institutionen statt. Darüber hinaus unterstützt das LBEG im Themenbereich Grundwasser und Boden das Niedersächsische Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO).

Das LBEG hat zur Klimarisikoanalyse folgende Klimarisiken beigetragen:

- Wassermangel im Boden
- Verminderte Retentionsleistung der Böden
- Stoffaustrag aus dem Boden in das Grundwasser
- Bodenerosion durch Wasser
- Bodenerosion durch Wind
- Vernässung durch Grundwasser
- Grundwasserdürre
- Mangel an Bewässerungswasser
- Grundwasserqualität



Kontakt zum LBEG:

Telefon: 0511 / 643-0

E-Mail: poststelle-hannover@lbeg.niedersachsen.de

Webseite: <http://www.lbeg.niedersachsen.de>

Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA)

Das Niedersächsische Landesgesundheitsamt (NLGA) hat das Ziel, die Gesundheit der Menschen in Niedersachsen zu fördern und zu schützen. Das NLGA berät insbesondere die kommunalen Gesundheitsbehörden/Gesundheitsämter und hat nur wenige direkte Berührungspunkte mit den Einwohner:innen Niedersachsens.

Aufgaben des NLGA:

- Durchführung von mikrobiologischen, umweltmedizinischen und wasserhygienischen Untersuchungen einschließlich krankenhaushygienischer Analysen.
- Bündelung und Auswertung von Daten z. B. zur Verbreitung von Infektionskrankheiten, zur Trinkwasserqualität oder zu Schuleingangsuntersuchungen.
- Konzeption und Durchführung von Fortbildungsveranstaltungen für Berufsgruppen des Gesundheitswesens.
- Beratung des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (z. B. kommunale Gesundheitsämter, politische Institutionen) und medizinischer Einrichtungen (z. B. Krankenhäuser) sowie Berufsgruppen des Gesundheitswesens.
- Information der Öffentlichkeit und der Fachöffentlichkeit durch Merkblätter, Berichte, Website www.nlga.niedersachsen.de und die Social-Media-Kanäle (LinkedIn, Instagram (nlga.niedersachsen) und Spotify „NAGuK – der Podcast zu Gesundheit und Klima in Niedersachsen“)

Das NLGA hat zur Klimarisikoanalyse folgende Klimarisiken beigetragen:

- Cyanobakterien (Blualgen)
- *Vibrio vulnificus*
- Gesundheitsrisiken durch Hitzebelastung
- Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung
- Klimagerechtigkeit
- Vektoren und Nagetiere: Übertragung klimasensibler Infektionskrankheiten



Kontakt zum NLGA:

Telefon: 0511-4505-501

E-Mail: klima@nlga.niedersachsen.de

Webseite: www.nlga.niedersachsen.de

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) nimmt in der Funktion einer Landesoberbehörde wesentliche Aufgaben der Wasserwirtschaft in Niedersachsen wahr. Organisatorisch ist er dem Geschäftsbereich des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz zugeordnet. Mit seinem Fachwissen in Fragen des Küsten-, Wasser-, Natur- und Strahlenschutzes und den zahlreichen erhobenen Daten und Untersuchungen liefert der NLWKN wichtige Entscheidungsgrundlagen.

Der Geschäftsbereich (GB) 3 „Wasserwirtschaft und Strahlenschutz“ betreibt u. a. den Gewässerkundlichen Landesdienst (GLD), welcher das hydrologische Gesamtbild sowie den ökologischen Zustand und die Veränderungen mit Hilfe eines niedersachsenweiten Gewässermessnetzes ermittelt, bewertet und dokumentiert und Stellung zu Vorhaben hinsichtlich ihrer Vereinbarkeit mit den wasserwirtschaftlichen Zielen und Grundsätzen bezieht. Zudem werden der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft analysiert, Konzepte zum Hochwasserschutz entwickelt und verlässliche Hochwasser- und Sturmflutvorhersagen erstellt. Einen weiteren Schwerpunkt bilden die Umsetzung nationaler und internationaler Abkommen und Richtlinien (z. B. EG-WRRL und EG-MSRL), um mithilfe von Monitoring-, Bewirtschaftungs- und Maßnahmenprogrammen die niedersächsischen Gewässer und deren Ökosysteme nachhaltig zu schützen und den guten Umweltzustand zu erreichen. In der Küstenregion untersucht die Forschungsstelle Küste im NLWKN die hydro- und morphologischen Vorgänge anhand umfangreicher Messprogramme, ergänzt durch numerische Modelle. Darauf aufbauend werden großräumige und langfristige Entwicklungstrends hergeleitet, auf deren Grundlagen u. a. morphologische Analysen oder Vorarbeiten für Küstenschutzmaßnahmen erstellt werden. Für letztere werden durch den GB 2 „Planung und Bau“ Strategien und Generalpläne entwickelt, die wichtige Grundlagenwerke für Schutz- und Anpassungsmaßnahmen bilden.

Der NLWKN hat zur Klimarisikoanalyse folgende Klimarisiken beigetragen:

- Meeresspiegelanstieg
- Sturmflut
- Seegang
- Küstennahe Strömungen
- Entwicklung des Wattenmeeres
- Wasserqualität der Übergangs- und Küstengewässer
- Küstennahe Grundwasserversalzung
- Geschützte Niederungsgebiete der Festlandsküste
- Entwässerung der Küstenniederungen
- Belastung auf den Insel- und Küstenschutz
- Hochwasser
- Starkregen
- Grundwasserhochstand
- Niedrigwasser
- Grundwassertiefstand



Kontakt zum NLWKN:

Telefon: 04931 / 947-0

E-Mail:

poststelle.direktion@nlwkn.niedersachsen.de

Webseite:

www.nlwkn.niedersachsen.de

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK)

Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK) ist die größte Beratungsorganisation der Landwirtschaft in Niedersachsen mit Sitz in Oldenburg. Ihre Aufgaben sind im Gesetz über die Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LwKG) geregelt. Die LWK wird durch gewählte Vertreterinnen und Vertreter des Berufsstandes selbst verwaltet. Ehrenamtliche Vertreterinnen und Vertreter der Branche fallen in der Kammerversammlung, im Vorstand und in Ausschüssen strategische Entscheidungen. 2.500 hauptamtliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter halten in zahlreichen regionalen Dienststellen in ganz Niedersachsen in der Beratung engen Kundenkontakt. Die LWK ist neben der Beratung der landwirtschaftlichen Betriebe ebenfalls für die Ausführung von hoheitlichen Aufgaben im Auftrag des Landes Niedersachsen zuständig. Die Aufgaben der LWK umfassen folgende Punkte:

- Qualifizierung, Beratung und Förderung
- Übernahme der vom Land übertragenen Aufgabe der Agrarförderung und weiteren hoheitlichen Aufgaben
- Praxisorientierte Forschung
- Fachbehördliche Aufgaben
- Vertretung der Interessen der Arbeitgeber:innen und Arbeitnehmer:innen in der Landwirtschaft

Die LWK organisiert sich in mehreren Geschäftsbereichen. Im Geschäftsbereich Landwirtschaft (GB 3) berät die LWK zu Fragen in den Bereichen Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Tierhaltung, Tierzucht und Tiergesundheit, Unternehmensführung, den Betrieb und Hof, zu Belangen der Umwelt und der Natur und zu den Themen Bauen, Energie und Technik. Die Fischerei wird als eigener Fachbereich dem Ressort Tier zugeordnet.

Der LWK hat zur Klimarisikoanalyse folgende Handlungsfelder beigetragen:

- Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren
- Abiotischer Stress (Pflanzen)
- Verschiebung von Anbaugebieten
- Verschiebung von Vegetationsperioden
- Stress durch Schädlinge/Krankheiten (Pflanzen)
- Ertragsausfälle
- Qualität der Ernteprodukte
- Kommerzielle Fischbestandsänderung in der südlichen Nordsee
- Auswirkungen auf das Vorkommen und den Gesundheitsstatus fischereilich genutzter Arten im Binnenland
- Verknappung der Produktionsressourcen für die Aquakultur



Kontakt zur LWK:

Wiebke Schumacher

Telefon: 0441 801 271

Mail: wiebke.schumacher@lwk-niedersachsen.de

Webseite: <https://www.lwk-niedersachsen.de/>

Nordwestdeutsche forstliche versuchsanstalt (NW-FVA)

Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) betreibt Waldforschung für die Bundesländer Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. In ihrem Zuständigkeitsbereich befinden sich 2,7 Mio. Hektar Wald, nahezu ein Viertel der Waldfläche Deutschlands. Die Kernkompetenzen sind: angewandte Waldforschung, langfristiges Monitoring sowie Transfer von Wissen. Die Inhalte richten sich an den Anforderungen der forstlichen Praxis aus. Die NW-FVA versteht sich als Kompetenz- und Servicestelle für Forstbetriebe, Waldbesitzende, Verwaltungen und die Politik in den beteiligten Ländern. Im Fokus stehen die aktuell vorrangigen Forschungsthemen:

- Anpassungsstrategien an den Klimawandel
- Risikomanagement im Wald
- Sicherung der Rohstoffversorgung
- Sicherung der biologischen Vielfalt
- Betriebliche Steuerung

Die Abteilung Umweltkontrolle beschäftigt sich mit der Frage, wie sich Umweltveränderungen und waldbauliche Maßnahmen auf den Wald und die von ihm erbrachten Ökosystemleistungen auswirken. Zur Beantwortung dienen langfristige Umweltmonitoringflächen, Inventuren zum Wald- und Bodenzustand, Versuche im Wald sowie ein leistungsfähiges Umweltanalytiklabor. Die gewonnenen Erkenntnisse werden für die forstliche Praxis, die Politik und die Öffentlichkeit aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

Die Abteilung Waldwachstum untersucht waldökologische Prozesse wie Verjüngung, Wachstum und Mortalität in Abhängigkeit von Standort, Baumart und Struktur. Ziel der Forschung ist die Entwicklung von Leitbildern für die multifunktionale Waldbewirtschaftung. Aktuell stehen dabei waldbauliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel besonders im Blickpunkt. Eine wichtige Basis waldwachstumskundlicher Forschung bildet ein großes Versuchsflächen-netz mit bis zu 140jähriger wissenschaftlicher Beobachtung.

Die NW-FVA hat zur Klimarisikoanalyse folgende Klimarisiken beigetragen:

- Trockenstressrisiko im Wald



Kontakt zur NW-FVA:

Telefon: 0551 / 69401-0

E-Mail: zentrale@nw-fva.de

Webseite: www.nw-fva.de

Harzwasserwerke GmbH

Das Hauptgeschäftsfeld der Harzwasserwerke (HWW) ist die öffentliche Trinkwasserversorgung. Mit drei Talsperren- und vier Grundwasserwerken versorgen die Harzwasserwerke über ihr 520 km langes Wassertransportnetz weite Teile Niedersachsens und Bremen mit Trinkwasser. Mit einer Trinkwasserabgabe von rund 100 Mio. m³ pro Jahr, das zu rd. 70 % aus Talsperren und zu rd. 30 % aus Grundwasser gewonnen wird, gehören die Harzwasserwerke als Fernwasserversorger zu den zehn größten Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland.

Neben der Trinkwasserversorgung sind die Harzwasserwerke im Bereich Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung und elektrischer Energieerzeugung aus Wasserkraft tätig. Hierfür betreiben die HWW im westlichen Harz neben 6 großen Talsperren mit einem Gesamtvolumen von 182 Mio. m³ auch ein engmaschiges hydrologisches Messnetz.

Die Harzwasserwerke sind im Jahr 1996 von einer selbständigen Anstalt des öffentlichen Rechts des Landes Niedersachsen in eine GmbH umgewandelt worden. Die Geschäftsanteile haben Mitglieder eines Konsortiums norddeutscher Energie- und Wasserversorgungsunternehmen übernommen, die zum allergrößten Teil auch Trinkwasserkunden der Harzwasserwerke sind.

Die Harzwasserwerke haben zur Klimarisikoanalyse folgende Klimarisiken beigetragen:

- Talsperrenbewirtschaftung



Kontakt zu den Harzwasserwerken:

Telefon: +49 5121 404-0

E-Mail: hww@harzwasserwerke.de

Webseite:

<https://www.harzwasserwerke.de/>

Anlage A.1

Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth

Die Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth ist eine staatliche Hochschule für angewandte Wissenschaften im Nordwesten Niedersachsens und nimmt gemäß Niedersächsischem Hochschulgesetz Aufgaben in der Forschung, der Lehre und der Third Mission wahr.

An den drei Studienorten sind ca. 650 Personen beschäftigt, und aktuell werden rund 6.400 Studierende in 58 Studiengängen ausgebildet.

Das Forschungsprofil der Jade Hochschule zeichnet sich durch einen regionalen Fokus und durch einen hohen Praxisbezug aus. Mit den Schwerpunkten „Technik für die Gesundheit“, „Maritime Wirtschaft und Küstentechnik“ und „Digitales Bauen und Informationstechnologie“ ist die Jade Hochschule aktuell auf der Forschungslandkarte der Hochschulrektorenkonferenz vertreten.

Die Quantifizierung regionaler Klimawandelfolgen und die Identifizierung Anpassungsoptionen im Bereich der Wasserwirtschaft gehören zu den Zukunftsfeldern, die die Hochschule identifiziert hat und mit Forschungsaktivitäten in enger Zusammenarbeit mit regionalen Akteuren hinterlegt.

Die Jade Hochschule hat zur Klimarisikoanalyse bei dem Klimarisiko Entwässerung der Küstenniederungen beigetragen.



Kontakt zur Jade Hochschule:

Telefon: 04421 / 985-0

0441 / 7708-0

Forschungsmanagement:

Apl.-Prof. Dr. Helge Bormann

helge.bormann@jade-hs.de

www.jade-hs.de

Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Landschaftswasserhaushalt der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Die Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Landschaftswasserhaushalt am Institut für Biologie und Umweltwissenschaften lehrt und forscht zu hydraulischen und hydrochemischen Prozessen in der aquatischen Umwelt, insbesondere den Wechselwirkungen zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser, der Interaktion von Wasser und Gestein, Wasser- und Stoffflüssen in Landschaften sowie dem Verhalten von Schadstoffen im Grundwasser. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Küste und der Untersuchung von Prozessen am Land-See Übergang. Hier werden Süßwasserlinsen, Grundwasserversalzung, das subterrane Ästuar und submarine Grundwasseraustritte thematisiert. Des Weiteren befassen wir uns mit der Rolle von Wasser in Ökosystemen. Unsere Untersuchungen bestehen aus Geländearbeiten, experimenteller und analytischer Arbeit im Labor, begleitet von numerischen Grundwassermodellierungen.

Die Arbeitsgruppe hat zur Klimarisikoanalyse zum Klimarisiko Grundwasserversalzung beigetragen.



Kontakt:

Gudrun Massmann
Telefon: 0441/798-4837
E-Mail: gudrun.massmann@uni-oldenburg.de
Webseite: <https://uol.de/hydrogeologie>

Herausgeber:

Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie und Klimaschutz
Archivstraße 2
30169 Hannover

Dezember 2025

Gestaltung:

LGLN
Landesamt für Geoinformation
und Landesvermessung Niedersachsen

poststelle@mu.niedersachsen.de
www.umwelt.niedersachsen.de



Niedersachsen. Klar.