Klimawirkungsstudie Niedersachsen

Wissenschaftlicher Hintergrundbericht

erstellt durch

das Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen

Mai 2019



Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

GEOZENTRUM HANNOVER

NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

Mitwirkende (alphabetisch)

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie:

Dr. Jörg Elbracht, Nicole Engel, Denise Harders, Dr. Udo Müller, Dirk Prause, Tobias Schlinsog

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz:

Markus Anhalt, Uwe Petry, Christine Schnorr

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz:

Jens Becker, Carina Holl, Lena Hübsch, Dr. Christian Jacobs, Petra Schilling

Herausgeber:

Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Archivstraße 2

30169 Hannover

1. Auflage: Mai 2019

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Zielsetzung 5

2 Das Rahmenkonzept 7

2.1 Verwendete Begriffe und Definitionen 7

2.2 Vorgehensweise 10

2.3 Untersuchungsgebiet 14

2.4 Datengrundlagen 18

2.4.1 Klimamodelldaten 18

2.4.2 Abflussdaten 22

2.4.3 Bodendaten 23

2.4.4 Landnutzungsdaten 24

2.4.5 Geländehöhen 24

2.4.6 Hydrogeologische Gesteinseinheiten im Festgestein 25

2.5 Impaktmodelle 26

2.5.1 Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 26

2.5.2 Die hydrologischen Modelle PANTA RHEI und HBV-IWW 27

2.5.3 MeMaS 29

2.5.4 Statistisches Prognosemodell 30

3 Ausgewählte Themenfelder im Handlungsfeld Wasserwirtschaft 31

3.1 Klimawirkungen im Themenfeld Grundwasser 31

3.1.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes 31

3.1.2 Klimawirkung Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser 32

3.1.3 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld 48

3.2 Klimawirkungen im Themenfeld Oberflächengewässer 49

3.2.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes 49

3.2.2 Klimawirkung mittlerer Durchfluss 51

3.2.3 Klimawirkung Flusshochwasser (Scheitelabfluss) 64

3.2.4 Klimawirkung Flusshochwasser (Häufigkeit) 79

3.2.5 Klimawirkung Sturzfluten 93

3.2.6 Klimawirkung Niedrigwasserabfluss 114

3.2.7 Klimawirkung Talsperrenbewirtschaftung 122

3.2.8 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld 127

4 Ausgewählte Themenfelder im Handlungsfeld Boden 129

4.1 Klimawirkungen im Themenfeld Boden 129

4.1.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes 129

4.1.2 Klimawirkung potenzielle Erosion durch Wasser 131

4.1.3 Klimawirkung Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung) 141

4.1.4 Klimawirkung Zusatzwasserbedarf 151

4.1.5 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld 160

5 Zusammenfassung der Ergebnisse 162

6 Ausblick 165

7 Literaturverzeichnis 166

8 Anhang 171

1 Motivation und Zielsetzung

Die Niedersächsische Landesregierung hat im Januar 2013 die Klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsen für die Bereiche Klimaschutz und Klimafolgenanpassung beschlossen (MU, 2013). Dem Strategieteil für den Bereich der Klimafolgenanpassung liegt eine umfassende Analyse der in Niedersachsen zu erwartenden Folgen und Herausforderungen des Klimawandels zugrunde. Für insgesamt 19 Handlungsfelder wurde eine Abschätzung von Art, Ausmaß und Wirkungsrichtung der in Niedersachsen zu erwartenden Klimaänderungen vorgenommen. Diese Abschätzung war Ergebnis eines intensiven Dialogprozesses im Rahmen einer Regierungskommission mit insgesamt 42 Expertinnen und Experten und eines von der Landesregierung finanzierten Forschungsverbundes Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF), der den Erarbeitungsprozess der Regierungskommission in allen Phasen begleitete.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, diese Analysen einerseits methodisch weiterzuentwickeln, andererseits die zu erwartenden Klimaänderungen stärker zu regionalisieren, da dies nicht Teil des damaligen Strategieprozesses war und sich die Aussagen hier zumeist noch wenig räumlich differenziert auf den Gesamtraum Niedersachsens beschränkten.

Im Rahmen einer standardisierten Untersuchung von Klimawirkungen (einer sog. Klimawirkungsanalyse) soll daher im Rahmen der vorliegenden Studie identifiziert werden, welche Regionen und Sektoren in Niedersachsen besonders vom Klimawandel betroffen sind und wo besonderer Anpassungsbedarf besteht. Bei einer Klimawirkungsanalyse wird die Auswertung der Ergebnisse der Klima- und Klimawirkungsforschung um eine Bewertung dieser Klimawirkungen ergänzt. Damit können fachlich begründete „Wirkungs-Hotspots“ identifiziert werden.

Als grober Orientierungsrahmen für das Vorgehen diente der Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen des Umweltbundesamtes (BUTH et al., 2017).

Aufgrund der zeitlichen und personellen Rahmenbedingungen wurden bei der vorliegenden Untersuchung folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Als thematischer Bezugsrahmen konzentriert sich die Studie auf die Handlungsfelder der Wasserwirtschaft und des Bodens. Dabei liegen die Schwerpunkte in den Themenbereichen Bodenfunktionen, Grundwasser sowie Oberflächengewässer (Fließgewässer).
- Den räumlichen Bezugsrahmen stellt die Landesgrenze von Niedersachsen dar, wobei das Gebiet nochmals in fünf Regionen unterteilt wurde (s. Kapitel 2.3).
- Zudem wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auf die Durchführung einer vollständigen Vulnerabilitätsanalyse verzichtet, für die eine Klimawirkungsanalyse jeweils den ersten Schritt darstellt (zur Begriffsklärung s. Kapitel 2.1).

Die vorliegende Klimawirkungsanalyse wurde durch das Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen durchgeführt, das sich aus Vertreterinnen und Vertretern des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU), des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zusammensetzt.

2 Das Rahmenkonzept

2.1 Verwendete Begriffe und Definitionen

Die hier verwendeten Begriffe sowie deren Definitionen orientieren sich im Wesentlichen am Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (BUTH et. al., 2017), der vom Umweltbundesamt herausgegeben wurde.

Änderungssignal:

Umfang der Veränderungen eines klimatischen Zustandes im Zuge des Überganges von einem Referenzzeitraum (t_0) zu einem zukünftigen Zeitraum ($t_{>0}$). Beschreibt Richtung und Betrag der Veränderung (z.B. Temperaturzunahme um +2,0 Grad Celsius).

Anpassungskapazität:

Die Anpassungskapazität umfasst die Möglichkeiten eines Systems, sich durch zusätzliche Maßnahmen in der Zukunft an den Klimawandel anzupassen und potenzielle Schäden zu mindern oder Chancen zu nutzen (siehe auch Abbildung 2-1).

Bedeutung (einer Klimawirkung):

Die Bedeutung einer → *Klimawirkung* umfasst einerseits ihre abgeschätzte (physikalische) Veränderung als auch andererseits die Wirkung dieser Veränderung auf ein spezifisches System. So kann beispielsweise eine große Klimawirkung (z.B. hoher Zusatzwasserbedarf) eine relativ kleine Bedeutung für ein System haben, wenn dieses relativ unempfindlich gegenüber diesen Veränderungen (im abgeschätzten Rahmen) ist.

Impaktmodell:

Ein Modell zur Abschätzung der Folgen des → *klimatischen Einflusses* auf ein System. Es stellt i.d.R. die komplexen und häufig nicht linearen Zusammenhänge zwischen klimatischen Größen, den Parametern zur → *Sensitivität* eines Systems sowie dem → *räumlichen Vorkommen* dar.

Indikator (einer Klimawirkung):

Messbare Kenngröße bzw. Aspekt zur (quantitativen, semi-quantitativen) Beschreibung bzw. Abschätzung des Ausmaßes einer Klimawirkung.

Klimatischer Einfluss:

Der klimatische Einfluss wird durch die für eine → *Klimawirkung* relevanten Klimagrößen wie Temperatur, Niederschlag, Wind etc. beschrieben (siehe auch Abbildung 2-1)

Klimawirkung:

Eine Klimawirkung beschreibt die beobachtete oder potenzielle Wirkung des → *klimatischen Einflusses* auf das System unter Berücksichtigung der entsprechenden → *Sensitivität* und des → *räumlichen Vorkommens* (siehe auch Abbildung 2-1).

Klimawirkungsbewertung:

Bewertung der Ergebnisse der Klimawirkungsforschung im Hinblick auf deren → *Bedeutung* für das als relevant angesehene, betroffene System.

Klimawirkungsforschung:

Analyse der Klimaentwicklung sowie der Auswirkungen von klimatischen Ereignissen und Veränderungen auf sozioökonomische oder biophysikalische Systeme mittels → *Klimawirkungsmodellen*, → *Proxyindikatoren* und → *Expertengesprächen*.

Proxyindikator:

Proxyindikatoren ermöglichen die Parametrisierung (Darstellung von komplexen Effekten bzw. Prozessen durch vereinfachende Ansätze) von → *Klimawirkungen* mittels plausibler (und verfügbarer) Daten. Diese repräsentieren indirekt die Kernelemente → *klimatischer Einfluss*, → *räumliches Vorkommen* und → *Sensitivität*. Die Quantifizierung der Klimawirkung erfolgt hierbei zumeist mittels (räumlicher) Verschneidung der einzelnen Proxyindikatoren. Da diese häufig unterschiedliche Maßeinheiten besitzen, muss diese Verschneidung i.d.R. auf Basis normalisierter Werte erfolgen.

Räumliches Vorkommen:

Das räumliche Vorkommen beschreibt die Anwesenheit des durch den → *klimatischen Einfluss* potenziell beeinträchtigten Systems in einer Untersuchungsregion, z.B. in Form der Landnutzungsarten. (siehe auch Abbildung 2-1).

Sensitivität:

Die Sensitivität (Anfälligkeit oder Empfindlichkeit) beschreibt, in welchem Maße ein System (z.B. Wirtschaftssektor, Bevölkerungsgruppe, Ökosystem) aufgrund seiner Eigenschaften auf einen → *klimatischen Einfluss* reagiert. (siehe auch Abbildung 2-1).

Vulnerabilität:

Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel beschreibt den Grad, zu dem ein System – etwa ein Ökosystem, ein wirtschaftliches System oder soziales System – durch Klimaänderungen gefährdet ist. Sie ergibt sich aus der → *Klimawirkung* auf ein System und dessen → *Anpassungskapazität*. (siehe auch Abbildung 2-1).

Wandelszenario:

Um die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen von Klimawirkungen basierend auf den verwendeten Modell-Ensembles zu verdeutlichen, wird neben den mittleren Tendenzen zusätzlich der Minimal- und Maximalwert von Kenngrößen betrachtet. Hierbei stellt der Maximalwert ein starkes (negatives) und der Minimalwert ein schwaches (weniger negatives) Wandelszenario dar.

Wirkmodell:

siehe → *Impaktmodell*

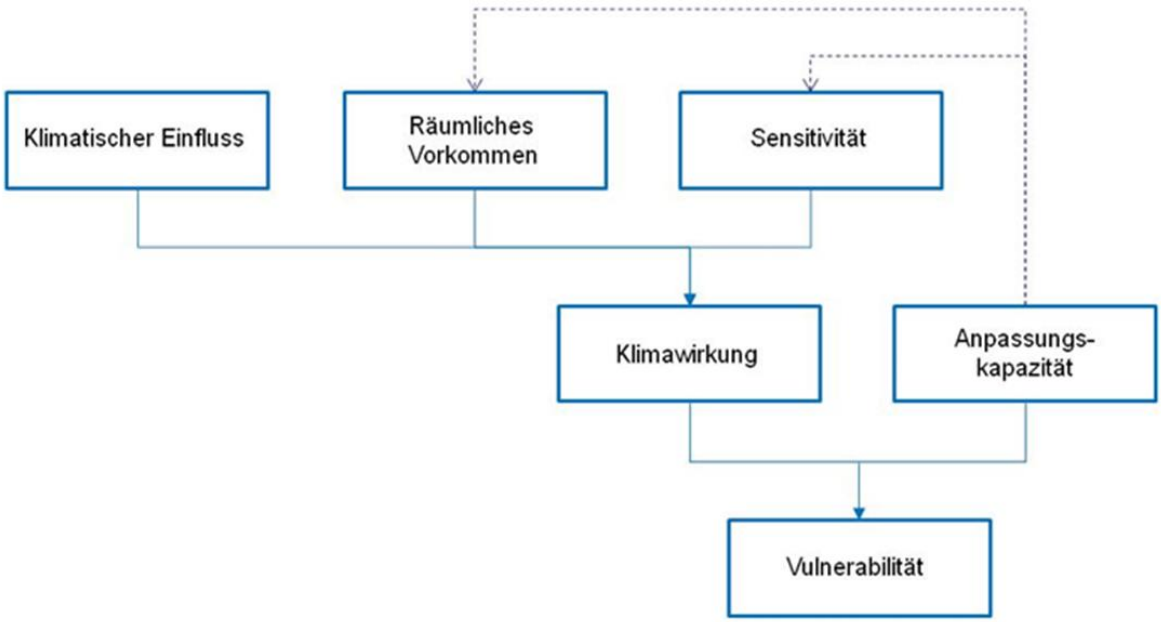


Abbildung 2-1: Das Vulnerabilitätskonzept des Umweltbundesamtes (Quelle: BUTH **et al., 2017)**

2.2 Vorgehensweise

Die Durchführung der vorliegenden Studie orientierte sich im Wesentlichen am Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen des Umweltbundesamtes (BUTH et al., 2017). Entsprechend der Empfehlungen des Leitfadens umfasst eine Vulnerabilitätsanalyse neben den Bestandteilen einer Klimawirkungsstudie (d.h. die Klima- bzw. *Klimawirkungsforschung* und *Klimawirkungsbewertung*) zusätzlich die Bewertung der *Anpassungskapazitäten* sowie schließlich der *Vulnerabilität*. Die Einschätzung der *Anpassungskapazitäten* ist ein komplexer, normativer Prozess, der die Beteiligung von verschiedenen Akteuren und Experten notwendig macht. Neben den in Kapitel 1 genannten Institutionen wurden in der aktuellen Phase der Studie jedoch keine weiteren Beteiligten herangezogen, da die Analysen aufgrund begrenzter Ressourcen ausschließlich im Hinblick auf die naturwissenschaftlichen Wirkungszusammenhänge erfolgten. Daher stellt diese (Pilot-)Studie zunächst eine reine Klimawirkungsanalyse dar, ohne die Betrachtung der regionalen *Anpassungskapazitäten* und *Vulnerabilitäten*. Gleichwohl umfasst die Studie bereits erste themenfeldspezifische Konzepte für eine mögliche Vulnerabilitätsanalyse.

Nach der Formulierung der Zielsetzungen sowie des thematischen und räumlichen Bezugsrahmens (vgl. Kapitel 1) erfolgte anschließend die Analyse und Bewertung der *Klimawirkungen* in den Handlungsfeldern Wasserwirtschaft (für die Themenfelder Grundwasser und Oberflächengewässer, vgl. Kapitel 3) und Boden (vgl. Kapitel 4). Hierzu wurden zunächst relevante *Klimawirkungen* aus fachlicher Sicht in den einzelnen Bereichen auf der Arbeitsebene (LBEG, NLWKN) ausgewählt. Für diese *Klimawirkungen* wurden *Indikatoren* gewählt, die mit Hilfe von verschiedenen Operationalisierungsmethoden, soweit möglich, quantifiziert wurden. Dies konnte auf Grundlage von *Impaktmodellen*, *Proxyindikatoren* oder *Experteninterviews* geschehen. Die unterschiedlichen Stärken und Schwächen der genannten Methoden werden in Tabelle 2-1 skizziert.

Die Beschreibung der *Klimawirkungen* sowie der jeweiligen *Indikatoren* und Operationalisierungsmethoden erfolgt in den Kapiteln 3 und 4 sowie in Form von Steckbriefen, die im Anhang dieser Studie aufgeführt sind. Die Analyse der *Klimawirkungen* bzw. *Änderungssignale* erfolgt differenziert nach unterschiedlichen Zeiträumen, Jahreszeiten und *Wandelszenarien*. Als Zeiträume wurden in Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten (LINKE et al., 2017) verschiedene 30-Jahres-Zeitscheiben ausgewählt:

- Referenzzeitraum: 1971-2000
- Nahe Zukunft: 2021-2050
- Ferne Zukunft: 2071-2100

Innerhalb der Zeiträume erfolgen die Analysen in der Regel für das Gesamtjahr bzw. unterteilt nach Halbjahren oder nach Jahreszeiten.

Als Klimaszenario wurde das „weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5 herangezogen (vgl. Kapitel 2.4.1). Dieses Szenario bot zum Zeitpunkt der vorliegenden Studie die größte Datenbasis an verfügbaren, räumlich hochaufgelösten Klimamodellläufen, wodurch eine größtmögliche Sicherheit in Bezug auf die regionalen Aussagen zur Bandbreite zukünftiger Entwicklungstendenzen gewährleistet wird. Zudem zeigt dieses Szenario die deutlichsten klimatischen Veränderungen, auf die man sich einstellen muss, wenn die Bemühungen zum Klimaschutz nicht zeitnah und konsequent auf globaler Ebene vorangetrieben werden. Dadurch kann gezeigt werden, ob die betrachteten Systeme gegenüber den bisher größten modellierten klimatischen Veränderungen und ihren Folgen vulnerabel erscheinen oder nicht. Um die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen von *Klimawirkungen* basierend auf den verwendeten Modell-Ensembles zu verdeutlichen, werden neben den mittleren Tendenzen zusätzlich der Minimal- und Maximalwert der Analyseergebnisse von verschiedenen Kenngrößen betrachtet. Hierbei stellt i.d.R. der Maximalwert ein starkes und der Minimalwert ein schwaches Wandelszenario bezogen auf die jeweilige *Klimawirkung* dar (basierend auf *Wirkmodellen* bzw. *Proxyindikatoren*). Auf die Betrachtung von Landnutzungs- oder Sensitivitäts-Szenarien wurde aufgrund der begrenzten Ressourcen sowie mangels Daten verzichtet.

Die Abschätzung der resultierenden Klimawirkungen in den einzelnen Themenfeldern erfolgt anhand der in Tabelle 2-1 aufgeführten Methoden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Wasserhaushaltsmodelle bzw. Hydrologische Modelle sowie Werkzeuge zur systematischen bzw. statistischen Auswertung. Weitere Einzelheiten sind dem Kapitel 2.5 zu entnehmen.

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Analysen klassifiziert und mittels Karten für die betrachteten Zeitscheiben, Wandelszenarien und ggf. Jahreszeiten regional differenziert dargestellt. Hierzu werden zunächst die Wirkungsketten, d.h. die Zusammenhänge zwischen *klimatischen Einflussfaktoren* und der spezifischen *Klimawirkung* sowie weiterer indirekter Wirkungen in vereinfachter Form dargestellt und beschrieben. Anschließend wird der *Indikator* zur Quantifizierung der jeweiligen *Klimawirkung* erläutert sowie die Methode zu dessen Operationalisierung. Aufgrund der räumlichen Heterogenität der Ergebnisse wurden bei der anschließenden Klassifizierung für keinen der Indikatoren spezifische Schwellenwerte festgelegt. Die Zuordnung der Werte hinsichtlich der Stärke der *Klimawirkung* bzw. des *Änderungssignals* erfolgte auf Basis der minimalen und maximalen Ausprägung als äußerste Klassengrenzen. Abschließend werden die Erkenntnisse regional zusammengefasst.

Die aus der Operationalisierung resultierenden Ergebnisse für die Bewertung der *Klimawirkung* sowie deren Veränderung in der nahen und fernen Zukunft werden in Kartenform jeweils als mittlere Tendenz sowie über das Minimum bzw. Maximum der Ergebnisbandbreite (bezeichnet als schwaches und starkes *Wandelszenario*) dargestellt (siehe Beispiele in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3).

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Methoden zur Operationalisierung von Indikatoren

Methode	Vorteile	Nachteile
Impaktmodell	- objektiv nachvollziehbar -räumlich detaillierte Aussagen - Abbildung komplexer Zusammenhänge möglich	- hoher Datenbedarf - hoher Zeitaufwand für Modellerstellung
Proxyindikator	- objektiv nachvollziehbar - räumlich detaillierte Aussagen - relativ geringer Zeitaufwand	- mittlerer Datenbedarf - nur wenig komplexe Zusammenhänge darstellbar
Experteninterview	- Unabhängig von Daten-verfügbarkeit - fasst Erfahrungen lokaler Experten zusammen - relativ geringer Zeitaufwand	- subjektive Einschätzung - wenig (räumlich / zeitlich) differenzierte Aussagen

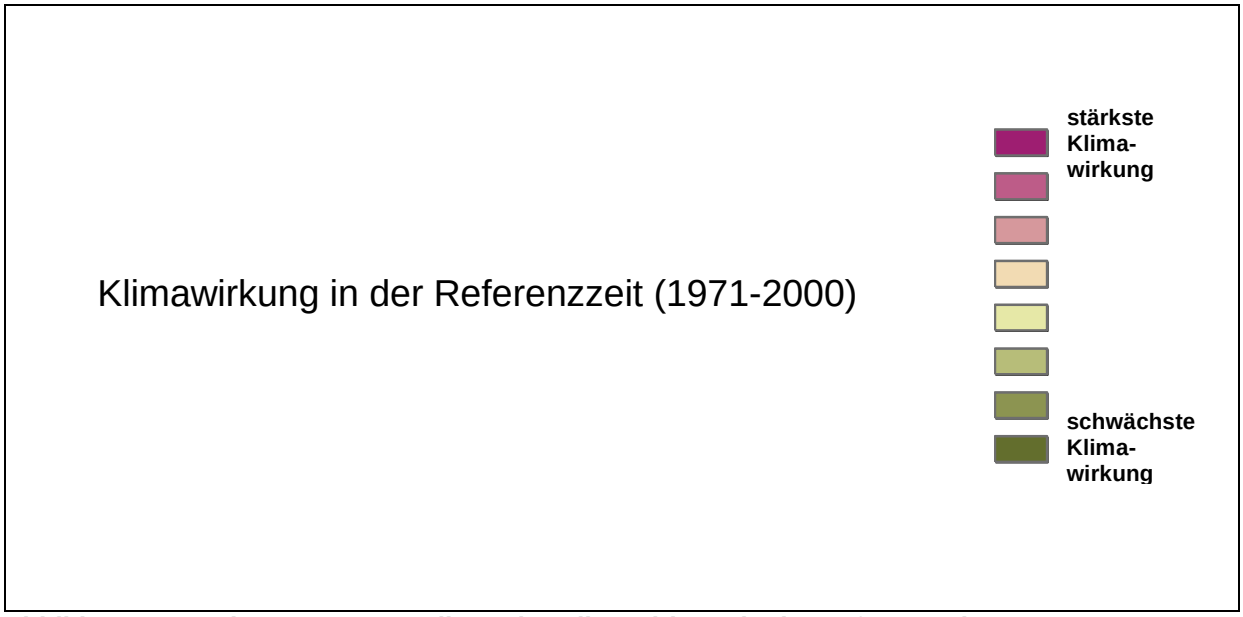


Abbildung 2-2: Schema zur Darstellung der Klimawirkung in der Referenzzeit

Klimawirkung		Änderung
Absolute Klimawirkung unter einem starken Wandelszenario	**Maximum**	Klimaänderungssignal unter einem starken Wandelszenario
Absolute Klimawirkung unter einem mittleren Wandelszenario	**Mittlere Tendenz**	Klimaänderungssignal unter einem mittleren Wandelszenario
Absolute Klimawirkung unter einem schwachen Wandelszenario	**Minimum**	Klimaänderungssignal unter einem schwachen Wandelszenario
 **stärkste Klimawirkung** **schwächste Klimawirkung**		 **stärkste Zunahme** **stärkste Abnahme**

Abbildung 2-3: Schema zur Darstellung der Klimawirkungen und Änderungssignale für die nahe Zukunft (2021-2050) bzw. ferne Zukunft (2071-2100)

Die abschließende Bewertung der jeweiligen Klimawirkungen umfasst neben der Beschreibung der räumlichen Muster der Ausprägungen der gewählten *Indikatoren* sowie deren Veränderungen unter dem Einfluss des Klimawandels zusätzlich auch deren allgemeine *Bedeutung* für das jeweilige Themenfeld. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse und Aussagen nur auf der verwendeten räumlichen Skala Gültigkeit besitzen. Räumlich differenziertere, lokale Aussagen sind dagegen nur unter Berücksichtigung lokaler Begebenheiten möglich. Aufgrund der Datenbasis, der verwendeten Methoden zur Analyse der Daten sowie der fehlenden Beteiligung von Akteuren vor Ort konnten entsprechende Detailbetrachtungen nicht gemacht werden.

2.3 Untersuchungsgebiet

Für die Klimawirkungsstudie wurde Niedersachsen in fünf Region unterteilt. Die genaue Abgrenzung beruht zum einen auf den naturräumlichen Einheiten Niedersachsens, zum anderen auf der Unterteilung von Klimastationsregionen des LBEG (vgl. Abbildung 2-4). Durch diese Kombination wurden fünf Regionen herausgearbeitet, die im Hinblick auf die geographischen und klimatischen Gegebenheiten jeweils verhältnismäßig homogene Einheiten bilden. Diese umfassen die Küstenregion, das westliche bzw. östliche Flachland, das Berg- und Hügelland sowie den Harz (vgl. Abbildung 2-5).

Die Region der Küste im Norden umfasst die vorgelagerten Inseln, weite Teile des Watts und der Marschen sowie die nördlichsten Ausläufer der Geest. Während es sich beim Watt um ebene Schlick- und Sandflächen handelt, die zweimal täglich durch den Gezeitenwechsel überflutet werden, bilden die Marschen junge Ablagerungen des Meeres, die stellenweise bis etwa 2 m ü. NHN aufgeschlickt wurden. Da die Watten regelmäßig Überflutungen mit ständiger Sedimentation unterliegen wird eine Bodenbildung verhindert. Eine Untergliederung ist im Wesentlichen durch die Körnung der Wattablagerung und durch die geringen Höhenunterschiede bestimmt. So finden sich in Bereichen mit höherer Strömungsgeschwindigkeit sandigere, in stilleren Bereichen schluffige Sedimente (BENZLER et al., 1997). Im Untergrund der ostfriesischen Inseln und in weiten Teilen der Watten ist das Grundwasser versalzt. Auf den Inseln sind jedoch durch versickernde Niederschläge Süßwasserlinsen entstanden, die aufgrund der geringeren Dichte auf dem salzigen Meerwasser schwimmen (ELBRACHT et al., 2016). Die Böden der Marschen sind durch die relativ gleichkörnigen (vorwiegend feinsandige bis schluffige) Sedimente und den Grundwassereinfluss geprägt (BENZLER et al., 1997). In der Regel sind im Bereich der Marschen zwei Grundwasserstockwerke ausgebildet. Das obere Stockwerk ist durch historische Überflutungen und durch unterirdisch eindringendes Nordseewasser stark versalzt. In der Nähe des Geestrandes gibt es dennoch ergiebige Süßwasservorkommen in tieferen Stockwerken (ELBRACHT et al., 2016). Aufgrund der hochliegenden Grundwasseroberfläche weist dieses Gebiet ein engmaschiges Netz von künstlichen Entwässerungsgräben auf (SEEDORF et al., 1992). In Abhängigkeit des Wasserhaushaltes sind die Böden der Marsch

meistens ertragreiche Standorte (zum Beispiel entwässerte Kalkmarsch) (BENZLER et al., 1997).

Die Region des westlichen Flachlandes umfasst weite Teile der Geest, die eine vom Eis (der Eiszeiten) sowie seinen Schmelzwässern geschaffene Altmoränenlandschaft darstellt. Sie erstreckt sich bis zu den Lössbörden des Bergvorlandes im Süden und erreicht Höhen bis etwa 70 m ü. NHN, an einzelnen Erhebungen auch über 100 m ü. NHN. Im Bereich der flacheren Grundmoränen finden sich zumeist Ackerflächen auf eher sandig-trockenen Böden (z.B. Podsol), während die etwas höher gelegenen Endmoränenzüge häufig durch Kiefern-, teils auch Buchenwälder geprägt sind. Aufgrund hoher Niederschläge und durchlässiger Sand- und Kiesschichten existieren hier überwiegend ergiebige Grundwasservorkommen, die für die Trink- und Brauchwasserversorgung genutzt werden. Die natürliche Flussdichte ist dagegen eher gering, da große Teile des Niederschlages durch Versickerung dem Grundwasser zufließen, dessen Oberfläche zudem oft niedriger liegt als die Sohlen der zahlreichen Kleintäler (SEEDORF et al., 1992).

Das östliche Flachland reicht im Norden von der Lüneburger Heide bis an die Lössbörden im Süden. Als Teil der Geest ist auch die Lüneburger Heide mit nährstoffarmen Böden wie Podsol eine glaziale Aufschüttungslandschaft aus überwiegend sandigen Ablagerungen, die für norddeutsche Verhältnisse große Geländehöhen von bis zu 169 m ü. NHN erreicht (ELBRACHT et al., 2016). Gekennzeichnet ist diese Region durch Äcker, Wälder und die typischen Heideflächen. Besonders sind die zusätzlich durch Plaggenwirtschaft über Jahrhunderte hinweg entstandenen mächtigen Auftragsböden mit erhöhten Gehalten an Humus, wodurch die Wasserhaltefähigkeit und Nährstoffkapazität der Böden nachhaltig erhöht wurde. Diese Böden werden üblicherweise von den natürlichen Böden unterlagert (BENZLER et al., 1997). Der komplexe hydrogeologische Bau der Lüneburger Heide bedingt durch seine teils mächtigen quartärzeitlich entstandenen Aquifere sehr günstige Entnahmebedingungen für die öffentliche Wasserversorgung, wodurch der Lüneburger Heide eine hohe wasserwirtschaftliche Bedeutung zukommt (ELBRACHT et al., 2016). Südlich des Mittellandkanals geht die niedersächsische Geest in die Lössbörden über. In der Hildesheimer und Braunschweig-Helmstedter Börde werden durch weichselzeitliche Lössablagerungen höchste Bodengüten erreicht. Wegen der hohen Bodenfruchtbarkeit ist diese Bergvorlandzone von der natürlichen Waldvegetation fast völlig befreit und unterliegt einer intensiven ackerbaulichen Nutzung. Wichtige Böden der Lössbörde sind dabei die Schwarzerden (zum Beispiel in der Hildesheimer Börde) und die Parabraunerde (zum Beispiel in der Braunschweiger Börde). Auf den Festgesteinsdurchragungen ohne Lössbedeckung finden sich hingegen Bodentypen (wie z.B. Rendzinen, Ranker, Braunerden), die denen des Berglandes sehr ähnlich sind während die Niederungen vor allem von Gleyen und Niedermooren eingenommen werden (BENZLER et al., 1997) In den Lössbördengebieten sind ebenfalls elster- und saalezeitliche Porengrundwasserleiter vorhanden, deren Mächtigkeit nach Süden auf Werte von weniger als 10 m absinkt (ELBRACHT et al., 2016). Aufgrund der geringmächtigeren Auflagerung pleistozänen Materials über dem anstehenden Festgestein,

ist die Ergiebigkeit der Grundwasserleiter in diesen Gebieten wesentlich geringer als im Bereich der Geest (SEEDORF et al., 1992).

Die Region des Berg- und Hügellandes im Südosten bildet die Schwelle zum Mittelgebirge. Es handelt sich um eine kleinräumig gekammerte, waldreiche Landschaft mit häufigen Hanglagen und Höhenstufen bis etwa 500 m ü. NHN. Im Norden noch von lössbedeckten Böden geprägt, dominieren im Süden eher Höhenzüge aus zeitweilig sehr trockenen Buntsandstein- und Muschelkalktafeln mit Gesteinsböden (SEEDORF et al., 1992). Während auf den lössbedeckten Böden generell Parabraunerden anzutreffen sind, finden sich in den feuchten Höhenlagen eher Pseudogleye sowie flachgründige Rendzinen in den stark exponierten Gebieten ohne Decklage (BENZLER et al., 1997). Durch den sehr heterogenen geologischen Aufbau sind auch die hydrogeologischen Verhältnisse sehr komplex. Grundwasservorkommen sind in stark wechselnder Ergiebigkeit in Kluft- und teilweise auch in Karstgrundwasserleitern vorhanden (ELBRACHT et al., 2016). Das Gewässernetz reicht von relativ engmaschigen Strukturen in Regionen mit tonigen, undurchlässigen Gesteinen bis zu Regionen mit geringer Flussdichte, im Bereich von durchlässigen Schichten aus Sand- und Kalkstein (SEEDORF et al., 1992).

Der Harz hebt sich als höchstes Mittelgebirge Norddeutschlands in klimatischer und geologischer Hinsicht deutlich von den benachbarten Naturräumen ab (V. DRACHENFELS, 1990). Der niedersächsische Teil des Harzes kennzeichnet sich durch relativ niedrige Temperaturen, geringe jahreszeitliche Temperaturschwankungen sowie durch hohen Regen- und Schneereichtum (V. DRACHENFELS, 1990). Die dominierenden Böden sind Braunerden, auf denen häufig eine deutliche Versauerung oder Podsolierung feststellbar ist. Als Nutzung überwiegt die Forstwirtschaft – nur auf den Hochflächen gibt es neben den Siedlungen auch Grünlandnutzung (BENZLER et al., 1997). Aufgrund der hohen Niederschlagsmengen von in der mittleren Jahressumme über 1000 mm entspringen im Harz zum einen zahlreiche Vorfluter (z.B. Oder, Söse, Innerste, Oker), die in die umliegenden Naturräume entwässern, zum anderen werden die größten Trinkwasser-Talsperren des Landes gespeist (V. DRACHENFELS, 1990; ELBRACHT et al., 2016). Aufgrund des hohen Anteils an Festgestein ohne größeres Porenvolumen und der hohen Reliefenergie wird der größte Teil des Niederschlagswassers nicht gespeichert, sondern versickert entlang von Klüften und Verwerfungen bis zur Gesteinsoberfläche und tritt dann häufig über Quellschüttungen zu Tage.

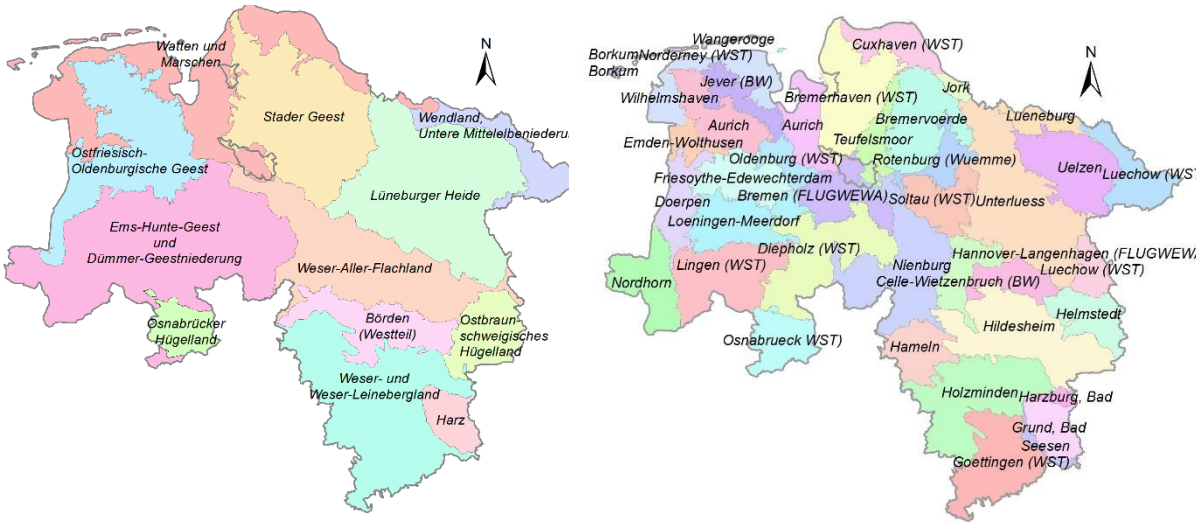


Abbildung 2-4: Naturräume (links) und Klimastationsregionen (rechts) in Niedersachsen

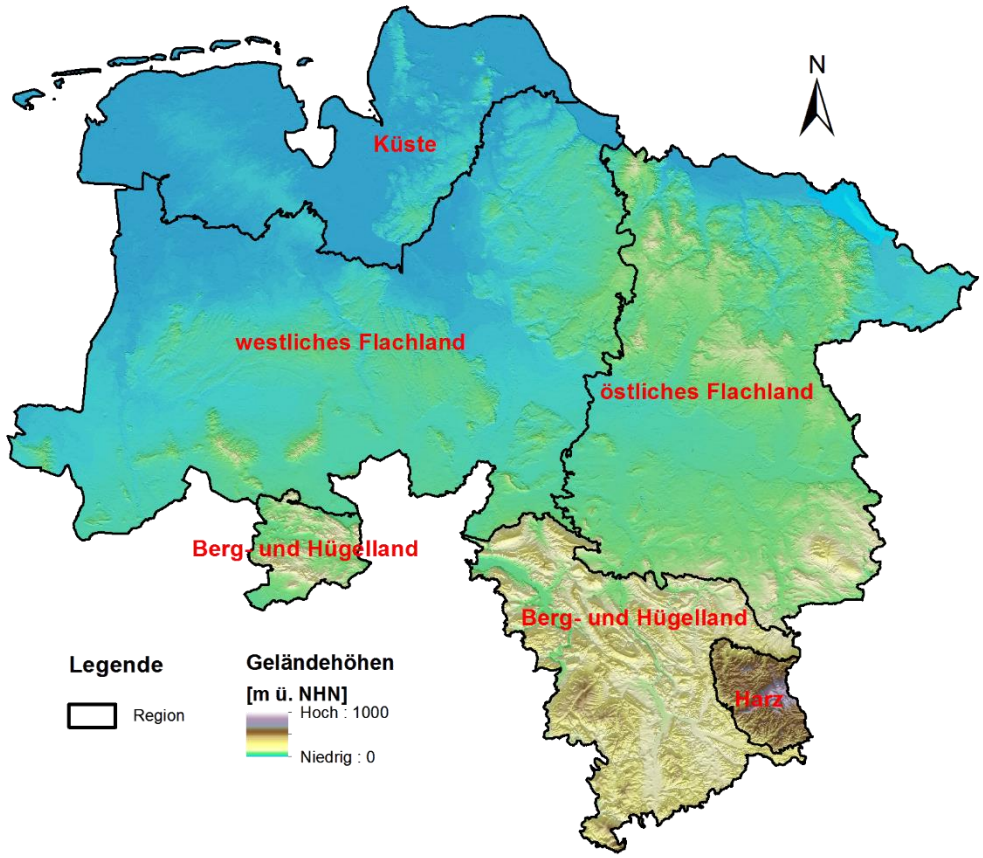


Abbildung 2-5: Übersicht über die Unterteilung von Niedersachsen in fünf Teilregionen anhand der Naturräume und der Klimastationsregionen

2.4 Datengrundlagen

Im Folgenden werden die Daten vorgestellt und erläutert, die bei der Erstellung der Impaktmodelle eine besondere Relevanz besaßen. Zusätzlich erfolgt eine Vorstellung der Klimaszenarien und damit einhergehenden Klimaprojektionen (Klimamodelle), die für die Abschätzungen der Klimawirkungen in der vorliegenden Studie herangezogen wurden. Alle genannten Daten besitzen eine für den gewählten Betrachtungsmaßstab ausreichende Auflösung.

2.4.1 Klimamodelldaten

Die Analysen der zukünftigen Klimawirkungen in Niedersachsen basieren auf dem „weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5 (vgl. auch Kapitel 2.2). Hierbei handelt es sich um ein Szenario, welches einen kontinuierlichen Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen beschreibt, der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von 8,5 Watt pro m² gegenüber dem vorindustriellen Niveau bewirkt. Im Vergleich zu anderen verfügbaren Szenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP6.0) stellt dieses Szenario den stärksten Einfluss von anthropogen bedingten Treibhausgasen in der Zukunft dar.

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes stand eine Vielzahl von Klimaprojektionen für das Szenario RCP8.5 zur Verfügung, die aus verschiedenen Kombinationen von Globalen und Regionalen Klimamodellen (bzw. Regionalisierungsmethoden) entstanden sind. Diese Modelldaten entstammen zum einen dem Projekt EURO-CORDEX (JACOB et al., 2014), zum anderen dem Projekt ReKliEs-De (ReKliEs-De, 2018). Aus diesem maximal verfügbaren Gesamtensemble von Klimaprojektionen wurden unterschiedliche Läufe für die vorliegende Klimawirkungsstudie ausgewählt, da eine Analyse mit allen verfügbaren Daten zu aufwändig gewesen wäre, vor allem im Hinblick auf die Simulation der Klimafolgen mit Hilfe der Impaktmodelle (vgl. Kapitel 2.5). Das Teilensemble für das Themenfeld Oberflächengewässer basiert auf Läufen von Klimaprojektionen, die bereits Anfang 2016 verfügbar waren und auch für das Projekt KliBiW (NLWKN, 2017, 2019) genutzt wurden. Im Zuge dieses Projektes wurden die Klimamodelldaten für die Impaktmodellierung auf ein regelmäßiges Raster von 10 x 10 km interpoliert. Das Teilensemble für die Themenfelder Grundwasser sowie Bodenfunktionen basiert auf einer Auswahlmethode des DWD (DALELANE, 2018) und stellt hinsichtlich der Bandbreite zukünftiger Klimasignale verschiedener maßgeblicher Klimagrößen ein repräsentatives Ensemble für Niedersachsen dar (siehe Tabelle 2-2 und Abbildung 2-6). Alle benutzten Klimamodelldaten zeigen für den Zeitraum der Gegenwart (Referenzzeitraum 1971-2000) mehr oder weniger ausgeprägte Abweichungen von beobachteten Klimamessdaten. Um diesen Fehler nicht in die Betrachtung der (zukünftigen) Klimawirkungen einfließen zu lassen, wurden die wasserwirtschaftlich besonders relevanten Klimamodelldaten (Temperatur und Niederschlag) vor der Anwendung in den Impaktmodellen einer Bias-Adjustierung unterzogen. Hierbei wurde das einfache Verfahren des Linear Scaling (z.B. TEUTSCHBEIN & SEIBERT, 2012) monatsweise angewendet.

Um zu prüfen, ob die Klimawirkungen in den verschiedenen Themenfeldern ungeachtet unterschiedlicher Modell-Ensembles auf vergleichbaren Änderungssignalen basieren, wurden die jeweiligen Ensemble-Signale für das schwache bzw. starke Wandelszenario sowie die mittlere Tendenz je Zeitraum und Region verglichen (siehe Tabelle 2-3).

Tabelle 2-2: Im Zuge der Klimawirkungsstudie betrachtete Klimaprojektionen aus dem Szenario RCP8.5; Eu: EURO-CORDEX, Re: ReKliEs-De; blau: Ensemble-Mitglieder Handlungsfeld Grundwasser / Boden, gelb: Ensemble-Mitglieder Handlungsfeld Oberflächengewässer, grün: Ensemble-Mitglieder aller Handlungsfelder

	CCLM	REMO	WRF	WR13	STARS	RCA4	RACMO	HIRHAM
Can-ESM2	Re	Re		Re	Re			
CNRM-CM5	Eu	Re		Re	Re	Eu		
EC-EARTH	Eu	Re	Re	Re	Re	Eu	Eu	Eu
HadGEM2-ES	Eu	Re	Re	Re	Re	Eu	Eu	
IPSL-CM5A			Eu			Eu		
MIROC5	Re	Re		Re	Re			
MPI-ESM-LR	Eu	Eu	Eu	Re	Re	Eu		
MPI-ESM-L2		Re						

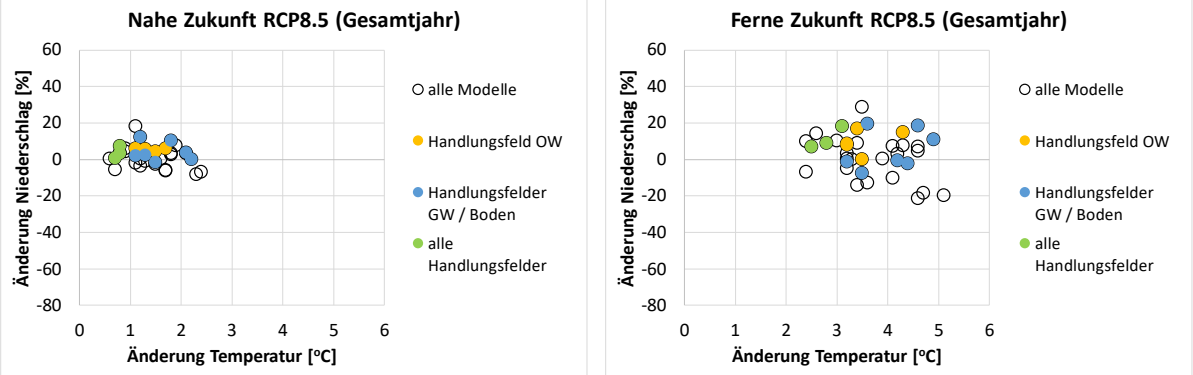


Abbildung 2-6: Streudiagramme der Änderungssignale von mittlerer Temperatur und Niederschlagssumme im „weiter-wie-bisher"-Szenario RCP8.5 (insgesamt 37 Modellläufe) für Niedersachsen; links die nahe Zukunft (2021-2050), rechts die ferne Zukunft (2071-2100), jeweils relativ zum Referenzzeitraum 1971-2000

Die Gegenüberstellung der beiden benutzten Ensembles zeigt, dass es geringe Unterschiede im oberen Bereich (Maximum) der Temperaturbandbreite gibt. So liegen die Daten des Modell-Ensembles für Grundwasser / Boden im Mittel ca. +0,5 °C über denen des Ensembles für

Oberflächengewässer. Bei den mittleren Tendenzen nehmen diese Unterschiede etwas ab, und beim Minimum sind die Daten nahezu gleich. Bei den Niederschlagssummen liegen die Unterschiede im oberen Bereich der beiden Ensemble-Bandbreiten (Maximum) zwischen 0 – 30 mm, im Bereich der mittleren Tendenzen nehmen sie regional noch etwas zu, während sie im unteren Bereich der Bandbreite (Minimum), vor allem in der fernen Zukunft, vereinzelt auch über 100 mm erreichen können. Diese Unterschiede waren grundsätzlich zu erwarten, da das Ensemble für Grundwasser / Boden insgesamt einen größeren Bereich der maximalen Bandbreite der Klimagrößen abbildet als das Ensemble für Oberflächengewässer.

Entgegen dieser (zu erwartenden) Abweichungen erscheinen die Unterschiede in den Bandbreiten der beiden Ensembles nur relativ gering, mit Ausnahme der unteren Bandbreite der Niederschläge in der fernen Zukunft. Daher werden die beiden Ensembles als gleichwertige Eingangsdaten für die jeweiligen Impaktmodelle angesehen, so dass auch die resultierenden Klimawirkungen gegenübergestellt werden können.

Tabelle 2-3: Absolute Werte der beiden benutzten Modell-Ensembles für die Kenngrößen mittlere Temperatur und Niederschlagssumme, gemittelt jeweils für die fünf betrachteten Regionen (oberer Wert: Ensemble Oberflächengewässer, unterer Wert: Ensemble Grundwasser und Boden)

Region	Küste			Westl. Flachland			Östl. Flachland			Berg- / Hügelland			Harz		
Zeitraum	1971 - 2000	2021 - 2050	2071 - 2100	1971 - 2000	2021 - 2050	2071 - 2100	1971 - 2000	2021 - 2050	2071 - 2100	1971 - 2000	2021 - 2050	2071 - 2100	1971 - 2000	2021 - 2050	2071 - 2100
	Mittlere Temperatur [°C]														
Maximum		10,9 11,2	13,3 13,9		10,9 11,4	13,5 14,1		10,7 11,3	13,3 14,0		10,5 11,0	13,1 13,7		8,6 9,1	11,3 11,7
Mittlere Tendenz	9,0 9,1	10,2 10,5	12,3 12,7	9,2 9,2	10,4 10,6	12,5 12,9	9,0 9,0	10,3 10,4	12,3 12,8	8,8 8,6	10,1 10,1	12,1 12,5	6,8 6,6	8,1 8,1	10,3 10,6
Minimum		9,9 9,9	11,7 11,6		10,0 10,0	11,8 11,8		9,8 9,8	11,7 11,7		9,6 9,4	11,5 11,4		7,6 7,4	9,5 9,4
	Niederschlagssumme [mm]														
Maximum		903 895	989 956		792 821	872 876		709 719	783 778		830 849	915 920		1215 1240	1322 1338
Mittlere Tendenz	828 794	871 820	918 836	742 744	777 762	814 772	654 650	689 672	729 674	773 775	817 795	854 790	1131 1144	1177 1164	1209 1147
Minimum		810 781	838 703		747 730	752 651		659 639	662 576		787 754	798 667		1119 1074	1110 996

2.4.2 Abflussdaten

Insgesamt stehen für Niedersachsen 338 Pegel mit Abflussdaten auf Tageswertbasis zur Verfügung. Ein Großteil dieser Pegel wird vom NLWKN betrieben, einige weitere von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung sowie von der Harzwasserwerke GmbH. Aus dieser Gesamtmenge wurden insgesamt 143 als Referenzpegel für die Simulation der Hochwasserverhältnisse sowie 93 Referenzpegel für die Simulation der Niedrigwasserverhältnisse ausgewählt. Kriterien hierfür waren zum einen eine möglichst geringe anthropogene Beeinflussung, z.B. durch Stauhaltungen, Talsperren oder ähnliches, zum anderen die Qualität, mit der die Wirkmodelle die beobachteten Abflüsse an den Pegeln wiedergeben konnten. (siehe Abbildung 2-7).

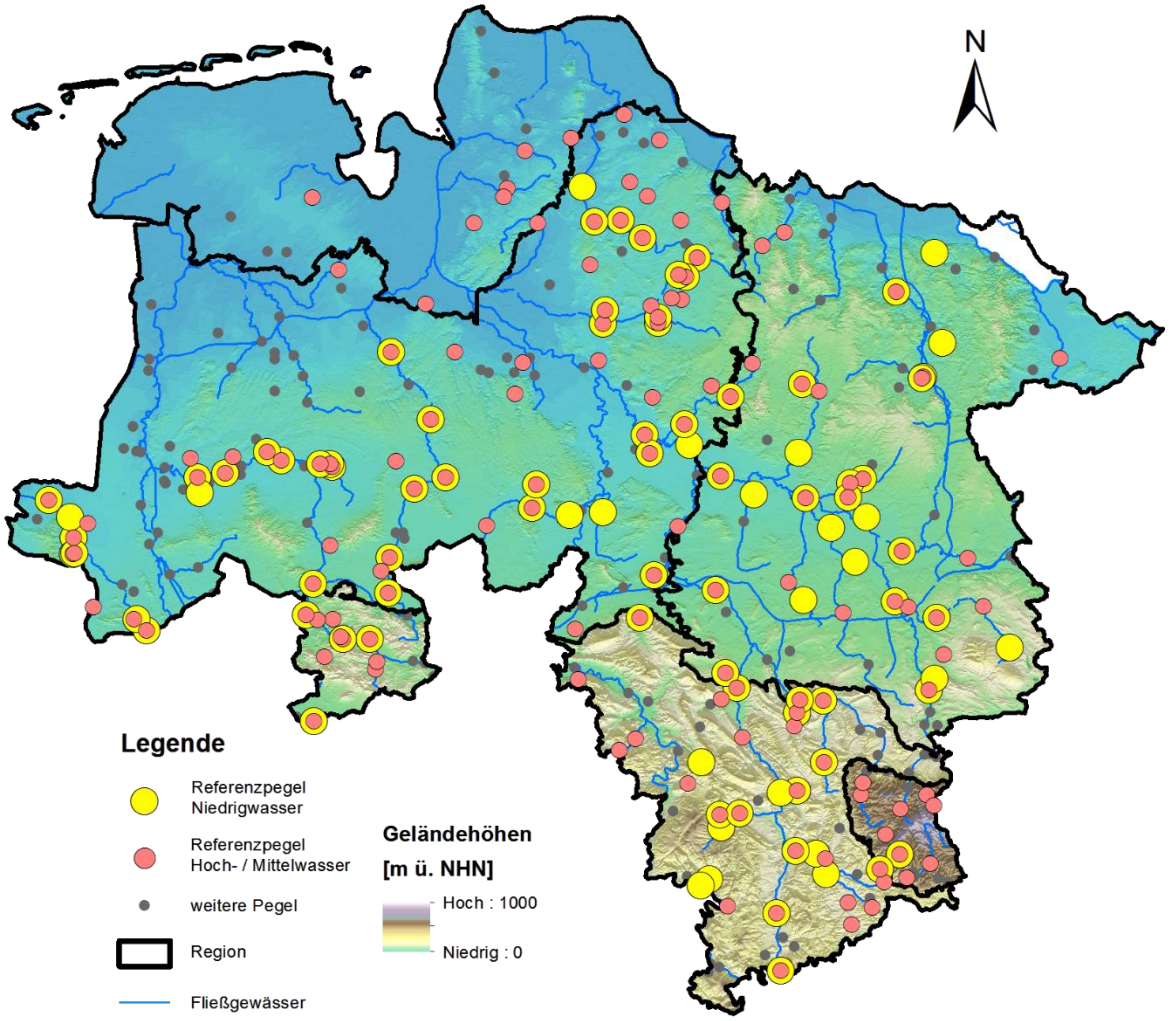


Abbildung 2-7: Übersicht über die verfügbaren Abflusspegel bzw. verwendeten Referenzpegel in Niedersachsen

2.4.3 Bodendaten

In den hydrologischen Impaktmodellen (PANTA RHEI und HBV-IWW) wurde die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 (BÜK50) verwendet (LBEG, 1999/2014). Diese beinhaltet unter anderem den Grundwasserflurabstand und eine Einteilung von Staunässestufen, die in dem Impaktmodell mGROWA18 (HERMANN et al., 2013; ERTL et al., in Vorbereitung) Verwendung fanden.

Im MethodenManagementSystem (MeMaS) des LBEG ist die Bodenkarte 1:50.000 (BK50) als bodenkundliche Datengrundlage hinterlegt. Diese hat im November 2017 offiziell die BÜK50 als bodenkundliches Standardwerk abgelöst und dient als Grundlage für die Auswertungen im Themenfeld Boden.

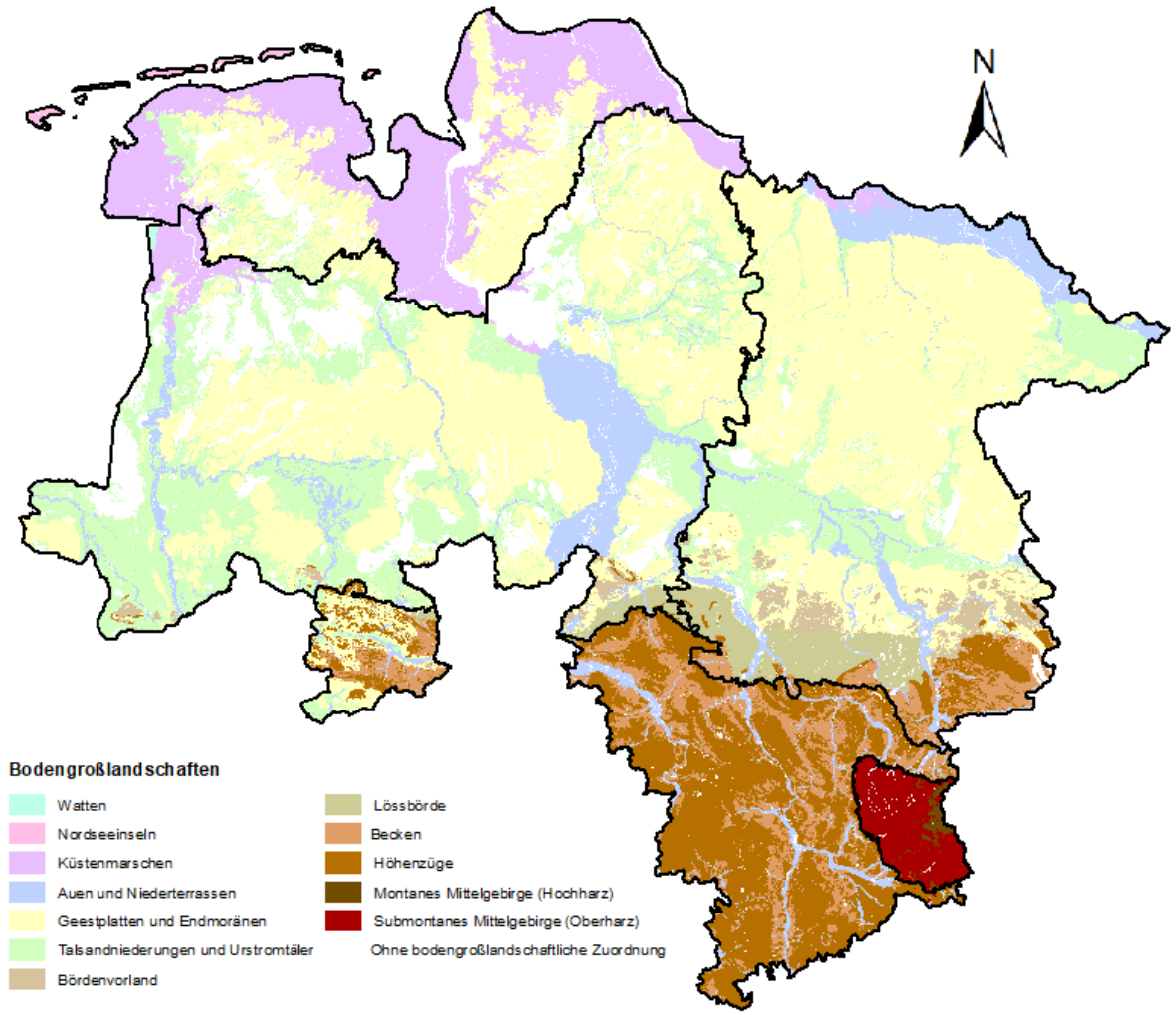


Abbildung 2-8: Bodengroßlandschaften in Niedersachsen auf Basis der BK 50 (Stand Februar 2018)

2.4.4 Landnutzungsdaten

Die in den Impaktmodellen berücksichtigten Landnutzungsdaten basieren auf dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) sowie dem CORINE Land Cover (2006). Die unterschiedlichen originalen Klassifizierungen der Nutzungstypen wurden für die Berücksichtigung in den jeweiligen Modellen zum Teil weiter aggregiert.

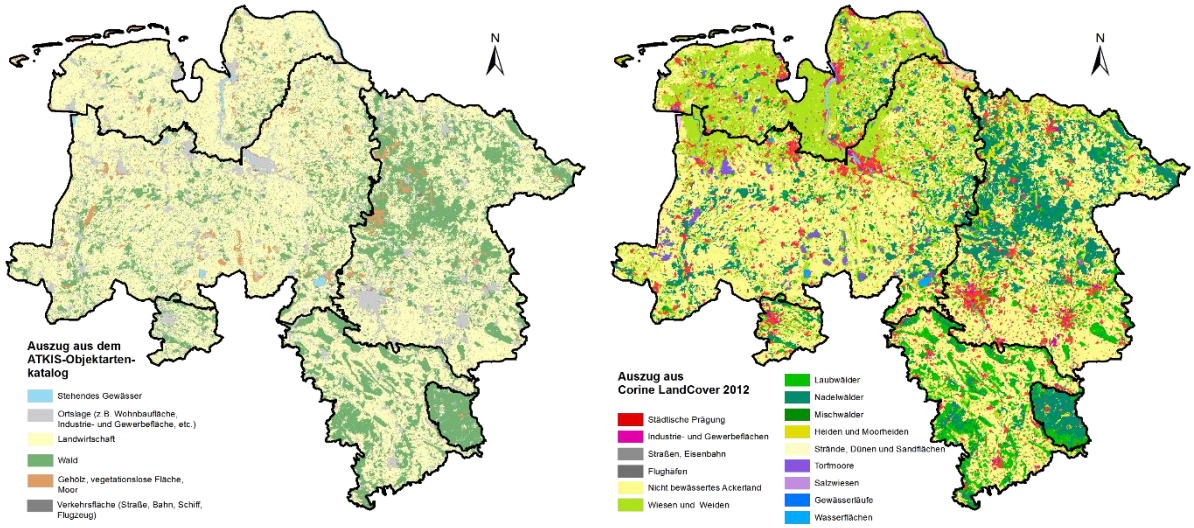


Abbildung 2-9: Übersicht über die Landnutzungsdaten, basierend auf ATKIS (links) und CORINE Land Cover 2006 (rechts); Nutzungsarten teilweise aggregiert

2.4.5 Geländehöhen

In den hydrologischen Modellen wurde u.a. ein Digitales Geländemodell mit 10 m Gitterweite (DGM10) vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verwendet. Für die Modellierung der Grundwasserneubildung kam das DGM25 vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) zum Einsatz.

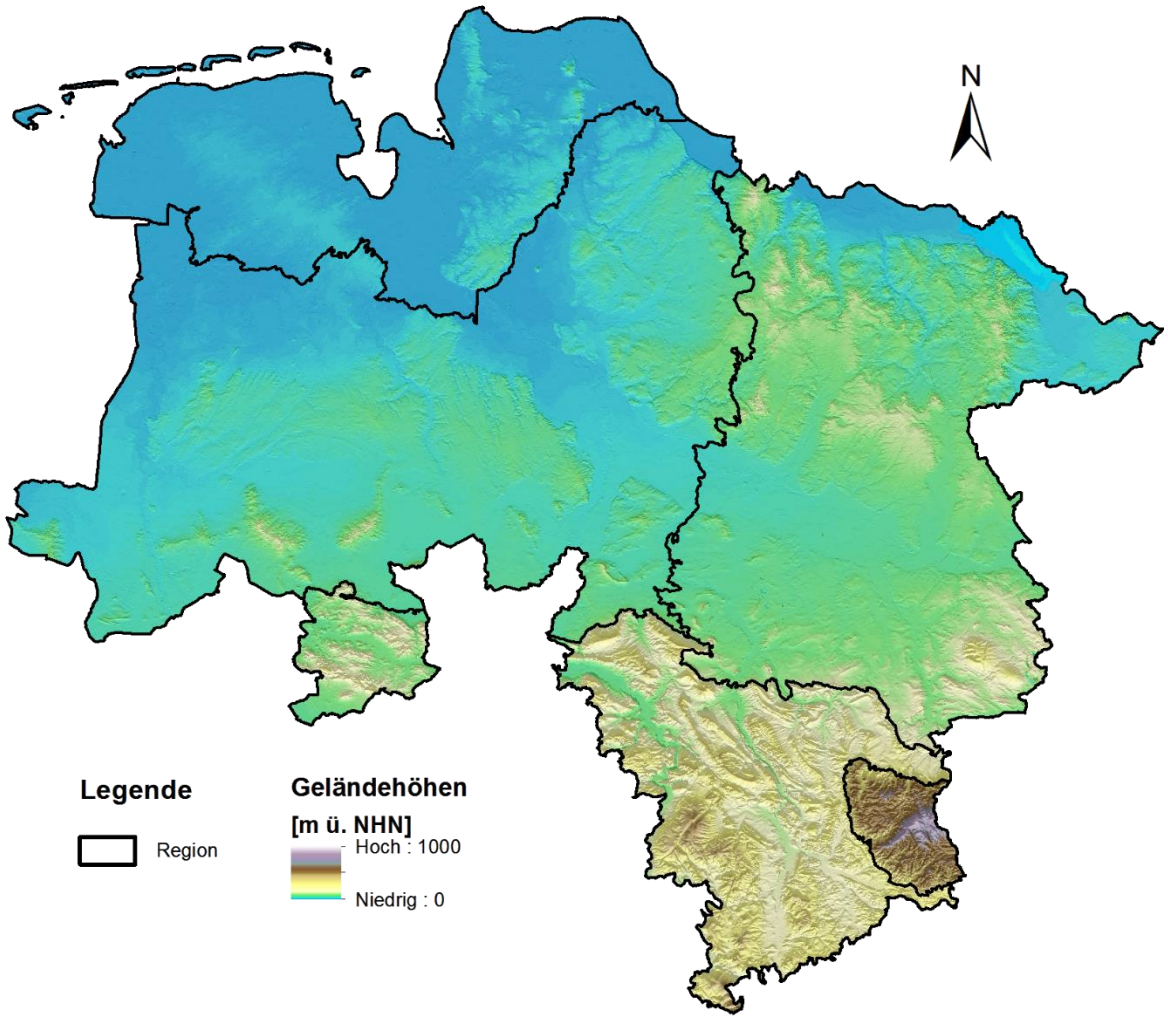


Abbildung 2-10: Rasterdaten des Digitalen Geländemodells (DGM10)

2.4.6 Hydrogeologische Gesteinseinheiten im Festgestein

Für die Simulation der Grundwasserneubildung in Festgesteinsbereichen wurde unter anderem die Geologische Karte von Niedersachsen im Maßstab 1:50.000 (GK 50) als Datenbasis verwendet (LBEG, 2007). In Festgesteinsbereichen ist die Grundwasserneubildung im Allgemeinen geringer als in den Porengrundwasserleitern der Lockergesteine und wird daher mit Hilfe von „Base Flow Indizes“ (BFI-Werten) reduziert, welche den einzelnen Festgesteinsbereichen zugeordnet werden.

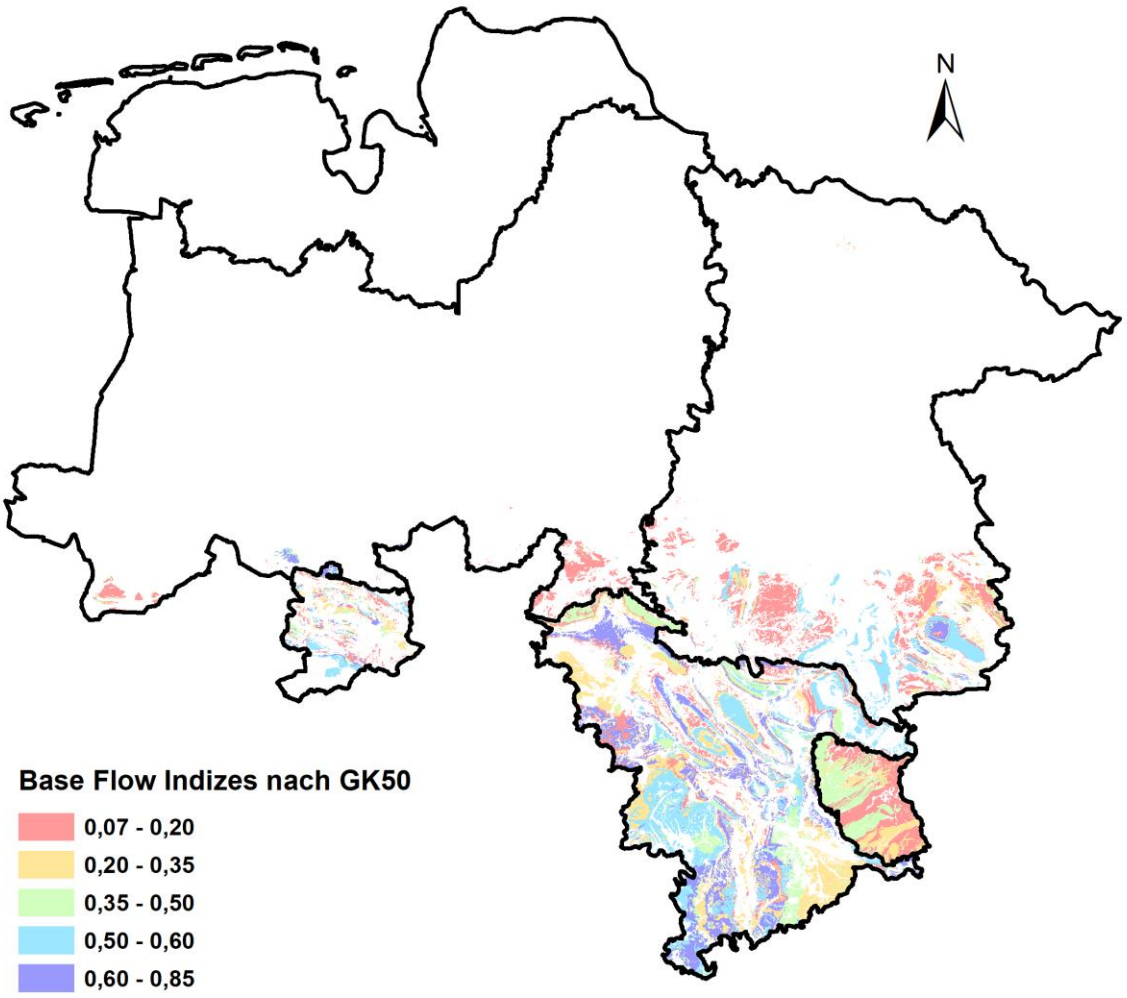


Abbildung 2-11: Übersicht über die Festgesteinsbereiche in Niedersachsen anhand von Base Flow Indizes auf Grundlage der Geologischen Karte 1:50.000 (GK 50)

2.5 Impaktmodelle

2.5.1 Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA18

Am Forschungszentrum Jülich GmbH wurde in Zusammenarbeit mit dem LBEG das Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 („monatlicher Großräumiger Wasserhaushalt“) entwickelt (HERRMANN et al. 2013; ERTL et al., in Vorbereitung), welches in Niedersachsen standardmäßig zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Modellierung der Grundwasserneubildung Anwendung findet. mGROWA ist ein rasterbasiertes und deterministisches Modell zur flächendifferenzierten Bestimmung der mittleren mehrjährigen Wasserhaushaltsgrößen und wurde für einen Einsatz in großen Modellgebieten (Flusseinzugsgebiete, Bundesländer etc.) konzipiert. Vor allem für die Wasserwirtschaft ist die Grundwasserneubildung von hoher Bedeutung und wird im mGROWA18-Modell monatsweise ermittelt. Nach HERMANN et al. (2013) müssen die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der

Klimagrößen „Niederschlag“ und „Gras-Referenzverdunstung“ im Rahmen der Datenaufbereitung als Modellinput für die Simulation des Wasserhaushalts vorbereitet werden. Diese können aus regional verfügbaren Daten oder aus den Ergebnissen von Klimasimulationen abgeleitet werden. Letztere werden im Rahmen dieser Studie verwendet (siehe Kapitel 2.4.1), um mögliche zukünftige Veränderungen der Grundwasserneubildung zu identifizieren. Auf Basis der Wasserhaushaltsgleichung werden die vertikalen Prozesse des Wasserhaushalts zellenweise bilanziert. Die Zellgröße des Modellrasters wurde für diese Studie auf ein 500 m Raster festgelegt, kann jedoch beliebig groß gewählt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Modells mGROWA18 findet sich in HERRMANN et al. (2013) und ERTL et al. (in Vorbereitung).

2.5.2 Die hydrologischen Modelle PANTA RHEI und HBV-IWW

Für die Analyse der zukünftig resultierenden Abflüsse anhand der Klimaprojektionen wurden für die vorliegende Studie die Simulationsergebnisse von zwei hydrologischen Modellsystemen herangezogen. Zum einen wurde das Modell PANTA RHEI benutzt, das durch die Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau an der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH entwickelt wurde. Zum anderen erfolgten Simulationen mit dem Modell HBV-IWW (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model), welches eine durch das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover modifizierte Version des ursprünglich am Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) entwickelten Modells darstellt. Der Fokus der Modellierung mit PANTA RHEI lag auf der Simulation von mittleren und großen Pegelgebieten in Niedersachsen, während der Fokus von HBV-IWW auf der Simulation von kleineren Pegelgebieten (Kopfgebiete) lag, um im Hinblick auf Aussagen zu kompletten Flusseinzugsgebieten zusätzliche Informationen bereitzustellen. Zur Ableitung der zukünftigen Abflussveränderungen in Niedersachsen wurde ein Gesamtpool aus den Ergebnissen der beiden hydrologischen Modelle herangezogen.

PANTA RHEI ist ein deterministisches, semi-distributives Modell mit einer räumlichen Disaggregierung in 3 Ebenen: Gesamteinzugsgebiet, Teileinzugsgebiete und Hydrotope. Dabei stellen Hydrotope die kleinsten Berechnungseinheiten dar. Innerhalb eines Teileinzugsgebiets weisen sie gleichartige hydrologische Eigenschaften auf und werden aus der Verschneidung von Teileinzugsgebiets-, Boden- und Landnutzungsdaten generiert. Für die Ableitung von Höhe und Gefälle eines Teileinzugsgebiets wird ein digitales Geländemodell benötigt. Der interne Rechenzeitschritt bei der Abflusssimulation beträgt eine Stunde. Aufgrund der zeitlichen Auflösung der klimatischen Klimaprojektionsdaten erfolgte die Auswertung der Modellergebnisse auf Basis von Tagesmittelwerten. Die folgenden meteorologischen Parameter werden für die Berechnung des Wasserhaushaltes in PANTA RHEI verwendet: Niederschlag, Lufttemperatur (Tagesmittel, -maximum und -minimum), Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Als relevante hydrologische Prozesse werden in dem Modell auf Ebene der Hydrotope die

Prozesse der Abflussbildung berechnet. Hierzu zählen Schneeakkumulation und –schmelze, Evapotranspiration, Interzeption, Infiltration, sowie Perkolation. Die Abflusskonzentration und das Abflussrouting (Hochwasserablauf im Fließgewässer) werden auf der Ebene der Teileinzugsgebiete berechnet (vgl. Abbildung 2-12). Weitere Informationen zu PANTA RHEI sind z.B. im Abschlussbericht des Projektes KliBiW (NLWKN, 2017) oder im Benutzerhandbuch zu dem Modell (LWI-HYWAG, IFW, 2012) aufgeführt.

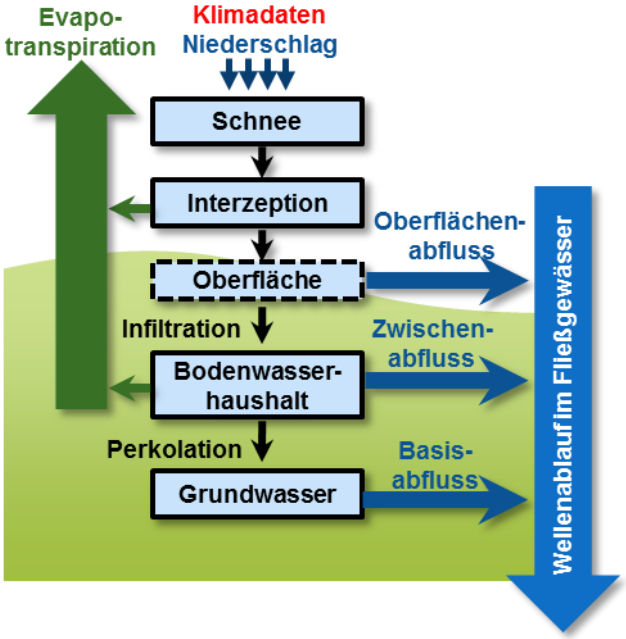


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der vertikalen (Abflussbildung) und lateralen (Abflusskonzentration) hydrologischen Prozesse in PANTA RHEI

HBV-IWW ist ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell, das sowohl als Blockmodell (lumped) oder als halb-verteiltes Modell (semi-distributed) unter Verwendung von Teileinzugsgebieten aufgebaut werden kann. Mit den Eingangsdaten der Gebietsmittelzeitreihen des Niederschlags, der Temperatur, der Grasreferenzverdunstung und des Bestandskoeffizienten kann für einen Gebietsauslass der Abfluss ermittelt werden. Die Abflussbildung der jeweiligen Teileinzugsgebiete wird mit Hilfe einer vertikalen Kopplung von vier Speichern realisiert (vgl. Abbildung 2-13). Dabei beschreibt jeweils ein Speicher den Schneespeicher, den Bodenspeicher, den Grundwasserspeicher in der oberen, meist ungesättigten Zone und den Grundwasserspeicher in der unteren, meist gesättigten Zone. Die einzelnen Abflusskomponenten werden mittels der Einheitsganglinie transformiert. Auf diese Weise wird die Abflusskonzentration an den jeweiligen Gebietsauslässen der Teileinzugsgebiete realisiert. Die Modellgebiete wurden als Blockmodelle aufgebaut, d.h. ohne Ausweisung von Teileinzugsgebieten. Demzufolge wird der Prozess des Wellenablaufs nicht berücksichtigt. Dies beruht auf der Annahme, dass bei mesoskaligen Einzugsgebieten die Abflussbildungs- sowie Abflusskonzentrationsprozesse dominieren. Weitere Informationen zu

HBV bzw. HBV-IWW können LINDSTRÖM et al. (1997) bzw. WALLNER (2015) entnommen werden.

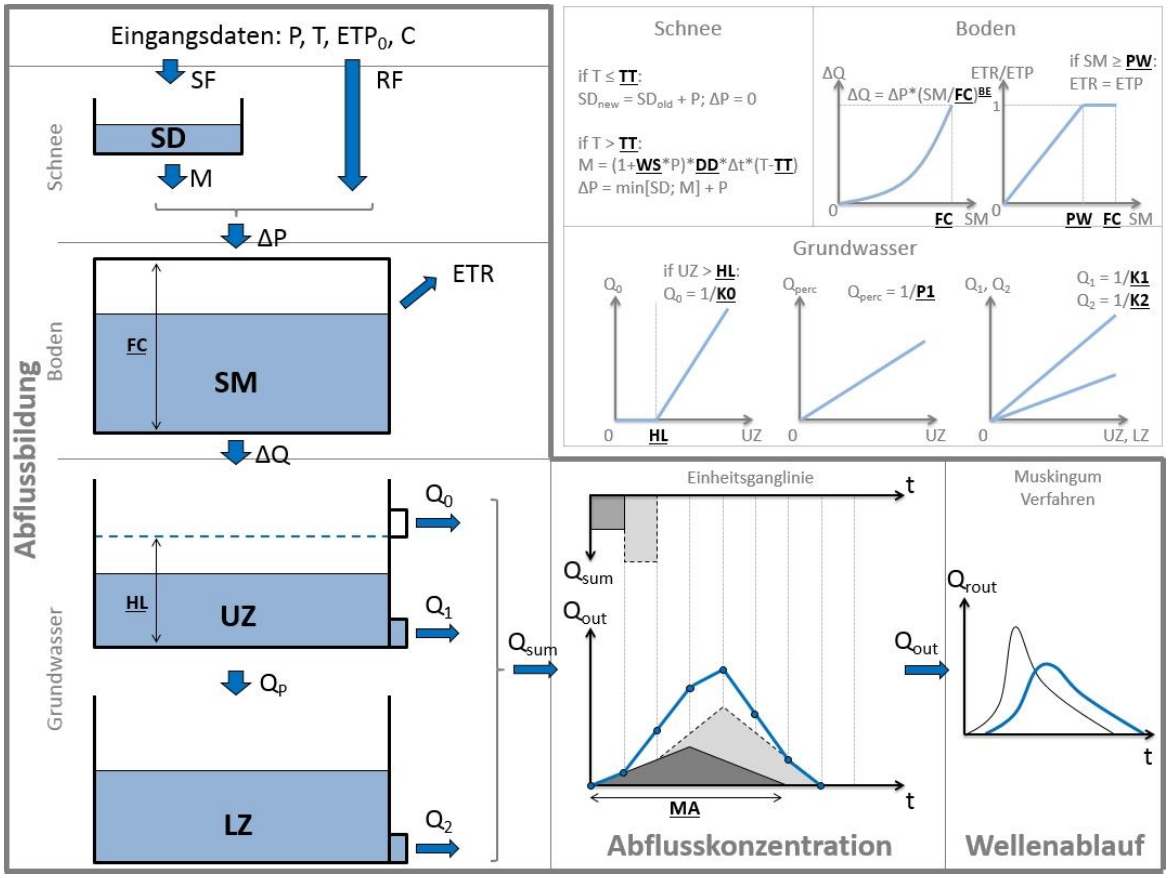


Abbildung 2-13: Struktogramm des konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modells HBV-IWW modifiziert nach Wallner (2015)

2.5.3 MeMaS

Für die Bewertung der Bodenfunktionen wird am LBEG das MethodenManagementSystem (MeMaS) genutzt. Das MeMaS bildet die zentrale Software des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®) und ermöglicht die systematische Auswertung bodenkundlicher Daten. Mit Hilfe von empirisch ermittelten Kennwerten und Verknüpfungsregeln können Bodenkennwerte und -prozesse modelliert werden. Die im MeMaS hinterlegte Methodenbank ist als Geobericht 19 (MÜLLER & WALDECK, 2011) veröffentlicht worden und somit jederzeit nachvollziehbar. Mittlerweile sind die Funktionen des MeMaS so ausgebaut worden, dass auch die Modellierung mit Klimaprojektionsdaten möglich ist. Das MeMaS ist kein Modell im klassischen Sinne, sondern eher ein Werkzeug, dass die automatisierte und systematische Auswertung empirisch ermittelter Kennwerte und Zusammenhänge auf Basis der vorhandenen Datengrundlagen ermöglicht. Zum aktuellen Zeitpunkt sind 34 dieser Auswertungsmethoden im Bereich Boden über MeMaS abrufbar. Die

detaillierte Beschreibung der hier verwendeten Auswertungsmethoden „Beregnungsbedürftigkeit“, „Standörtliches Verlagerungspotenzial von nichtsorbierbaren Stoffen“ und „Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser“ erfolgt in Kapitel 4. Die einzelnen Auswertungsmethoden des MeMaS können als Wirkmodelle bezeichnet werden.

2.5.4 Statistisches Prognosemodell

Für die Einschätzung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse auf Basis der Klimaprojektionen wurde u.a. ein statistischer Ansatz genutzt, um die Richtung und den Grad der möglichen Veränderungen mit Hilfe einer, im Gegensatz zu Wasserhaushaltsmodellen, simplifizierten Modellstruktur zu ermitteln. Hierbei erfolgt eine direkte Schätzung von Niedrigwasserindizes (NWI) auf Basis einer Reihe von klimatischen Kenngrößen, durch die Verbindung von meteorologischen und hydrologischen Ereignissen. Dabei wird angenommen, dass sich unterschiedliche Merkmale des hydrologischen Ereignisses, wie z.B. Dauer und Intensität der Niedrigwasserphase, durch die Kombination ausgewählter Merkmale der vorangegangenen meteorologischen Verhältnisse abbilden lassen. Hierzu zählen z.B. der mittlere Tagesniederschlag, die mittlere bzw. maximale Trockendauer, die mittlere bzw. maximale Regendauer, die Tagesmitteltemperatur, die mittlere bzw. maximale Hitzewellendauer, die potenzielle Verdunstung und die klimatische Wasserbilanz.

Der statistische Modellansatz benutzt das Verfahren der multiplen linearen Regression. Dabei erfolgt die gemeinsame Anpassung eines zeitlich-räumlichen Modells über mehrere Gebiete zur regionalen Prognose jährlicher NWI an den Pegeln. Die genannten meteorologischen Indizes werden dabei direkt als Regressoren im Modell verwendet. Für weitere Details wird auf den Abschlussbericht der Phase 5 des Projektes KliBiW verwiesen (NLWKN, 2019).

3 Ausgewählte Themenfelder im Handlungsfeld Wasserwirtschaft

3.1 Klimawirkungen im Themenfeld Grundwasser

3.1.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes

In Niedersachsen erfolgt die Gewinnung des Trinkwassers zu 86 % aus Grundwasser (Harztalsperren 12%, Fluss-, Quellwasser u. Uferfiltrat: 2% (LSN, 2013)). Zur nachhaltigen Nutzung des Grundwasserdargebotes ist es notwendig, auch die möglichen Einflüsse des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung zu identifizieren und die Auswirkungen zu beurteilen.

Grundwasser ist ein Rohstoff, der sich regenerieren und erneuern kann. Hauptlieferant für den Grundwasservorrat ist versickerndes Niederschlagswasser. Es sorgt dafür, dass die Grundwasservorkommen der Speichergesteine im Untergrund aufgefüllt werden. Besonders hoch ist die Grundwasserneubildung im Winter, da zu dieser Zeit ein großer Teil der Niederschläge im Boden versickert. In den wärmeren Jahreszeiten verdunstet dagegen ein großer Teil des Niederschlags bereits an der Oberfläche oder wird von Pflanzen aufgenommen. Die Grundwasserneubildung ist nicht überall gleich. Sie hängt unter anderem von der Niederschlagsmenge und -verteilung, der Durchlässigkeit des Bodens, den hydrogeologischen Eigenschaften des Bodens, dem Bewuchs und dem Relief der Bodenoberfläche sowie dem Grundwasserflurabstand ab. Da sich diese Parameter zum Teil auf kleinstem Raum deutlich unterscheiden, unterliegt auch die Grundwasserneubildungsrate großen lateralen Schwankungen. Eine flächendifferenzierte Ausweisung der mittleren Grundwasserneubildungsraten eröffnet die Möglichkeit, eine Reihe von hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zu beantworten. Die Beurteilung der Grundwasserneubildung erfolgt anhand des langjährigen Wasserhaushalts. Für die betrachteten Zeitreihen der nahen und fernen Zukunft sowie für die Referenzzeit, wird die Grundwasserneubildung als 30-jähriger Mittelwert angegeben. Zudem erfolgt eine innerjährliche Betrachtung des Sommer- und Winterhalbjahres.

In Niedersachsen zeigt sich eine differenzierte Verteilung der Grundwasserneubildung. In den Hochlagen der Mittelgebirge und des Harzes sowie in den Geestflächen des norddeutschen Tieflandes ergeben sich hohe Grundwasserneubildungsraten. In den Mittelgebirgen wird diese maßgeblich durch die Gesteinseigenschaften bestimmt und erreicht im Weser-Leine-Bergland zwischen 50 und 300 mm/a. Vor allem wegen der hohen Niederschlagsmengen, kommt es im Harz zu teilweise sehr hohen Grundwasserneubildungsraten von über 400 mm/a. Die Geestflächen zeigen, in Abhängigkeit von der Landnutzung, als grundwasserferne Standorte hohe jährliche Grundwasserneubildungsraten im Bereich zwischen 100 und 300 mm/a. In den küstennahen Marschen und den Flussniederungen sowie am östlichen Rand Niedersachsens zeigen sich niedrige Grundwasserneubildungsraten und auch Grundwasserzehrgebiete. Geringere Flurabstände sorgen in diesen Gebieten für eine höhere Verdunstung durch kapillaren Aufstieg und damit für geringere Neubildungsraten. Vor allem in den Marschen wird durch die Drainagen im hydrologischen Winterhalbjahr die Höhe der Grundwasserneubildung

zusätzlich reduziert. Am östlichen Rand Niedersachsens nehmen die Raten wegen der dort generell geringeren Niederschlagsmengen deutlich ab.

3.1.2 Klimawirkung Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser

3.1.2.1 Wirkungsketten

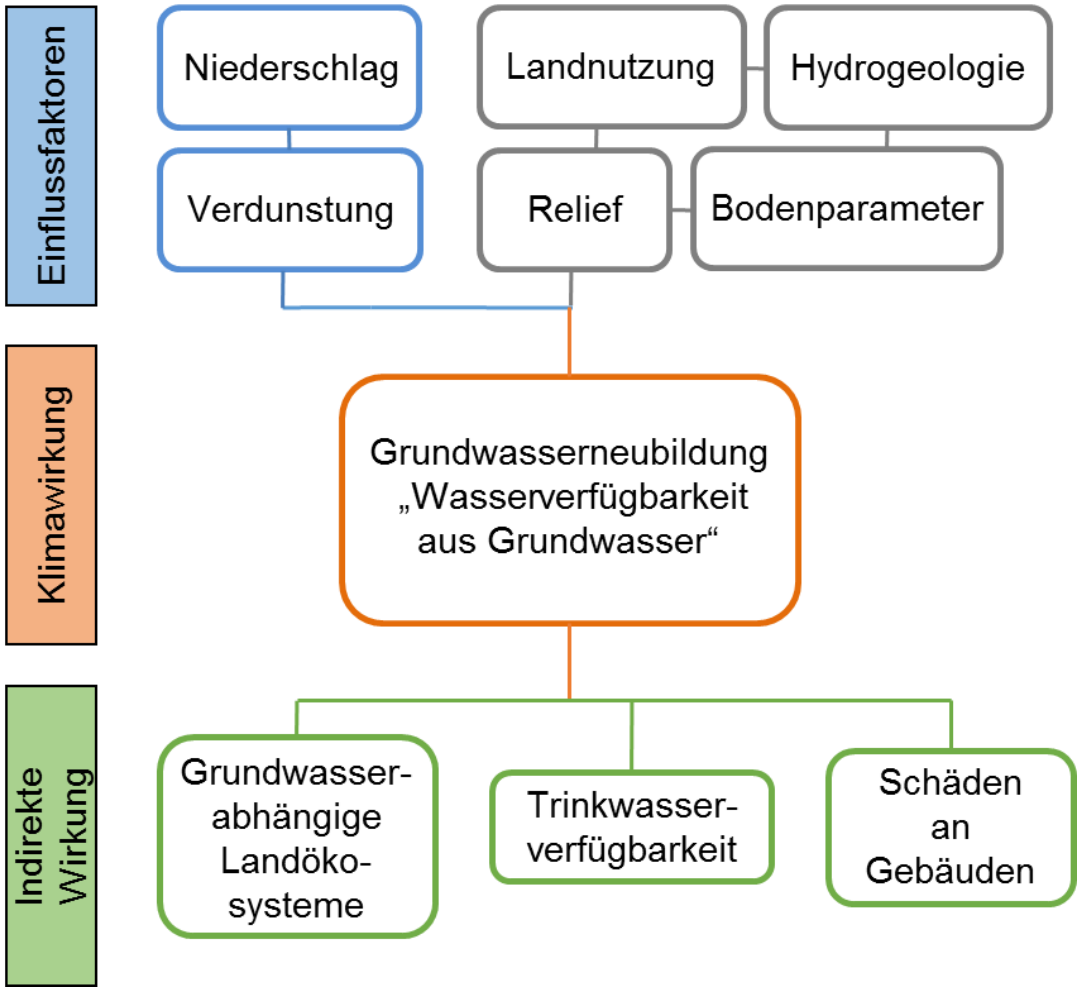


Abbildung 3-1: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser im Themenfeld Grundwasser

Die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser hängt im Wesentlichen davon ab, wie groß der Anteil des versickernden Niederschlags ist, der die Grundwasseroberfläche erreicht und somit zur Grundwasserneubildung beiträgt. Ein Teil des Niederschlags geht durch Verdunstung verloren. Beeinflusst wird dies zum einen durch die regional vorherrschenden klimatischen Bedingungen wie die Temperatur, die relative Feuchte, die Windgeschwindigkeit und die Sonneneinstrahlung. Zum anderen bestimmen auch die Landnutzung, die Topographie, der Versiegelungsgrad, die hydrogeologischen Eigenschaften und die bodenphysikalischen

Parameter sowie der Grundwasserflurabstand die Menge des verdunsteten Wassers. Teile des übrigen Niederschlagswassers gelangen durch Oberflächen- und Zwischenabfluss in Vorfluter. Die Hydrogeologie des Untergrundes und eventuelle künstliche Entwässerung bestimmen diesen Prozess. Das Wasser, welches weder verdunstet noch dem Direktabfluss zugeordnet werden kann, gelangt zum Grundwasser und entspricht der Grundwasserneubildung.

Die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser wirkt sich auf viele andere Bereiche aus. So sind grundwasserabhängige Landökosysteme auf eine bestimmte Höhe der Grundwasseroberfläche angewiesen und können bei mangelnder Wasserverfügbarkeit geschädigt werden. Ausreichend große Grundwasservorräte sind insbesondere für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung, die industrielle Brauchwassernutzung und die Bewässerungsfeldwirtschaft unabdingbar. In Talniederungen kann ein saisonales Ansteigen der Grundwasseroberfläche zu Vernässung führen, wodurch auch Schäden an Gebäuden verursacht werden können. Im Gegensatz dazu kann es in einigen Bereichen zur Versteppung oder zu Setzungsschäden an Gebäuden kommen, falls Trockenjahre in mehrfacher Folge auftreten. Da das Grundwasser häufig in direkter Verbindung mit den Vorflutern steht, kann auch der Mindestabfluss in Bächen und Flüssen beeinflusst werden. Wird dieser nicht erreicht, kommt es zu negativen Auswirkungen für die Kühlwassernutzung der Energiewirtschaft und die Ökologie kleiner Fließgewässer.

3.1.2.2 Indikatoren und Operationalisierung

Der Indikator zur Beschreibung der Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser ist die Grundwasserneubildung. Das als Wirkmodell dienende Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 (HERMANN et al., 2013; ERTL et al., in Vorbereitung) gibt für die betrachteten Zeitreihen zu jeder Simulation die monatliche Grundwasserneubildungsrate in mm als Rasterdatensatz aus. Diese wird jeweils zu einem 30-jährigen Mittelwert aggregiert und im betrachteten Ensemble ausgewertet. Eine geringe Grundwasserneubildungsrate bzw. eine hohe Grundwasserzehrung entspricht dabei einer niedrigen Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser und wird hier mit einer starken Klimawirkung gleichgesetzt. Die Grundwasserneubildungsrate ist durch die räumliche Heterogenität der Standorteigenschaften und ihre flächendifferenzierte Ausweisung nicht für die Festlegung von Schwellenwerten geeignet. Daher lassen sich auch aus der Literatur keine fachlich begründeten Schwellenwerte für eine starke bzw. schwache Klimawirkung ermitteln. Die Klasseneinteilung für die Klimawirkung basiert auf den Bandbreiten der minimalen bis maximalen Grundwasserneubildungsrate pro Rasterzelle. Gleiches gilt für die Änderungssignale in der Zukunft.

Tabelle 3-1: Klasseneinteilung der Grundwasserneubildungsrate bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Grundwasserneubildungsrate [mm/a]
	> 300
	250 bis 300
	200 bis 250
	150 bis 200
	100 bis 150
	50 bis 100
	1 bis 50
	0 bis -50
	-50 bis -100
	-100 bis -150
	-150 bis -200
	< -200

Legende	Änderung der Grundwasserneubildungsrate [mm/a]
	100 bis 150
	50 bis 100
	bis 50
	Keine Änderung
	bis -50
	-50 bis -100
	-100 bis -150
	< -150

3.1.2.3 Ergebnisse und Bewertung

Bei Betrachtung der **Klimawirkung** Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser im Referenzzeitraum (Abbildung 3-2), welche durch den Indikator der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate abgebildet wird, zeigen sich an der Küste, in den Talniederungen und am östlichen Rand Niedersachsens Bereiche mit einer niedrigen Grundwasserneubildungsrate, was einer starken Klimawirkung entspricht. Im Harz, im Berg- und Hügelland sowie in weiten Teilen des Flachlandes besteht eine hohe Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser bzw. eine hohe Grundwasserneubildungsrate und somit eine schwache Klimawirkung. In der nahen und fernen Zukunft bleibt diese grundlegende Verteilung, wie sie auch in Kapitel 3.1.1 beschrieben ist, bestehen. Dies ist auch in der Abbildung 3-12 zu erkennen, in welcher die Grundwasserneubildungsrate in den einzelnen Klimaregionen dargestellt ist. Demnach weist die Küstenregion die niedrigste und der Harz die höchste mittlere Grundwasserneubildungsrate auf. Je nach betrachtetem Wandelszenario steigt oder sinkt die Grundwasserneubildungsrate innerhalb der Bandbreite, wie in Abbildung 3-3 bis Abbildung 3-10 und Abbildung 3-12 visualisiert ist.

Nach Abbildung 3-12 zeigt sich im Sommerhalbjahr nur für das Bergland und den Harz im Mittel eine leicht positive Grundwasserneubildungsrate. Weite Teile Niedersachsens unterliegen einer jahreszeitlich typischen Grundwasserzehrung, was einer starken Klimawirkung und damit einer geringen Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser entspricht. Im Minimum der Bandbreite vergrößern sich diese Grundwasserzehrungsgebiete in der nahen und in der fernen Zukunft (Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7). Das Maximum der Bandbreite erreicht für die Küste und das westliche und östliche Flachland eine minimal positive Grundwasserneubildungsrate (Abbildung 3-12).

Im Winterhalbjahr findet der Großteil der Grundwasserneubildung statt. Mit Ausnahme der Watten und Marschen (siehe auch Abbildung 2-4), die in der Küstenregion liegen und stark durch künstliche Entwässerung beeinflusst werden, ist für ganz Niedersachsen eine hohe Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser angegeben. Die größte mittlere Grundwasserneubildungsrate liegt dabei im westlichen Flachland (Abbildung 3-12). Nach Abbildung 3-10 treten in der fernen Zukunft im Minimum der Bandbreite im Flachland vereinzelt Gebiete auf, in denen eine Grundwasserzehrung ausgewiesen wird.

Die **Änderungssignale** lassen für die 30-jährige mittlere Grundwasserneubildungsrate, bei Betrachtung des gesamten Jahres, keinen eindeutigen Trend für Niedersachsen erkennen (Abbildung 3-11). Nach Abbildung 3-3 zeigt die mittlere Tendenz in der nahen Zukunft nur geringe Änderungen, wenngleich im Maximum der Bandbreite für die meisten Teile Niedersachsens eine geringfügige Zunahme der Grundwasserneubildungsrate und im Minimum eine geringe Abnahme, insbesondere im Nordwesten, simuliert wird. In der fernen Zukunft zeigt sich in der mittleren Tendenz eine differenzierte Aufteilung zwischen Abnahmen und Zunahmen der Grundwasserneubildungsrate (Abbildung 3-4). Gebiete, in denen bereits eine niedrige Grundwasserneubildung oder -zehrung vorhanden war, erfahren eine weitere Abnahme, wohingegen Gebiete, die im Vergleich zum Referenzzeitraum eine höhere Grundwasserneubildungsrate aufweisen, eine leichte Zunahme erfahren. An den Grenzen der Bandbreite zeigt sich in Abbildung 3-4 für das Maximum hingegen eine Zunahme und für das Minimum eine Abnahme der Grundwasserneubildungsrate.

Für das Sommerhalbjahr wird von der Mehrzahl der Modelle eine Abnahme der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate simuliert (Abbildung 3-11). Wiedergegeben durch die mittlere Tendenz, zeigt sich dieser Trend für alle Klimaregionen in Abbildung 3-12. In der Fläche ist die Abnahme der mittleren Tendenz für die nahe Zukunft schwach ausgeprägt, in der fernen Zukunft wird in den Gebieten mit einer starken Klimawirkung eine weitere Abnahme der Grundwasserneubildungsrate von bis zu -100 mm simuliert. Im Maximum der Bandbreite zeigt sich in Niedersachsen sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft teilweise eine sehr geringe Zunahme der Grundwasserneubildungsrate, wohingegen das Minimum eine weitere Verstärkung der Zehrungsgebiete ausweist.

Für das Winterhalbjahr wird hingegen von der Mehrzahl der Modelle eine Zunahme der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate simuliert (Abbildung 3-11). Dieser Trend zeigt

sich ebenso durch die mittlere Tendenz für alle Klimaregionen in Abbildung 3-12, obwohl die Bandbreiten in der nahen und fernen Zukunft im Minimum auch eine Abnahme der Grundwasserneubildungsrate anzeigen. Im Maximum wird vor allem für Gebiete mit einer bereits im Referenzzeitraum hohen Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser, also einer schwachen Klimawirkung, eine Zunahme der Grundwasserneubildungsrate simuliert (Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10). In der mittleren Tendenz wird ebenfalls für solche Flächen eine Zunahme von bis zu 50 mm in der fernen Zukunft angezeigt.

Die **Bedeutung** der möglichen zukünftigen Veränderung der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate liegt, vor allem aus Sicht der Wasserwirtschaft, in dem Trend für das Sommer- und Winterhalbjahr. In der nahen Zukunft sind vorerst nur geringe Veränderungen zu erwarten. Je nach betrachteten Bereich der Bandbreite bzw. des Wandelszenarios ist im Sommerhalbjahr, wenn der Bedarf an Grundwasser durch den Menschen und die Vegetation am höchsten ist, in der fernen Zukunft mit größeren Abnahmen der Grundwasserneubildungsrate zu rechnen. Dies kann zum einen gravierende Auswirkungen für viele Ökosysteme und die Landwirtschaft haben. Zum anderen können dadurch Engpässe in der Trink- und Brauchwasserversorgung auftreten. Im Winterhalbjahr wird von der Mehrzahl der Modelle eine stetige Zunahme der Grundwasserneubildungsrate simuliert, wodurch die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser ansteigt. Dies kann zu Vernässungen sowie zu Schäden an Gebäuden durch einen Anstieg der Grundwasseroberfläche und zu verstärkter Erosion führen.

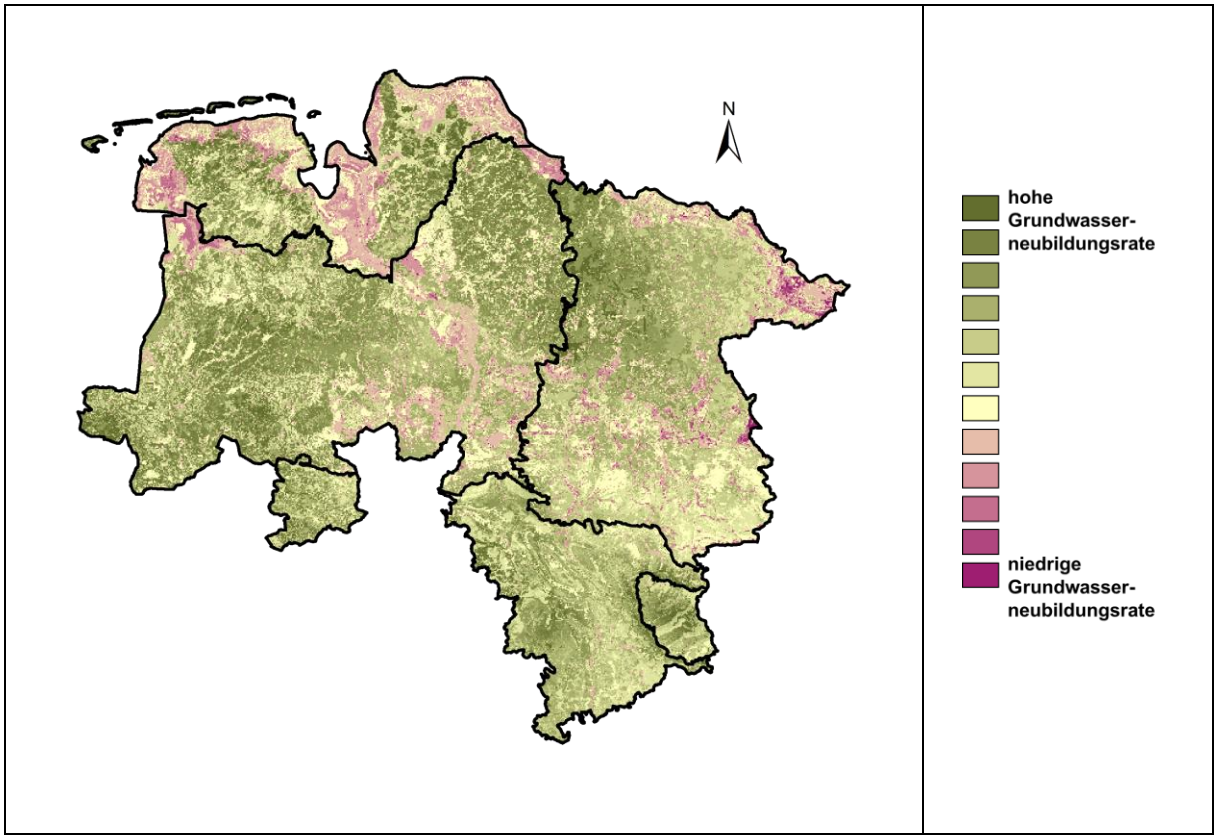


Abbildung 3-2: Mittlere Grundwasserneubildungsrate im Gesamtjahr (November bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

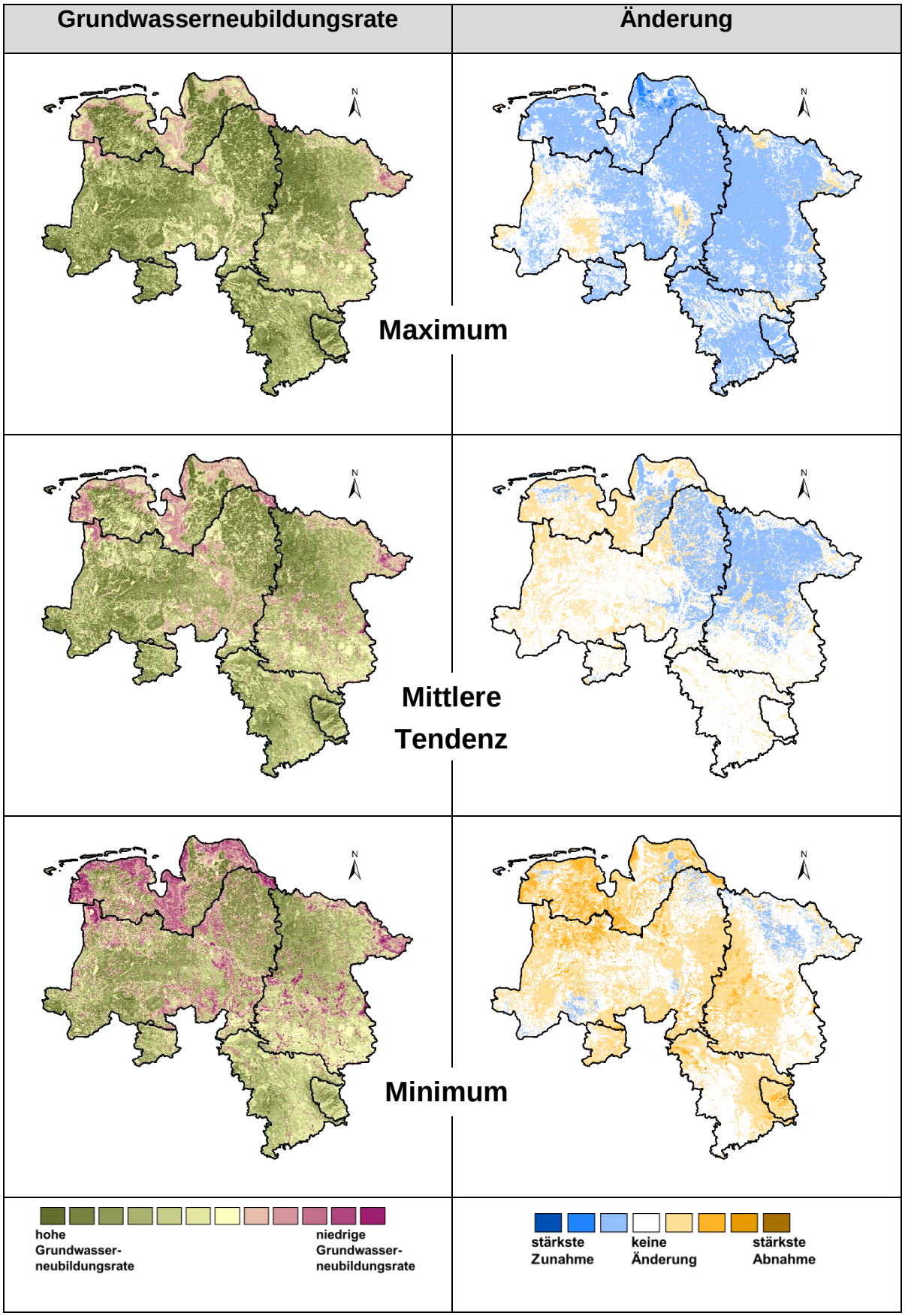


Abbildung 3-3: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

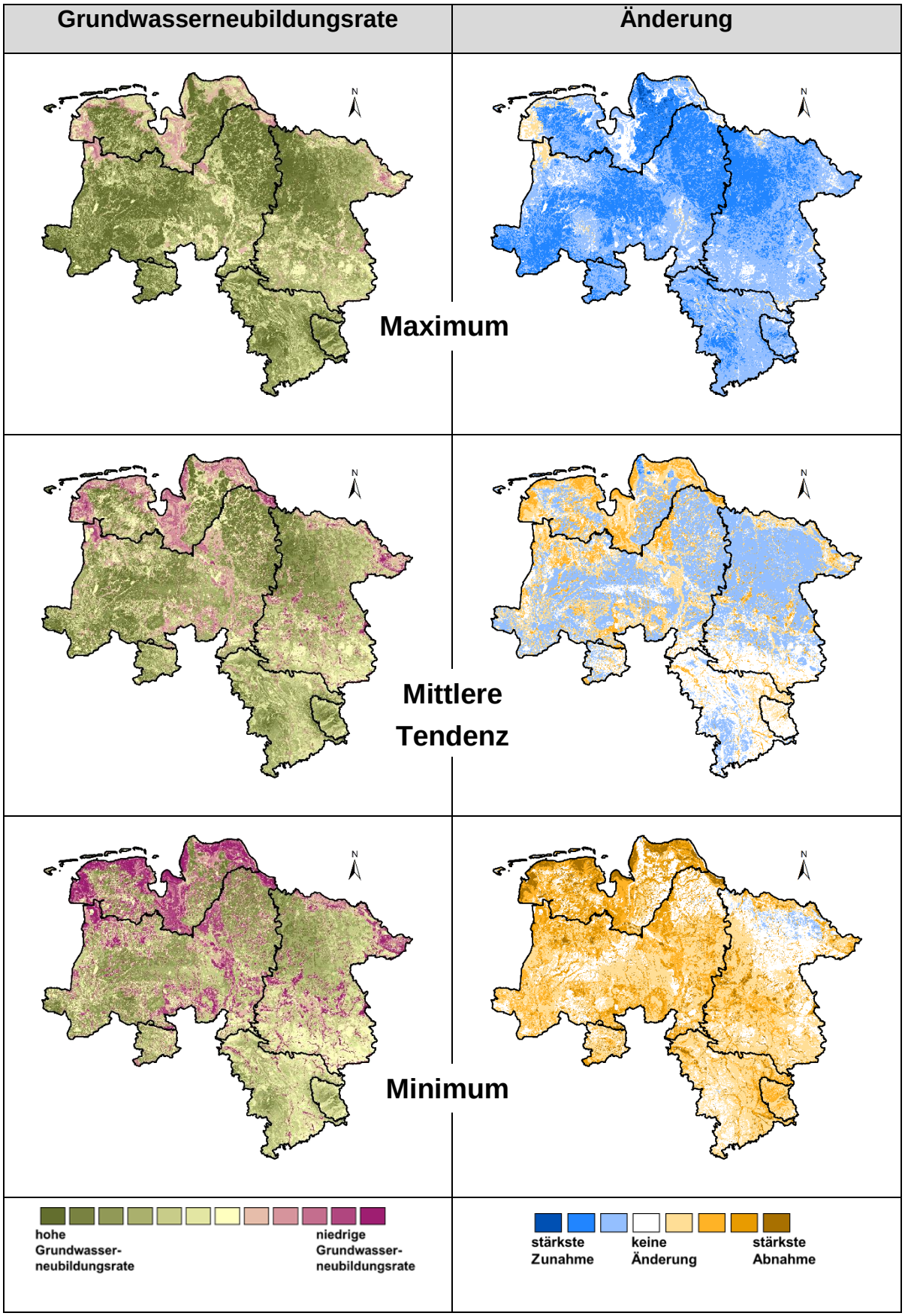


Abbildung 3-4: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

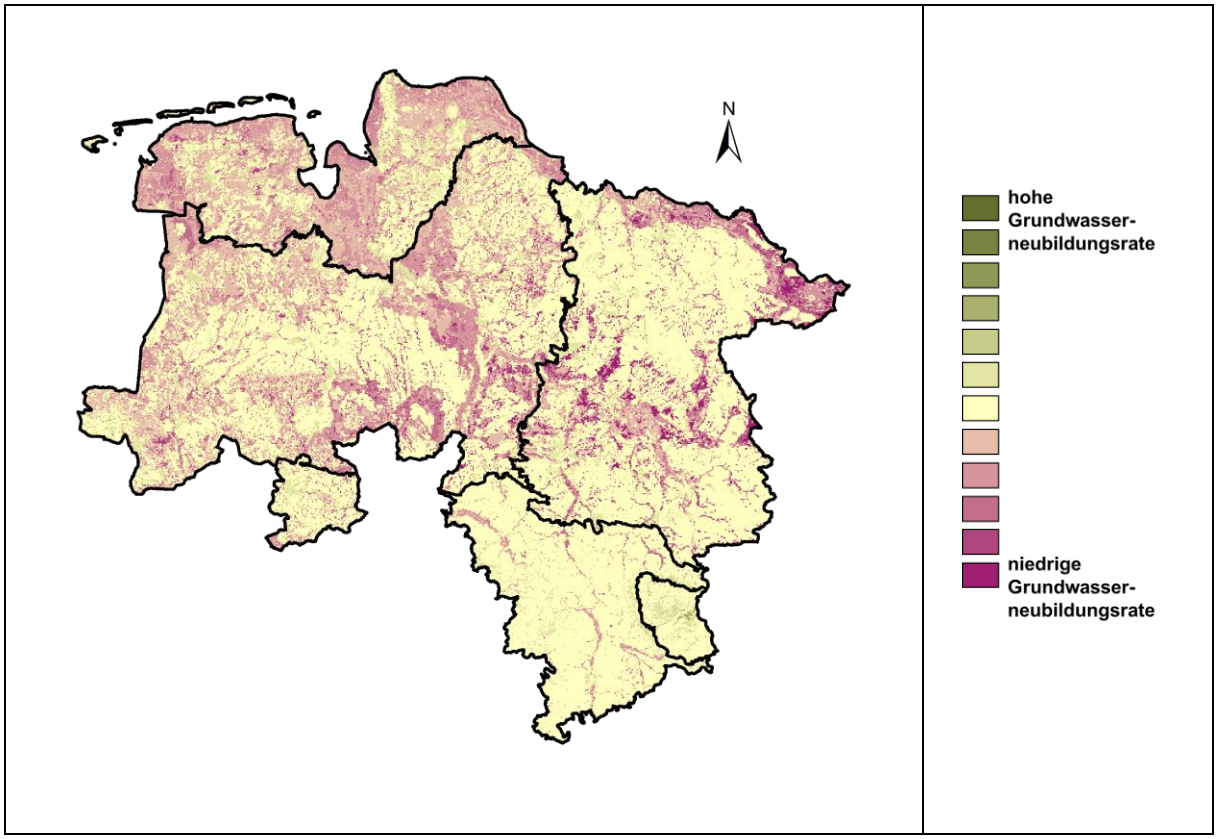


Abbildung 3-5: Mittlere Grundwasserneubildungsrate im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

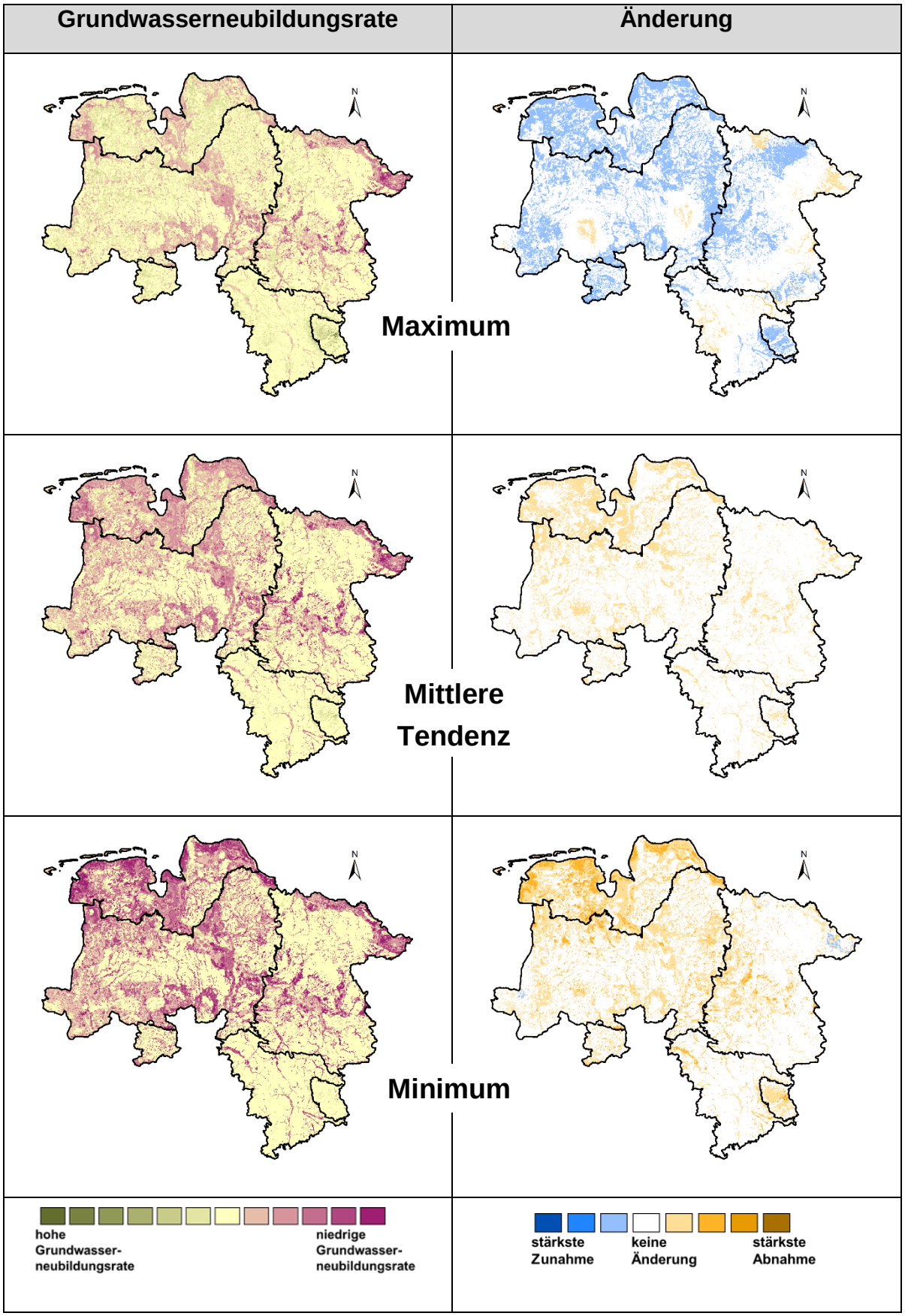


Abbildung 3-6: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

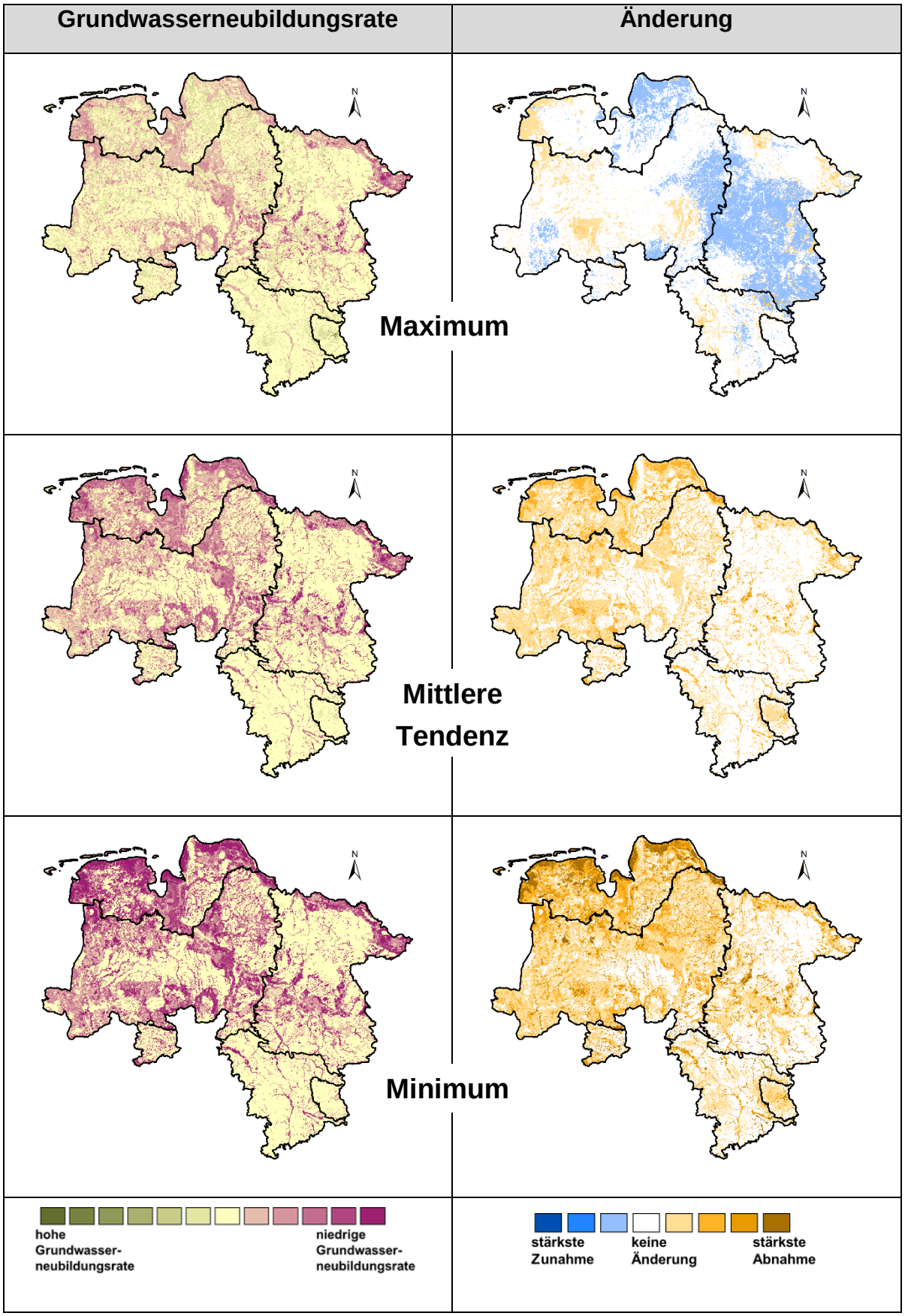


Abbildung 3-7: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

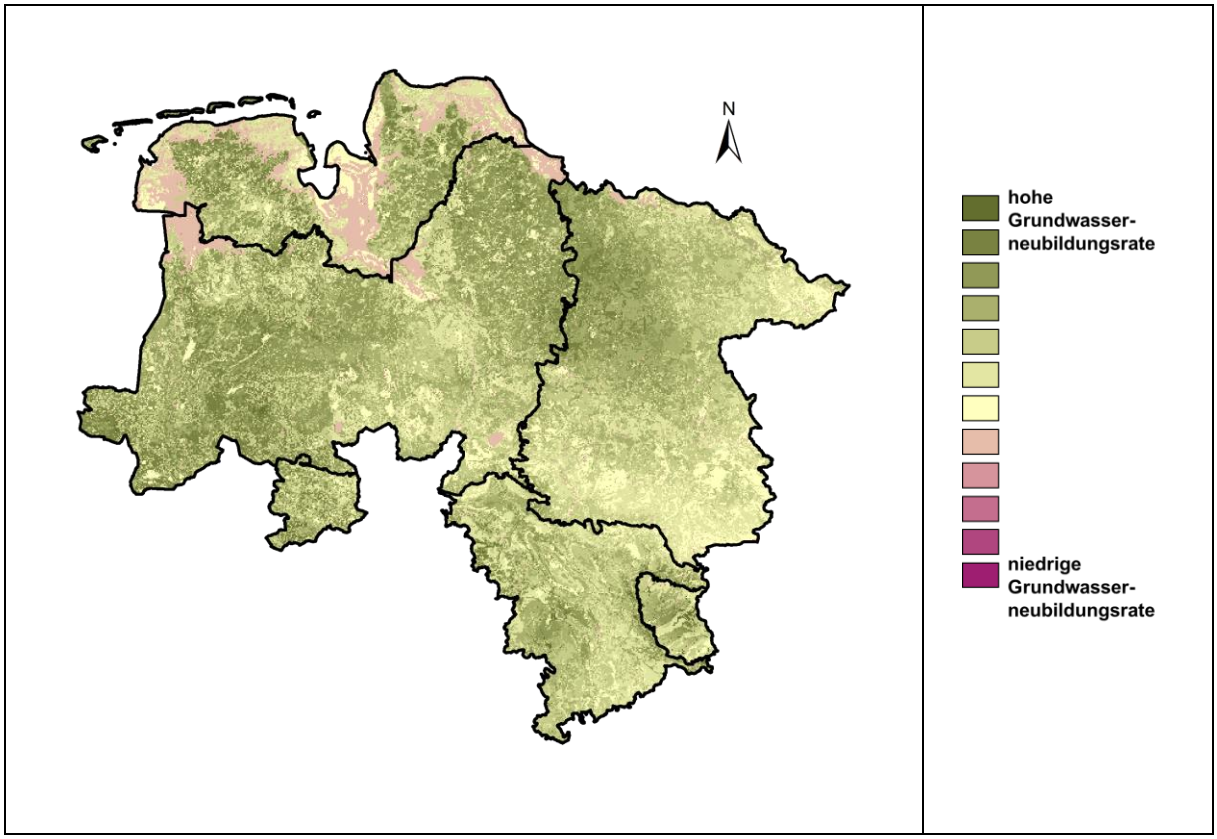


Abbildung 3-8: Mittlere Grundwasserneubildungsrate im Winterhalbjahr (November bis April) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

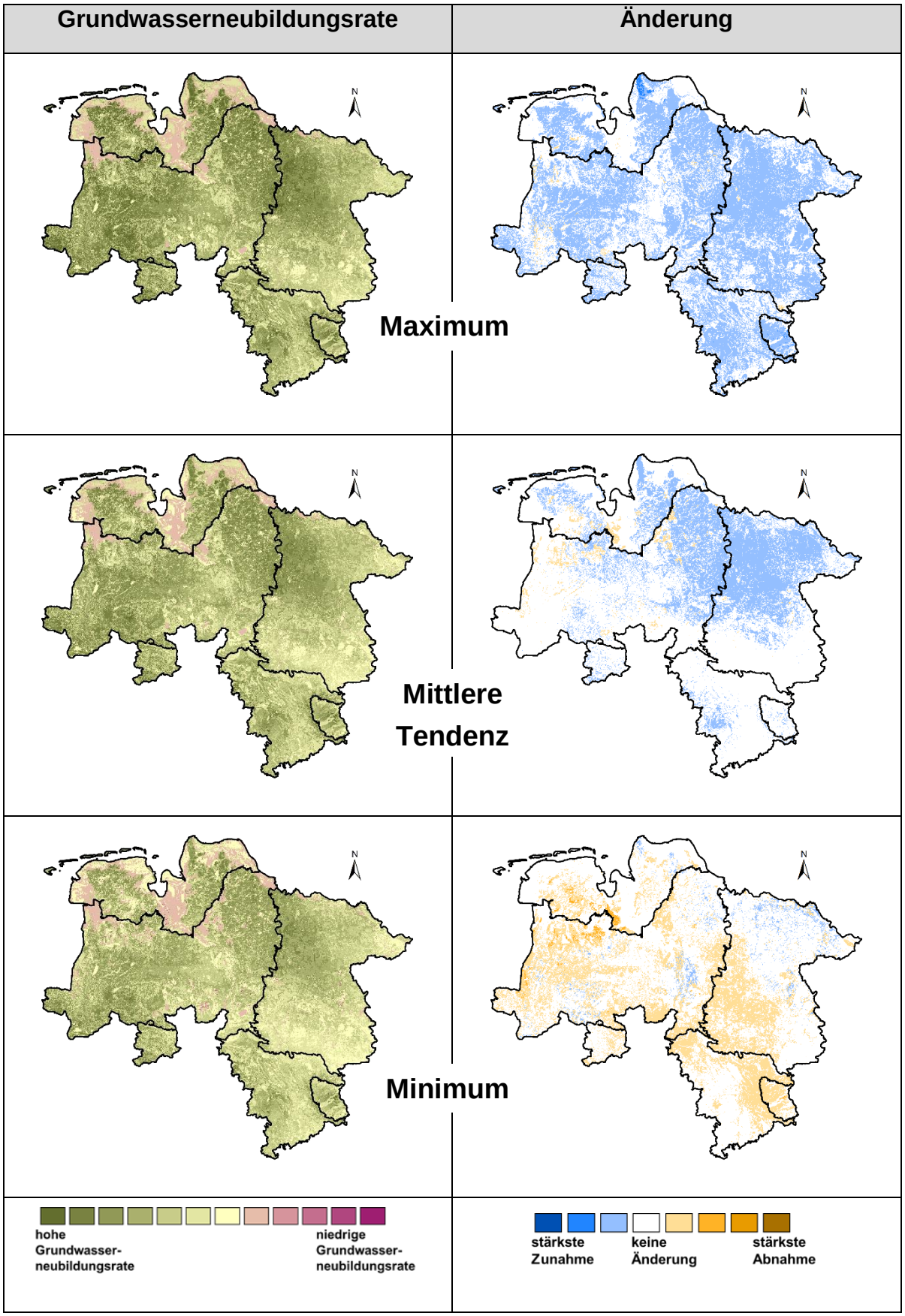


Abbildung 3-9: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der nahen Zukunft (2021-2050)

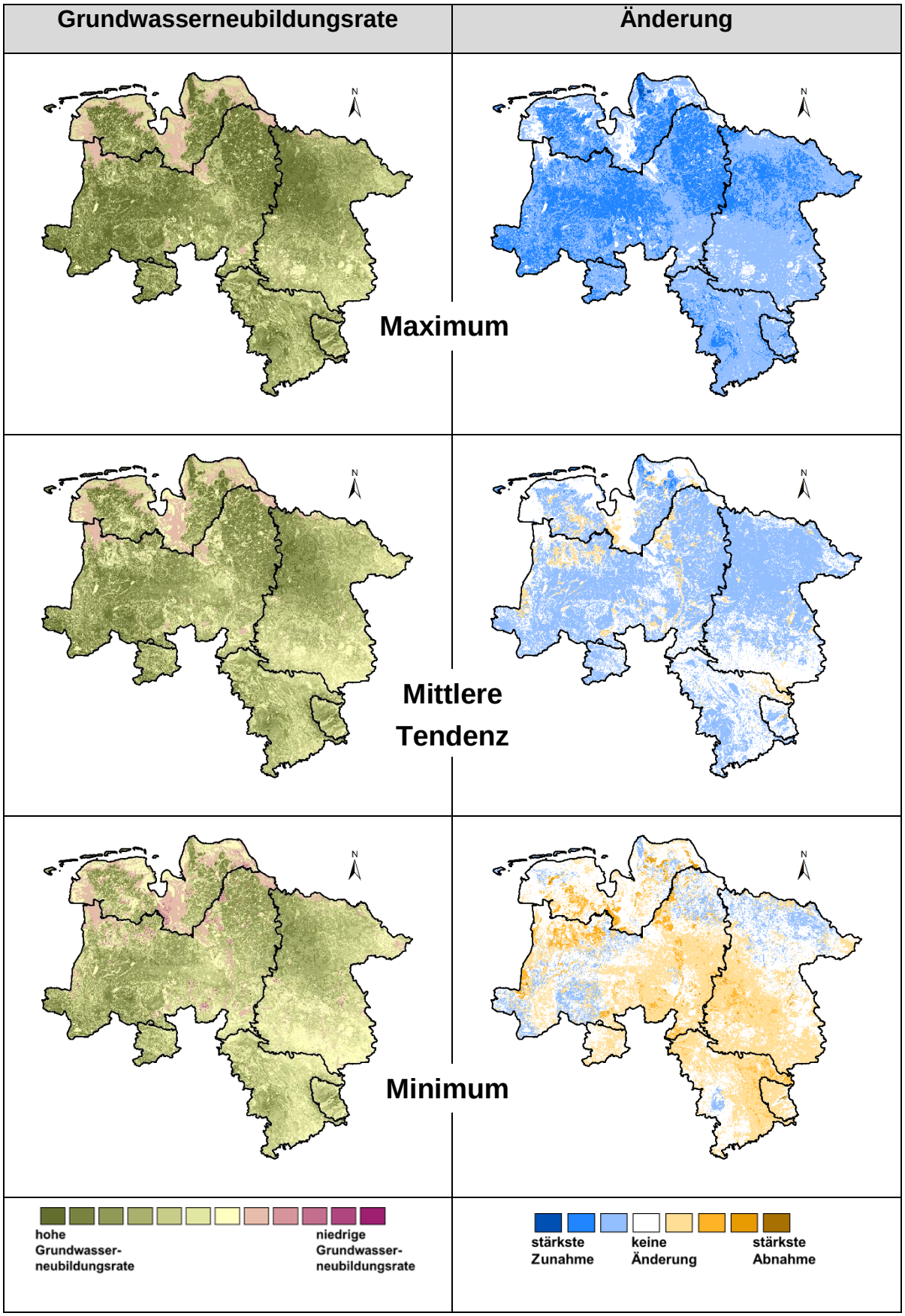


Abbildung 3-10: Mittlere Grundwasserneubildungsrate bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der fernen Zukunft (2071-2100)

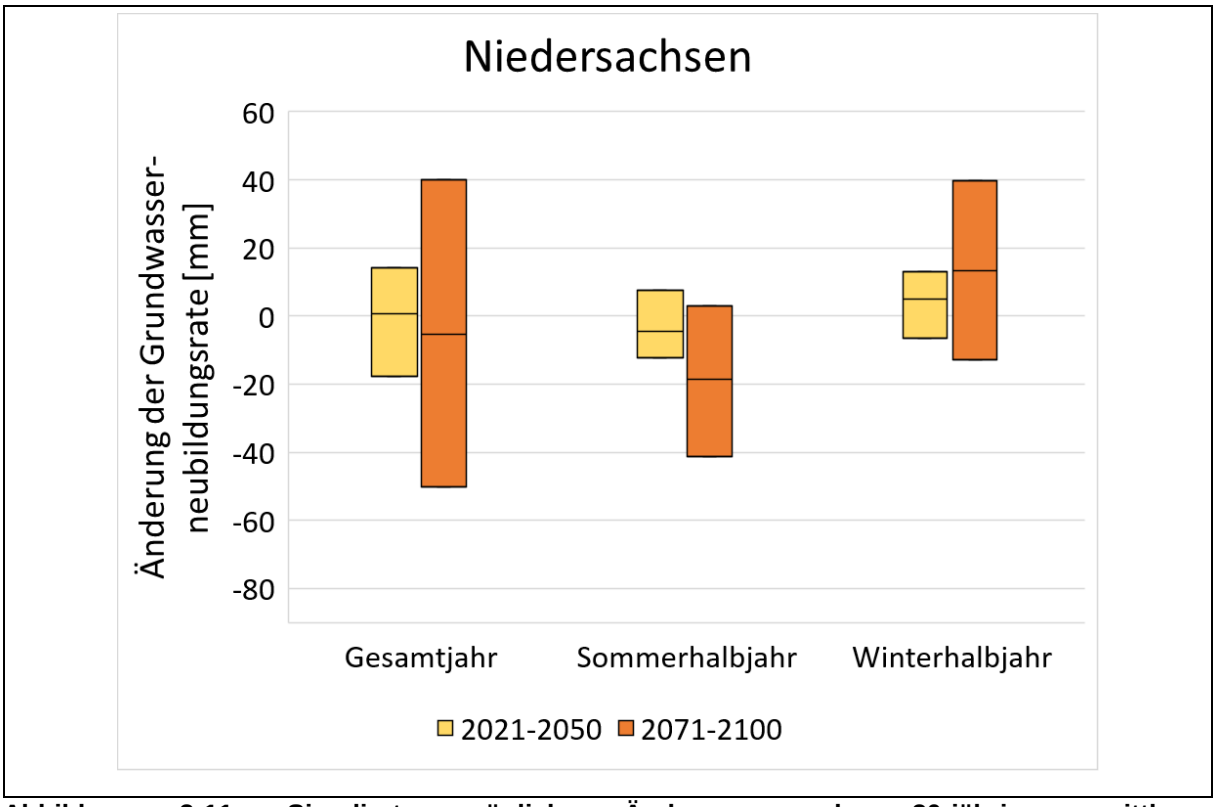


Abbildung 3-11: Simulierte mögliche Änderungen der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate des verwendeten Modell-Ensembles des RCP8.5-Szenarios für Niedersachsen. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der Änderungen über alle Rasterzellen in Bezug zum Referenzzeitraum. Betrachtet werden das gesamte Jahr sowie das Sommer- (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis April)

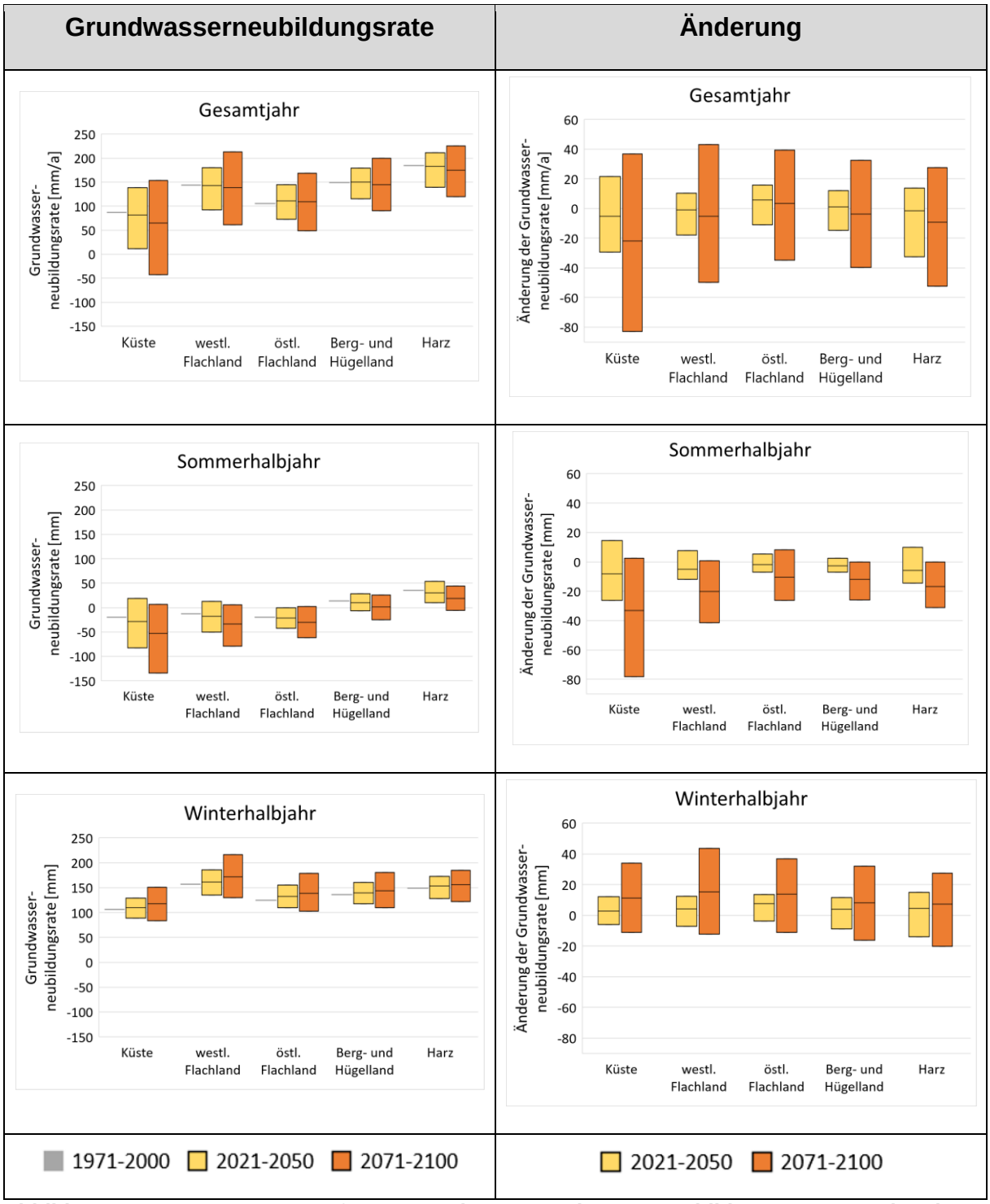


Abbildung 3-12: Zusammenfassung der Grundwasserneubildungsrate und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

3.1.3 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld

Gerade weil das System Grundwasser eher träge auf Klimaänderungen reagiert, ist es vor allem im Hinblick auf eine nachhaltige Trinkwasserversorgung wichtig, entsprechend dem Vorsorgeprinzip, vorrausschauend zu handeln. Durch Maßnahmen der Klimafolgenanpassung kann versucht werden, die Vulnerabilität, also Verwundbarkeit, des Systems „Grundwasser“ zu minimieren, und somit das Ausmaß und die Geschwindigkeit der negativen Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Grundwasserdargebot abzuschwächen.

Aufgrund der großen Unsicherheit bezüglich der Richtung und Intensität der Veränderungen ist es sinnvoll, die bereits heute angewendeten Maßnahmen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung in Zukunft auszubauen und durch weitere Anpassungsmaßnahmen zu ergänzen. Besonders geeignet sind sogenannte „No-Regret-Maßnahmen“, die auch dann einen Vorteil bringen, wenn die Auswirkungen der Klimaänderungen anders ausfallen als angenommen.

Die berechnete zukünftige Änderung der Grundwasserneubildung weist eine hohe Bandbreite auf und jedes Ergebnis innerhalb dieser Bandbreite besitzt die gleiche Wahrscheinlichkeit. Im Sinne eines vorausschauenden Umgangs mit der Ressource Grundwasser im Klimawandel ist es sinnvoll, den für den jeweiligen Sektor ungünstigsten Fall der Bandbreite zu betrachten. Zum Beispiel ist der Sektor der Trinkwassergewinnung mit einer hohen Sensitivität gegenüber der Klimawirkung Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser gekennzeichnet und sollte sich demnach am Minimum-Bereich der Ergebnisbandbreite, also an einem verringerten Grundwasserneubildungsniveau, orientieren. Vor allem, wenn es bereits in der Vergangenheit im Sommer zu Engpässen bei der Trinkwasserförderung gekommen ist, handelt es sich in diesem Fall bei Anpassungsmaßnahmen um die oben beschriebenen „No-Regret“-Maßnahmen.

Um zukünftigen Nutzungskonflikten vorzubeugen, müssen angepasste Grundwassermanagementstrategien entwickelt werden. Dazu gehört u.a. die gezielte Förderung der Grundwasserneubildung bzw. -anreicherung wie etwa die Bereitstellung von dezentralen Versickerungsflächen, die Anpassung der Landnutzung und ein möglicher Waldumbau zu Laubwald. Wenn es die lokalen Verhältnisse zulassen, sollte die Förderung der Grundwasseranreicherung auch in der regionalen und städtischen Flächenplanung berücksichtigt werden. Um eine Bebauung von vernässungsgefährdeten Bereichen zu vermeiden, sollte bei einer Neuinanspruchnahme von Flächen verstärkt auf ein zukünftiges Ansteigen der Grundwasseroberfläche geachtet werden. Zu einer Anpassung zählen auch die Weiterführung und ggf. der Ausbau eines flächendeckenden Grundwasser-Monitorings hinsichtlich der Anforderung zur Detektion klimabedingter Änderungen bei Grundwassermenge und -beschaffenheit.

3.2 Klimawirkungen im Themenfeld Oberflächengewässer

3.2.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes

Der Abfluss in den Oberflächengewässern resultiert aus dem Niederschlag, der auf die Erdoberfläche fällt und von dort aus direkt oberflächlich oder nach der Infiltration in den Boden innerhalb der ungesättigten Bodenzone bzw. über das Grundwasser der Schwerkraft folgend lateral dem Vorfluter zufließt. Teilweise kann der Abfluss auch durch Schneeschmelzprozesse gebildet bzw. verstärkt werden. Durch diese Prozesse ergeben sich auch enge Verflechtungen bzw. Wechselwirkungen mit den Themenfeldern Grundwasser (z.B. Grundwasserneubildung bzw. -zehrung bei Niedrigwasserführung) und Boden (z.B. über die potenzielle Erosionsgefährdung und das standörtliche Verlagerungsrisiko bei Hochwasser). Der abflusswirksame Niederschlagsanteil ist im Wesentlichen von der Verdunstung an der Erd- und Vegetationsoberfläche (Evaporation und Interzeption) sowie durch Pflanzen (Transpiration) abhängig. Seine zeitliche Abflusskonzentration ist vor allem durch die Boden- und Geländebeschaffenheit bedingt. In Niedersachsen fallen im Mittel (1951-2015) rund 820 mm Niederschlag (nach Richter-Korrektur) im Jahr, davon verdunsten potenziell etwa 540 mm (~66%), so dass etwa 280 mm für den (oberirdischen und unterirdischen) Abfluss zur Verfügung stehen.

Niedersachsen umfasst ca. 40.000 Fluss-km. Davon liegen jeweils rund ein Viertel in den Regionen der Küste und des östlichen Flachlandes, etwas weniger als die Hälfte im westlichen Flachland, und der Rest verteilt sich auf das Berg- und Hügelland bzw. den Harz. Zu den bedeutendsten Vorflutern in Niedersachsen gehören die Ems, Weser und Elbe sowie ihre jeweiligen Nebengewässer. Besonders zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Risikogewässer entsprechend der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (2007/60/EG) wie Vechte, Hase, Hunte, Große Aue, Wümme, Ilmenau sowie Aller, Leine und Oker.

Flüsse erfüllen vielfältige Aufgaben. Sie dienen u.a. als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als Wasserstraße für den Verkehr, werden für Freizeitaktivitäten genutzt, stellen Wasser für Industrie und Energiegewinnung zur Verfügung und leiten große und extreme Niederschläge als Hochwasser ab. Vor allem der letztgenannte Aspekt beinhaltet besondere Herausforderungen, wenn es um die Risikoabschätzung und damit verbundene Schadenspotenziale in und an Gewässern geht. Aber auch extreme Trocken- und Niedrigwasserperioden können erhebliche Schäden verursachen, sei es z.B. durch Ernteausfälle in der Landwirtschaft, durch Produktionseinbußen in der Industrie aufgrund von fehlendem Kühl- oder Brauchwasser, durch Behinderungen der Binnenschifffahrt oder durch die Beeinträchtigung von Ökosystemen. Aus diesem Grund werden im Folgenden ausgewählte Klimawirkungen im Themenfeld Oberflächenabfluss auf Basis verschiedener Kenngrößen eingehender betrachtet und ihre zukünftigen möglichen Veränderungen unter dem Einfluss des „weiter-wie-bisher“-Szenarios analysiert. Hierzu zählen:

- der mittlere Durchfluss
- der Hochwasserabfluss
- die Hochwasserhäufigkeit
- die Sturzfluten
- der Niedrigwasserabfluss
- die Talsperrenbewirtschaftung

Zu den Entwicklungen einiger dieser Größen in der Vergangenheit kann festgestellt werden, dass in den letzten rund 50 Jahren die mittleren Abflüsse in Niedersachsen während der Sommermonate (Juni – August) deutlich abnehmende Tendenzen aufgewiesen haben. Im gleichen Zeitraum haben die Abflussmengen bei Niedrigwasser im östlichen Niedersachsen ebenfalls abgenommen, besonders deutlich im Einzugsgebiet von Aller-Leine-Oker. Die Jahreshöchstabflüsse (Abflussscheitel) haben im Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) im zentralen Niedersachsen deutlich abgenommen, während sie im Bereich von Harz und Heide nur geringfügige Veränderungen zeigten. Die Häufigkeit von (kleinen und mittleren) Hochwasserereignissen hat im Sommerhalbjahr im westlichen Niedersachsen sowie im Bereich der Heide und des Harzes bzw. südlichen Harzvorlandes tendenziell abgenommen, im Winterhalbjahr gab es dagegen regional Zunahmen. Diese Erkenntnisse basieren vor allem auf Untersuchungen im Zuge des Projektes KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) (NLWKN, 2017; NLWKN, 2019). Bedeutende Hochwasserereignisse traten in Niedersachsen in den letzten Jahren an der Elbe (2002, 2006, 2013) sowie an der Innerste (2007) und Oker / Innerste (2013 und 2017) auf. Auffällige Niedrigwasserperioden gab es in Niedersachsen an verschiedenen Flüssen vor allem 2003 und 2018.

3.2.2 Klimawirkung mittlerer Durchfluss

3.2.2.1 Wirkungsketten

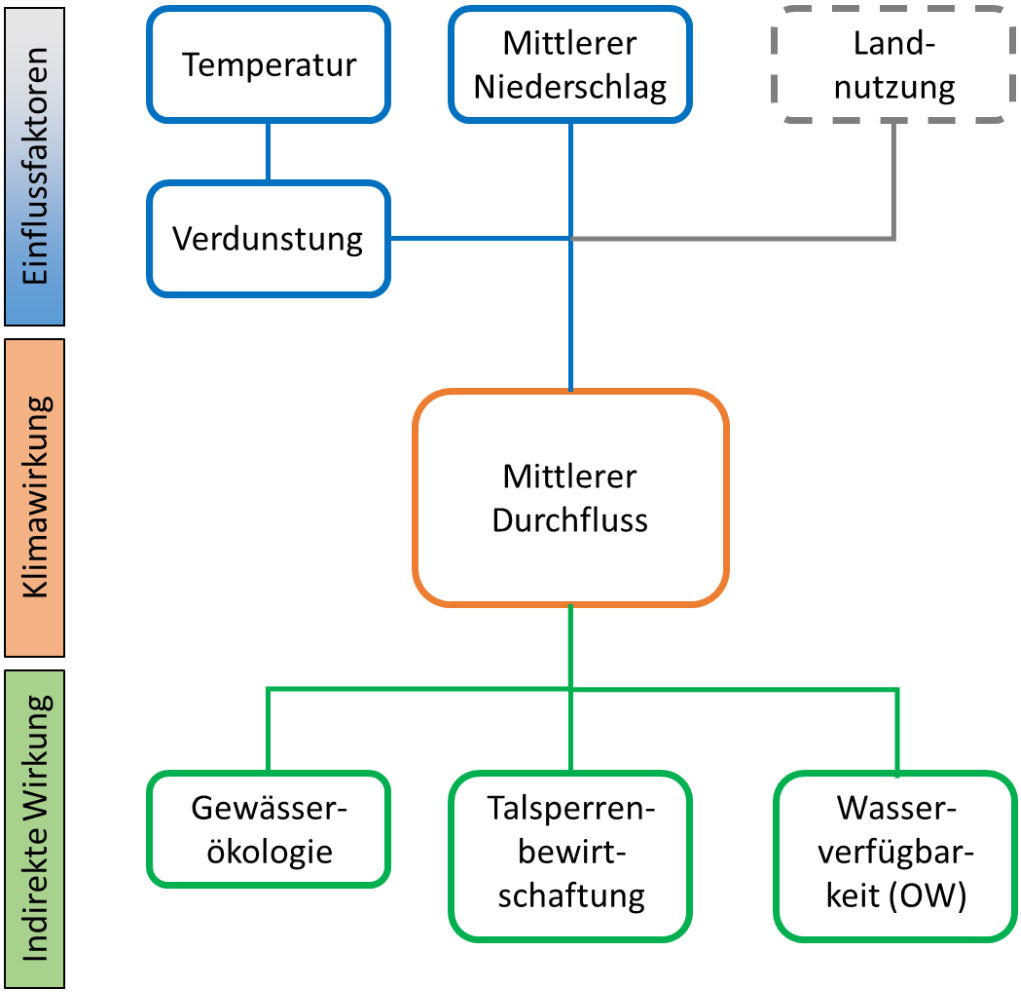


Abbildung 3-13: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung mittlerer Durchfluss im Themenfeld Oberflächengewässer

Der mittlere Durchfluss beschreibt die durchschnittlichen Abflussverhältnisse in einem Fließgewässer innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, z.B. Monate, Halbjahre oder Jahre. In diesen Zeiträumen kann es zu einem Wechsel zwischen (extrem) nassen und (extrem) trockenen Bedingungen kommen, wobei kurzzeitige Extremereignisse im Normalfall nur einen geringen Einfluss auf den ermittelten mittleren Durchfluss über einen längeren Zeitraum haben. Im Wesentlichen wird diese Klimawirkung durch langandauernde, charakteristische klimatische Bedingungen geprägt. Hierzu zählt vor allem der Niederschlag, der entweder oberflächlich oder, nach der Versickerung in den Boden, als Zwischen- oder Basisabfluss dem Gewässer zufließt. Weiterhin spielt auch die Verdunstung eine wichtige Rolle, die durch verschiedene klimatische Einflüsse geprägt wird, vor allem aber auch durch die vorherrschende Vegetation. Des Weiteren kann sich auch das Relief auf den mittleren Durchfluss auswirken, da je nach Neigung des Geländes mehr oder weniger Niederschlag

oberflächlich abfließt oder durch Versickerung dem Grundwasser zufließen kann. Die mittleren Abflussverhältnisse beeinflussen wiederum weitere, nachfolgende Faktoren. Hierzu zählen z.B. die Gewässerökologie, also die Flora und Fauna der Fließgewässer, die u.a. durch das vorherrschende Abflussregime geprägt werden. Weiterhin hängt die Bewirtschaftung von Talsperren wesentlich vom Mittelwasserabfluss ab, da Bewirtschaftungsstrategien und Nutzungsarten bzw. –intensitäten (z.B. Energiegewinnung, Trinkwasserspeicher, Freizeit, Niedrigwasseraufhöhung) sich vor allem nach der durchschnittlich abfließenden Wassermenge richten. Gleiches gilt auch für die Wasserverfügbarkeit im Zusammenhang mit Nutzungsansprüchen bzgl. Bewässerung, Wasserkraftnutzung sowie Brauch- bzw. Kühlwasser am Gewässer.

3.2.2.2 Indikatoren und Operationalisierung

Als Indikator zur Beschreibung der mittleren Durchflussverhältnisse bzw. Quantifizierung der Durchflussmengen dient an dieser Stelle die mittlere Abflusshöhe, die auch als abflusswirksamer Niederschlagsanteil innerhalb des jeweils betrachteten Einzugsgebietes definiert werden kann. Sie wird im Untersuchungsgebiet an jedem Pegel über den Mittelwasserabfluss (MQ) sowie das zugehörige Einzugsgebiet bestimmt. Dazu wird das MQ in die entsprechende Abflusshöhe umgerechnet, wie am Beispiel von Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Umrechnung der Abflussmenge 35 m³/s in die entsprechende Abflusshöhe am Beispiel eines fiktiven Einzugsgebietes (EZG) der Größe 1000 km²

Abfluss = 35 m³/s (bei 1000 km² EZG) ~ Abflusshöhe = ?? mm/d

$$35\frac{m^3}{s} = 35 * 86.400\ \frac{m^3}{d},\ \text{für ein EZG mit } 1.000\ km^2 \text{ gilt dann:}$$

$$\frac{35 * 86.400}{1.000\ (km^2)}\frac{m^3}{d} = \frac{35 * 86.400}{1.000.000.000\ (m^2)}\frac{m^3}{d} = \frac{35 * 86.400 * 1.000}{1.000.000.000}\frac{mm}{d}$$

$$= \frac{3.024.000}{1.000.000}\frac{mm}{d} = 3{,}024\frac{mm}{d}$$

35 m³/s (bei 1000 km² EZG) ~ 3 mm/d

Die betrachteten Durchflussmengen an den Pegeln stammen aus den Simulationen mit den hydrologischen Modellen HBV-IWW und PANTA RHEI. Ein fachlich begründeter Schwellenwert für die größte bzw. kleinste Abflusshöhe wird hierbei nicht festgelegt. Die Klasseneinteilung ergibt sich daher aus den Bandbreiten der minimalen bis maximalen Abflusshöhen an den Pegeln. Das Gleiche gilt für die Änderungssignale in der Zukunft.

Tabelle 3-3: Klasseneinteilung der Abflusshöhe des mittleren Durchflusses (MQ) bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Abflusshöhe [mm] MQ
	> 3,675 bis 4,200
	> 3,150 bis 3,675
	> 2,605 bis 3,150
	> 2,100 bis 2,605
	> 1,575 bis 2,100
	> 1,050 bis 1,575
	> 0,525 bis 1,050
	≤ 0,525

Legende	Änderung [%]
	> +85
	+65 bis +85
	+45 bis +65
	+25 bis +45
	+5 bis +25
	-5 bis +5
	-25 bis -5
	-45 bis -25
	-65 bis -45
	-85 bis -65
	< -85

3.2.2.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Darstellungen der räumlich differenzierten Analyseergebnisse für die **Klimawirkung** der Abflusshöhe des mittleren Durchflusses in Abbildung 3-14 bis Abbildung 3-22 sowie die Zusammenfassung in Abbildung 3-23 zeigen, dass die größten absoluten Abflusshöhen bei mittleren Abflussverhältnissen überwiegend im Harz vorkommen. Diese Dominanz tritt unabhängig vom Zukunftszeitraum auf, ist im Winterhalbjahr jedoch stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr. Auch das Berg- und Hügelland hebt sich in diesem Zusammenhang noch geringfügig von den anderen Regionen ab, wenn auch nicht so deutlich wie der Harz. Die anderen Regionen weisen dagegen verhältnismäßig geringe Abflusshöhen beim mittleren Durchfluss auf. Dieses räumliche Muster ist tendenziell unabhängig vom Abflusshalbjahr und setzt sich grundsätzlich auch in der nahen und fernen Zukunft unter allen Szenarien (schwaches, mittleres, starkes Wandelszenario) weiter fort. Die größten mittleren Abflusshöhen treten in allen Regionen grundsätzlich im Winterhalbjahr auf, bedingt u.a. durch verstärkende Schneeschmelzprozesse und geringere Verdunstungsraten.

Die **Änderungssignale** deuten im Harz fast immer auf geringe Abnahmen unter dem schwachen Szenario, die in der fernen Zukunft meist noch deutlicher ausgeprägt sind, und auf Zunahmen im starken Szenario. Die anderen Regionen unterscheiden sich nur wenig. Sie

zeigen im mittleren und starken Szenario Zunahmen, die in der fernen Zukunft deutlicher ausgeprägt sind als in der nahen Zukunft. Hierbei treten die Zunahmen im Flachland und an der Küste etwas deutlicher hervor als im Berg- und Hügelland. Außerdem zeigt das Winterhalbjahr insgesamt etwas stärkere Zunahmen als das Sommerhalbjahr.

Die **Bedeutung** der zukünftigen Veränderungen ist für alle Regionen als insgesamt eher gering bis mittel zu bezeichnen. Die Abnahmen der Abflusshöhen im Harz unter dem schwachen bzw. mittleren Szenario im Sommerhalbjahr könnten die vorhandenen Gewässerökosysteme sowie die Bewirtschaftung der Talsperren (unter den Aspekten der Trinkwasserversorgung und Energiegewinnung) ggf. vor neue Herausforderungen stellen. Auch die deutlichen Zunahmen der Abflüsse im gesamten Untersuchungsgebiet unter dem starken Szenario, vor allem in der fernen Zukunft, könnten ggf. die Ausgangssituation bei drohenden Hochwasserlagen verschärfen und die Anpassung von regionalen Vorsorge- und Schutzmaßnahmen notwendig machen.

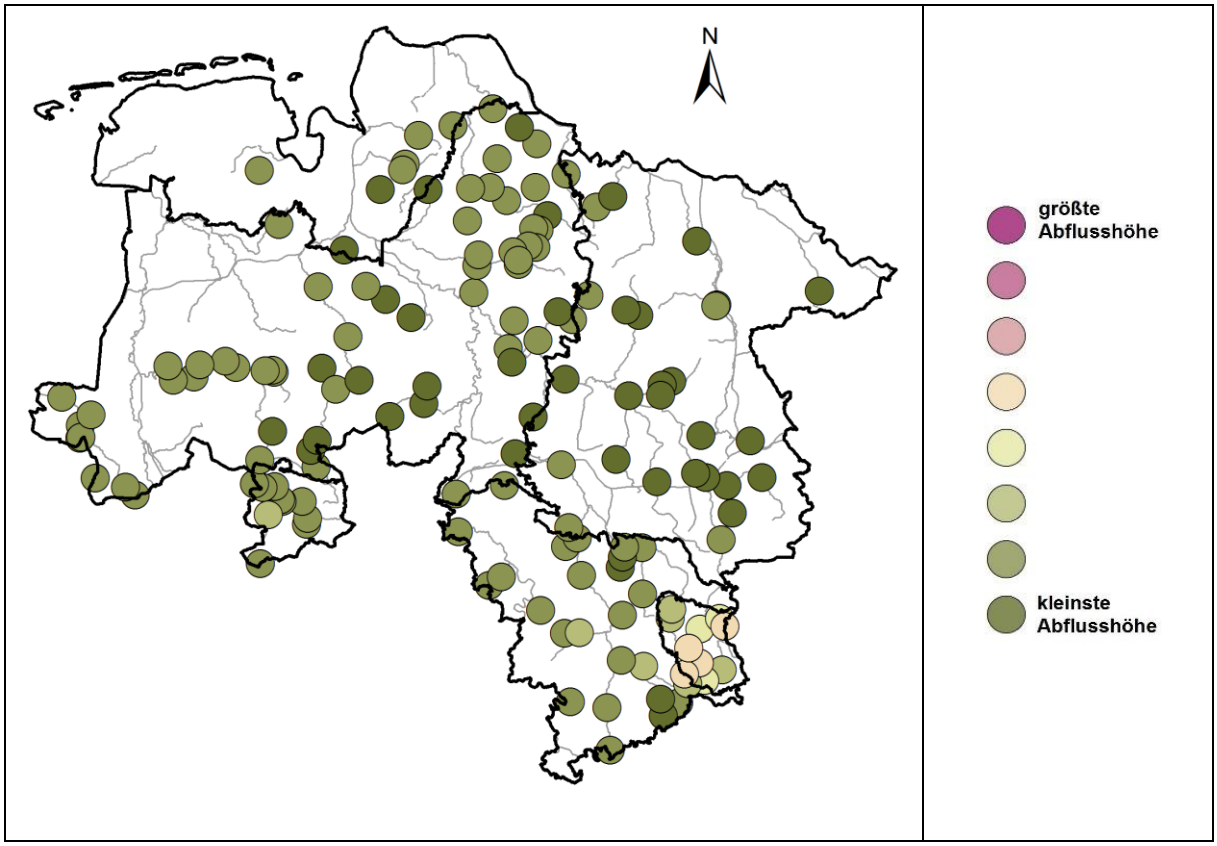


Abbildung 3-14: Abflusshöhe des mittleren Durchflusses (MQ) im Gesamtjahr (November bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

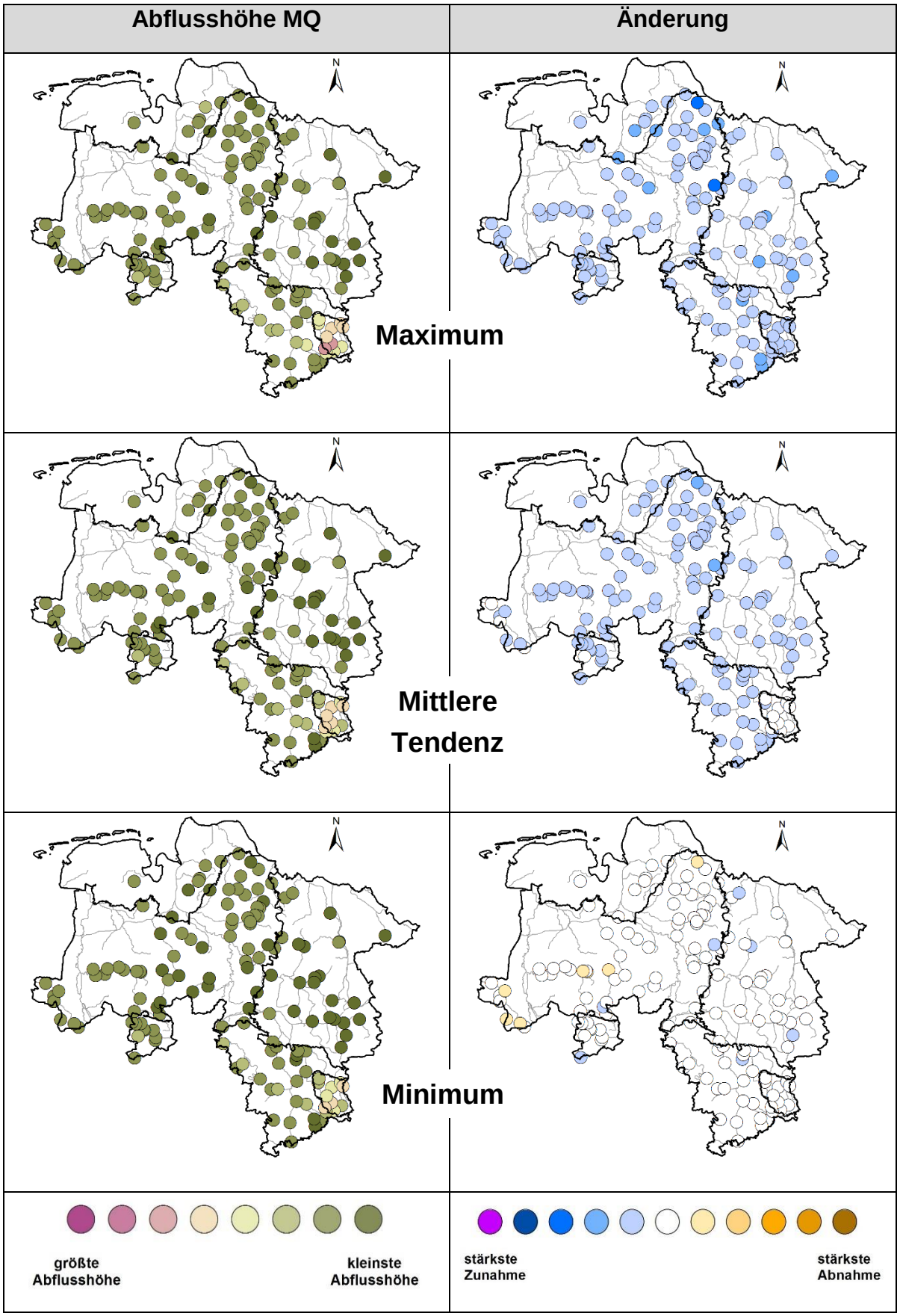


Abbildung 3-15: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

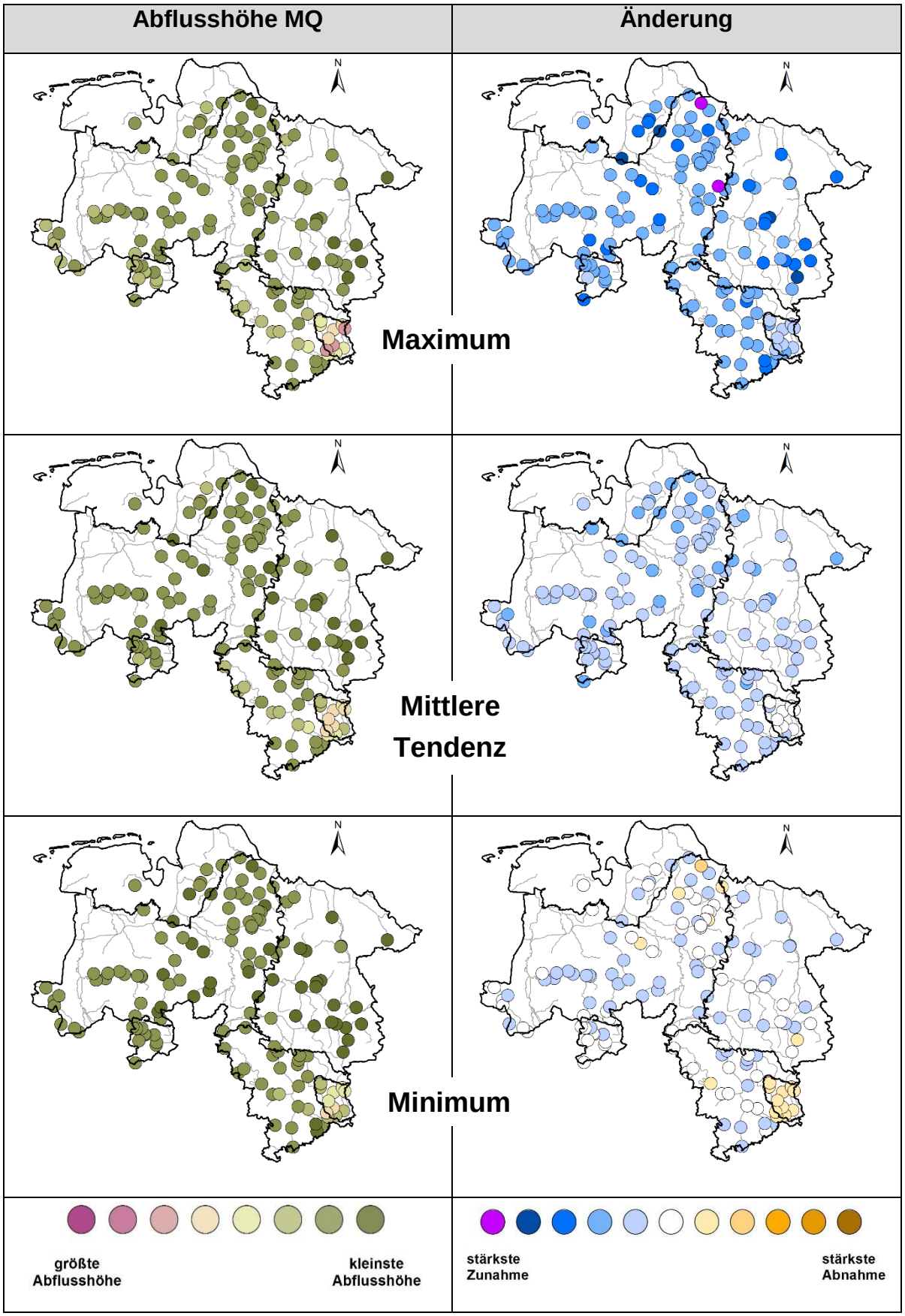


Abbildung 3-16: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

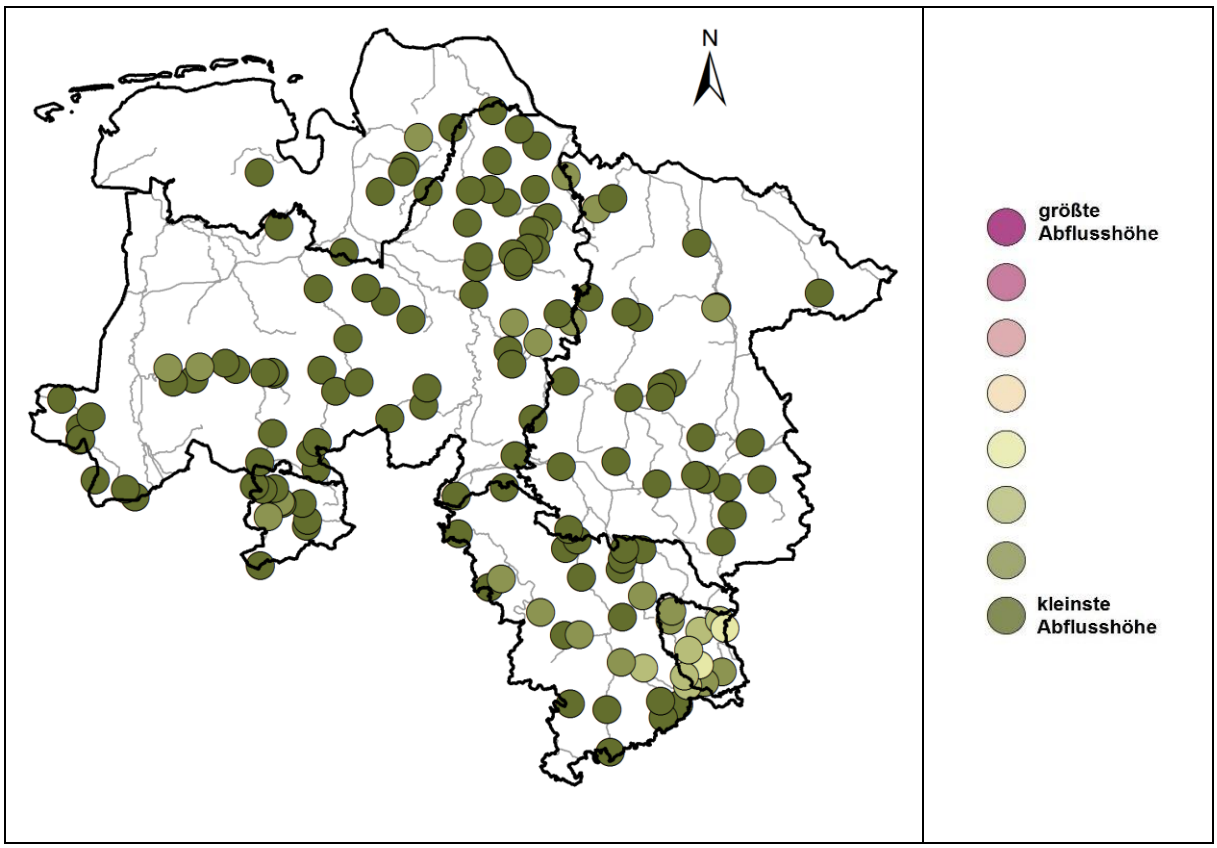


Abbildung 3-17: Abflusshöhe des mittleren Durchflusses (MQ) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

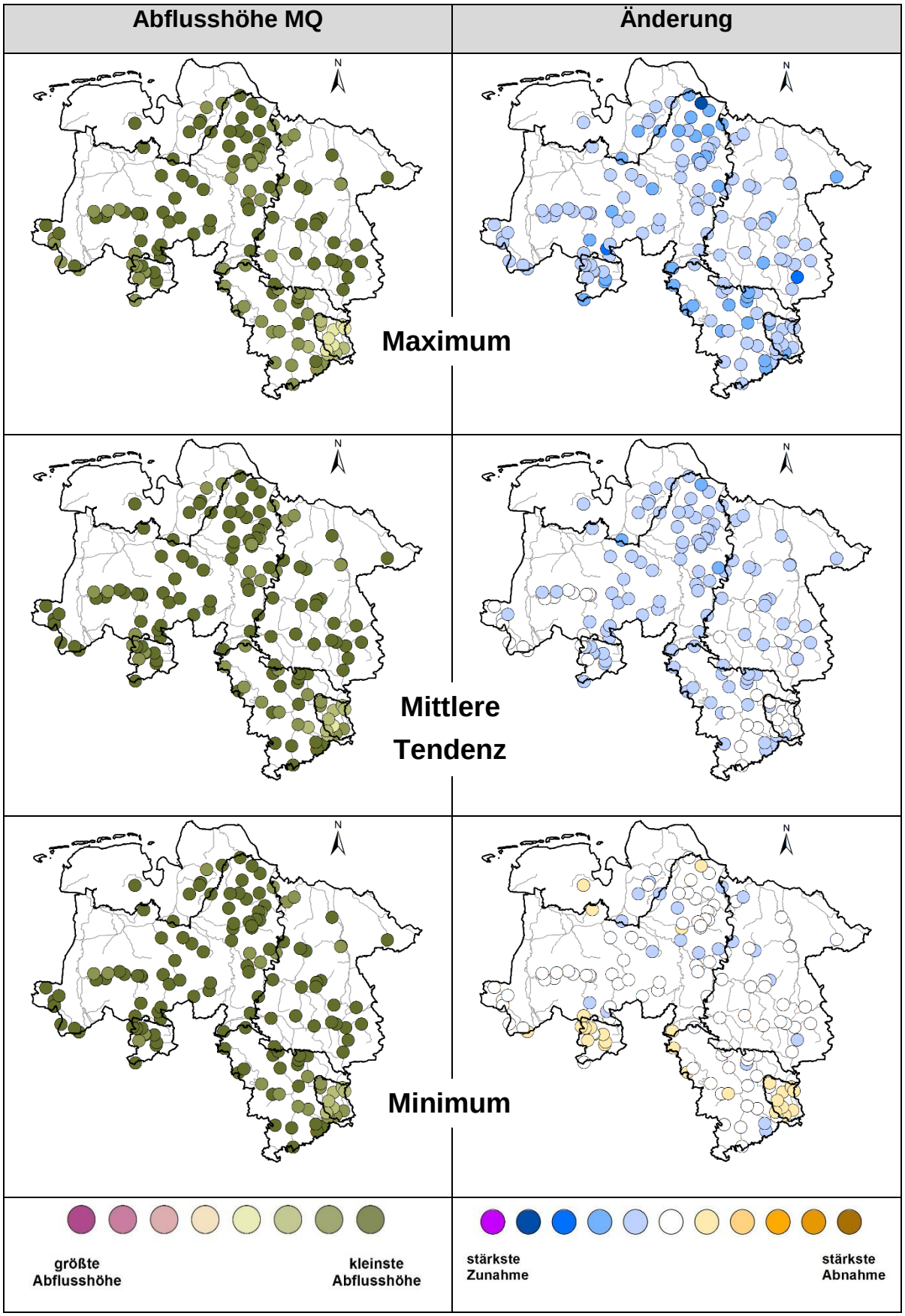


Abbildung 3-18: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

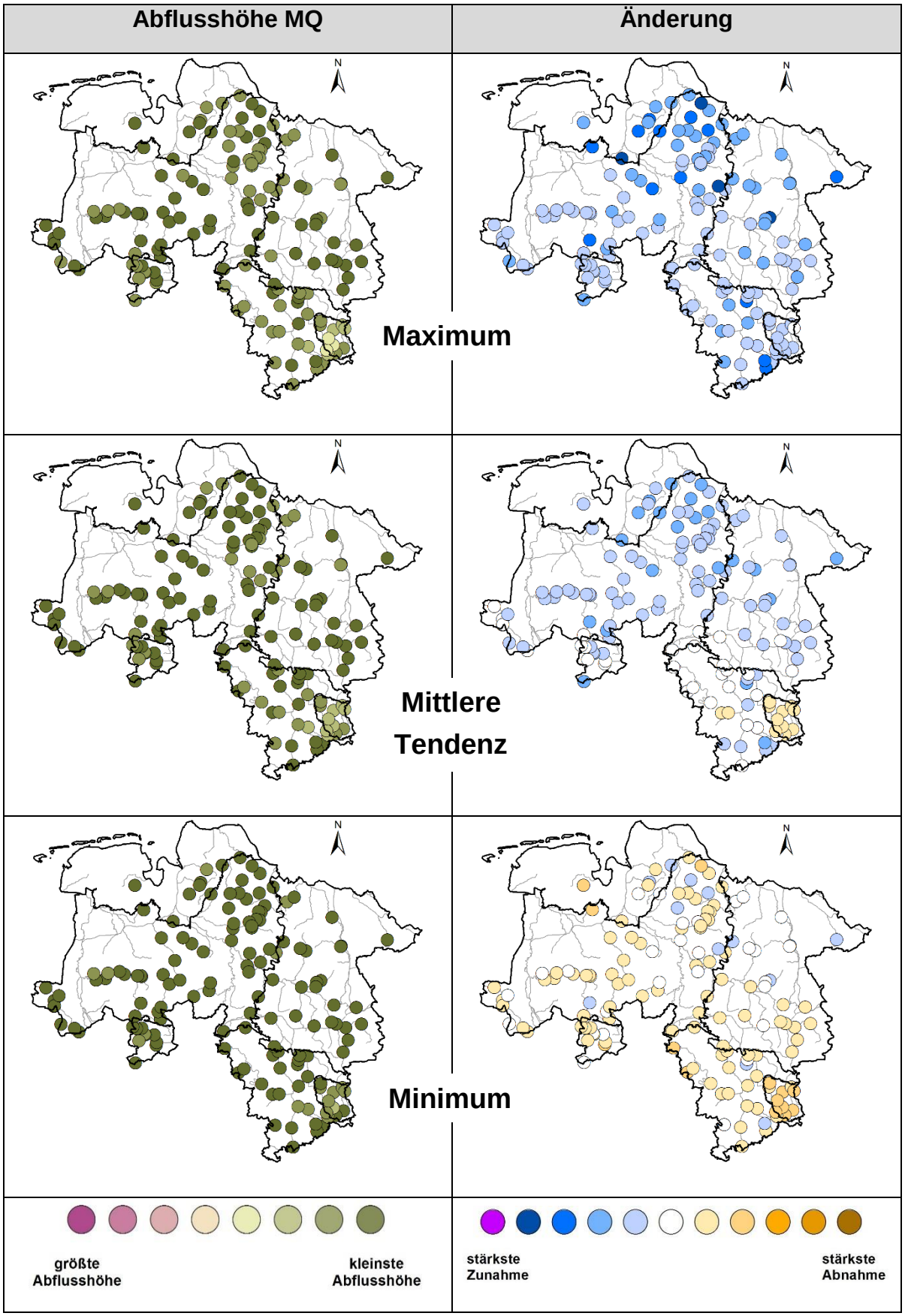


Abbildung 3-19: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

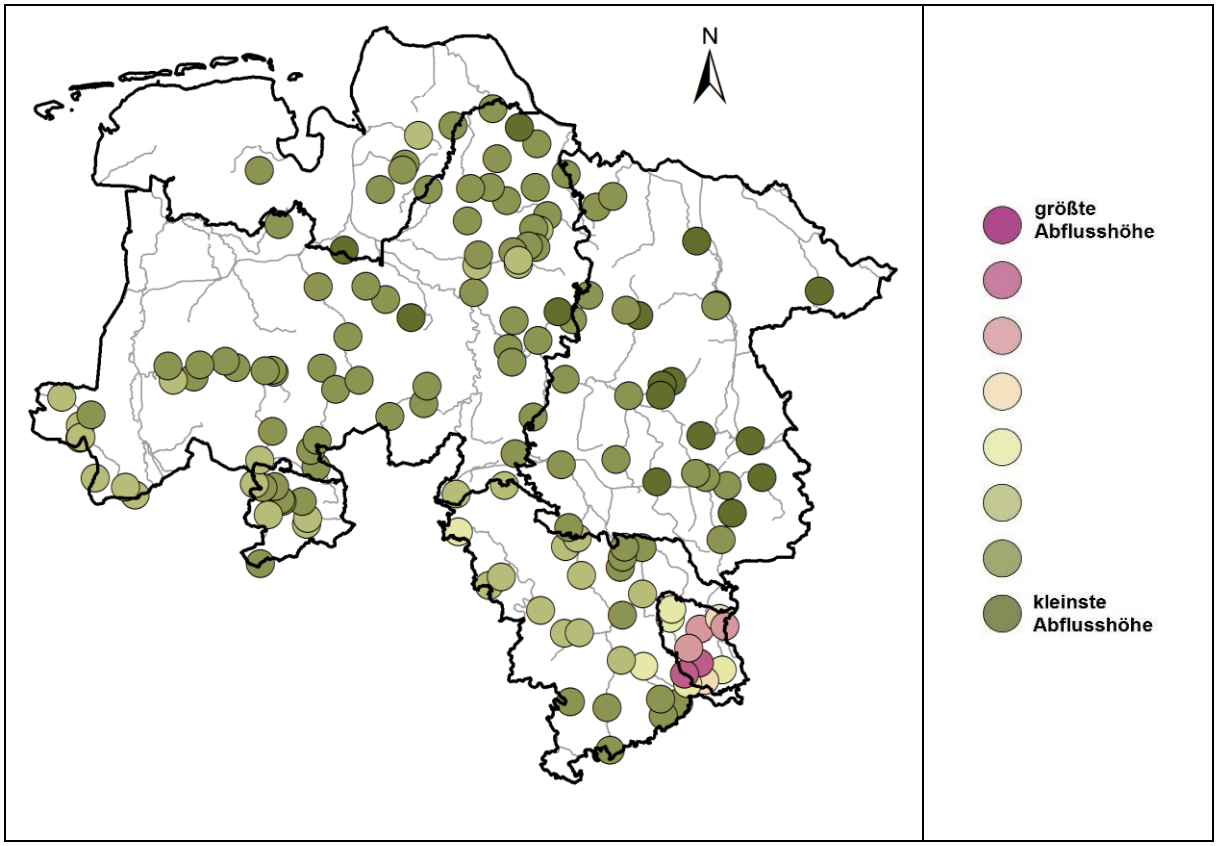


Abbildung 3-20: Abflusshöhe des mittleren Durchflusses (MQ) im Winterhalbjahr (November bis April) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

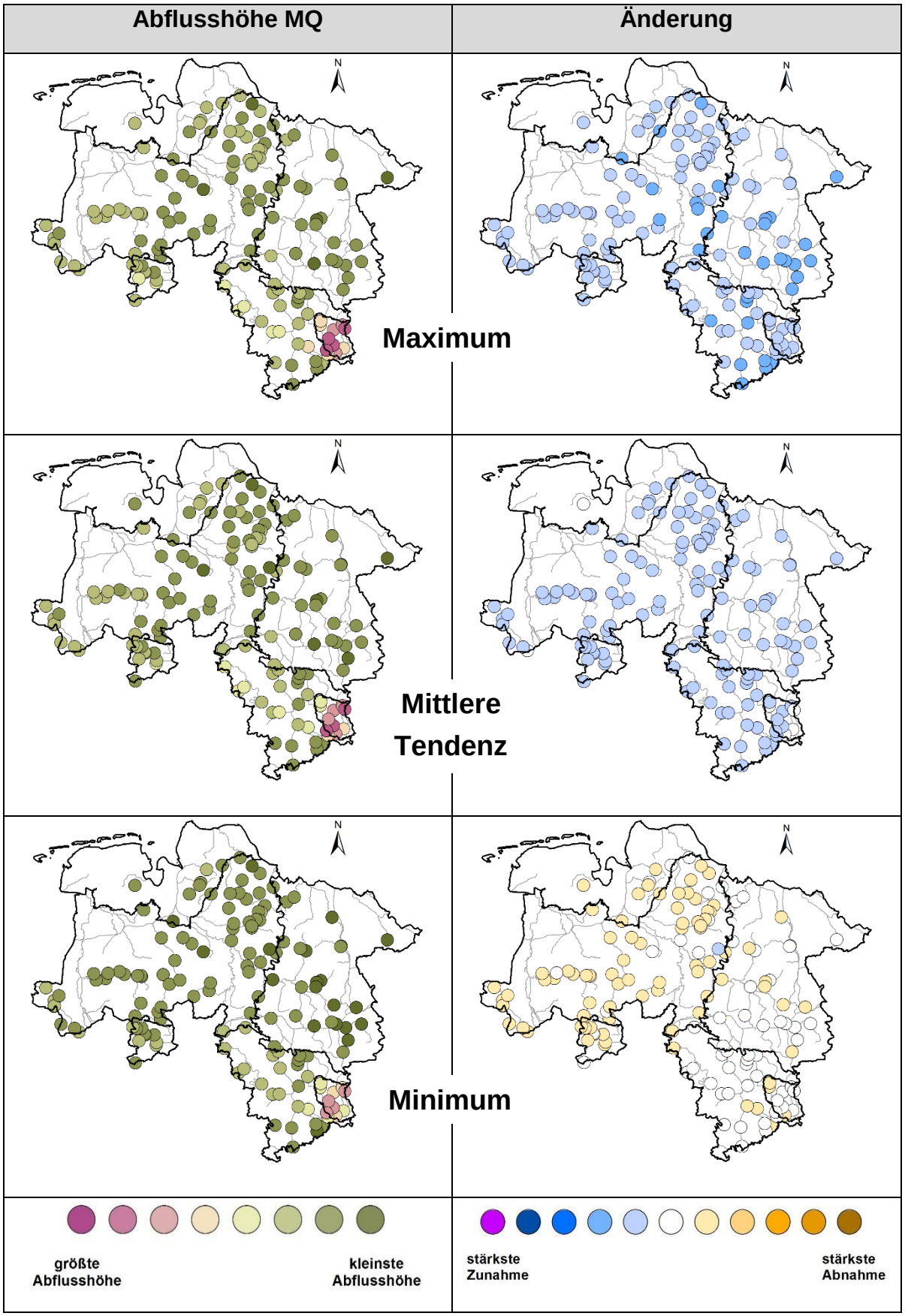


Abbildung 3-21: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der nahen Zukunft (2021-2050)

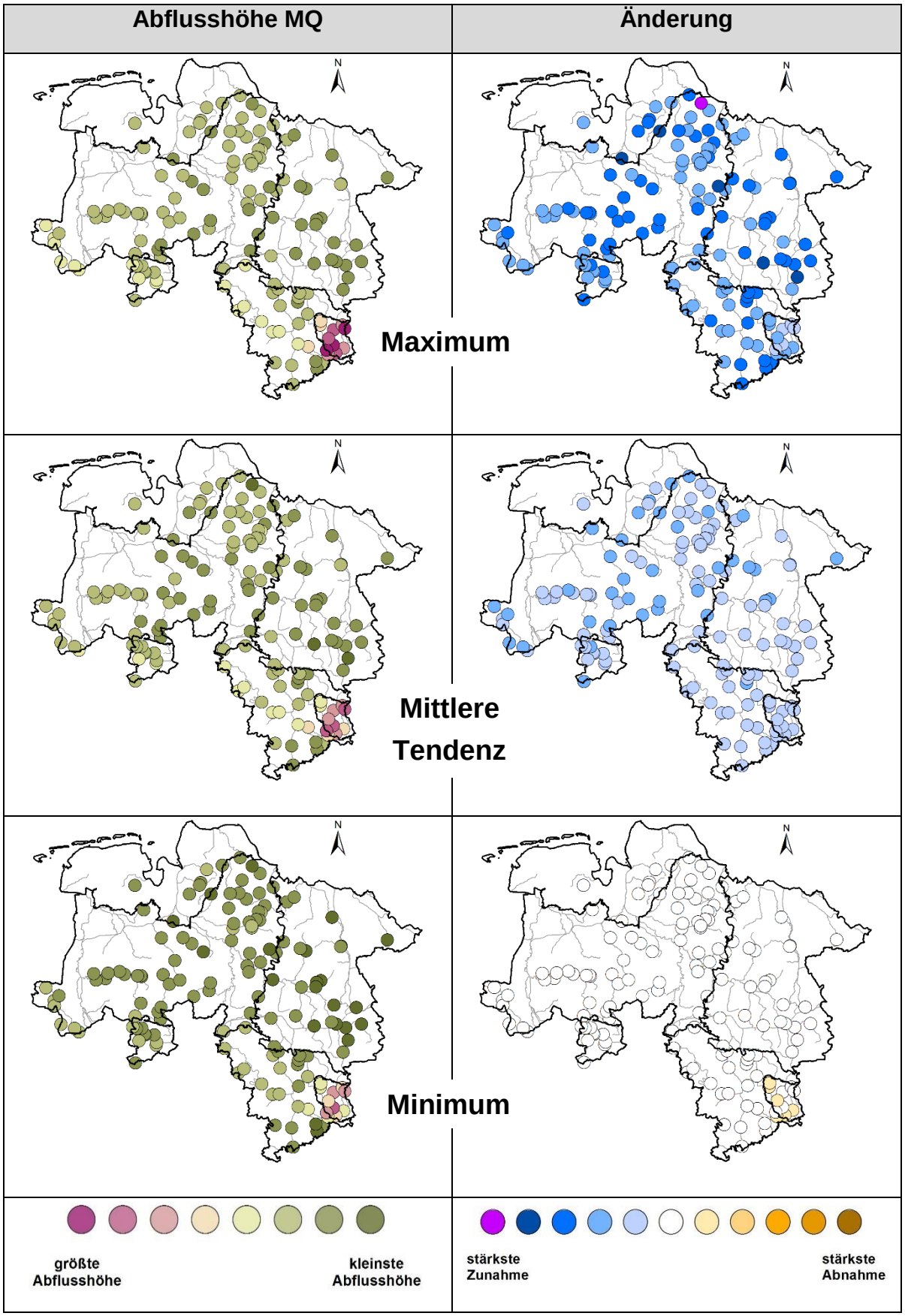


Abbildung 3-22: Abflusshöhe MQ bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der fernen Zukunft (2071-2100)

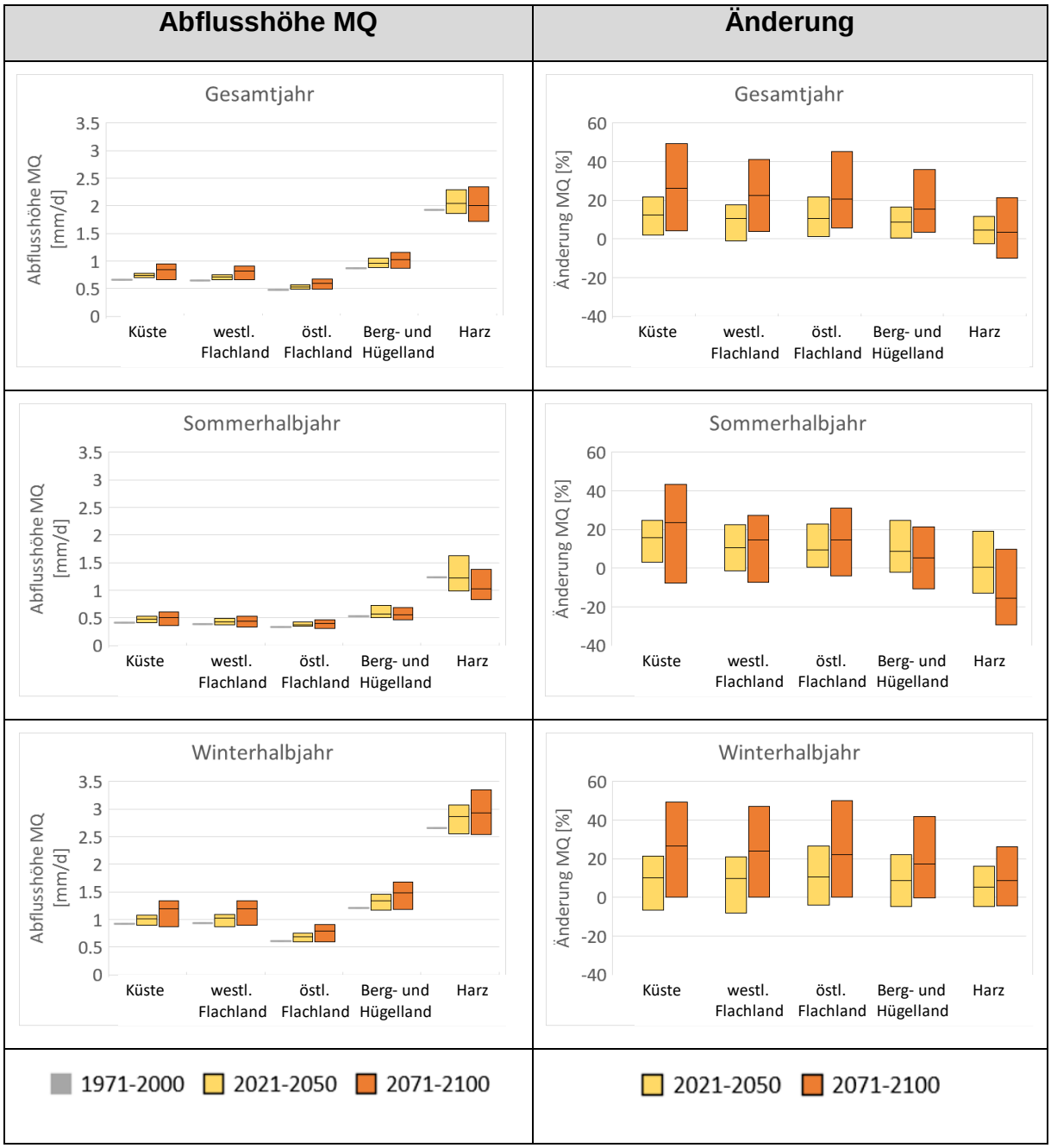


Abbildung 3-23: Zusammenfassung der Abflusshöhe des mittleren Abflusses (MQ) und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

3.2.3 Klimawirkung Flusshochwasser (Scheitelabfluss)

3.2.3.1 Wirkungsketten

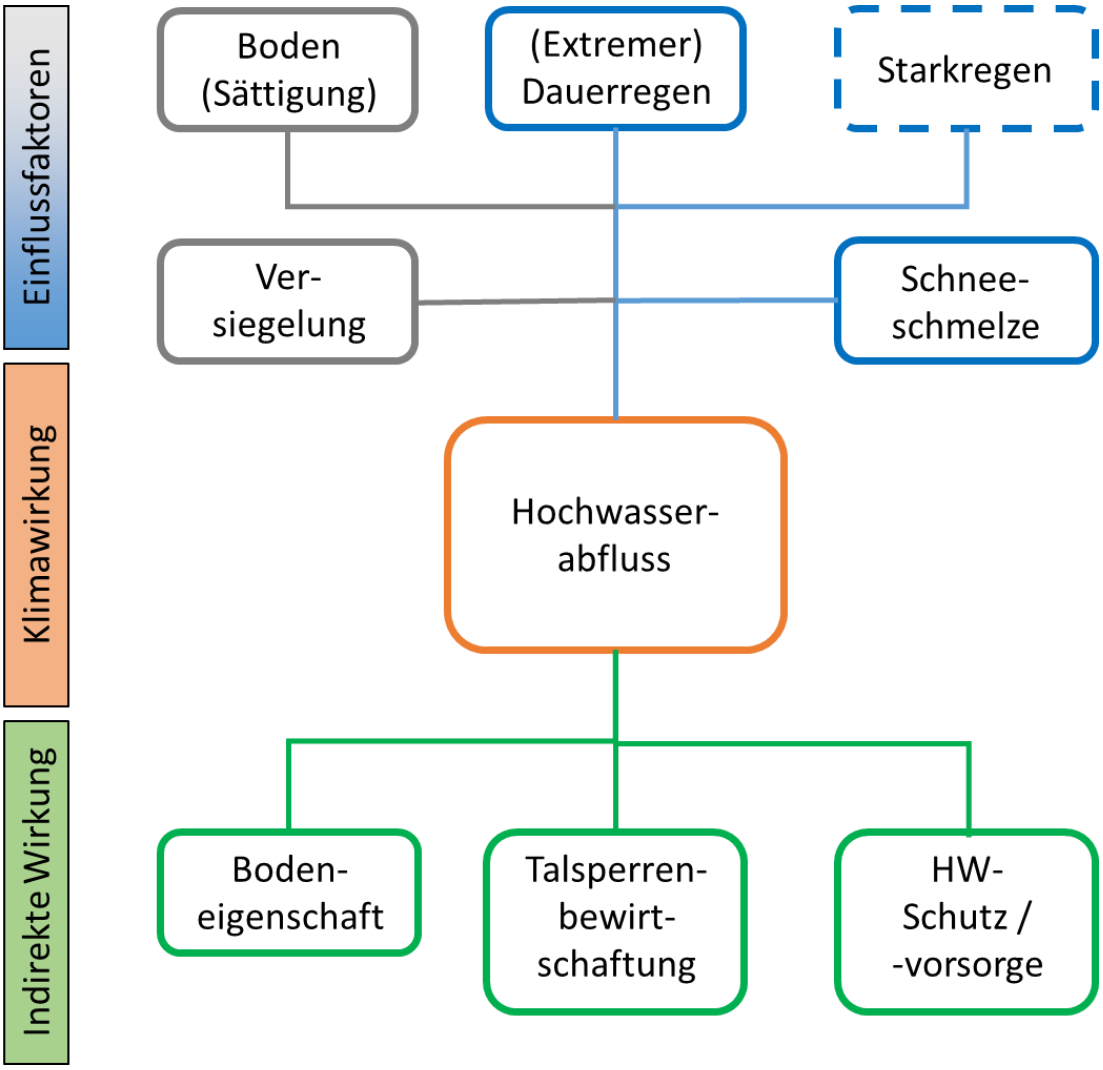


Abbildung 3-24: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Hochwasserabfluss im Themenfeld Oberflächengewässer

Der Hochwasserabfluss beschreibt eine ungewöhnlich hohe Abflussmenge in einem Gewässer, die statistisch gesehen selten auftritt (z.B. einmal pro Jahr oder seltener) und die dazu führen kann, dass das Gewässer aus dem Gewässerbett ausufert und Flächen beidseitig des Gewässerlaufes überflutet. Dieses Phänomen wird i.d.R. durch extreme bzw. besondere klimatische Bedingungen hervorgerufen. Der wesentlichste Einflussfaktor ist der Niederschlag. Dieser kann sowohl durch seine Menge, z.B. durch langanhaltende Dauerregen über mehrere Tage, als auch durch seine Intensität, z.B. durch kurzzeitige, lokal begrenzte Starkregen über wenige Minuten bis Stunden, hohe Abflussmengen im Gewässer verursachen. Während Dauerregen vor allem an größeren Gewässern zu Hochwasser führen, bewirken Starkregen

dies eher an mittleren und kleinen Flussläufen. Zusätzlich zum Niederschlag kann je nach Jahreszeit und Temperatur auch schmelzender Schnee Abflüsse verursachen, die die Entstehung von Hochwasser bewirken bzw. in Kombination mit extremen Niederschlägen sogar noch verstärken. Neben diesen klimatischen Faktoren können auch Gebietseigenschaften die Entstehung von Hochwasser begünstigen. Hier spielen vor allem Mechanismen eine Rolle, die das Retentionsvermögen im Einzugsgebiet der Gewässer vermindern, also den Rückhalt von Niederschlägen in der Fläche, so dass diese nur zeitlich verzögert abflusswirksam werden. Feuchte oder gesättigte Böden, bedingt z.B. durch längere Niederschläge im Vorfeld extremer Ereignisse, können nur wenig Wasser durch Infiltration bzw. Versickerung aufnehmen, so dass ein Großteil des Niederschlags oberflächlich direkt und ohne zeitliche Verzögerung abfließt. Dadurch können sich große Wassermengen binnen kürzester Zeit in den Gewässern sammeln und als Hochwasserwelle abfließen. Noch stärker wirkt dieser Effekt bei versiegelten Flächen. Die aus diesen Faktoren resultierenden Hochwasserabflüsse können, je nach Ausmaß der Ereignisse, materielle Schäden verursachen und Menschenleben gefährden. Daher müssen Maßnahmen zum Schutz vor Hochwasser und zur Vorsorge stets an veränderte Verhältnisse angepasst werden. Gleiches gilt auch für die Bewirtschaftung von Talsperren, sofern diese eine Hochwasserschutzfunktion erfüllen. Dieses kann wiederum zu Nutzungskonflikten mit anderen Aufgaben dieser Anlagen (z.B. Trinkwasserspeicher, Niedrigwasseraufhöhung) führen. Letztlich können Hochwasser auch die Bodenverhältnisse beeinflussen. Durch Überschwemmungen kann es zum Abtrag von Bodenmaterial (Erosion) oder zur Ablagerung von Stoffen bzw. Substrat kommen (auch Verschlämmung), was wiederum zu Veränderungen der Bodeneigenschaften führen kann.

3.2.3.2 Indikatoren und Operationalisierung

Die Beschreibung der Hochwasserverhältnisse erfolgt anhand von Abflüssen bei größeren, selteneren Ereignissen (Abflussscheitel mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 100 Jahren, sog. HQ100). Als Indikator zur Beschreibung der Abflussverhältnisse bzw. Quantifizierung des Abflussscheitels dient die Abflusshöhe, die auch als abflusswirksamer Niederschlagsanteil betrachtet werden kann (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Sie wird im Untersuchungsgebiet an jedem Pegel über die Scheitelwerte der jeweiligen Jahreshöchstabflüsse bestimmt. Aus diesen Daten erfolgt dann mit Hilfe einer extremwertstatistischen Analyse die Abschätzung der Scheitelabflüsse im Falle eines HQ100 anhand einer Gumbel-Verteilung, wie beispielhaft in Abbildung 3-25 dargestellt. Die Parameter der Verteilungsfunktion wurden hierbei mit Hilfe der L-Momente abgeschätzt (Hosking, 1990). Anschließend erfolgt die Umrechnung der HQ100-Abflüsse in die entsprechende Abflusshöhe.

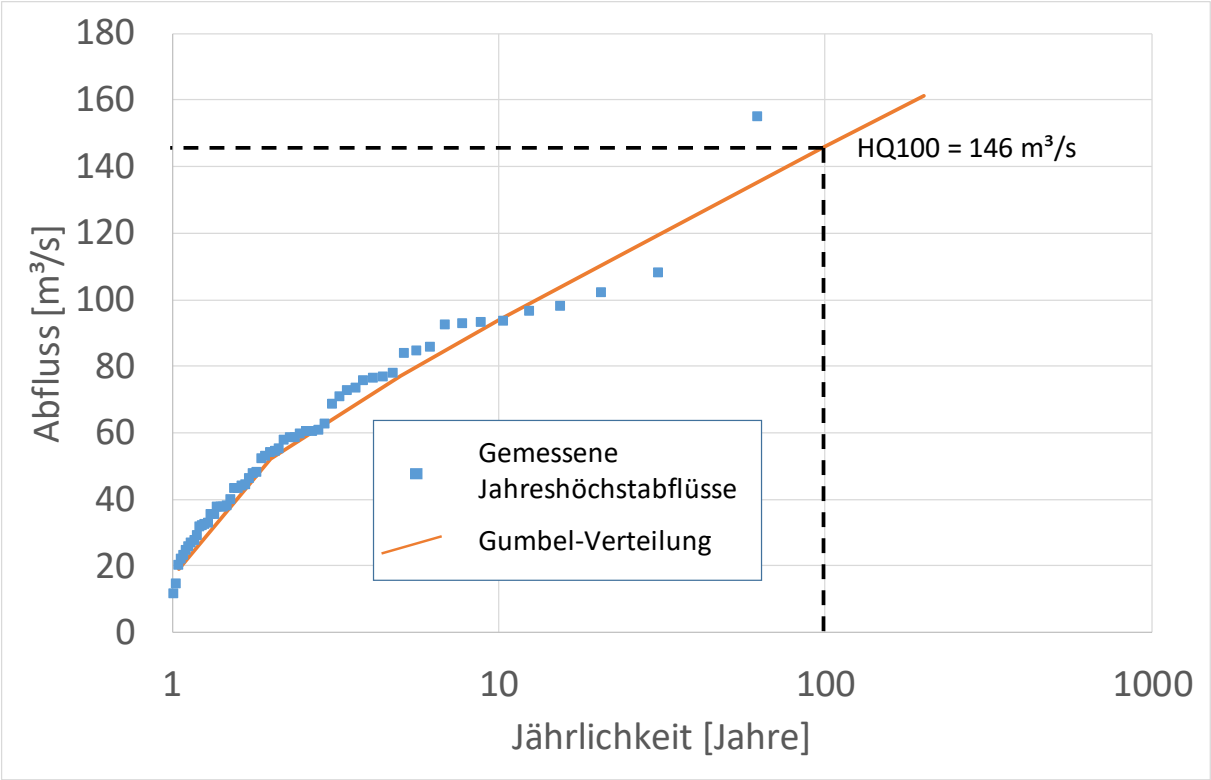


Abbildung 3-25: Beispiel für die Ableitung des Abflussscheitels für ein HQ100-Hochwasser mit Hilfe der Extremwertstatistik (hier: Gumbel-Verteilung mit Parameterschätzung über L-Momente)

Die betrachteten Abflussmengen bzw. -scheitel an den Pegeln stammen aus den Simulationen mit den hydrologischen Modellen HBV-IWW und PANTA RHEI. Ein fachlich begründeter Schwellenwert für die größte bzw. kleinste Abflusshöhe wird hierbei nicht festgelegt. Die Klasseneinteilung ergibt sich daher aus den Bandbreiten der minimalen bis maximalen Scheitelabflusshöhen an den Pegeln. Das Gleiche gilt für die Änderungssignale in der Zukunft.

Tabelle 3-4: Klasseneinteilung der Abflusshöhe des Scheitels beim HQ100 bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Abflusshöhe [mm] HQ100
	> 49,0 bis 56,0
	> 42,0 bis 49,0
	> 35,0 bis 42,0
	> 28,0 bis 35,0
	> 21,0 bis 28,0
	> 14,0 bis 21,0
	> 7,0 bis 14,0
	≤ 7,0

Legende	Änderung [%]
	> +85
	+65 bis +85
	+45 bis +65
	+25 bis +45
	+5 bis +25
	-5 bis +5
	-25 bis -5
	-45 bis -25
	-65 bis -45
	-85 bis -65
	< -85

3.2.3.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Analyseergebnisse für die Hochwasserverhältnisse in Abbildung 3-26 bis Abbildung 3-35 zeigen, dass die größte **Klimawirkung** bei der Hochwasserscheitel-Abflusshöhe im Falle eines HQ100 im Harz vorkommen, gefolgt vom Berg- und Hügelland. Die kleinsten Werte weist das östliche Flachland auf. Die Unterschiede zwischen allen Regionen sind im Winterhalbjahr deutlicher ausgeprägt als im Sommerhalbjahr und nehmen in allen Jahreszeiten vom starken über das mittlere bis zum schwachen Wandelszenario ab. Dieses Muster setzt sich grundsätzlich in der nahen und fernen Zukunft gleichermaßen fort. Ein Vergleich mit Analysen von kleineren, häufigeren Hochwasserereignissen, die im statistischen Mittel alle fünf Jahre in Erscheinung treten (HQ5) haben gezeigt, dass bei diesen Ereignissen die Unterschiede zwischen den Regionen schwächer ausgeprägt sind.

Die **Änderungssignale** der Abflusshöhen beim HQ100 zeigen unter dem schwachen Szenario zumeist kaum Veränderungen oder tendenziell Abnahmen in allen Jahreszeiten und Regionen. Umgekehrt zeigen sich unter dem starken Wandelszenario in beiden Zukunftszeiträumen durchweg Zunahmen, besonders im Sommerhalbjahr, ohne besondere räumliche Schwerpunkte. Unter dem mittleren Szenario kann nur im Sommerhalbjahr eine einheitliche Änderungsrichtung (Zunahme) in allen Regionen identifiziert werden. Die

räumlichen Muster der Veränderungen in der fernen Zukunft sind dabei stärker ausgeprägt. Einzig der Harz zeigt hier im schwachen und mittleren Szenario kaum Veränderungen bzw. noch Abnahmen. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Küste im Sommer unter dem schwachen Wandelszenario. Die Änderungssignale fallen im Untersuchungsraum insgesamt im Sommerhalbjahr stärker (nasser) aus als im Winterhalbjahr Die zukünftigen Änderungen der Abflusshöhen im Falle eines HQ5 zeigen regional nur geringfügige Unterschiede im Vergleich zu denen eines HQ100. Auf eine Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Die **Bedeutung** der zukünftigen Veränderungen der Hochwasserscheitel-Abflusshöhen ist für den Bereich des Harzes als eher gering bis mittel anzusehen. Zum einen fallen die Zunahmen hier zumeist relativ moderat aus. Lediglich im Sommerhalbjahr unter dem starken Wandelszenario können sich die bestehenden Verhältnisse erheblich verschärfen. Zum anderen berücksichtigen die Harzwasserwerke als Talsperrenbetreiber in dieser Region bereits heute Aspekte des Klimawandels im Zuge der regelmäßigen Neubewilligung der Talsperrensteuerung sowie durch verschiedene Studien zum zukünftigen Wassermanagement (vgl. Kapitel 3.2.7.3). Die Veränderungen bzw. Zunahmen der Abflusshöhen in den anderen Regionen fallen, mit Ausnahme des schwachen Wandelszenarios, z.T. deutlicher aus. Unter dem mittleren, vor allem aber unter dem starken Wandelszenario ist hier mit einer erheblichen Verschärfung der Hochwassersituation zu rechnen, die aufgrund der regional meist flachen Geländestrukturen größere Überschwemmungsflächen zur Folge hätte. Eine Anpassung der derzeitigen Schutz- und Vorsorgestrategien wäre dementsprechend notwendig, wodurch diese Veränderungen eine mittlere bis hohe Bedeutung für die Regionen haben.

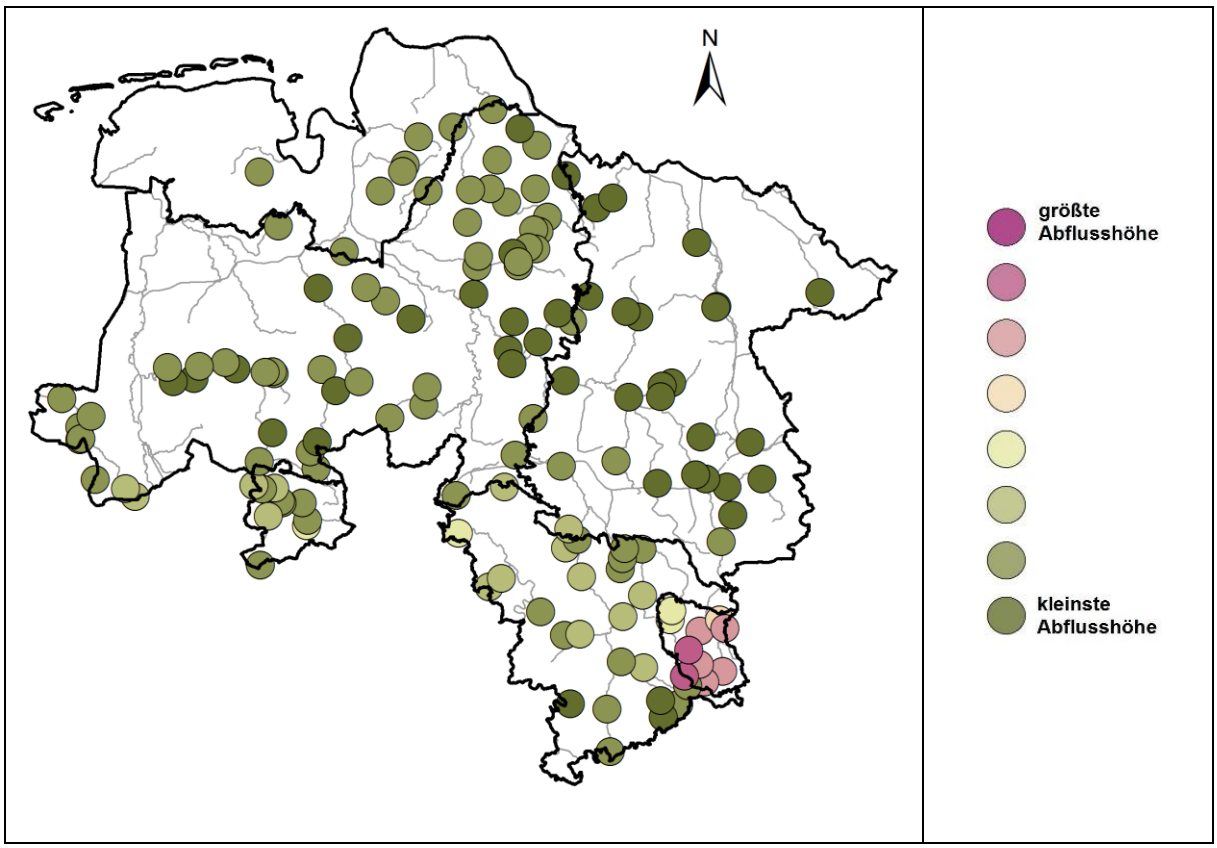


Abbildung 3-26: Scheitel-Abflusshöhe des HQ100 im Gesamtjahr (November bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

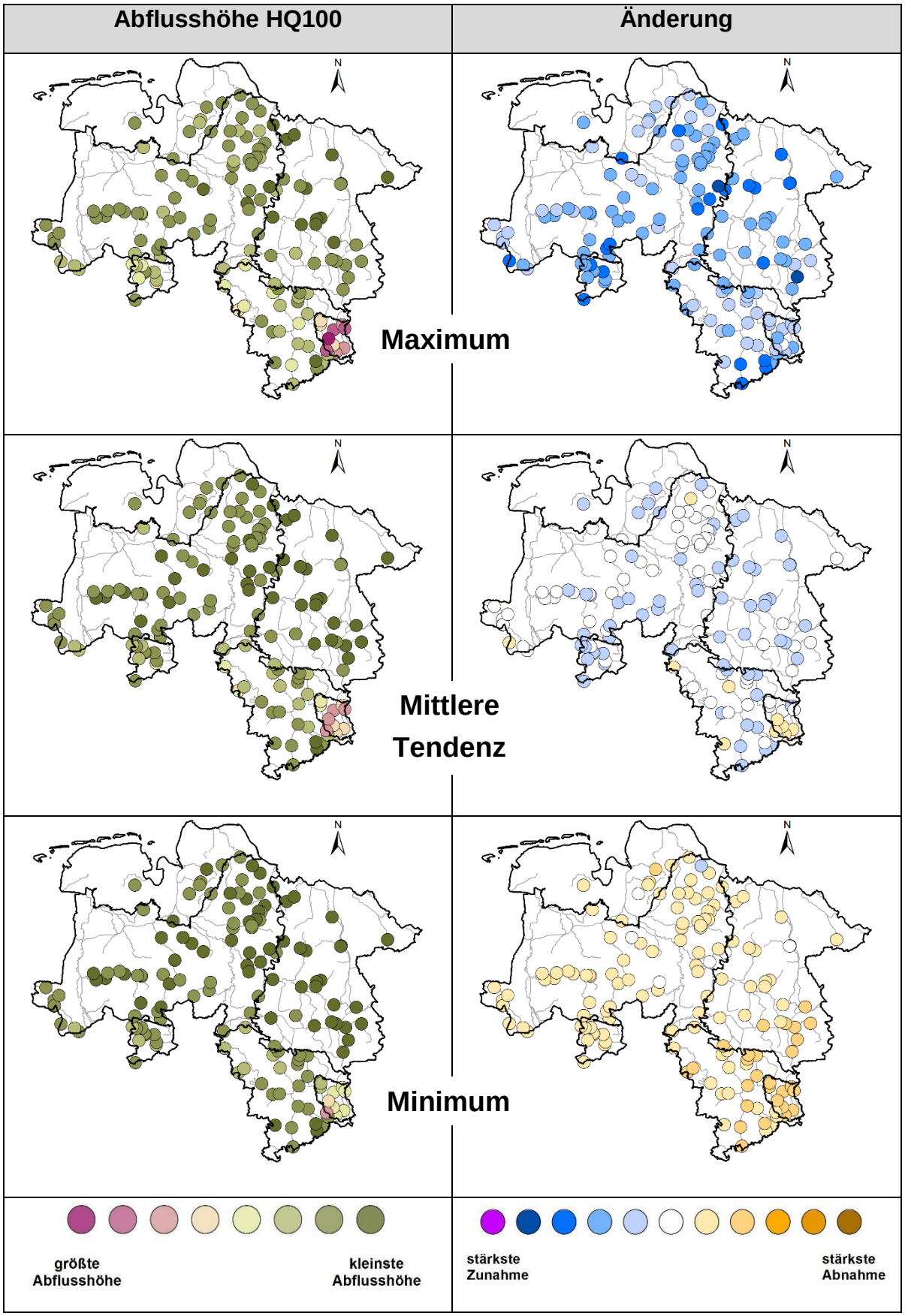


Abbildung 3-27: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

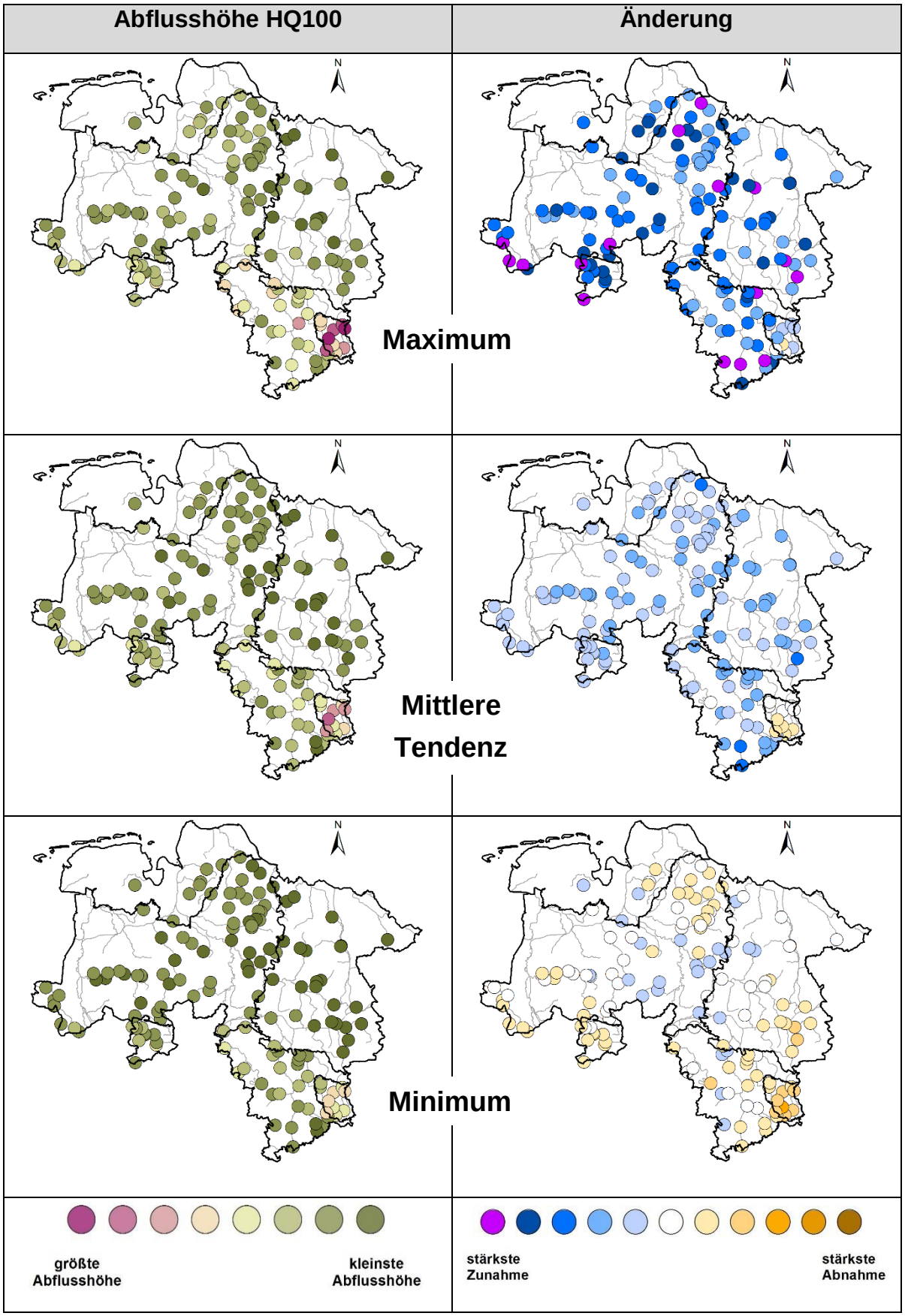


Abbildung 3-28: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

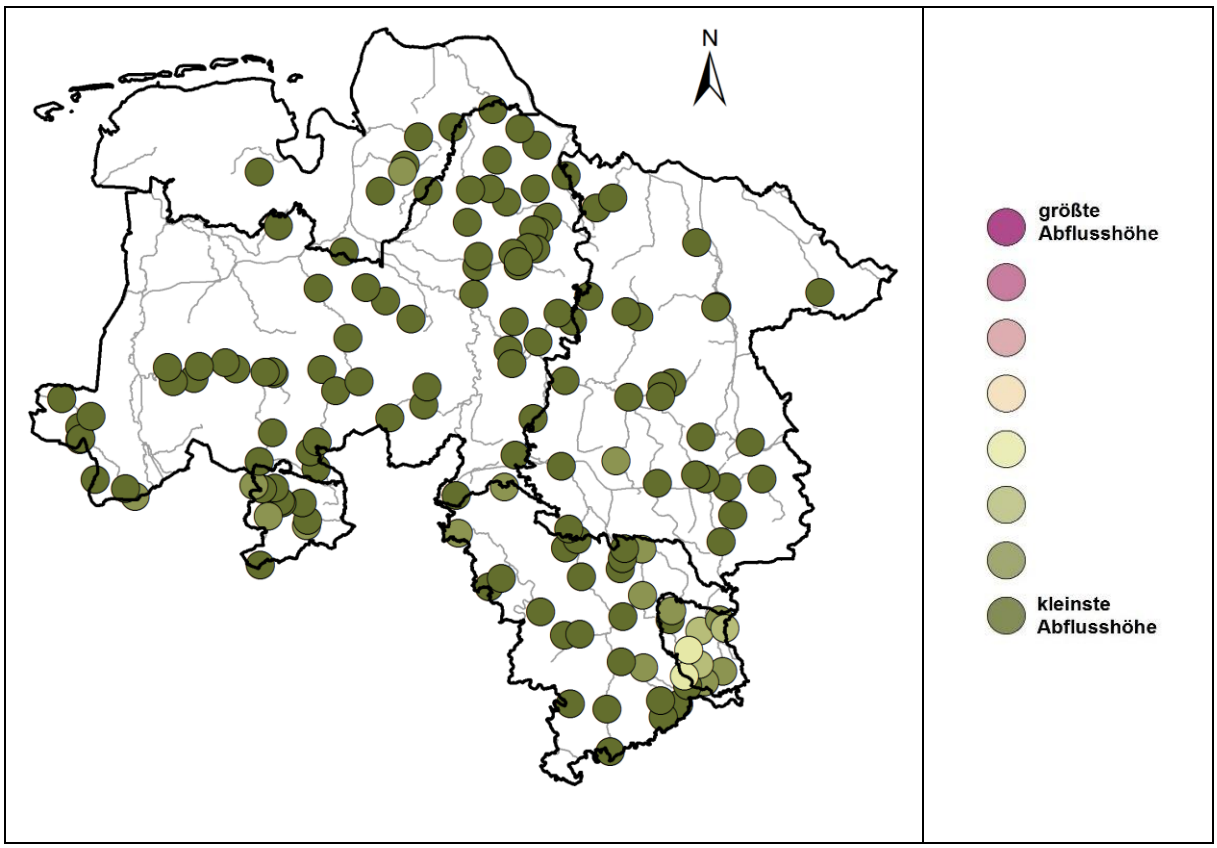


Abbildung 3-29: Scheitel-Abflusshöhe des HQ100 im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

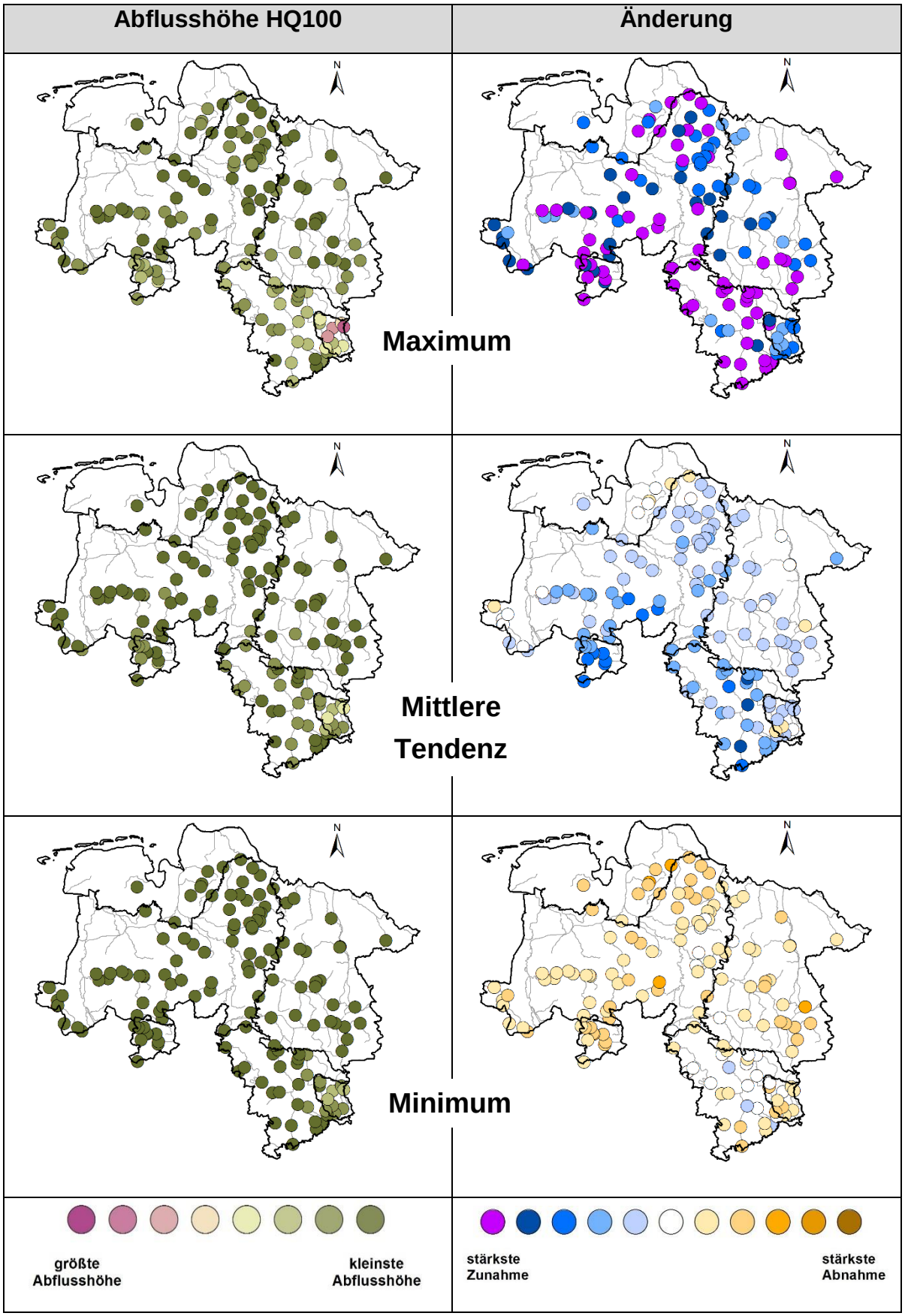


Abbildung 3-30: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

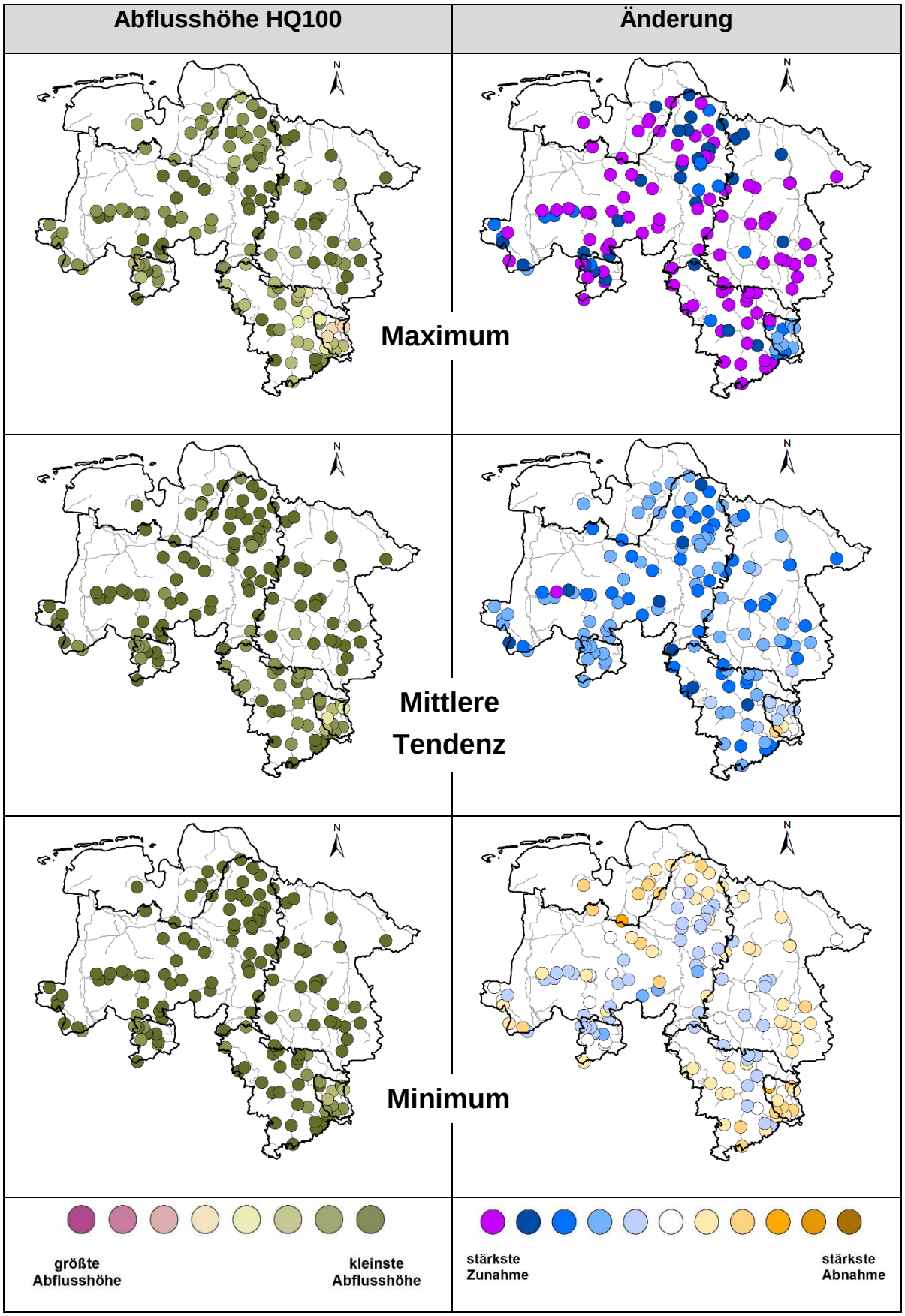


Abbildung 3-31: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

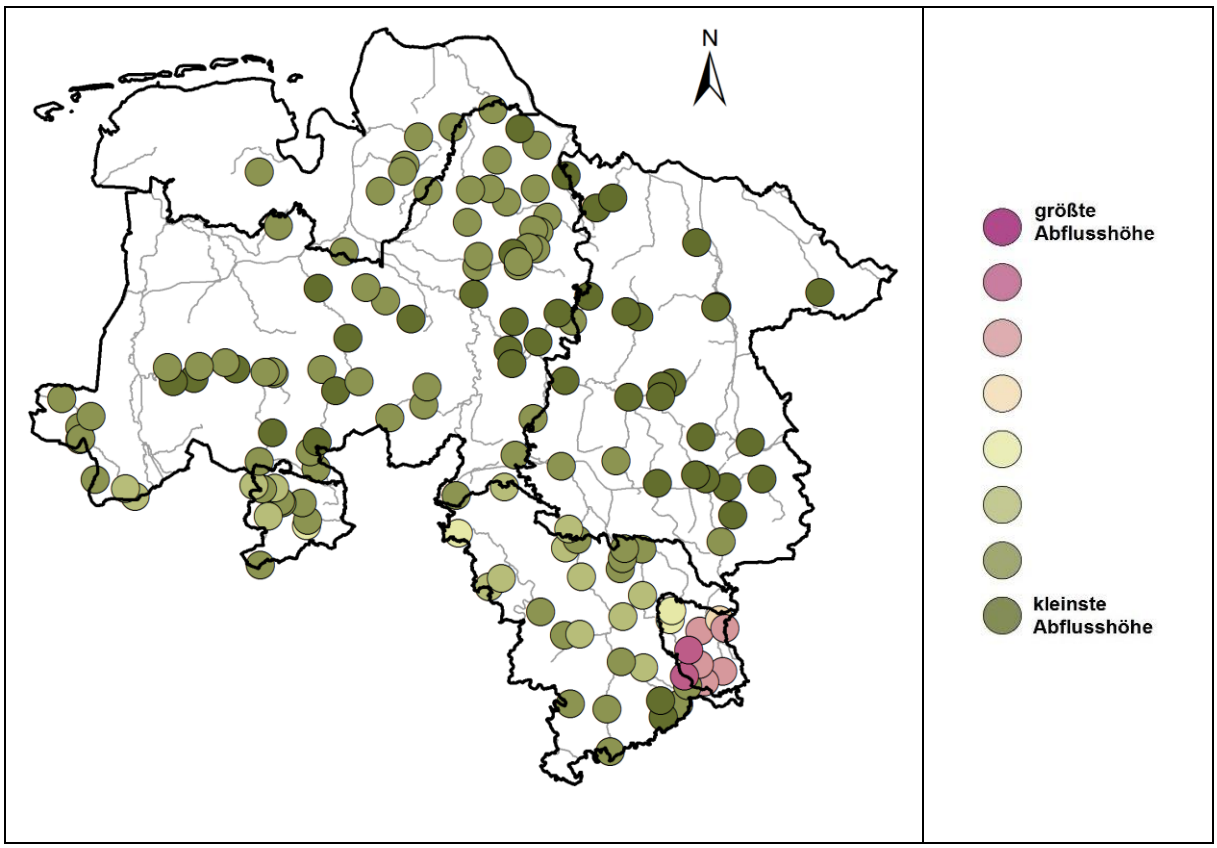


Abbildung 3-32: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 im Winterhalbjahr (November bis April) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

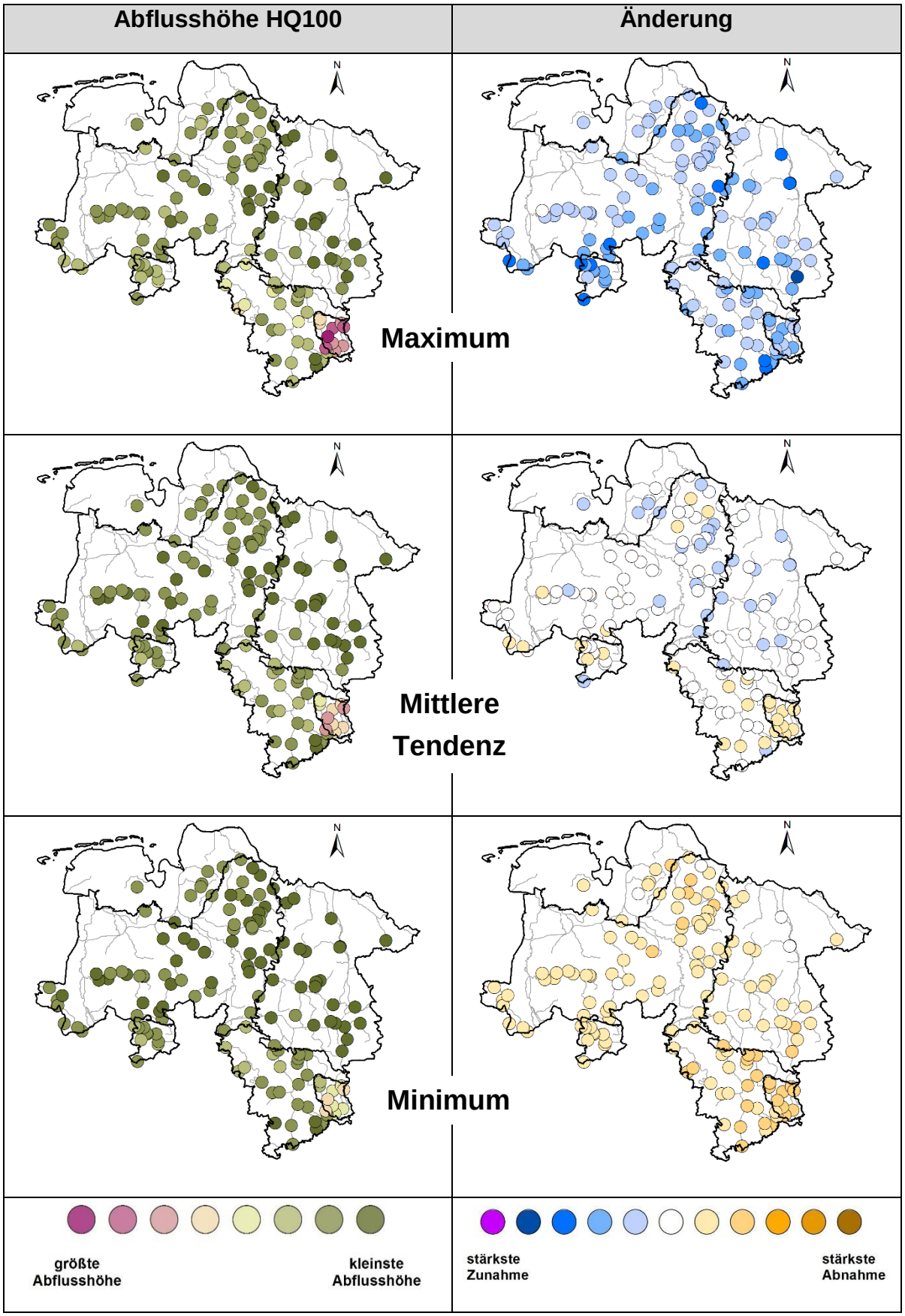


Abbildung 3-33: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der nahen Zukunft (2021-2050)

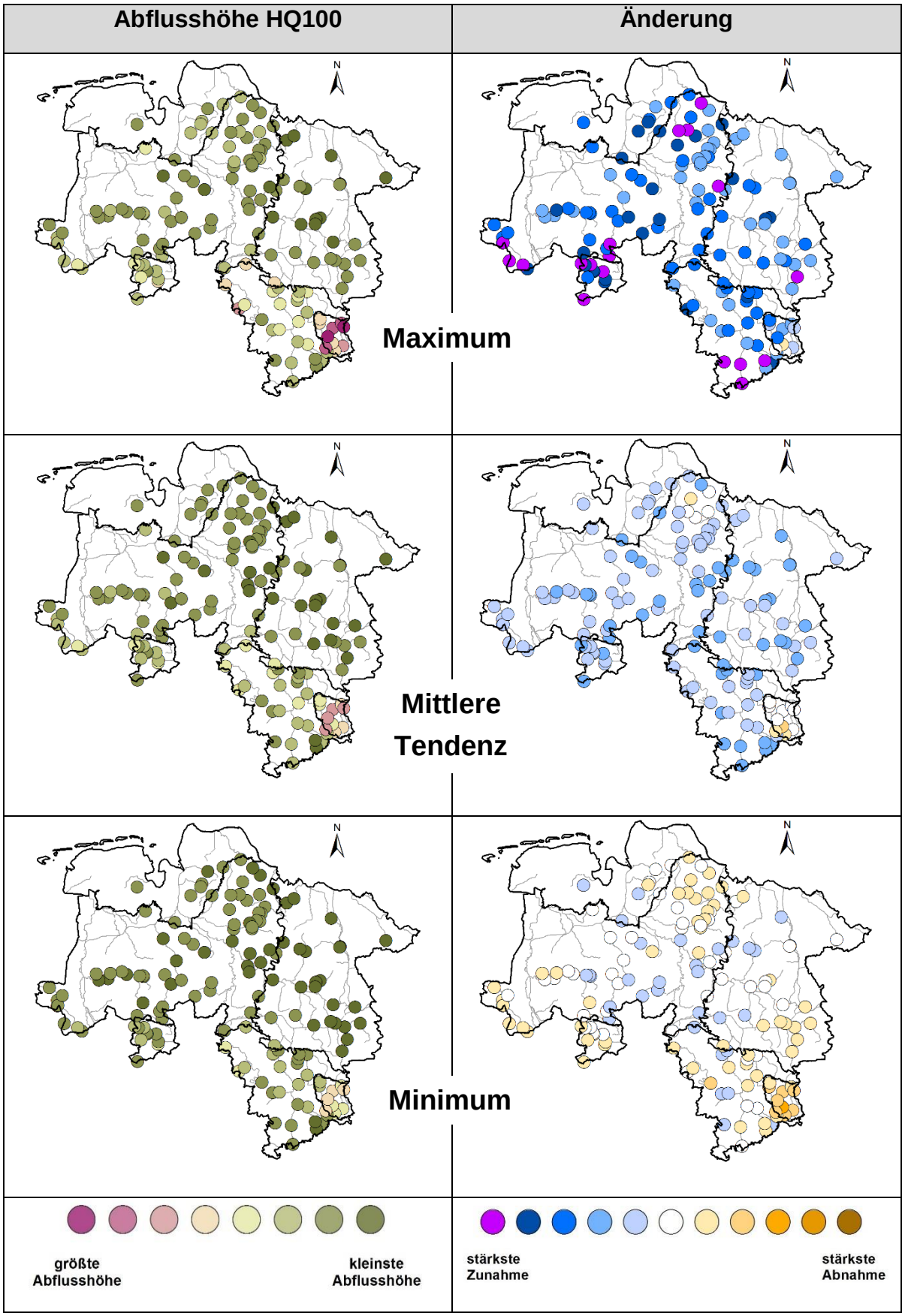


Abbildung 3-34: Scheitel-Abflusshöhe HQ100 bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (November bis April) in der fernen Zukunft (2071-2100)

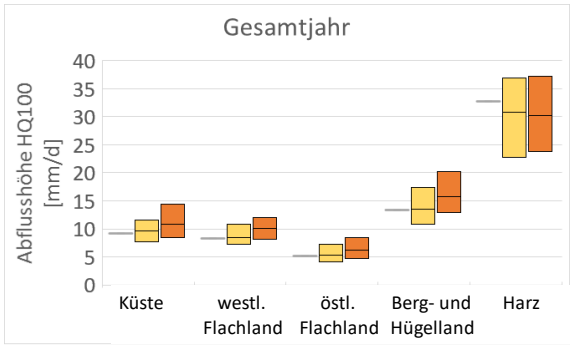
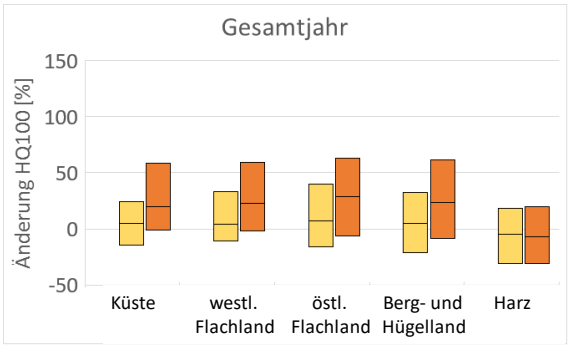
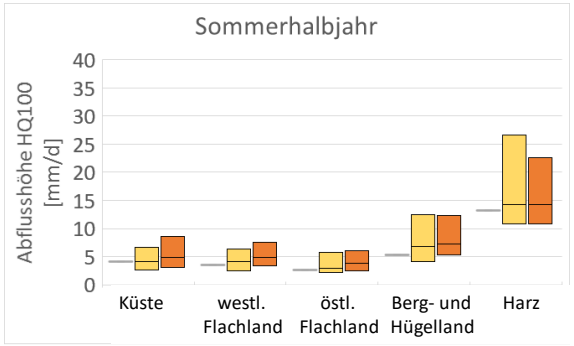
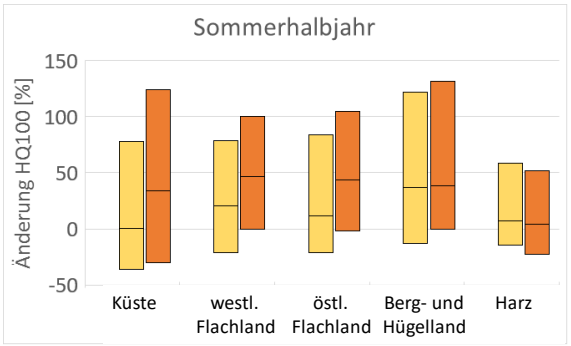
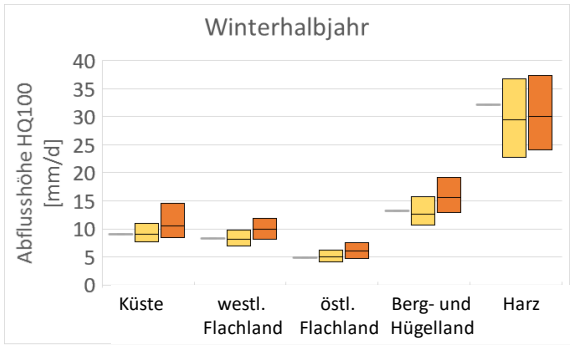
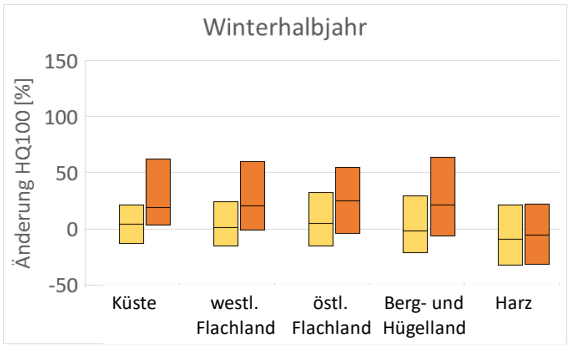
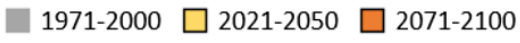
Abflusshöhe HQ100	Änderung
	
	
	
	

Abbildung 3-35: Zusammenfassung der Scheitel-Abflusshöhe HQ100 und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

3.2.4 Klimawirkung Flusshochwasser (Häufigkeit)

3.2.4.1 Wirkungsketten

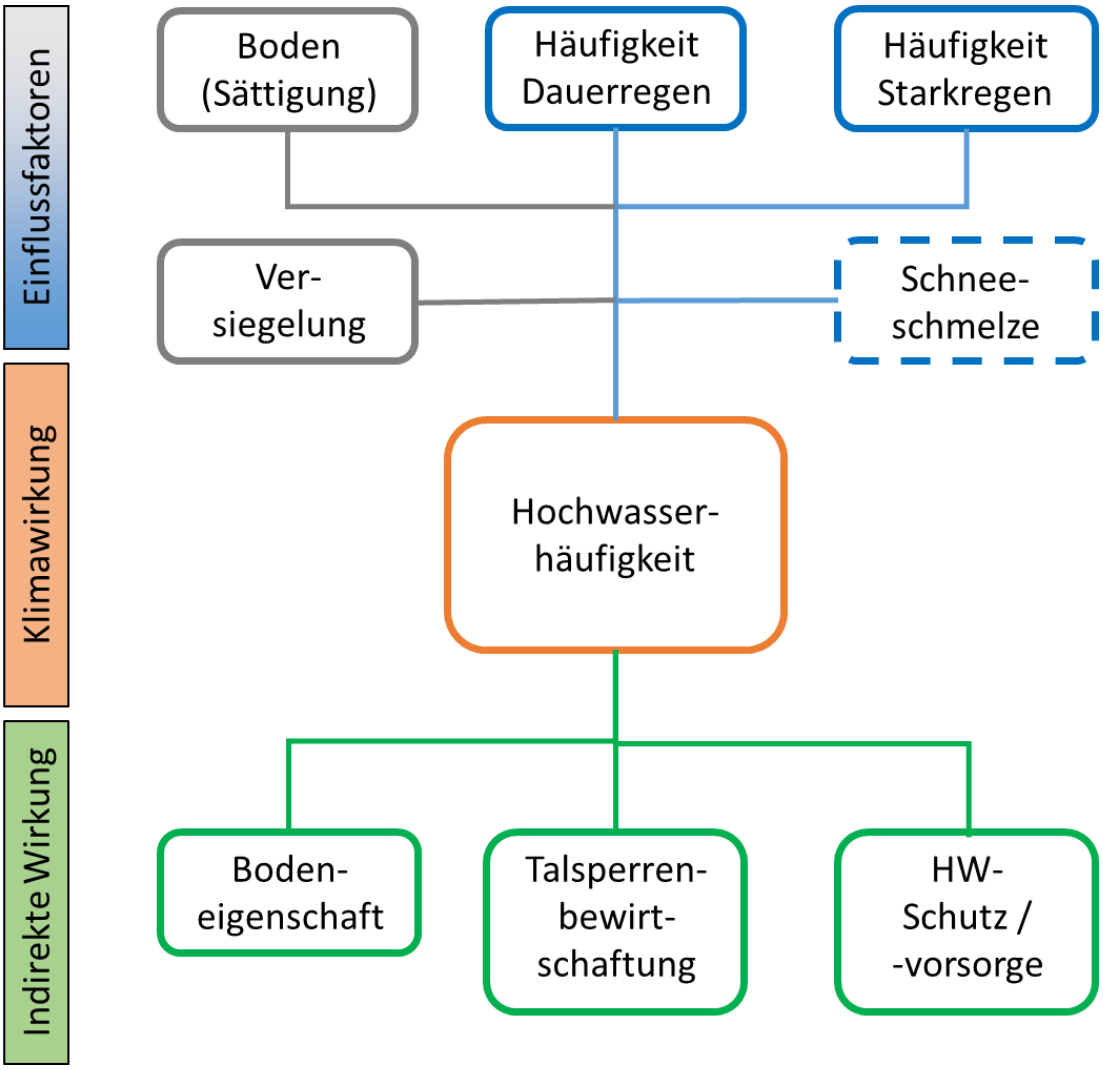


Abbildung 3-36: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Häufigkeit von Hochwasser im Themenfeld Oberflächengewässer

Die Häufigkeit von Hochwasser beschreibt die Anzahl der Abflussereignisse, bei denen ein Fließgewässer deutlich mehr Wassermengen abführt als im Normalfall. Dabei können die Wassermengen so groß sein, dass sie nicht mehr im Gewässerbett verbleiben und zu Ausuferungen führen. Dieses Phänomen wird i.d.R. durch extreme bzw. besondere klimatische Bedingungen hervorgerufen. Der wesentlichste Einflussfaktor ist der Niederschlag. Dieser kann sowohl durch seine Menge, z.B. durch langanhaltende Dauerregen über mehrere Tage, als auch durch seine Intensität, z.B. durch kurzzeitige, lokal begrenzte Starkregen über Minuten bis Stunden, hohe Abflussmengen im Gewässer verursachen. Treten solche Niederschläge aufgrund der Anzahl von bestimmten Wetterlagen häufiger auf, kann es auch

zu mehr Hochwasserereignissen innerhalb einer Zeitspanne kommen. Sofern Schneeschmelzen auftreten, können diese ebenfalls das Auftreten von Hochwasserereignissen, vor allem im Frühjahr, beeinflussen. Neben diesen klimatischen Faktoren können auch Gebietseigenschaften die Häufigkeit von Hochwasserereignissen begünstigen, ähnlich wie deren Abflussscheitel (vgl. Kapitel 3.2.3). Geringe Retentionsvermögen im Einzugsgebiet der Gewässer, bedingt z.B. durch gesättigte Böden oder versiegelte Flächen, können dazu führen, dass bereits bei „mittleren" Niederschlagsereignissen der Anteil des abflusswirksamen Niederschlags verhältnismäßig groß ist und Hochwasser hervorruft. Da diese Ereignisse häufiger auftreten als extreme Dauerregen oder Starkniederschläge, können auch entsprechende Abflussereignisse vermehrt in Erscheinung treten. Bei der Betrachtung der Häufigkeit von Hochwässern liegt der Fokus nicht ausschließlich auf Extremereignissen, die hohe Schäden verursachen oder Menschenleben gefährden. Trotzdem haben auch solche Ereignisse einen Einfluss auf Maßnahmen des Hochwasserschutzes bzw. der Hochwasservorsorge, da diese ggf. häufiger beansprucht werden. Auch die Bewirtschaftung von Talsperren kann durch eine veränderte Häufung von (kleineren) Hochwasserereignissen beeinflusst werden, wenn dadurch z.B. häufiger Speichervolumen als Hochwasserschutzraum in Anspruch genommen werden muss (ggf. auch zu anderen Jahreszeiten) und andere Nutzungen damit konkurrieren. Letztlich können häufigere Überschwemmungen der Vorländer auch mehr Boden erodieren, mehr Stoffe im Umfeld der Gewässer ablagern bzw. mehr Stoffe aus der Fläche in die Gewässer einbringen (Wechselwirkung mit Themenfeld Boden).

3.2.4.2 Indikatoren und Operationalisierung

Als Indikator zur Beschreibung der Häufigkeit von Hochwasserereignissen dient die Anzahl der Tage mit einem Abflusswert größer als das 99%-Quantil der mittleren Tagesabflüsse im Referenzzeitraum. Das bedeutet, es wird zunächst für jeden Pegel berechnet, welcher Abflusswert im Zeitraum 1971-2000 jeweils an 99% aller Tage unterschritten wird (bzw. an 1% überschritten). Dieser Abflusswert definiert nun das Auftreten eines Hochwassers im weiteren Sinne bzw. eines verhältnismäßig großen Abflusses an dem Pegel. Anschließend wird überprüft wie häufig dieser spezifische Abflusswert an dem jeweiligen Pegel im Referenzzeitraum sowie in der nahen und fernen Zukunft im Mittel pro Jahr bzw. Halbjahr erreicht bzw. überschritten wird.

Die betrachteten Abflussflussmengen an den Pegeln stammen aus den Simulationen mit den hydrologischen Modellen HBV-IWW und PANTA RHEI. Ein fachlich begründeter Schwellenwert für die größte bzw. kleinste Anzahl von Hochwasserereignissen wird hierbei nicht festgelegt. Vor allem in Einzugsgebieten mit geringen absoluten Abflusswerten im Referenzzeitraum kann sich die Häufigkeit von größeren Abflüssen (nicht Extremhochwässern) aufgrund der Definition des Kennwertes allerdings zukünftig erheblich verändern (z.T. mehr als verzehnfachen). Dies führt zu wenig räumlich differenzierten Mustern bei der kartographischen Ergebnisdarstellung, wenn die Minimal- und Maximalwerte den

Wertebereich der Klassen definieren. Um diesen Effekt zu vermindern, wurden bei der Darstellung die Häufigkeiten, die mehr als das etwa 5fache der Referenzzeit betragen, als größte Anzahl von Ereignissen definiert. Auch die Klassen der Änderungssignale wurden entsprechend angepasst, um den Einfluss einiger weniger Pegel mit sehr starken Veränderungen zu verringern und eine räumlich differenzierte Darstellung zu gewährleisten.

Tabelle 3-5: Klasseneinteilung der mittleren Anzahl großer Abflussereignisse bzw. deren Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Anzahl Tage mit Hochwasser [d]
	> 21
	> 18 bis 21
	> 15 bis 18
	> 12 bis 15
	> 9 bis 12
	> 6 bis 9
	> 3 bis 6
	≤ 3

Legende	Änderung [%]
	> +400
	+100 bis +400
	+50 bis +100
	+25 bis +50
	+10 bis +25
	-10 bis +10
	-25 bis -10
	-50 bis -25
	-75 bis -50
	< -75

3.2.4.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Darstellungen der Analyseergebnisse für die Häufigkeit von Hochwasserereignissen sind in Abbildung 3-37 bis Abbildung 3-45 aufgeführt. Aufgrund der Definition des Kennwertes (vgl. Kapitel 3.2.4.2) kommt es im Betrachtungszeitraum (Jahr oder Saison) an genau 1% aller Tage zu einem Hochwasser. Damit ist die **Klimawirkung** der Hochwasserhäufigkeit im Referenzzeitraum an allen Pegeln zunächst gleich groß. Innerhalb der Zukunftszeiträume ändert sich dieses Muster. In der nahen Zukunft zeigen sich zumeist nur geringe Unterschiede zwischen den Regionen, wobei die Anzahl unter dem mittleren und starken Wandelszenario stets zunimmt, mit Ausnahme des Harzes. Unter dem starken Wandelszenario zeigen sich auch etwas mehr räumliche Unterschiede, wobei das östliche Flachland am deutlichsten hervortritt. Es ist zu erkennen, dass der Harz hier die deutlich geringste Anzahl von Hochwasserereignissen im Untersuchungsgebiet aufweist, sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr. Das Berg- und Hügelland zeigt nur geringfügig größere Häufigkeiten. Ein

Grund hierfür sind die Talsperren im Harz, die größere Abflussereignisse dämpfen und deren unmittelbarer Einflussbereich bis in das Harzvorland reicht. Die Regionen der Küste und der Flachländer weisen an den meisten Pegeln in der nahen Zukunft die größten Häufigkeiten von Hochwasserereignissen auf. Dieses Muster verstärkt sich in der fernen Zukunft, vor allem unter dem starken Wandelszenario und besonders im östlichen Flachland.

Die **Änderungssignale** zeigen je nach Wandelszenario unterschiedliche Tendenzen. Während es unter dem schwachen Szenario vor allem im Harz, vereinzelt aber auch in anderen Regionen, tendenziell zu leichten Abnahmen bzgl. der Häufigkeit von Hochwassern kommt, nehmen diese unter dem mittleren und starken Szenario meist zu. Dabei sind die Zunahmen im Winterhalbjahr etwas schwächer als im Sommerhalbjahr. In der fernen Zukunft sind die Veränderungen der Häufigkeiten unter dem schwachen Wandelszenario regional unterschiedlich, wobei der Harz nach wie eher Abnahmen signalisiert. Vor allem das westliche Flachland zeigt hier bereits vereinzelt leichte Zunahmen. Unter dem starken Wandelszenario ist flächendeckend mit einer Zunahme der Häufigkeiten von Hochwassern zu rechnen, wobei diese im Flachland und an der Küste stärker zunehmen als im Berg- / Hügelland und im Harz. Insgesamt fallen die Zunahmen in der nahen Zukunft im Sommerhalbjahr etwas stärker aus, wohingegen in der fernen Zukunft in beiden Halbjahren die Zunahmen ähnlich stark sind.

Die zukünftigen Veränderungen der Hochwasser-Häufigkeiten haben für den Bereich des Harzes eine eher geringe **Bedeutung**. Die Veränderungen fallen hier je nach Szenario unterschiedlich aus, so dass keine eindeutige Entwicklungsrichtung (bzw. Zunahme) erkennbar ist. Zudem überwiegen natürliche Landnutzungsformen (Wald) und es gibt nur wenige Siedlungsflächen an Gewässern, so dass das Schadenspotenzial bei (kleinen) Hochwässern, wie sie an dieser Stelle betrachtet werden, relativ begrenzt bleibt. Auch liegt das Gebiet im direkten Einflussbereich der Harz-Talsperren mit ihrer Hochwasserschutzfunktion. Im Berg- und Hügelland und vor allem im Flachland sowie an der Küste nehmen die Häufigkeiten von Hochwasserereignissen unter fast allen Szenarien und Halbjahren zu (mit Ausnahme des schwachen Szenarios in der nahen Zukunft). Hier wird ein erheblicher Teil der Flächen landwirtschaftlich genutzt und es gibt zahlreiche Siedlungsbereiche an den Gewässern, die ein erhöhtes Schadenspotenzial bilden. Allerdings existieren in diesen Gebieten bereits zahlreiche Schutzkonzepte gegenüber Hochwasser. Zudem charakterisiert die analysierte Kenngröße tendenziell eher Ereignisse mit erhöhtem Abfluss und keine extremen Hochwasser. Daher besitzen diese Veränderungen für die genannten Regionen eine mittlere Bedeutung.

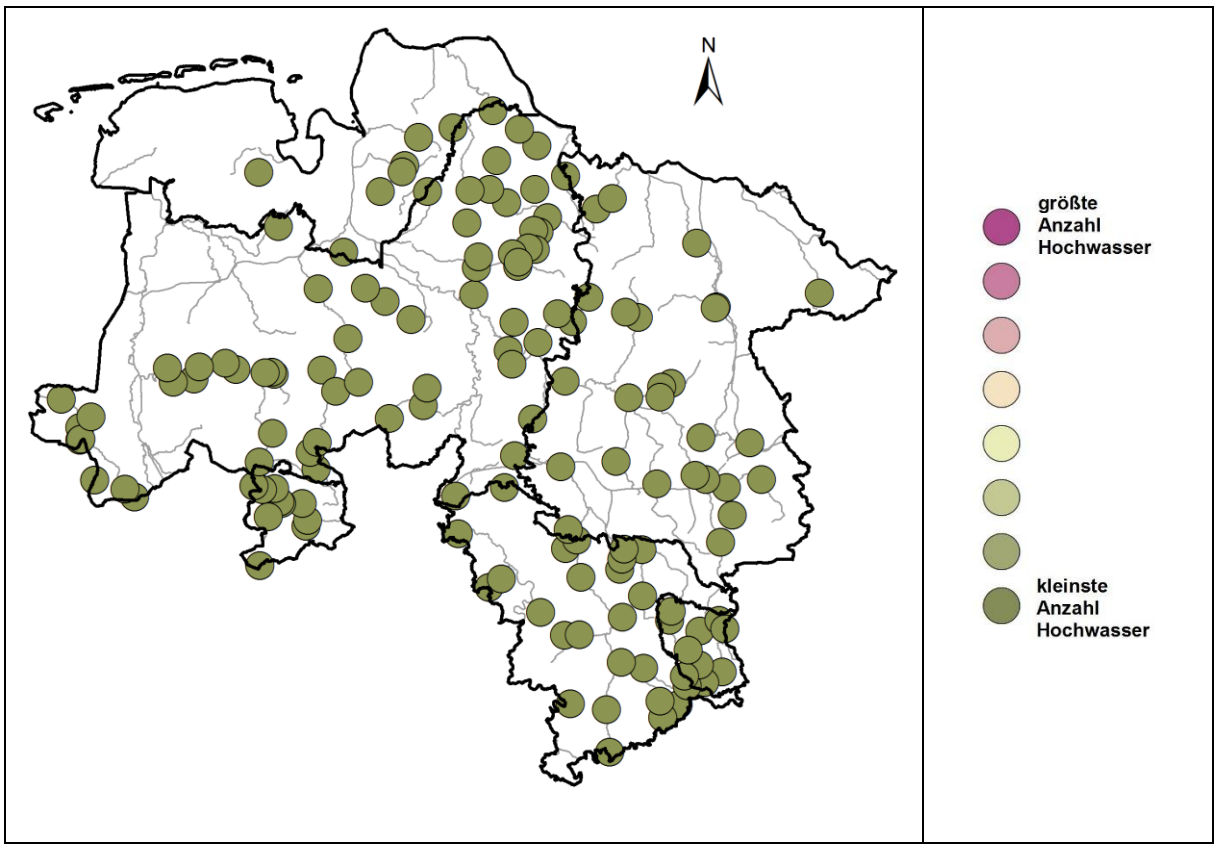


Abbildung 3-37: Anzahl der Hochwasserereignisse im Gesamtjahr (November bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

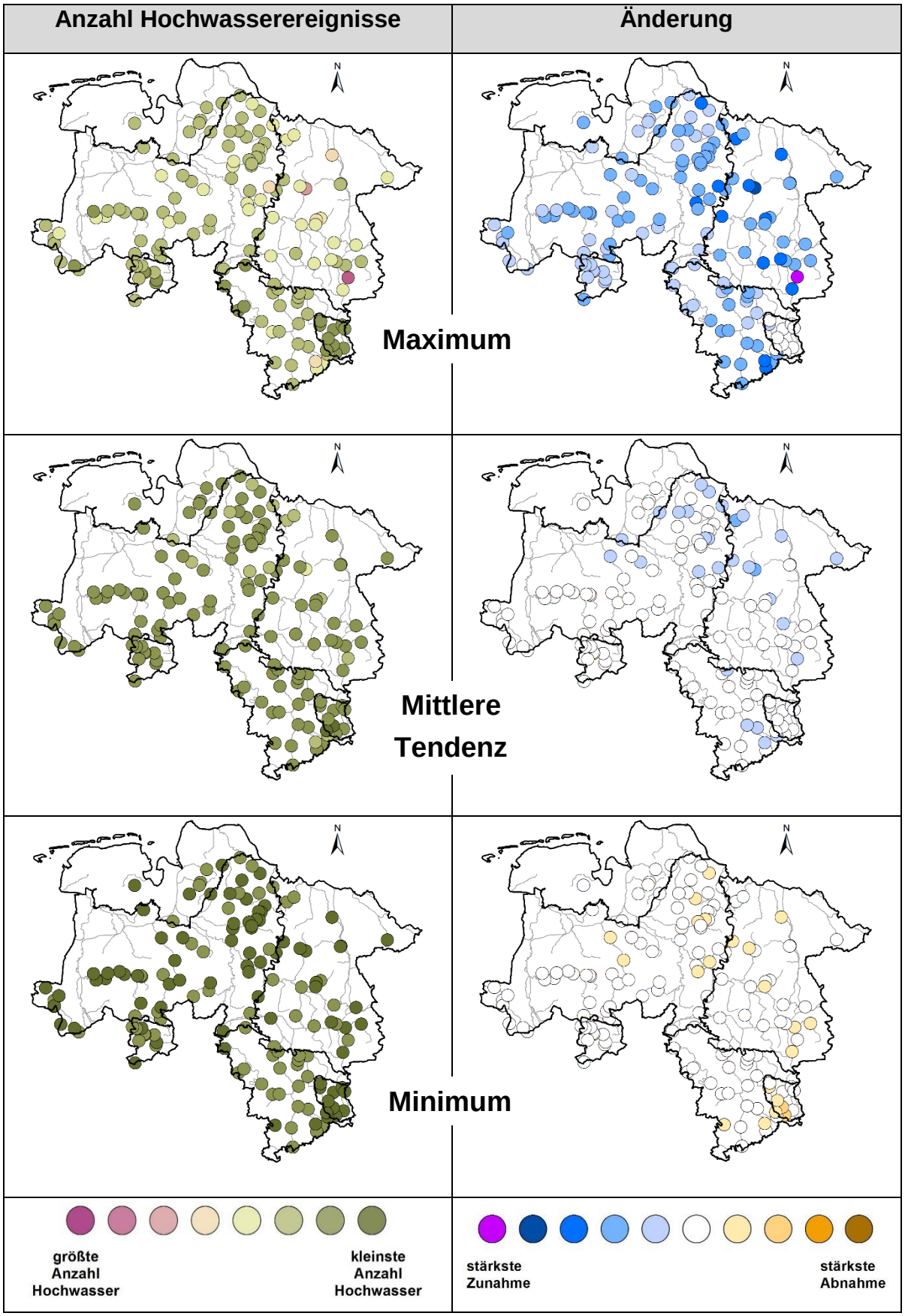


Abbildung 3-38: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

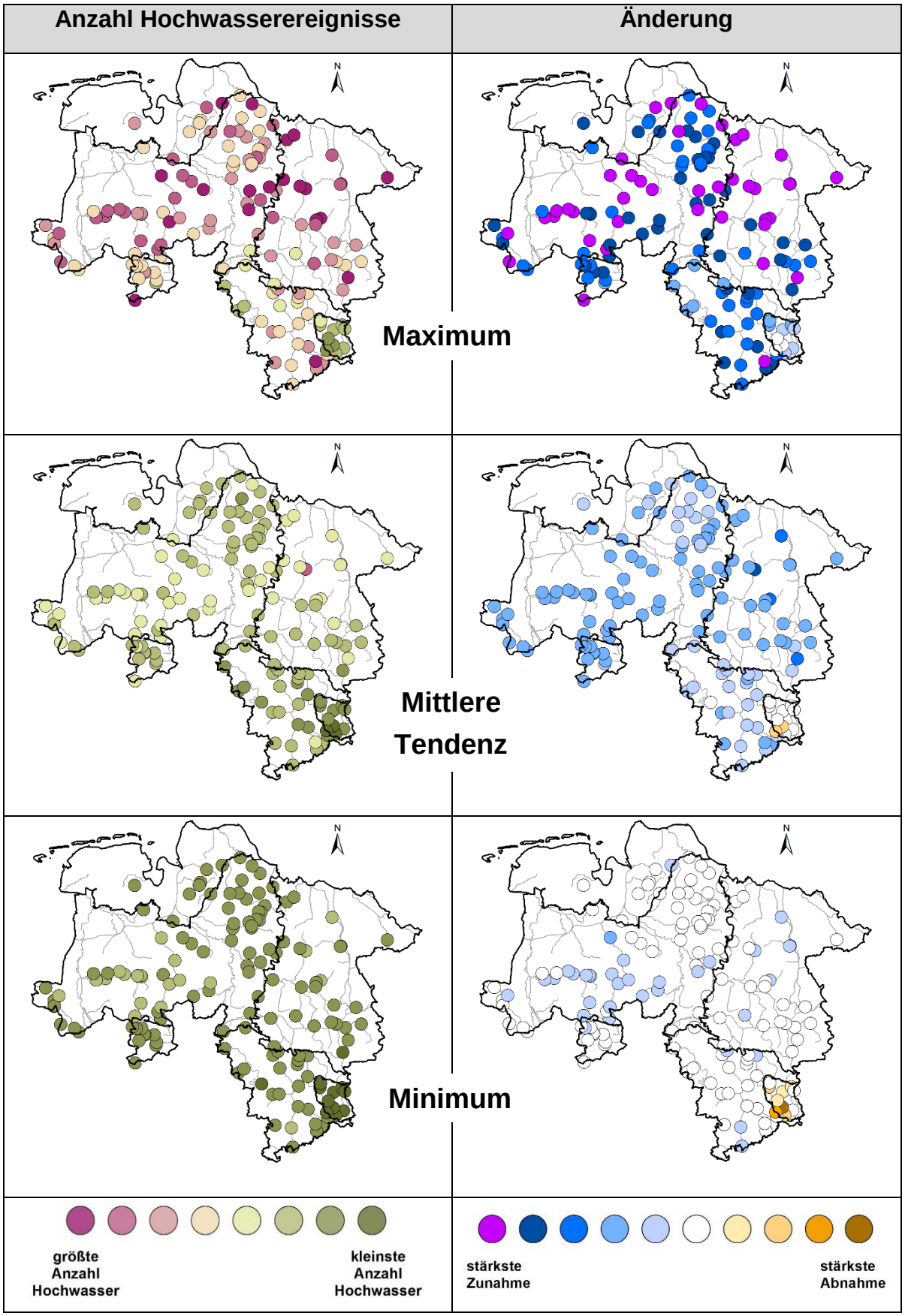


Abbildung 3-39: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (November bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

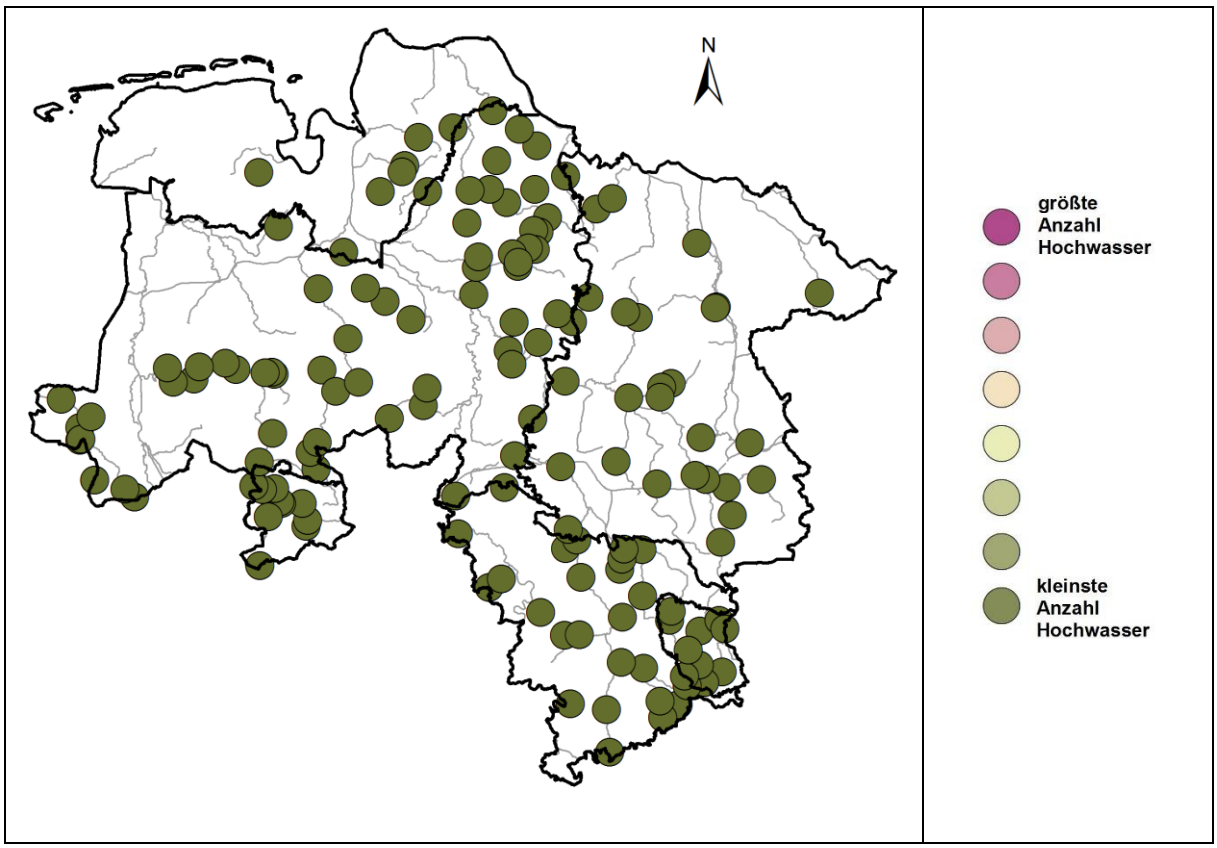


Abbildung 3-40: Anzahl der Hochwasserereignisse im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

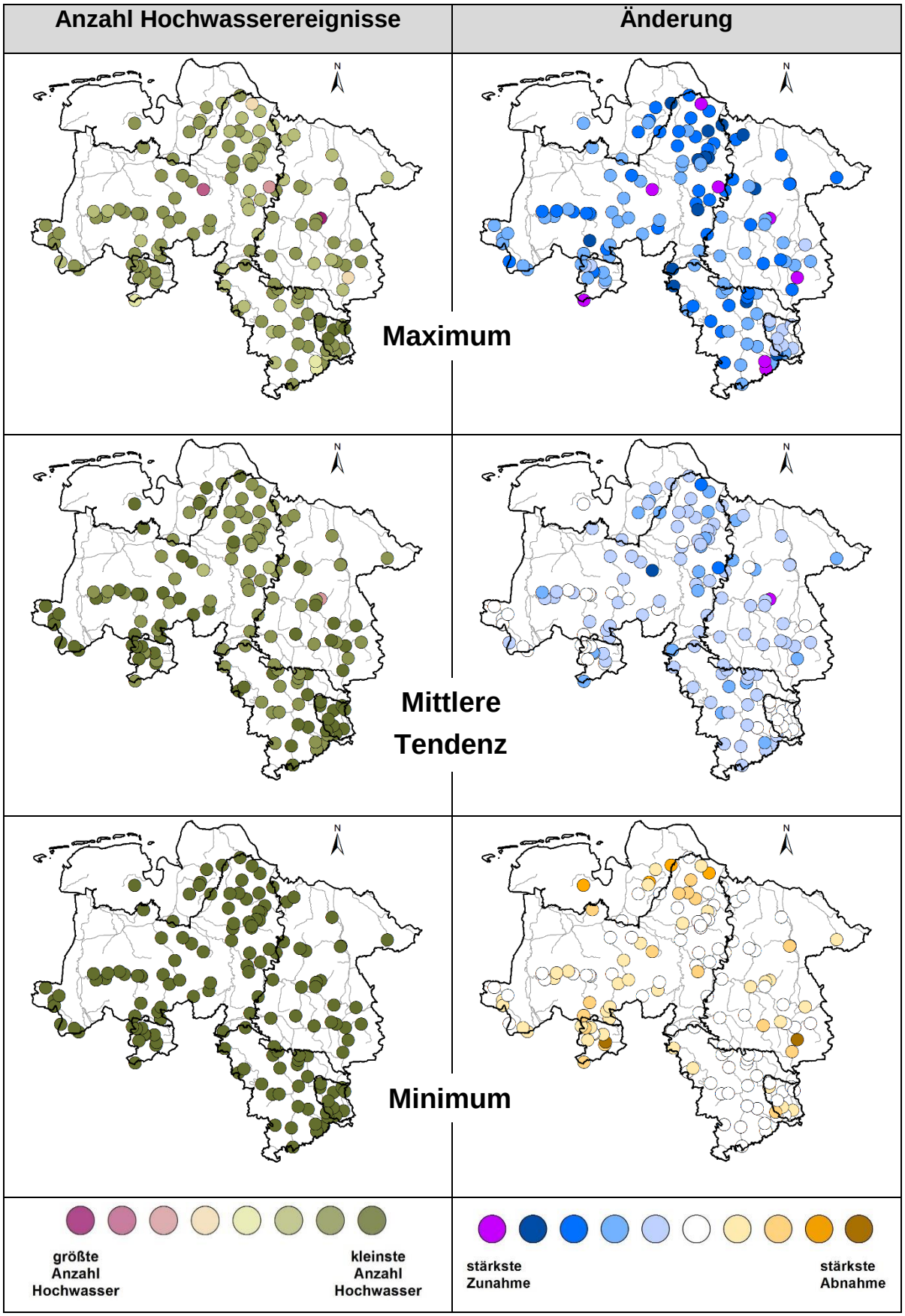


Abbildung 3-41: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der nahen Zukunft (2021-2050)

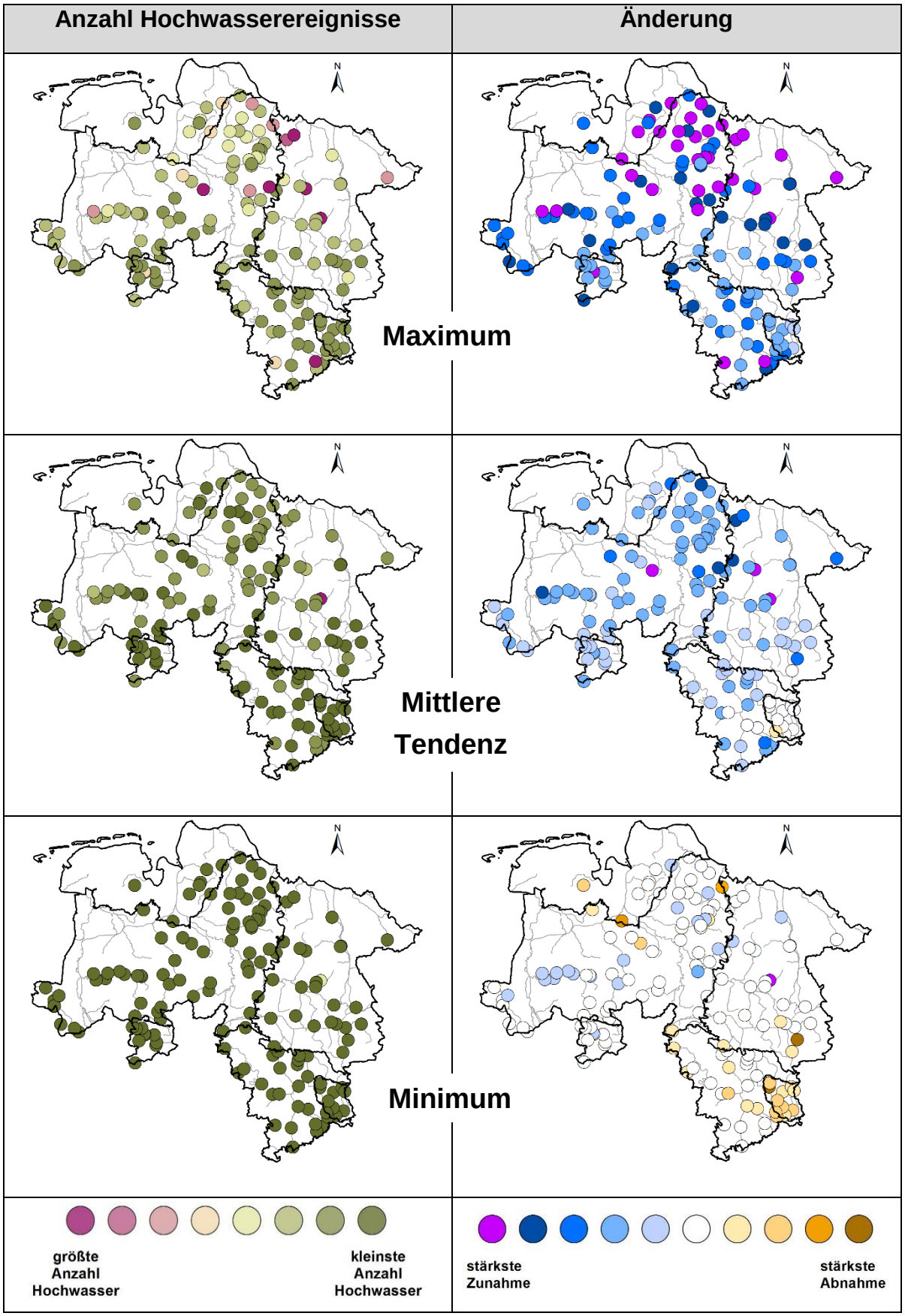


Abbildung 3-42: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in der fernen Zukunft (2071-2100)

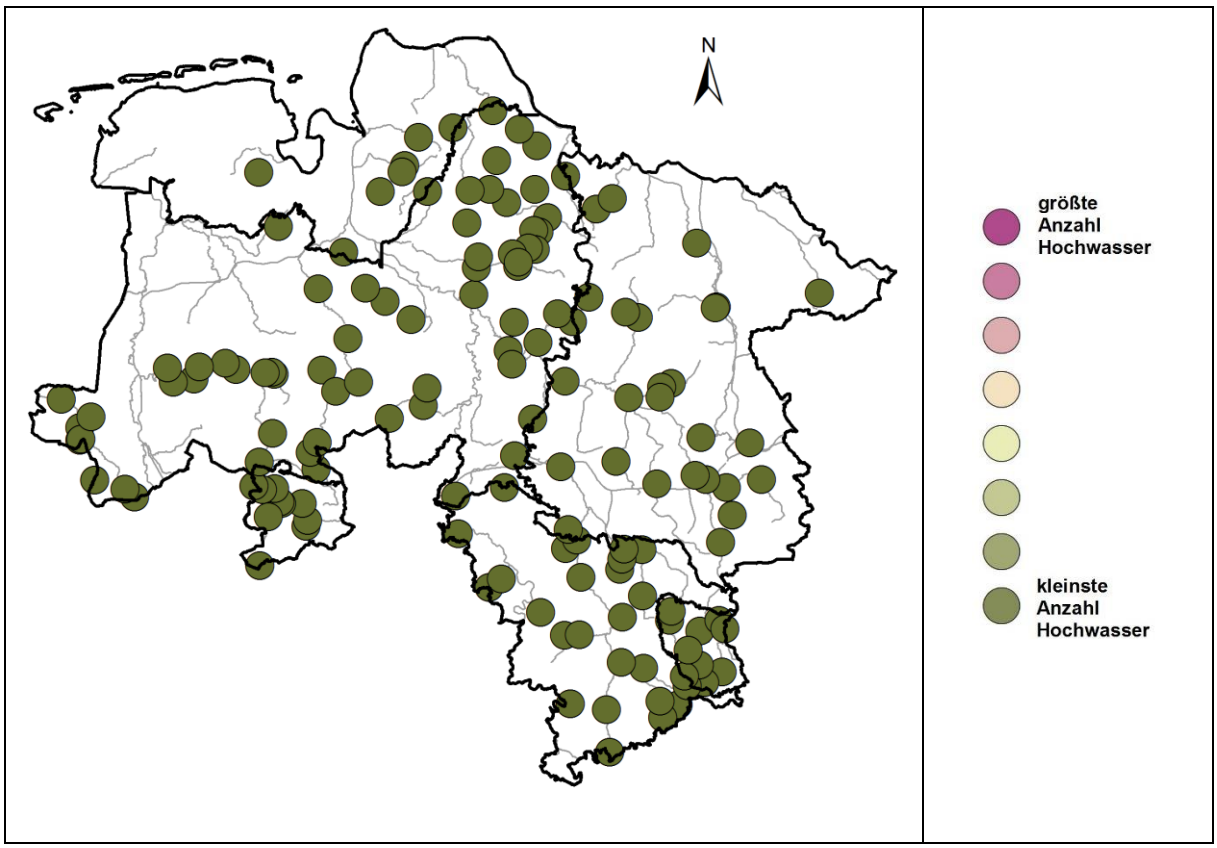


Abbildung 3-43: Anzahl der Hochwasserereignisse im Winterhalbjahr (November bis April) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

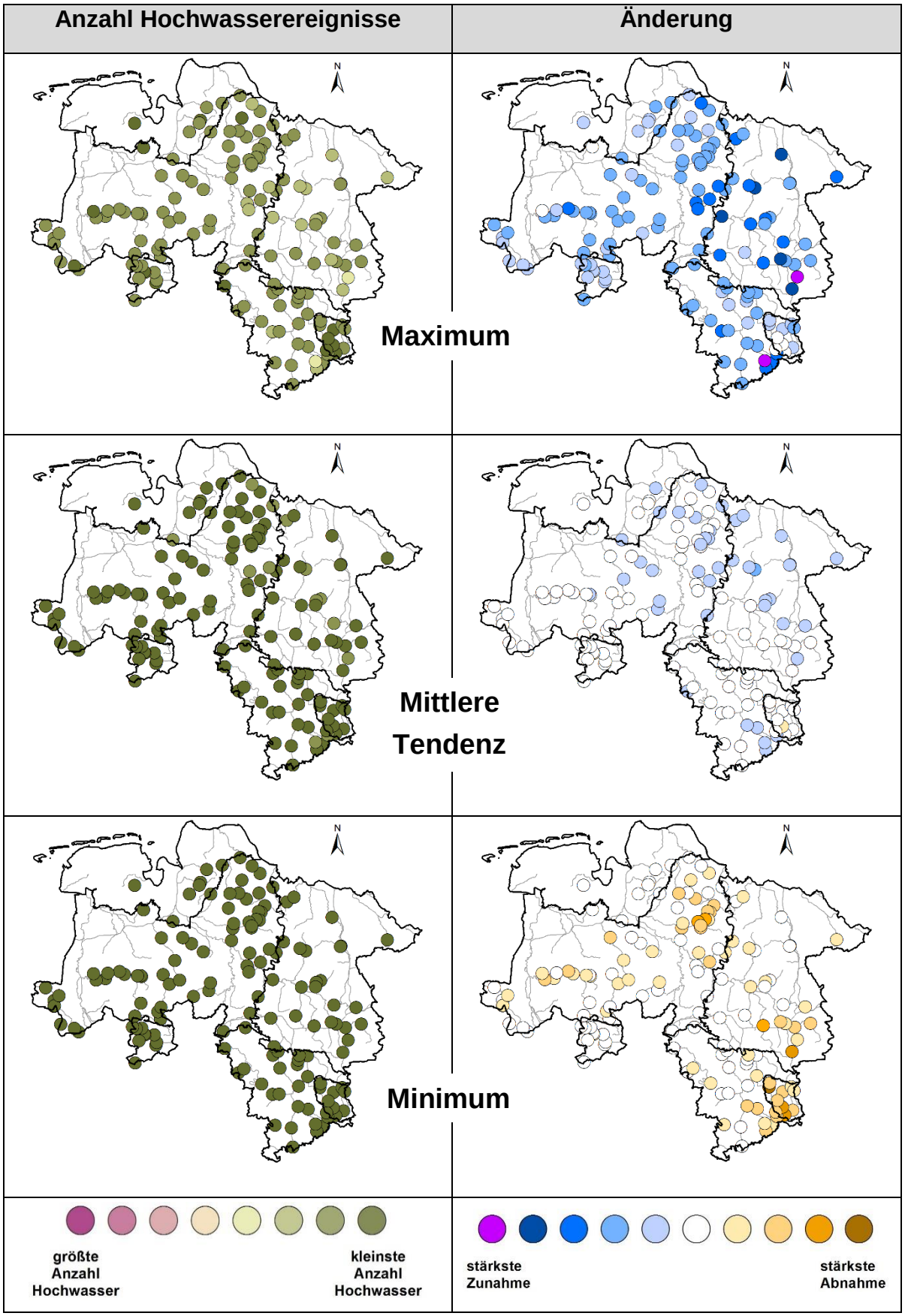


Abbildung 3-44: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (Nov bis Apr) in der nahen Zukunft (2021-2050)

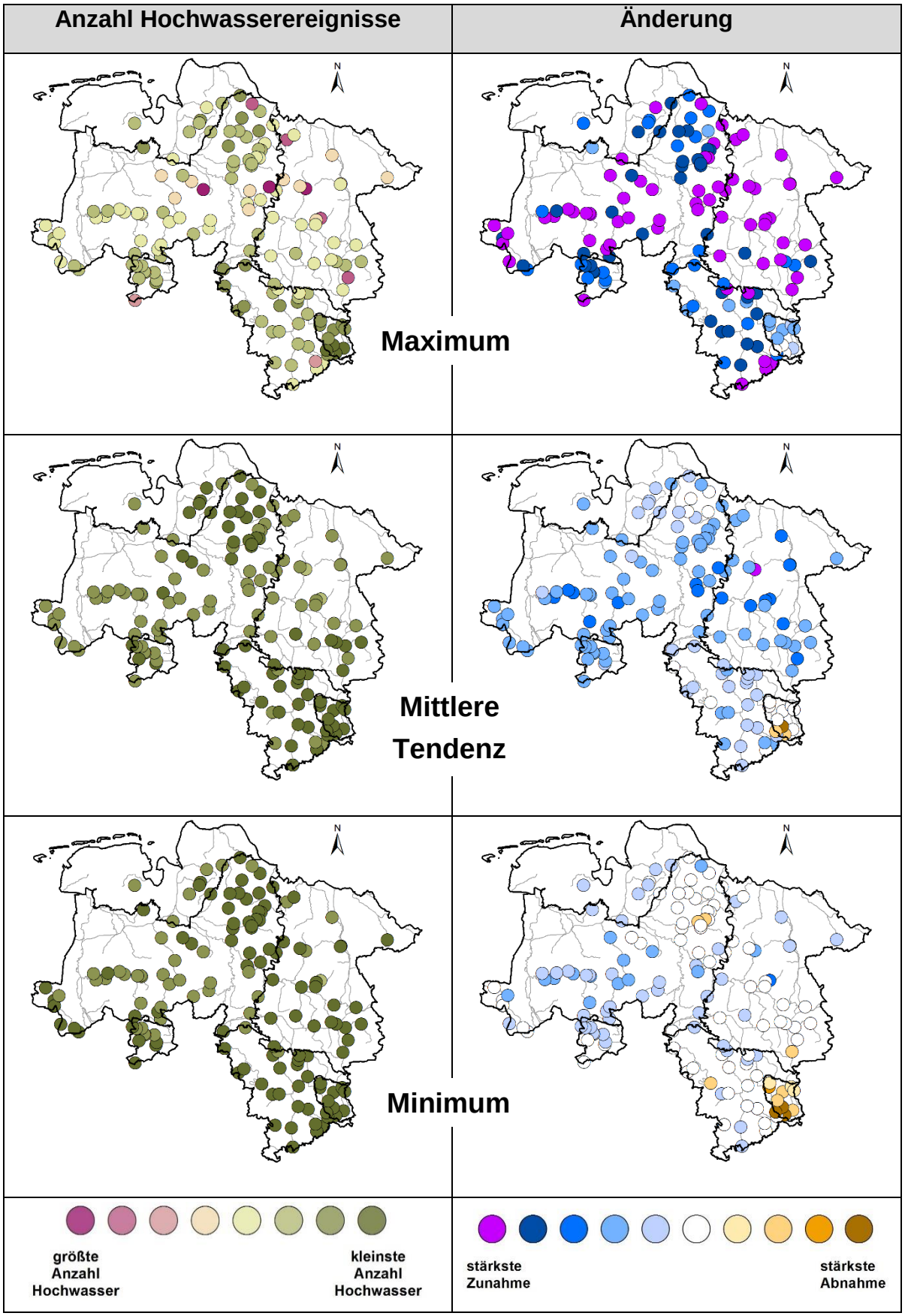


Abbildung 3-45: Anzahl der Hochwasserereignisse bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winterhalbjahr (Nov bis Apr) in der fernen Zukunft (2071-2100)

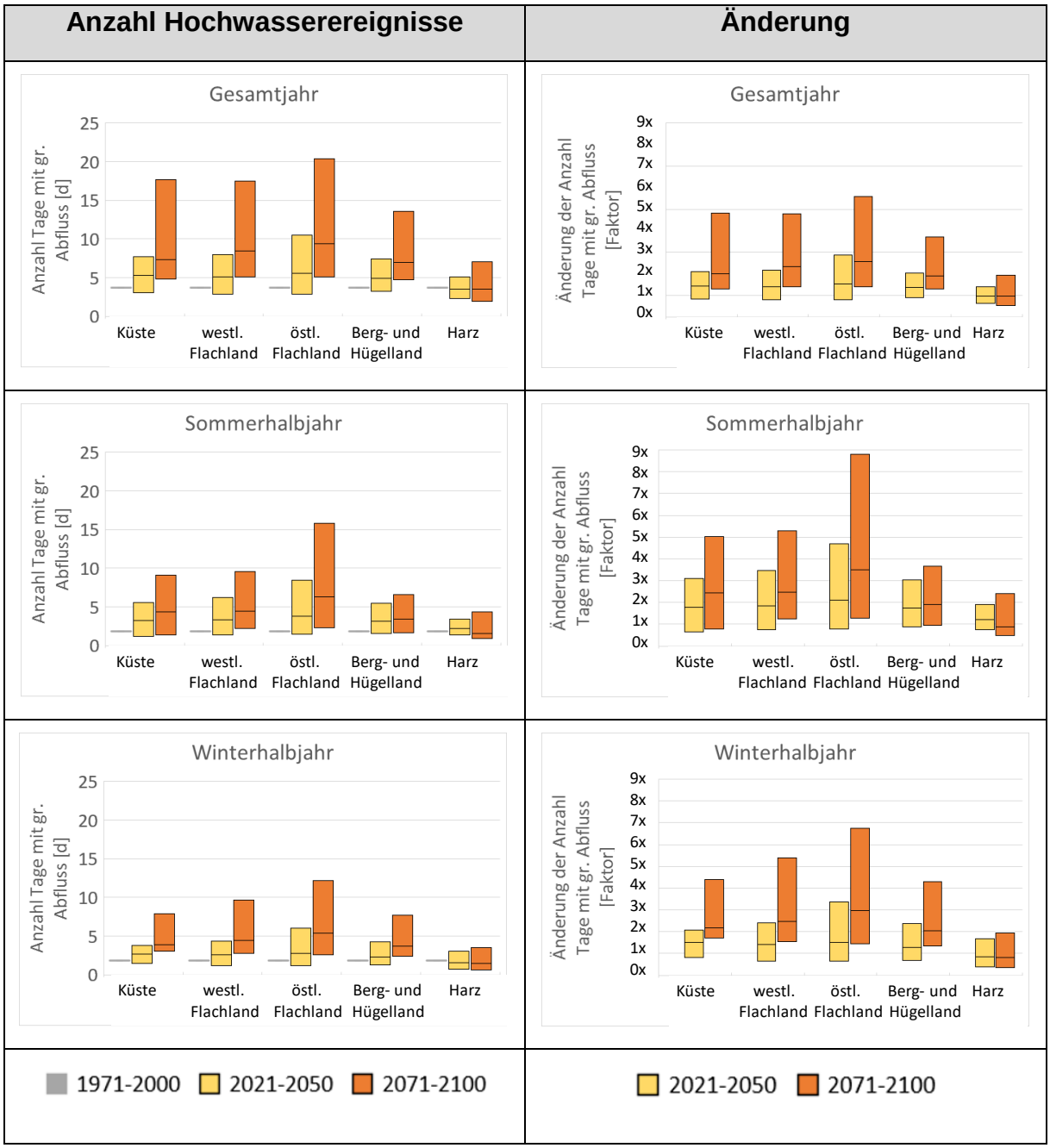


Abbildung 3-46: Zusammenfassung der mittleren Anzahl der Hochwasserereignisse und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

3.2.5 Klimawirkung Sturzfluten

3.2.5.1 Wirkungsketten

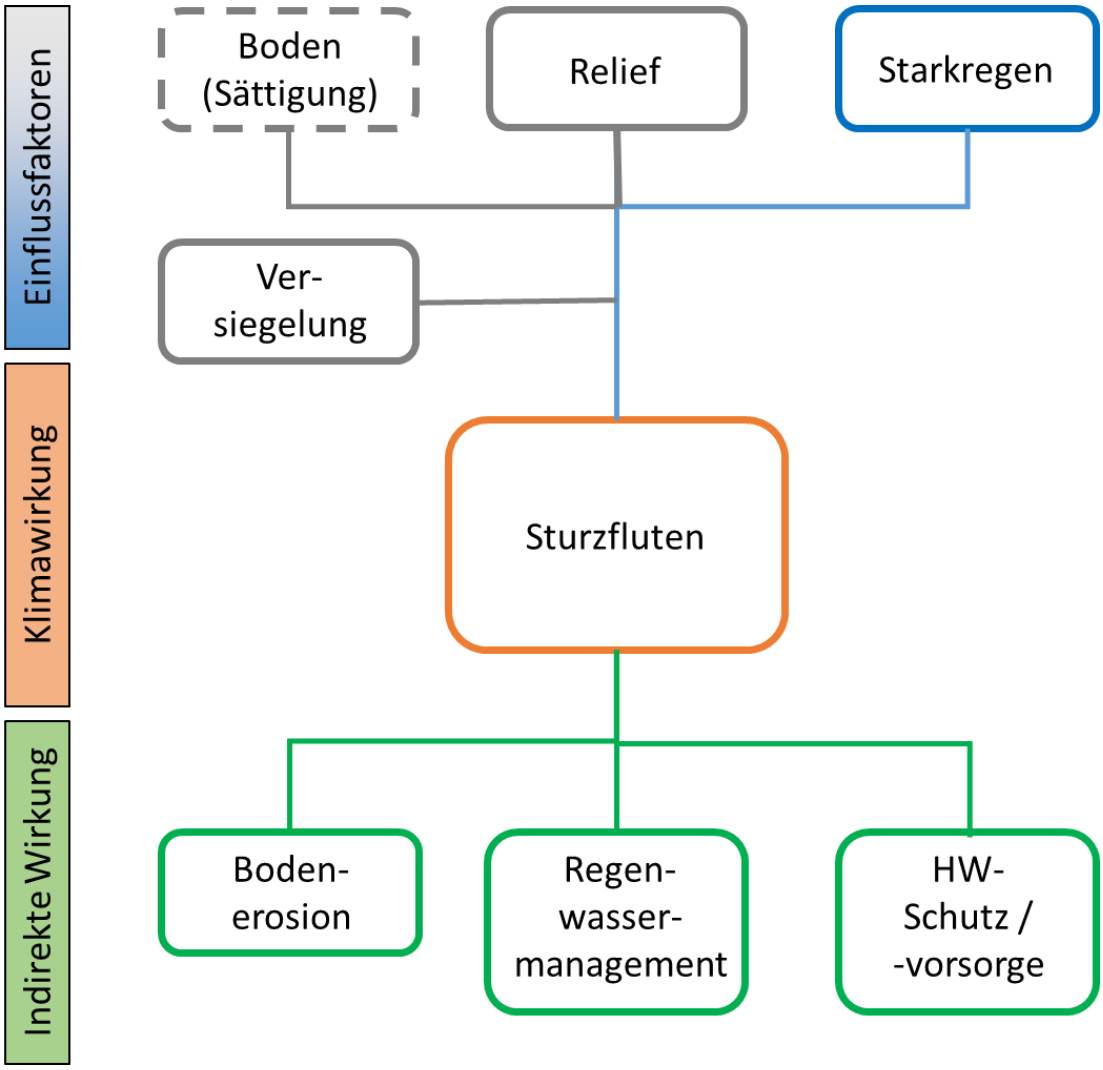


Abbildung 3-47: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Sturzfluten im Themenfeld Oberflächengewässer

Unter Sturzfluten werden in dieser Studie Ereignisse verstanden, bei denen große Regenmengen innerhalb kürzester Zeit fallen und zu einem Großteil direkt oberflächlich abfließen und zu Überflutungen in der Fläche führen können, bevor das Wasser den nächsten (größeren) Vorfluter erreicht. Wesentliche klimatische Auslöser sind hierbei Starkregenereignisse, die Niederschläge mit hoher Intensität aufweisen (große Regenmengen innerhalb kurzer Zeit) und räumlich meist lokal begrenzt fallen. Gebietseigenschaften, die diesen Effekt des flächigen Direktabflusses verstärken können, sind die Versiegelung und das Relief, d.h. die Neigungsverhältnisse im Gelände. Bereiche mit einem hohen Versiegelungsgrad (bzw. einer hohen Bodensättigung) und / oder größeren

Geländeneigungen tendieren verstärkt zu einem hohen abflusswirksamen Niederschlagsanteil sowie zu einem flächenhaften Abflussverhalten. Sturzfluten bzw. deren Veränderung haben einen maßgeblichen Effekt auf Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Hochwasservorsorge, da sie ein hohes Schadenspotenzial aufweisen, das z.B. durch Warnsysteme nur bedingt beeinflusst werden kann. Auch das Regenwassermanagement spielt bei der Bewältigung von Sturzfluten eine wichtige Rolle. Gelingt es, den fallenden Starkregen in Siedlungsgebieten durch Retention in der Fläche zu halten z.B. durch gezielte Nutzung ausgewählter Bereiche (Sportplätze, Parkplätze, Teichanlagen etc.) als Fluträume, kann die Wirkung der Sturzflut vermindert werden. In offenen Bereichen (z.B. unbewachsene landwirtschaftliche Flächen) können Starkregen zu erheblichen Schäden durch Erosion oder sog. Splash-Effekte (mechanische Wirkung der Regentropfen beim Aufschlag) führen.

3.2.5.2 Indikatoren und Operationalisierung

Sturzfluten werden nicht explizit mit den Impaktmodellen PANTA RHEI und HBV-IWW simuliert. Daher erfolgte eine Quantifizierung nicht direkt mit Hilfe von Wirkmodellen, sondern über den methodischen Ansatz der Proxyindikatoren. Hierbei findet die Operationalisierung durch die Verschneidung ausgewählter Daten statt, die relevante Parameter bzgl. Sturzfluten darstellen. Im diesem Fall wurde als Indikator das Sturzflutpotenzial ausgewählt, welches sich über die Kenngrößen Starkregen (bzw. Anzahl von Starkregentagen mit Niederschlag ≥ 20 mm/d) und Reliefenergie definiert. Die Starkregentage wurden hierbei direkt aus den Bias-adjustierten Daten des Klimamodell-Ensembles ermittelt. Die Abschätzung der Reliefenergie erfolgte über die Standardabweichung des Gefälles auf Basis eines Digitalen Geländemodells (DGM10). Zur Quantifizierung wurden die beiden Proxyindikatoren im GIS miteinander verschnitten. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49 dargestellt.

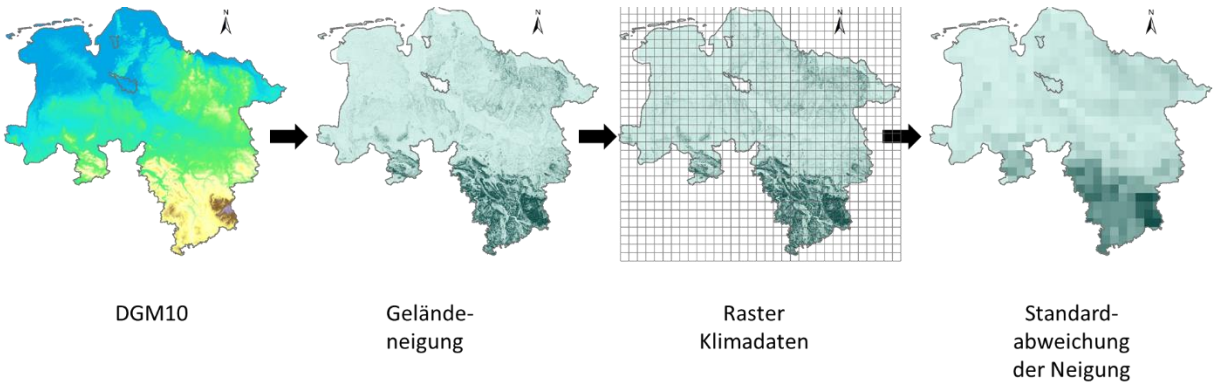


Abbildung 3-48: Vorgehen zur Ermittlung der Standardabweichung der Geländeneigung

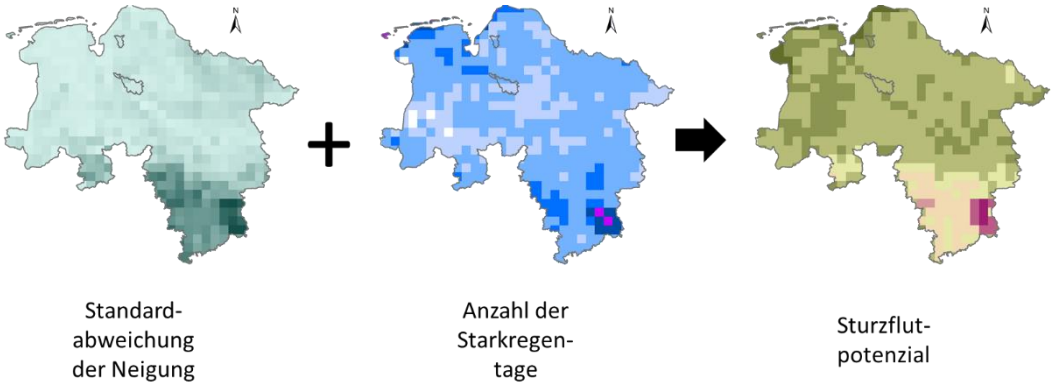


Abbildung 3-49: Vorgehen zur Ermittlung des Sturzflutpotenzials

Da es sich hierbei um zwei Größen mit unterschiedlichen Einheiten handelt, wurden die Werte beider Größen zunächst in eine dimensionslose Skala zwischen 0 und 1 überführt. Für diese Normalisierung wurden die Daten anhand der Formel 3-1 in jedem Rasterfeld umgerechnet.

$$X_{norm} = \frac{(x - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \qquad \textbf{Formel 3-1}$$

Dabei steht X_{norm} für den normalisierten Wert im betreffenden Rasterfeld, x für den jeweiligen Originalwert im Rasterfeld sowie X_{max} bzw. X_{min} für den maximalen bzw. minimalen Wert aus allen Rasterfeldern innerhalb von Niedersachsen. Die Kombination der normalisierten Werte der Starkregentage und Reliefenergie erfolgte dann additiv entsprechend Formel 3-2 für jede Rasterzelle.

$$X_{norm,gesamt} = \frac{\left(X_{norm,Starkregen} + X_{norm,Relief}\right)}{2} \qquad \textbf{Formel 3-2}$$

Diese Normalisierung wurde nur für die Darstellung des Sturzflutpotenzials durchgeführt. Die Betrachtung der Änderungssignale basiert alleine auf den (nicht normalisierten) Veränderungen der Starkregentage, da die zukünftige Reliefenergie als unverändert angenommen wird. Daraus ergibt sich folgende Klasseneinteilung für das Sturzflutpotenzial bzw. die Änderungssignale der Starkregentage.

Tabelle 3-6: Klasseneinteilung für das Sturzflutpotenzial bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000) für die Starkregentage

Legende	Sturzflutpotenzial [-]
	> 0,875 bis 1,000
	> 0,750 bis 0,875
	> 0,675 bis 0,750
	> 0,500 bis 0,675
	> 0,375 bis 0,500
	> 0,250 bis 0,375
	> 0,125 bis 0,250
	0,000 bis 0,125

Legende	Änderung Starkregentage [d]
	> +2,0
	+1,5 bis +2,0
	+1,0 bis +1,5
	+0,5 bis +1,0
	+0,25 bis +0,50
	-0,25 bis +0,25
	-0,5 bis -0,25
	-1,0 bis -0,5
	-1,5 bis -1,0
	-2,0 bis -1,5
	< -2,0

3.2.5.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Analyseergebnisse für die **Klimawirkung** des Sturzflutpotenzials in Abbildung 3-50 bis Abbildung 3-65 zeigen, dass die größten Potenziale stets im Bereich des Harzes anzutreffen sind, unabhängig von der Jahreszeit und dem Wandelszenario. Grund hierfür ist zum einen die verhältnismäßig große Anzahl an Starkregentagen, zum anderen die hohe Reliefenergie in dieser Region. Das Berg- und Hügelland zeigt ein mittleres Potenzial, während die übrigen Regionen (Flachländer und Küste) innerhalb des Betrachtungsraumes grundsätzlich eher gleichermaßen schwache Potenziale aufweisen. Auch hier spiegeln sich die entsprechenden Starkregen- sowie Reliefverhältnisse gleichermaßen wider. Über die Jahreszeiten ist das Sturzflutpotenzial während der Sommermonate am stärksten ausgeprägt, die Herbstmonate sind demgegenüber etwas schwächer betroffen. Die verhältnismäßig schwächsten Potenziale weisen die Monate im Winter und Frühling auf. Von der nahen zur fernen Zukunft nimmt das Sturzflutpotenzial nochmals in allen Regionen leicht zu. Die Unterschiede zwischen den Zukunftszeiträumen sind zumeist schwächer ausgeprägt als zwischen dem schwachen und starken Wandelszenario.

Die **Änderungssignale** sowie ihre räumlichen Muster unterscheiden sich zwischen den Jahreszeiten kaum. Die größten Änderungen (Zunahmen) sind grundsätzlich im Bereich des Harzes zu erkennen, regional auch im Berg- und Hügelland sowie an der Küste. Unter dem

schwachen Wandelszenario gibt es in der nahen Zukunft so gut wie keine Veränderungen bzw. regional auch Abnahmen. Im starken Wandelszenario sind die Zunahmen in der nahen Zukunft in den Wintermonaten am schwächsten ausgeprägt. In der fernen Zukunft gibt es Abnahmen nur noch unter dem schwachen Wandelszenario im Sommer. In Bezug auf die Jahreszeiten zeigt der Herbst insgesamt die größten Zunahmen bei den auslösenden Starkregentagen. Über das gesamte Jahr betrachtet muss zukünftig in allen Regionen mit Zunahmen gerechnet werden.

Eine maßgeblich eher hohe **Bedeutung** von Sturzfluten ist grundsätzlich für alle Regionen im Betrachtungsraum gegeben. Dies liegt zum einen daran, dass heutige Schutz- und Vorsorgemaßnahmen häufig eher auf Flusshochwasser und nicht auf in der Fläche auftretende Sturzfluten ausgerichtet sind. Zum anderen sind auch die kurzen Vorwarnzeiten entsprechender Ereignisse eine große Herausforderung für alle Regionen. Das Sturzflutpotenzial ist zwar im Harz und Harzvorland am größten, aber die Gefahr von Starkregenereignissen besteht innerhalb des gesamten Betrachtungsraumes. Auch Schadenspotenziale (vor allem Siedlungsflächen) sind in allen Regionen fast gleichermaßen vorhanden. Einzig die höhere Reliefenergie sowie die zukünftig verstärkte Zunahme von Starkregen speziell in der Region des Harzes lässt die Bedeutung des Sturzflutpotenzials hier noch höher erscheinen.

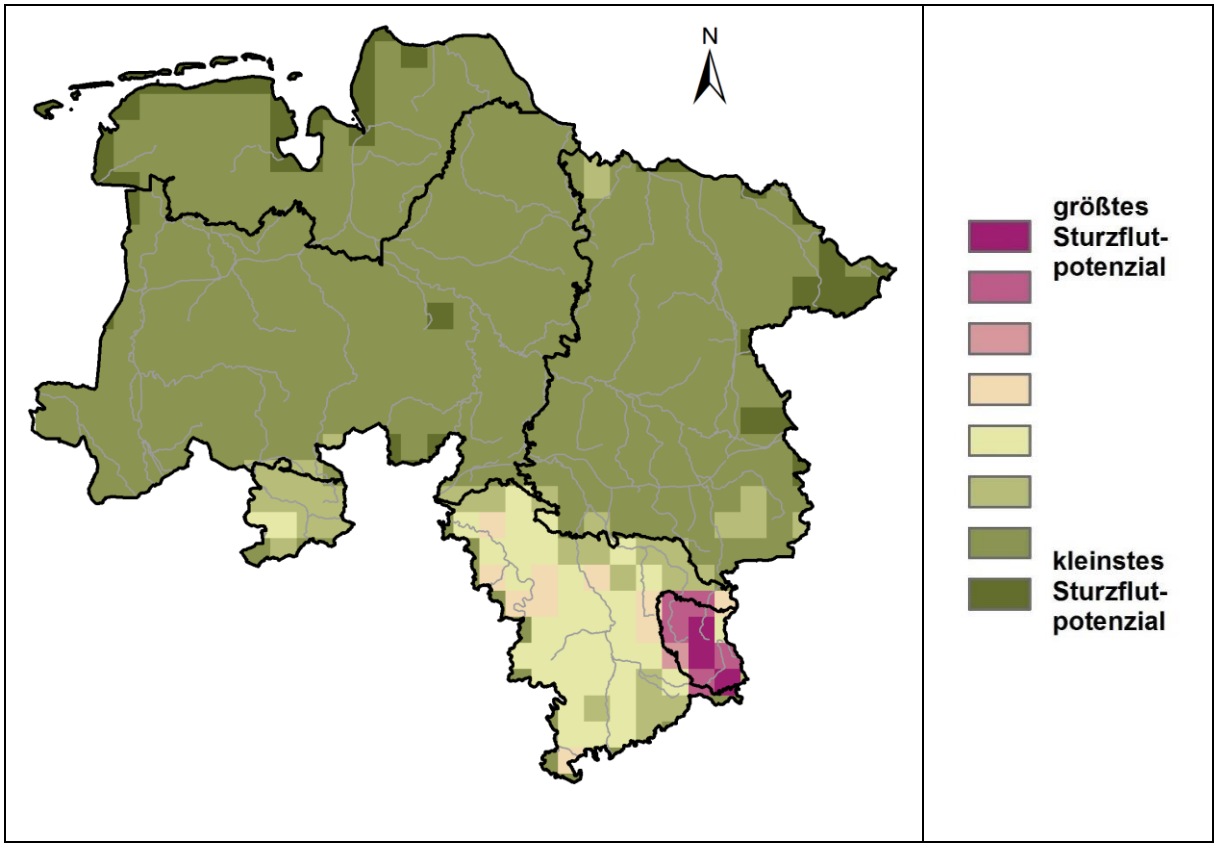


Abbildung 3-50: Das Sturzflutpotenzial im Gesamtjahr (Januar bis Dezember) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

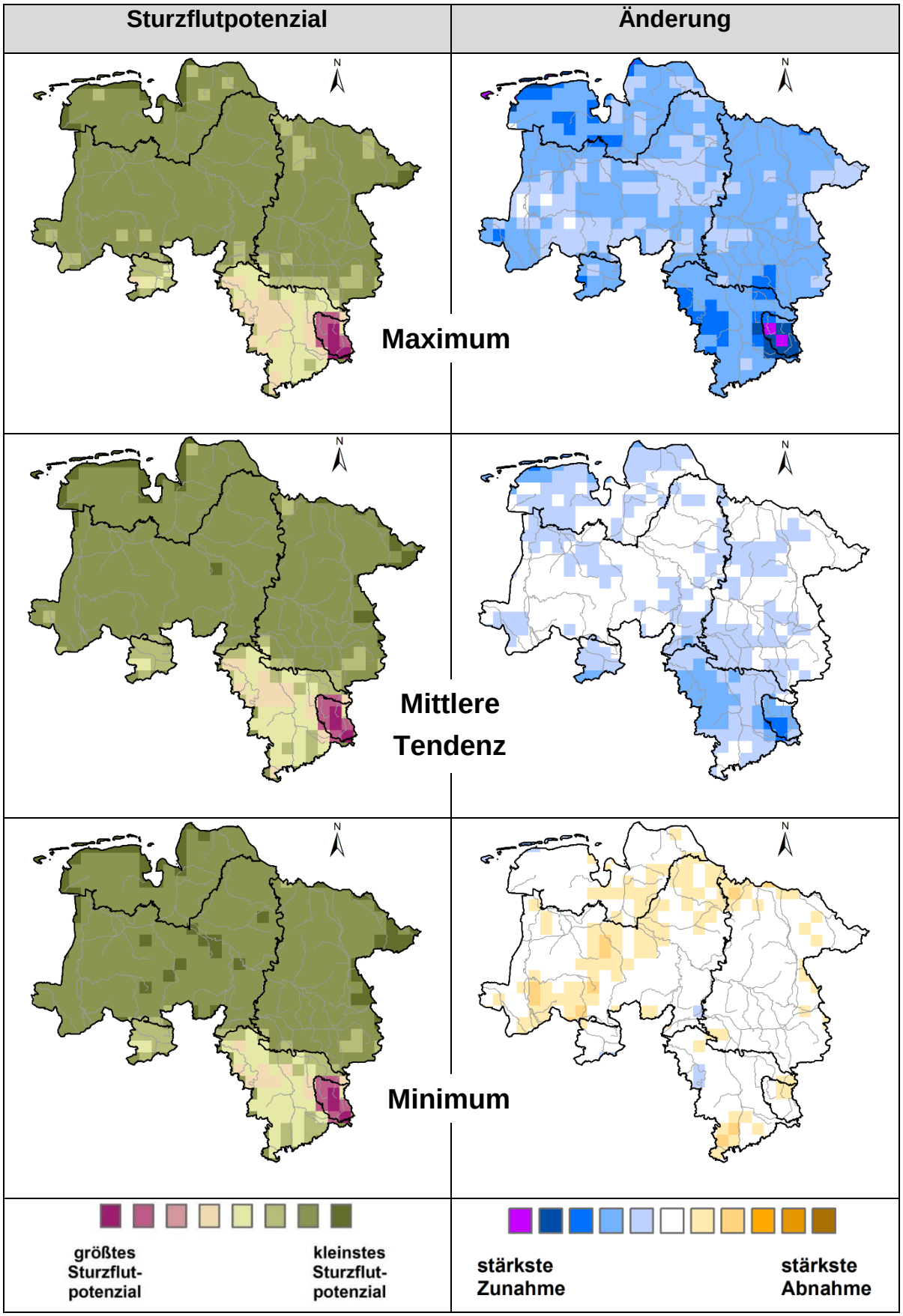


Abbildung 3-51: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (Januar bis Dezember) in der nahen Zukunft (2021-2050)

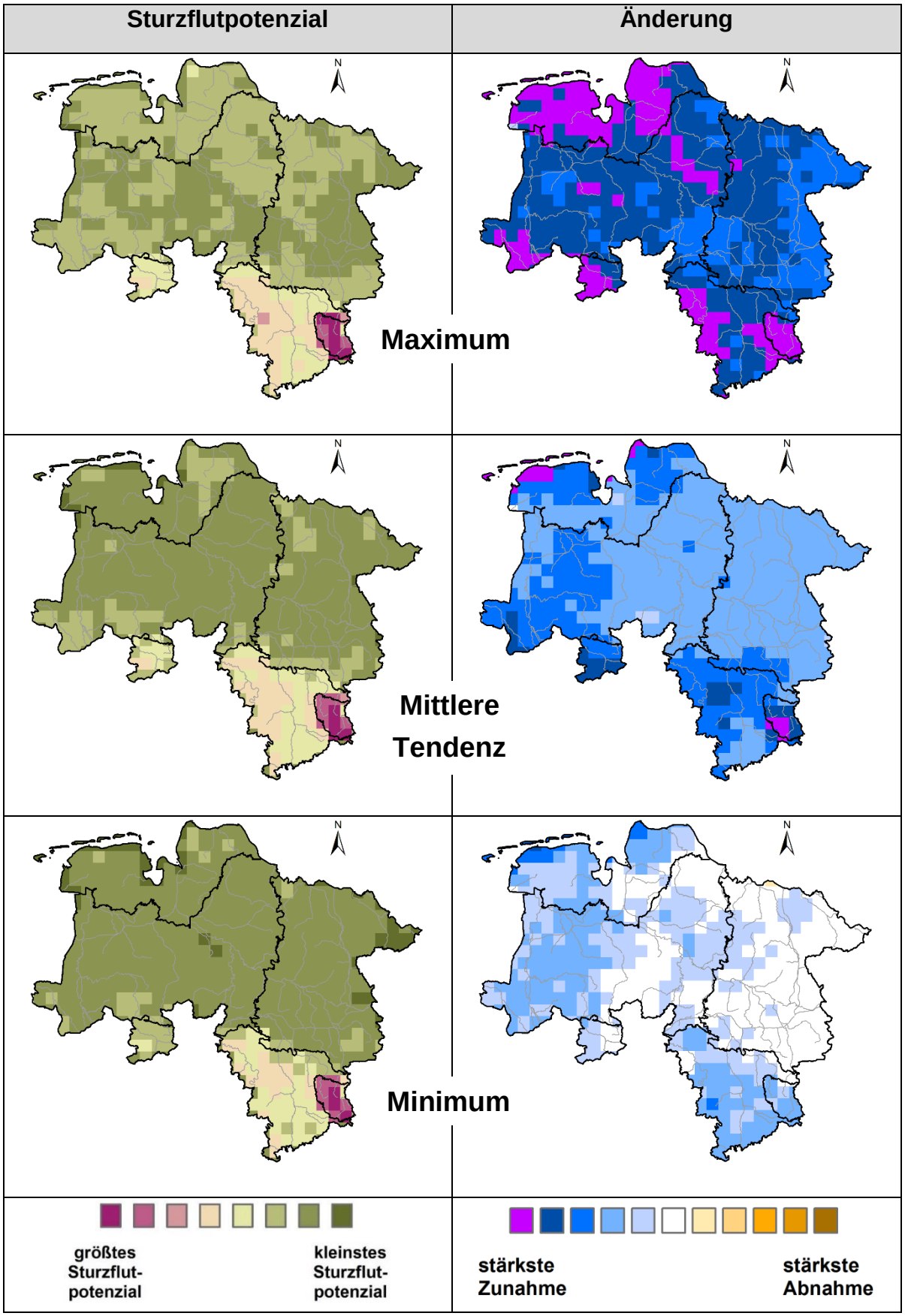


Abbildung 3-52: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (Januar bis Dezember) in der fernen Zukunft (2071-2100)

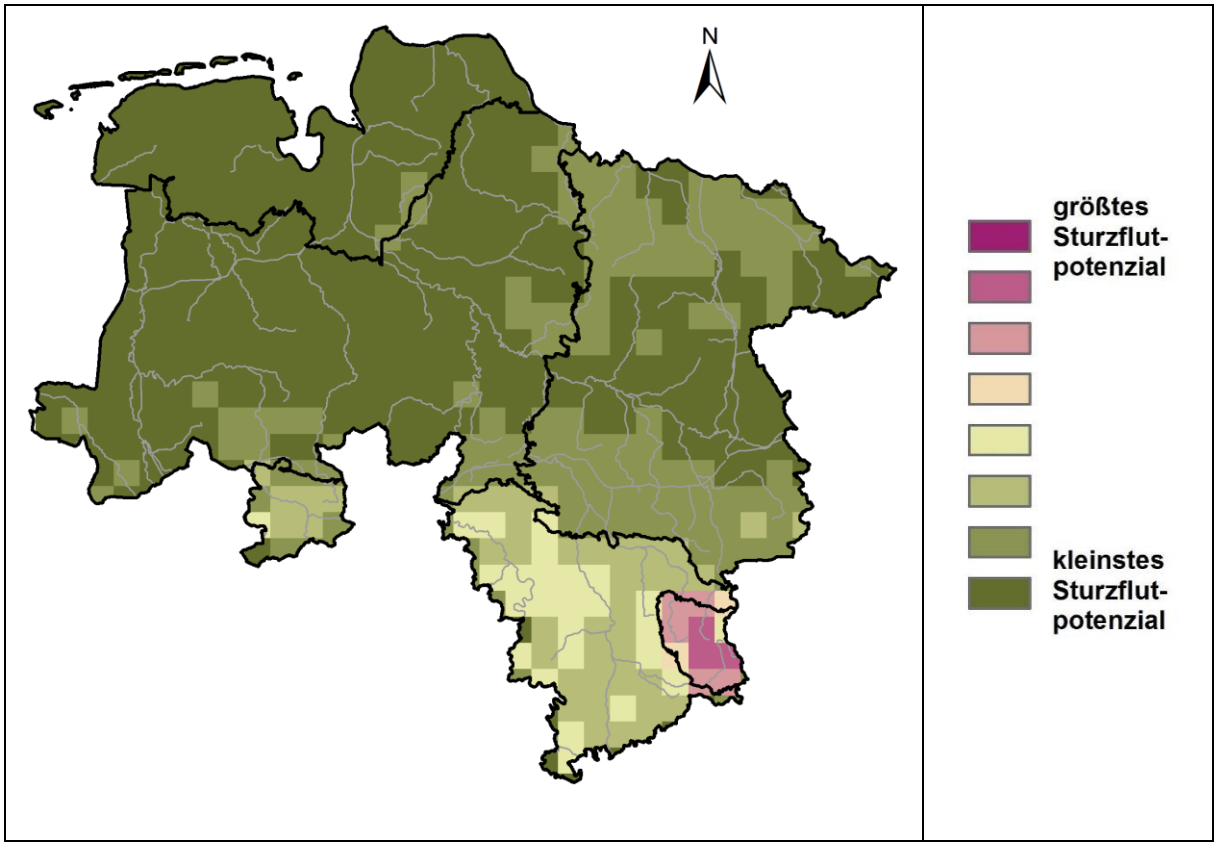


Abbildung 3-53: Das Sturzflutpotenzial im Frühling (März bis Mai) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

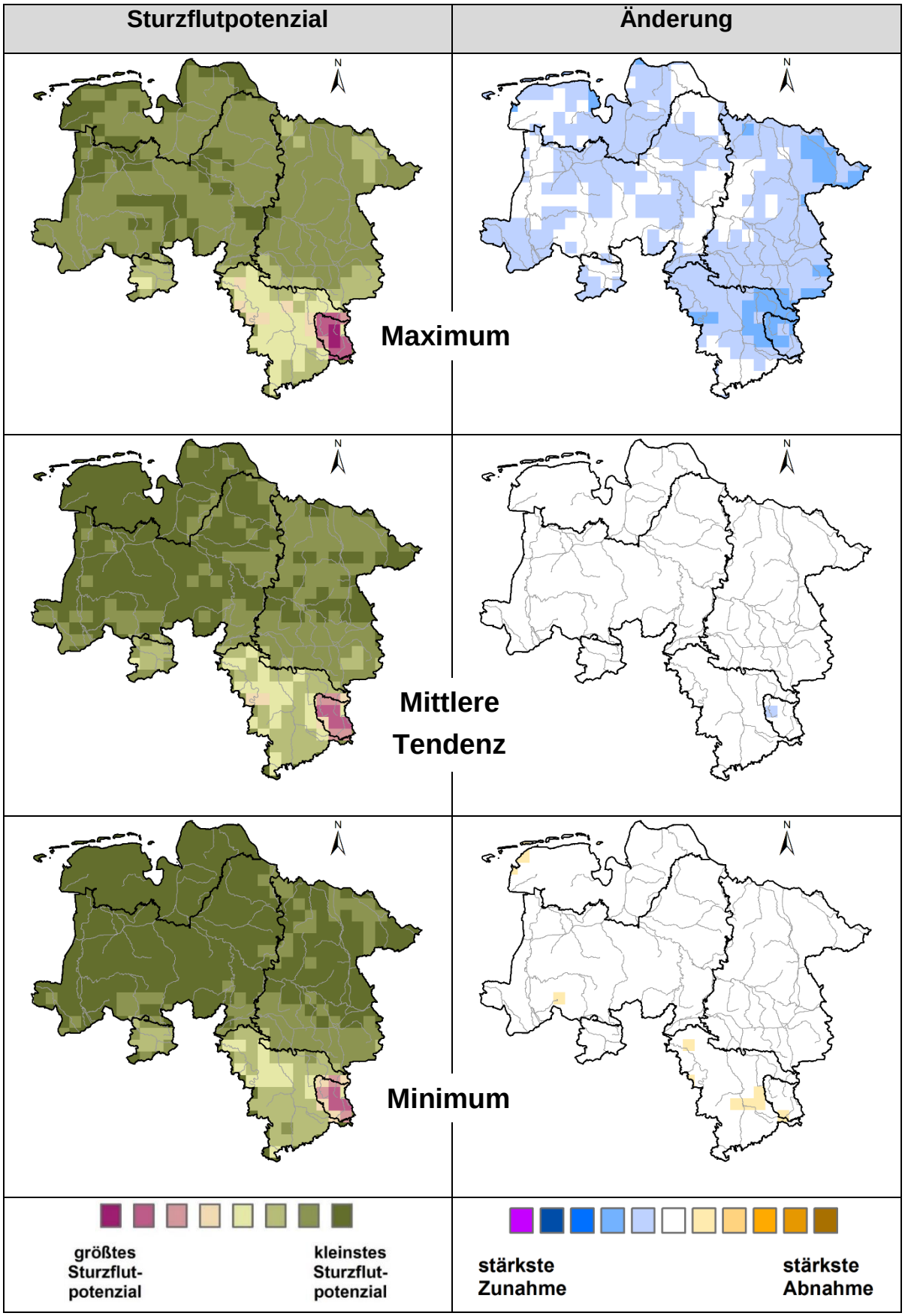


Abbildung 3-54: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Frühling (März bis Mai) in der nahen Zukunft (2021-2050)

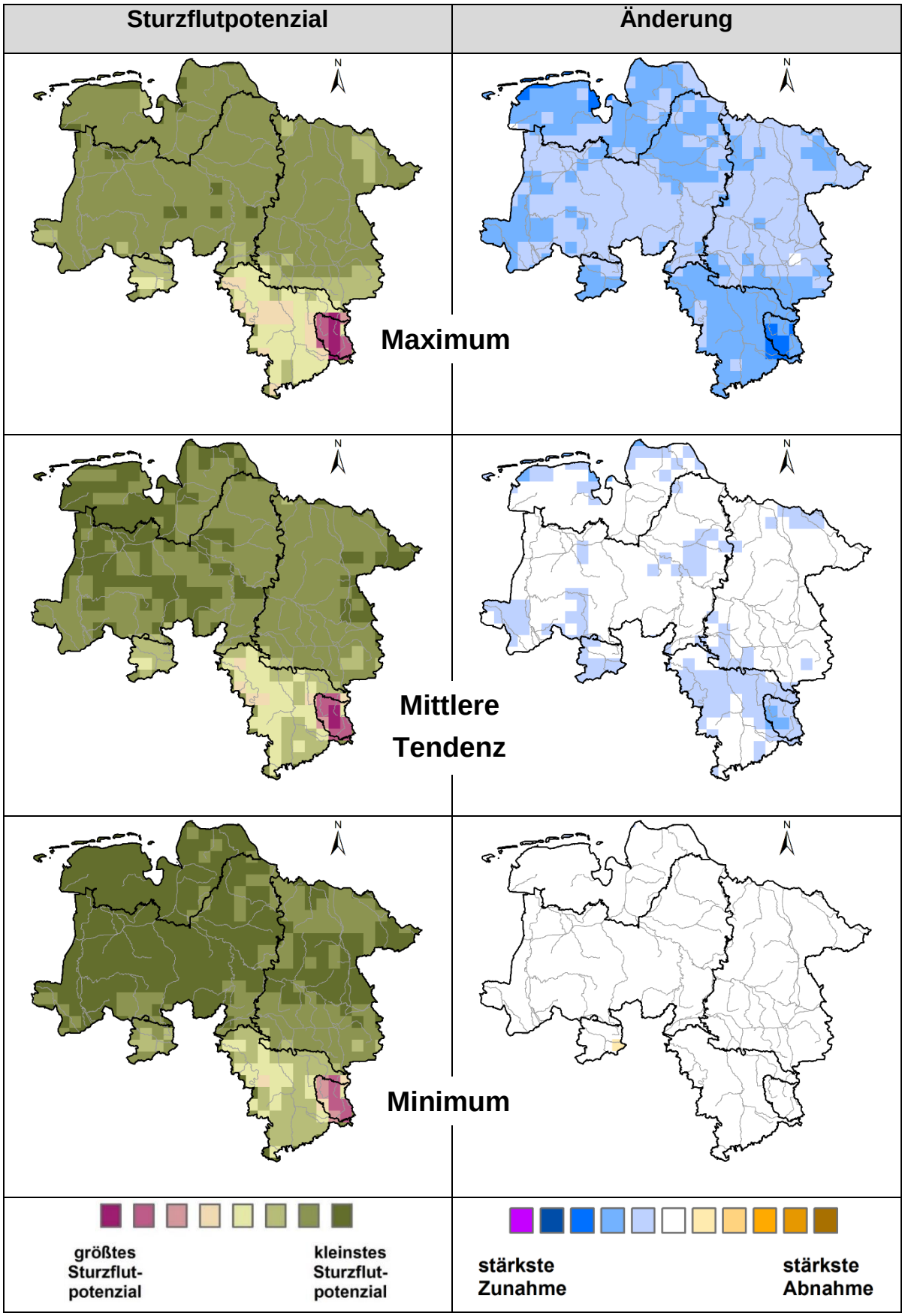


Abbildung 3-55: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Frühling (März bis Mai) in der fernen Zukunft (2071-2100)

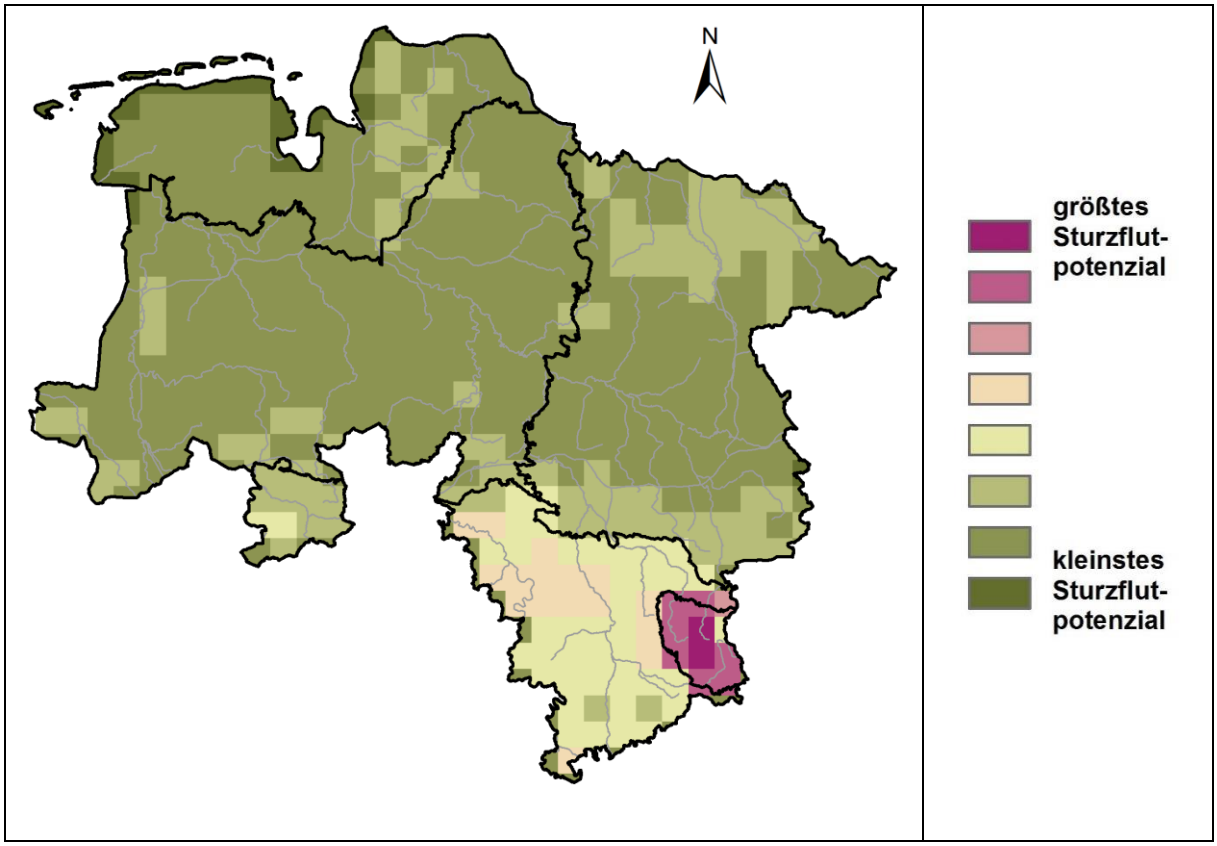


Abbildung 3-56: Das Sturzflutpotenzial im Sommer (Juni bis August) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

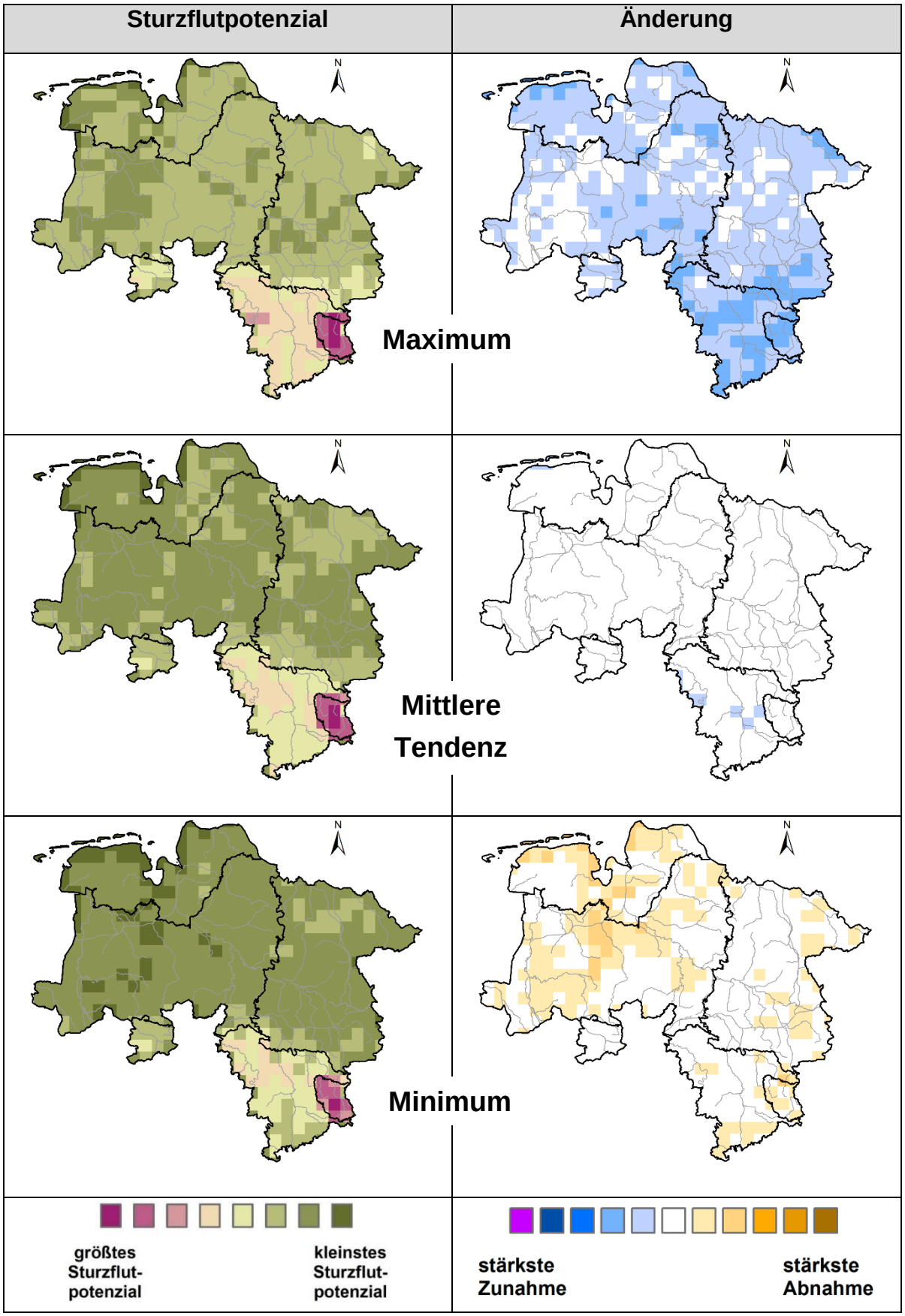


Abbildung 3-57: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommer (Juni bis August) in der nahe Zukunft (2021-2050)

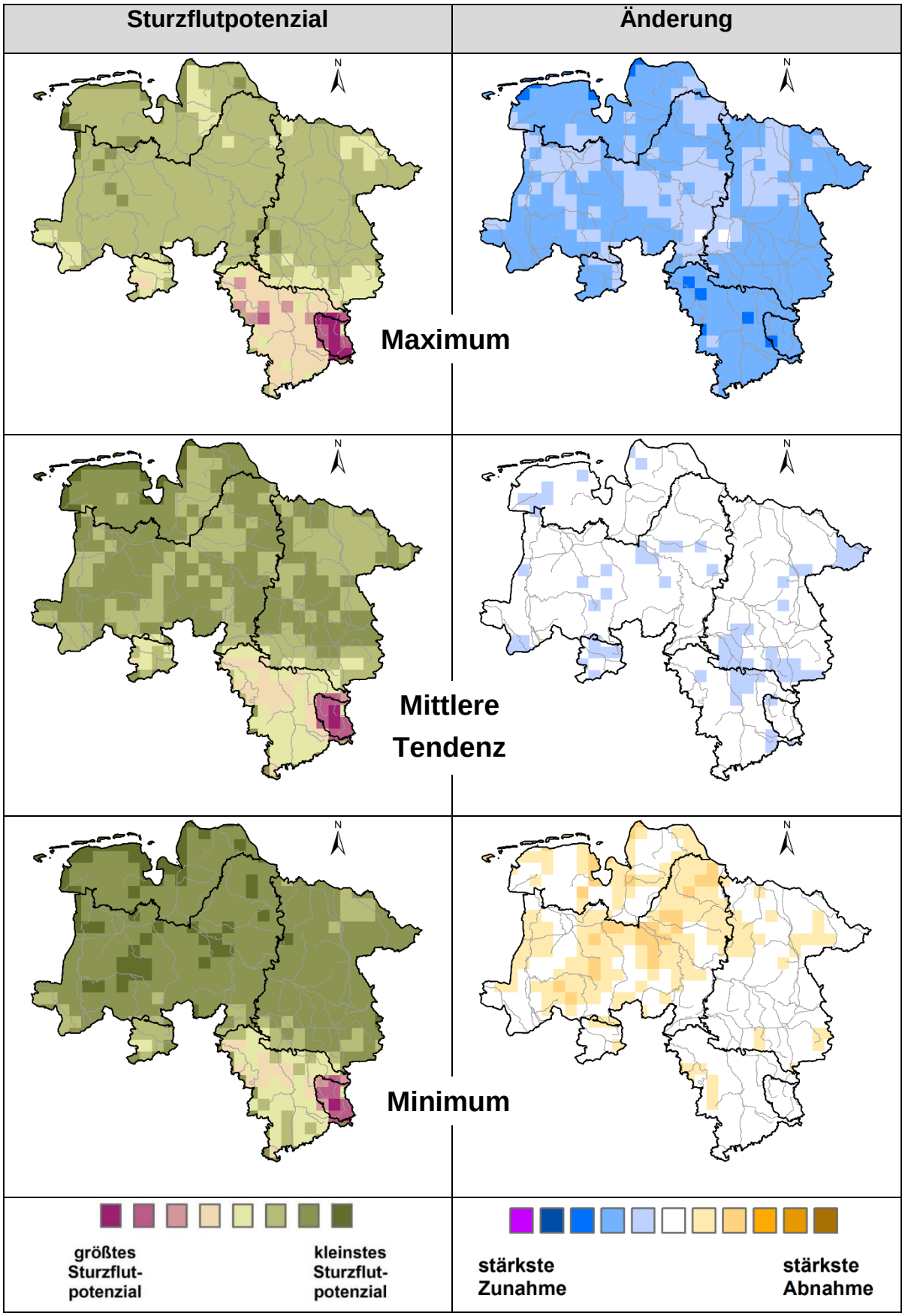


Abbildung 3-58: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Sommer (Juni bis August) in der fernen Zukunft (2071-2100)

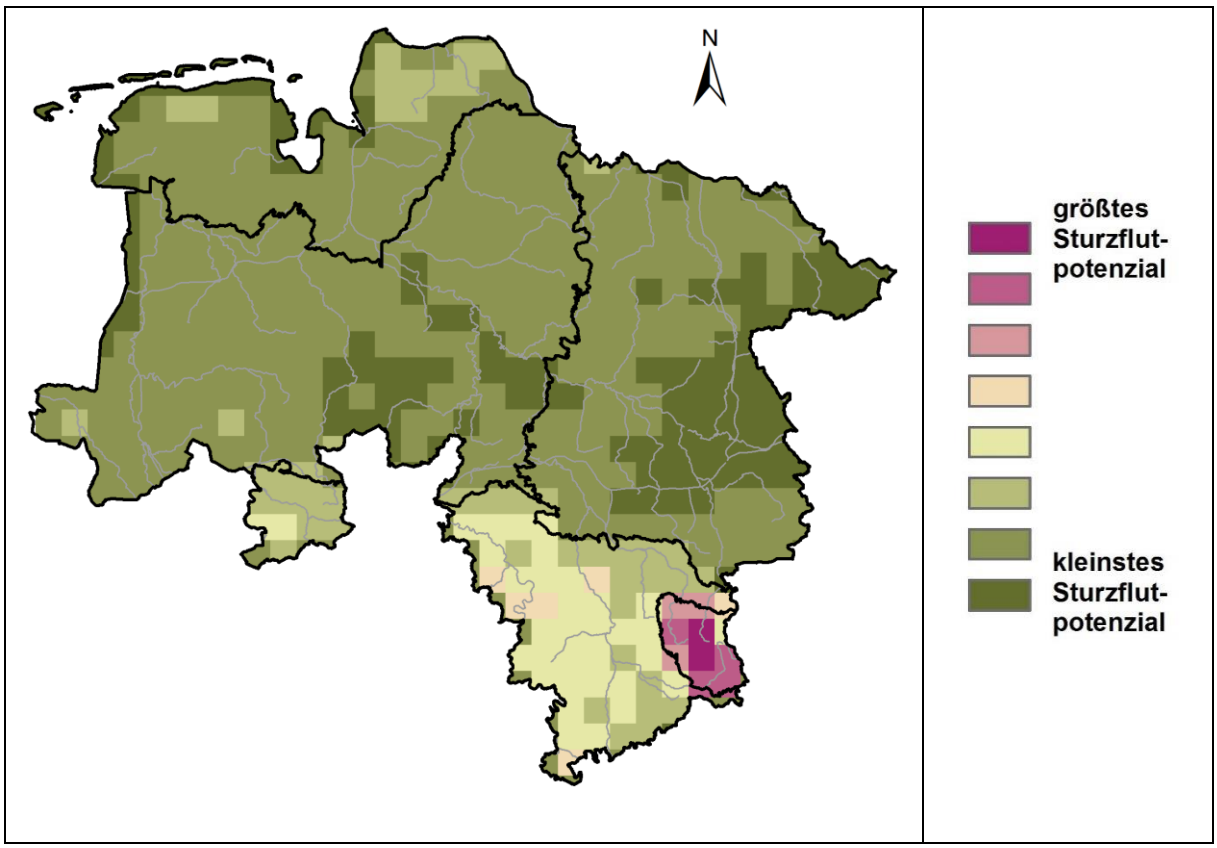


Abbildung 3-59: Das Sturzflutpotenzial im Herbst (September bis November) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

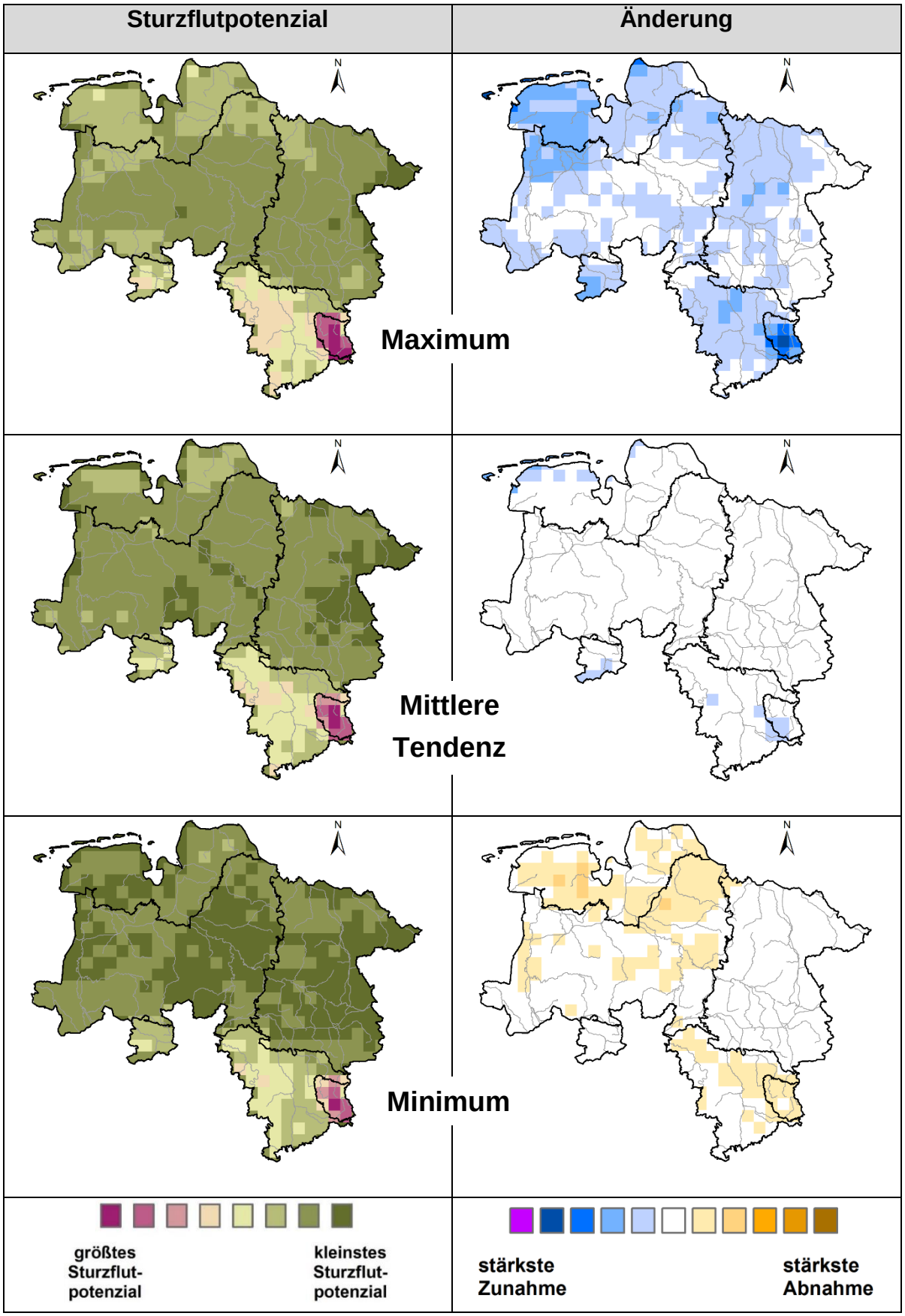


Abbildung 3-60: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Herbst (September bis November) in der nahen Zukunft (2021-2050)

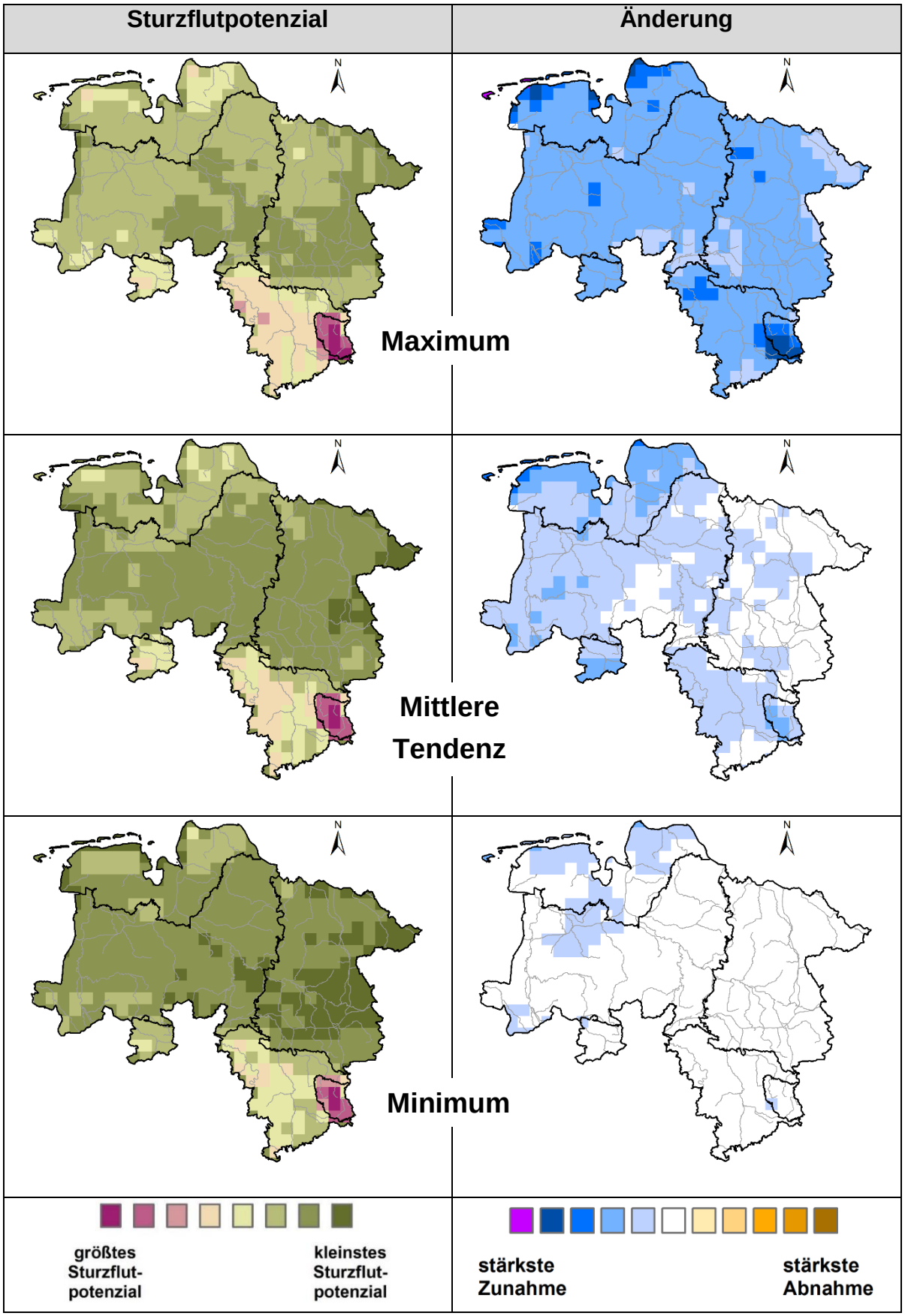


Abbildung 3-61: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Herbst (September bis November) in der fernen Zukunft (2071-2100)

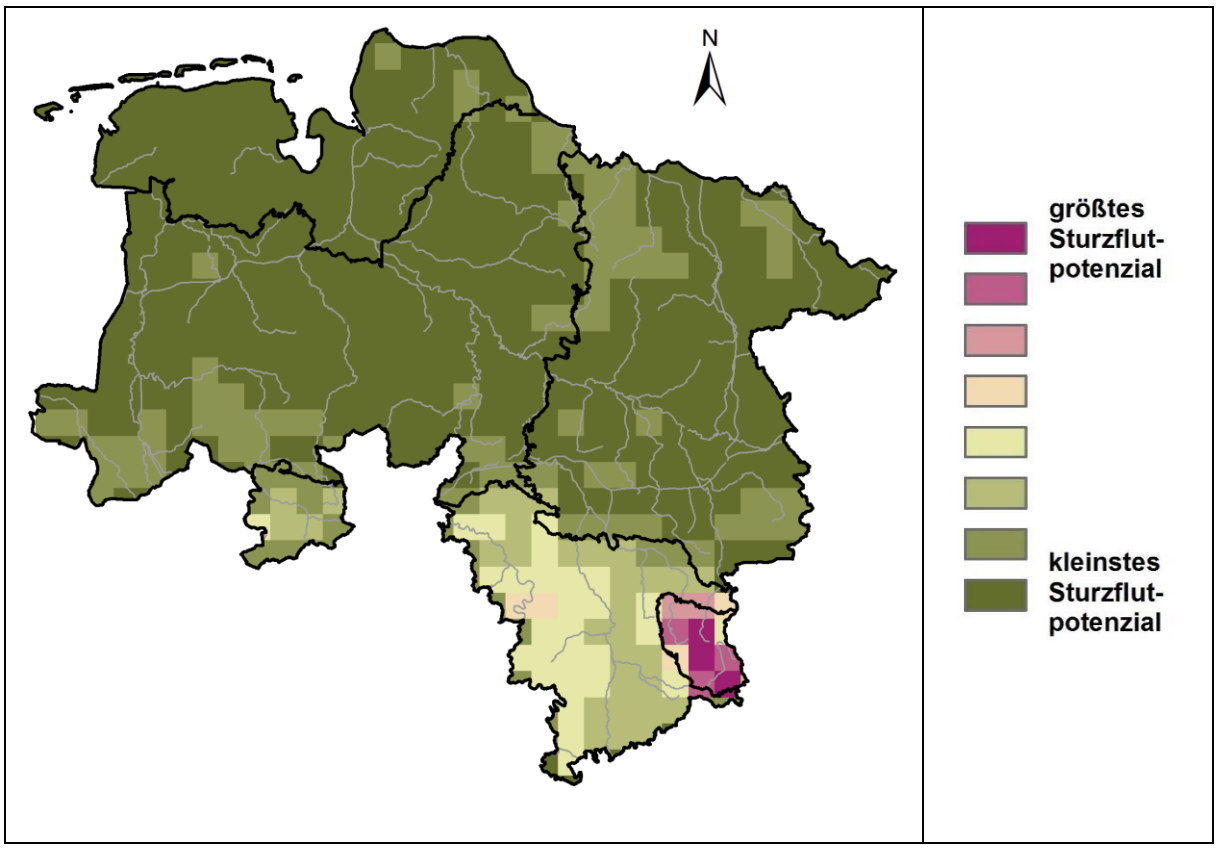


Abbildung 3-62: Das Sturzflutpotenzial im Winter (Dezember bis Februar) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

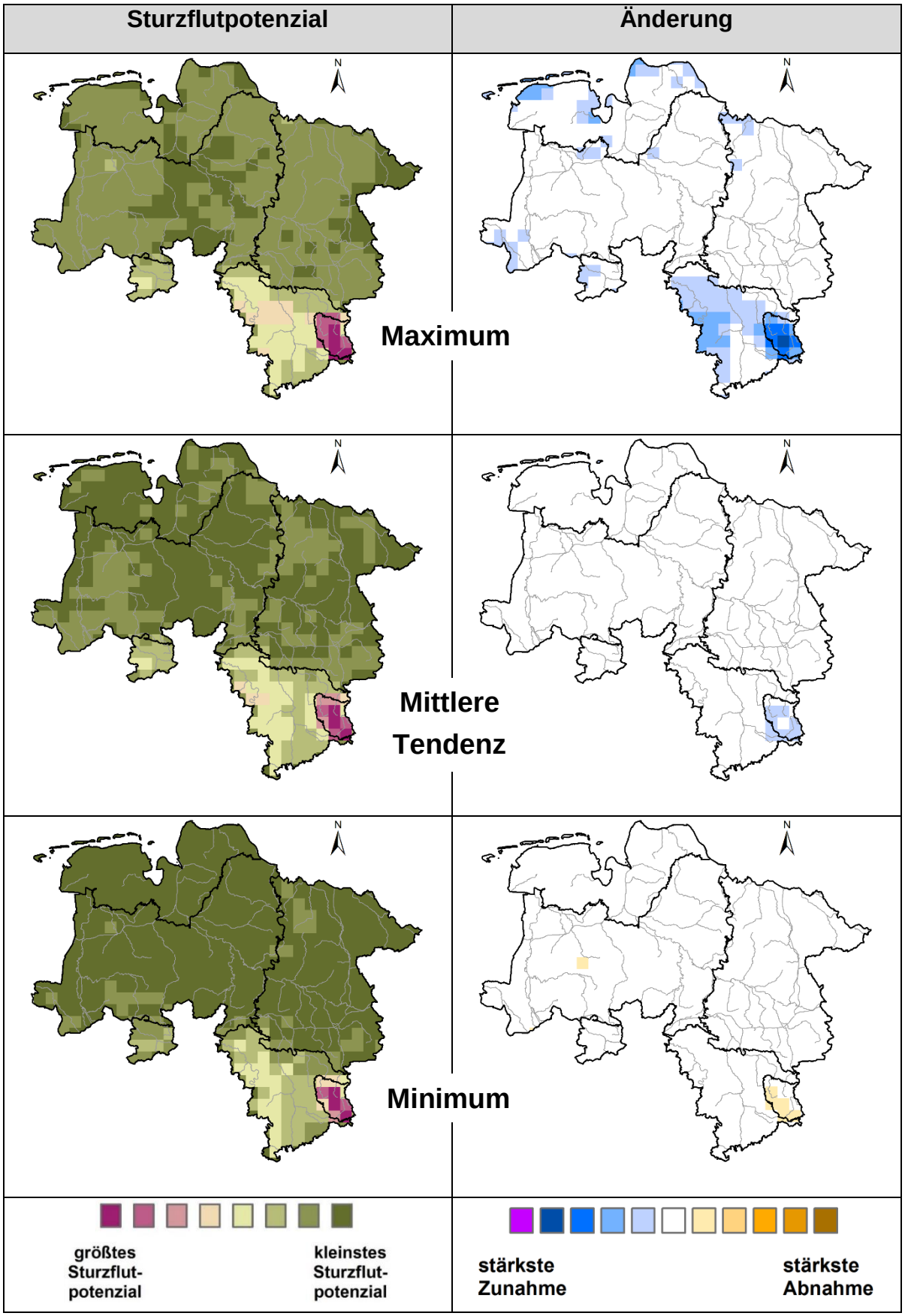


Abbildung 3-63: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winter (Dezember bis Februar) in der nahen Zukunft (2021-2050)

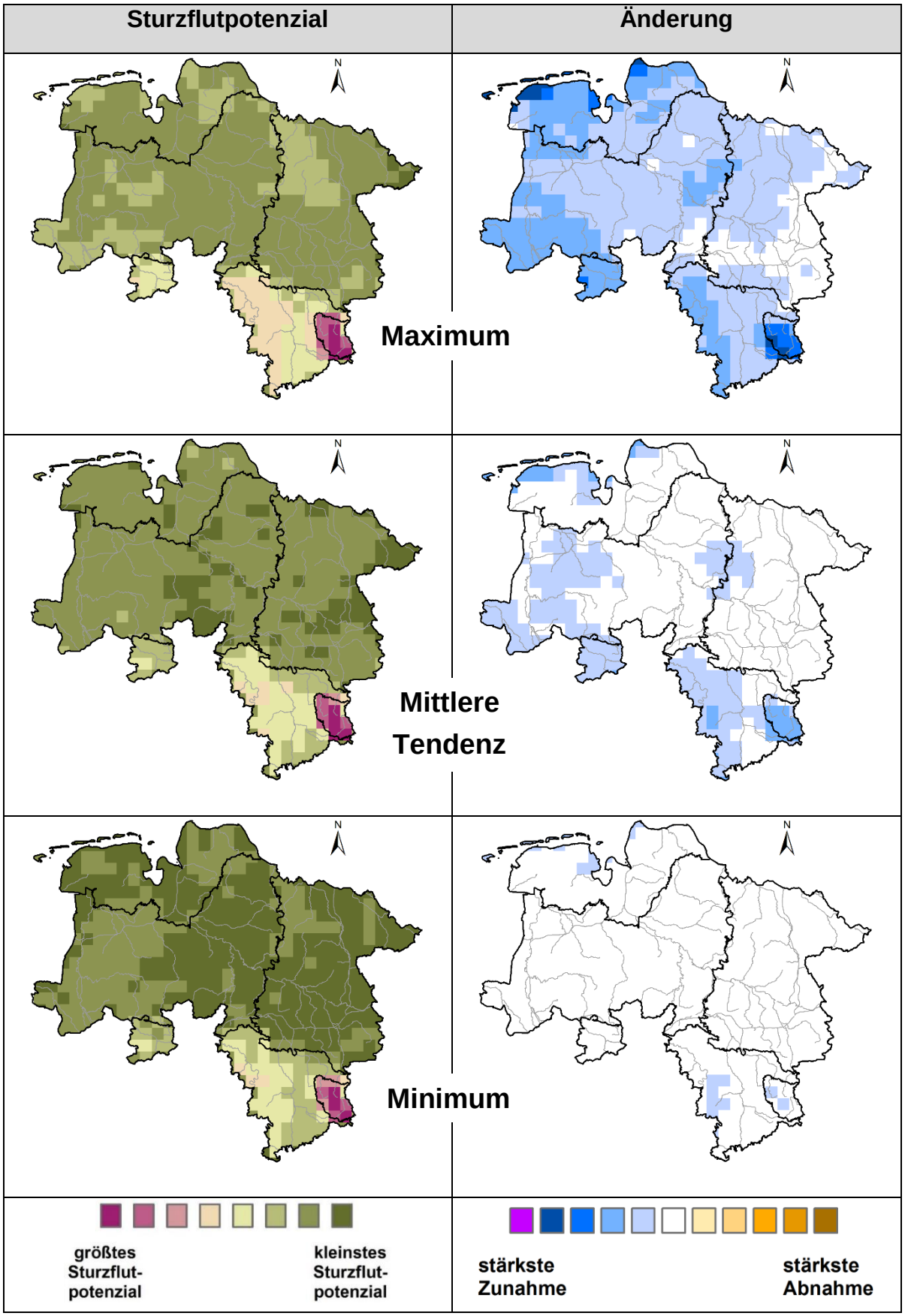


Abbildung 3-64: Das Sturzflutpotenzial bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Winter (Dezember bis Februar) in der fernen Zukunft (2071-2100)

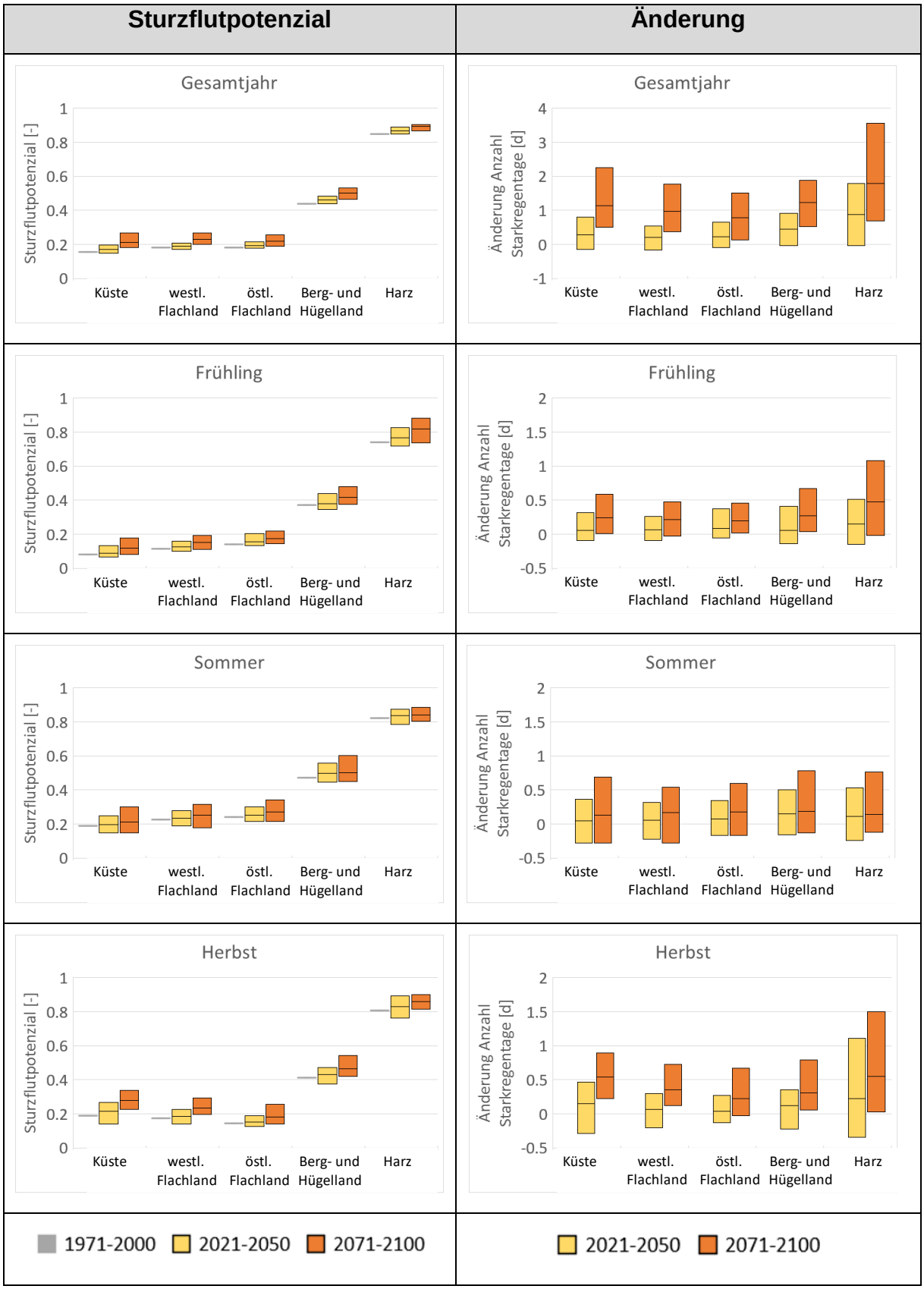


Abbildung 3-65: Zusammenfassung des Sturzflutpotenzials und dessen Veränderungen /gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen (Teil 1)

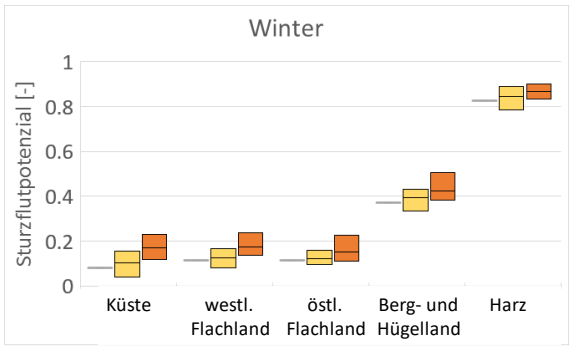
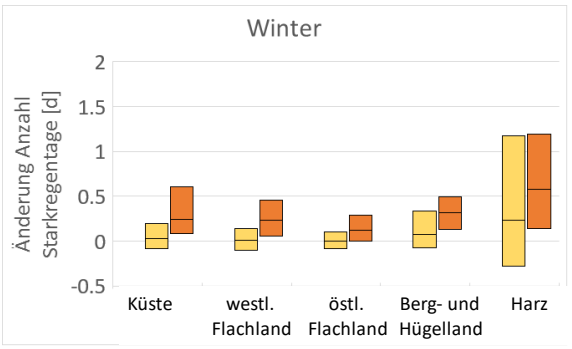
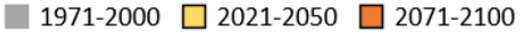
Sturzflutpotenzial	Änderung
	
	

Abbildung 3-65: Zusammenfassung des Sturzflutpotenzials und dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen (Teil 2)

3.2.6 Klimawirkung Niedrigwasserabfluss

3.2.6.1 Wirkungsketten

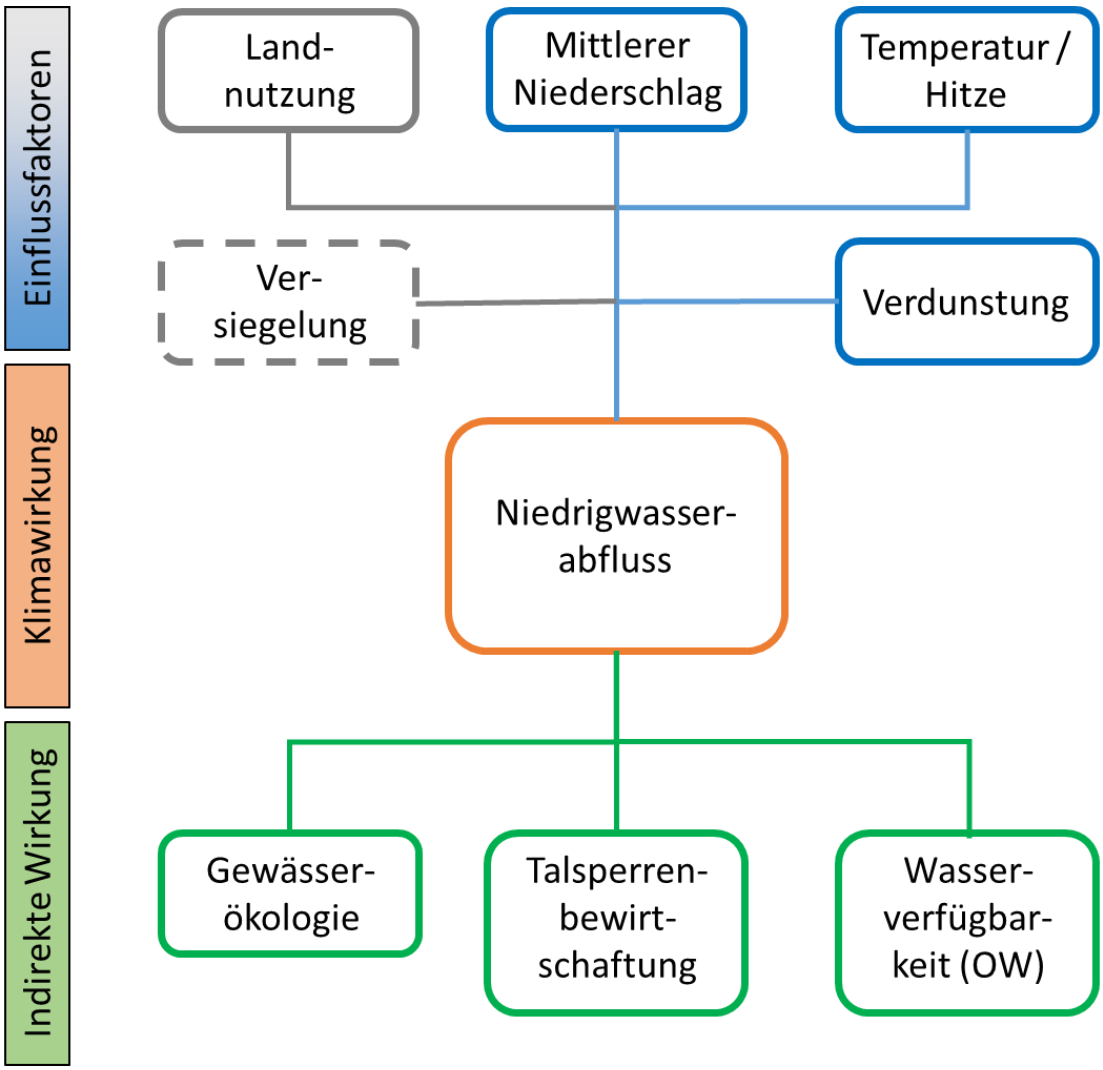


Abbildung 3-66: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Niedrigwasserabfluss im Themenfeld Oberflächengewässer

Der Niedrigwasserabfluss beschreibt eine (ungewöhnlich) niedrige Abflussmenge in einem Fließgewässer. Diese wird vor allem durch extreme klimatische Bedingungen hervorgerufen, die über einen längeren Zeitraum andauern. Hierzu zählen zum einen geringe Niederschläge bzw. Phasen von Trockenheit, zum anderen hohe Temperaturen, die mit einer erhöhten Verdunstung einhergehen. Diese Situation kann zusätzlich durch besondere standörtliche Verhältnisse verstärkt bzw. begünstigt werden, wie z.B. die Vegetation (erhöhte Transpiration der Pflanzen) oder den Versiegelungsgrad des Bodens (fehlende Infiltration). Auch anthropogene Eingriffe, wie die Speicherbewirtschaftung sowie Einleitungen und Entnahmen, können Niedrigwasserverhältnisse beeinflussen. In Kapitel 3.2.1 wird beschrieben, dass der Abfluss in Fließgewässern aus dem Niederschlag resultiert, der auf die Erdoberfläche (ggf.

Pflanzenoberfläche) fällt, abzüglich des Anteils der von dort verdunstet. Der verbleibende Teil des Niederschlags fließt entweder direkt als Oberflächenabfluss binnen kurzer Zeit in den nächsten Vorfluter oder er infiltriert in den Boden und fließt durch die ungesättigte Bodenzone bzw. über das Grundwasser dem Vorfluter lateral, zeitlich verzögert zu. Dies bedeutet, dass eine Niedrigwassersituation in der Regel erst dann entsteht, wenn die entsprechenden klimatischen Rahmenbedingungen über einen längeren Zeitraum vorliegen. Der Abfluss im Gewässerbett wird dann praktisch ausschließlich über das Grundwasser gespeist, da auch die ungesättigte Bodenzone während langer Trockenheit kein „freies“ (fließendes) Wasser mehr beinhaltet. Daher kann es während solcher Trockenphasen u.a. zu verstärkten Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser (in Form von Niedrigwasser im Gewässerbett) kommen, sowohl was die Wassermenge betrifft, als auch die Wasserqualität und Wassertemperatur.

Anders als Hochwasser tritt das Phänomen von Niedrigwasser nicht plötzlich und kurzzeitig auf, sondern es entwickelt sich langsam über einen längeren Zeitraum und kann auch entsprechend lange andauern (Wochen bis Monate). Dadurch kann auch die Ökologie der Gewässer (aquatische Organismen im und am Gewässer) in Mitleidenschaft gezogen werden, z.B. durch erhöhte Wassertemperaturen, geringe Sauerstoffgehalte oder erhöhte Stoffkonzentrationen. Gleichzeitig haben Niedrigwasser auch Auswirkungen auf die Bewirtschaftung von Talsperren, wenn diese, aus ökologischen oder ökonomischen Gründen, einen gewissen Wasserstand im Unterwasser garantieren sollen (Wassermengenproblem) oder wenn das Wasser in den Stauseen für die Trinkwassergewinnung genutzt wird (Wassermengen- / Wasserqualitätsproblem). Eng damit verknüpft sind auch die Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Wasserverfügbarkeit, z.B. im Zusammenhang mit industriellem Brauch- / Kühlwasser, welches dann ggf. nicht mehr in ausreichendem Maße zur Verfügung steht.

3.2.6.2 Indikatoren und Operationalisierung

Die Charakterisierung der Niedrigwasserverhältnisse erfolgt über den Indikator der niedrigsten Abflussmenge gemittelt über einen Zeitraum von sieben Tagen (NM7Q). Dieser Abflusswert wird wie bei der Operationalisierung des mittleren Durchflusses und der Hochwasser-Abflussscheitel in die entsprechende Abflusshöhe (~ abflusswirksamer Niederschlagsanteil) umgerechnet (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Da in Hinblick auf die Niedrigwasserführung in Gewässern ein kleiner Abflusswert in diesem Fall kritische Verhältnisse beschreibt und größere Abflüsse eher entspannte Verhältnisse darstellen, erfolgt die Einschätzung bzw. Farbgebung an dieser Stelle in umgekehrter Reihenfolge im Vergleich zu den anderen betrachteten Klimawirkungen im Themenfeld Oberflächengewässer (siehe Tabelle 3-7).

Die betrachteten Durchflussmengen an den Pegeln stammen aus den Simulationen mit dem hydrologischen Modell PANTA RHEI sowie einem statistischen Prognosemodell. Ein fachlich begründeter Schwellenwert für eine starke bzw. schwache Klimawirkung wird hierbei nicht festgelegt. Die Klasseneinteilung für die Klimawirkung ergibt sich daher aus den Bandbreiten

der minimalen bis maximalen Abflusshöhen an den Pegeln. Das Gleiche gilt für die Änderungssignale in der Zukunft.

Tabelle 3-7: Klasseneinteilung der Niedrigwasser-Abflusshöhe bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Abflusshöhe [mm] NM7Q
	> 0,7
	> 0,6 bis 0,7
	> 0,5 bis 0,6
	> 0,4 bis 0,5
	> 0,3 bis 0,4
	> 0,2 bis 0,3
	> 0,1 bis 0,2
	≤ 0,1

Legende	Änderung [%]
	> +45
	+35 bis +45
	+25 bis +35
	+15 bis +25
	+5 bis +15
	-5 bis +5
	-15 bis -5
	-25 bis -15
	-35 bis -25
	-45 bis -35
	< -45

3.2.6.3 Ergebnisse und Bewertung

Die räumlich differenzierten Ergebnisse der Analysen der **Klimawirkung** Niedrigwasserabfluss anhand des NM7Q sind in Abbildung 3-67 bis Abbildung 3-69 zu sehen, die regionale Zusammenfassung zeigt Abbildung 3-70. Die kleinsten Abflusshöhen bei Niedrigwasser sind sowohl in der Gegenwart als auch in der Zukunft im westlichen und östlichen Flachland vorzufinden. Die Unterschiede zwischen dem schwachen und starken Wandelszenario sind dabei nur gering. Im Bergland liegen die Abflusshöhen bei Niedrigwasser etwas über denen der Flachländer, wobei auch hier nur geringe Unterschiede zwischen der Gegenwart und Zukunft zu erkennen sind. Die kleinste Abflusshöhen bei Niedrigwasser weist der Harz auf. Diese Aussage besitzt jedoch nur eingeschränkte Gültigkeit, da sie auf einem einzigen Pegel beruht, der zwar unbeeinflusst ist von der Wirkung der Talsperren, dafür aber nur die Verhältnisse im Südharz darstellt. Insgesamt zeigt sich hier zukünftig eine abnehmende Abflusshöhe bei zunehmender Bandbreite zwischen schwachem und starken

Wandelszenario. Für die Küste können in diesem Fall keine Aussagen gemacht werden, da in dieser Region keine Pegel mit Abflussreihen im Zuge der Simulation der Niedrigwasserverhältnisse vorliegen (vgl. Abbildung 2-7).

Die **Änderungssignale** zeigen, dass es quasi in allen betrachteten Regionen deutliche Unterschiede zwischen dem schwachen und starken Wandelszenario gibt. Während es unter dem starken Wandelszenario in allen Regionen durchweg Zunahmen bzgl. der Abflusshöhe beim NM7Q zu verzeichnen gibt, nimmt diese unter dem schwachen Wandelszenario stets ab. Im Mittel fallen die Änderungen im westlichen Flachland sowie im Bergland in beiden Zukunftszeiträumen relativ moderat aus. Im östlichen Flachland sowie im Harz gibt es dagegen deutlichere Veränderungen, vor allem in der fernen Zukunft (Zunahmen der Abflüsse im östlichen Flachland, Abnahmen der Abflüsse im Harz). Allerdings sind die Bandbreiten zwischen schwachem und starken Szenario hierbei auch am größten.

Insgesamt haben die Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) eine mittlere **Bedeutung** für die Regionen in Niedersachsen. Die Bereiche der Flachländer weisen gegenwärtig relativ niedrige Abflusshöhen auf, die zukünftig prozentual zwar leicht zunehmen können, hinsichtlich der Absolutwerte jedoch nach wie vor vergleichsweise gering bleiben. Unter Berücksichtigung der tendenziell zunehmenden mittleren Abflüsse (vgl. Kapitel 3.2.2.3) sollten potenziell betroffene Systeme wie die Gewässerökologie oder der Wasserbedarf von Industrie/Gewerbe bzw. Städten mit diesen zukünftigen Verhältnissen nicht mehr Probleme bekommen als heute. Allerdings soll an dieser Stelle betont werden, dass das Thema Niedrigwasser in diesen Bereichen weiterhin eine besondere Herausforderung bleibt, auch weil sich ggf. der Bedarf an Wasser erhöhen könnte (z.B. im Zuge zukünftig zunehmender Temperaturen). Auch im Bergland scheinen sich die zukünftigen Verhältnisse im Mittel gegenüber der Gegenwart kaum zu verändern. Einzig der (Süd-)Harz zeigt in der (fernen) Zukunft deutliche Abnahmen beim NM7Q. Da die Talsperren im Harz u.a. auch für die Trinkwasserversorgung genutzt werden, kann es erforderlich sein, zukünftig in diesem Zusammenhang entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln (siehe auch Kapitel 3.2.7.3). Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich die Niedrigwassersituation in Niedersachsen auf Basis des betrachteten Klimaszenarios zumindest regional verschärfen kann. Aufgrund der großen Bandbreite und möglichen unterschiedlichen Entwicklungsrichtungen in der Zukunft können hierzu jedoch keine abschließende Einschätzung vorgenommen werden. Notwendige Anpassungsmaßnahmen sollten entsprechend flexibel und im Sinne eine „no-regret“-Strategie gestaltet werden.

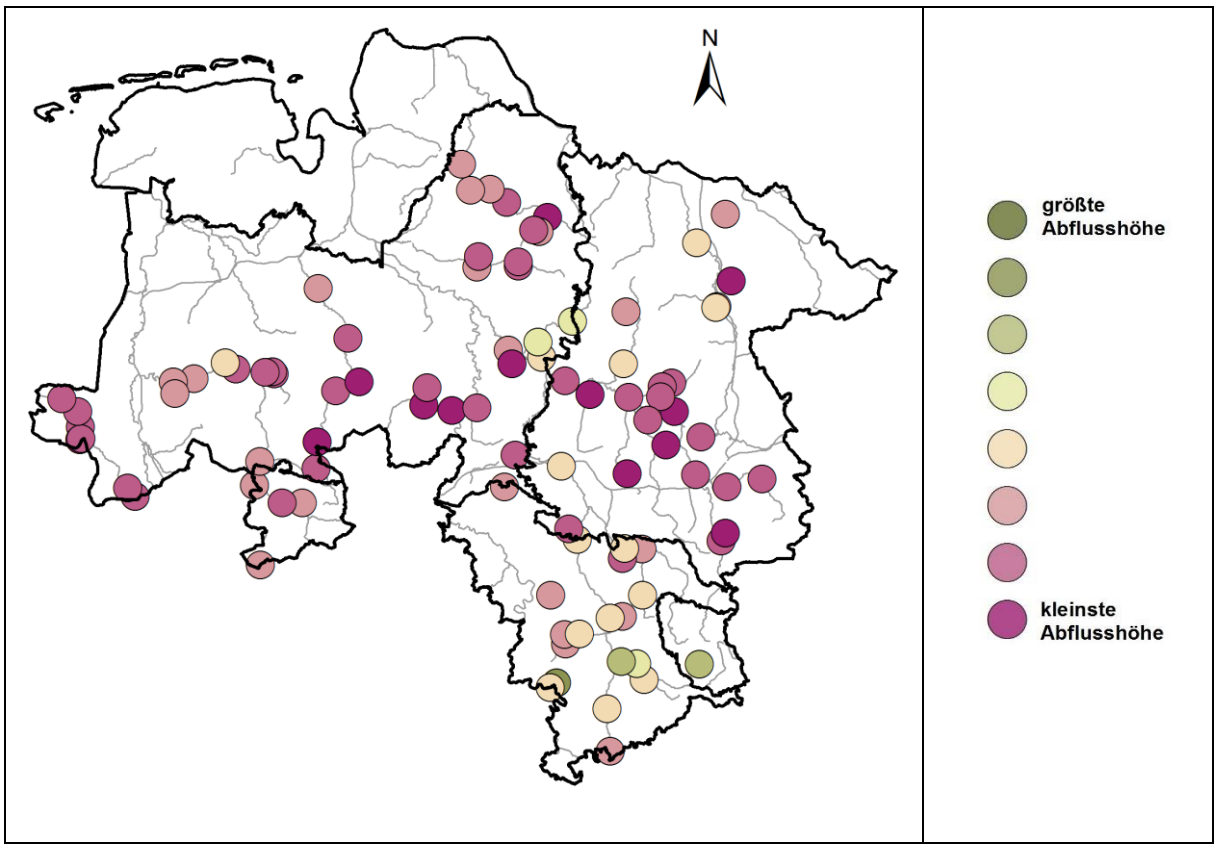


Abbildung 3-67: Niedrigwasser-Abflusshöhe des NM7Q im Gesamtjahr (April bis März) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

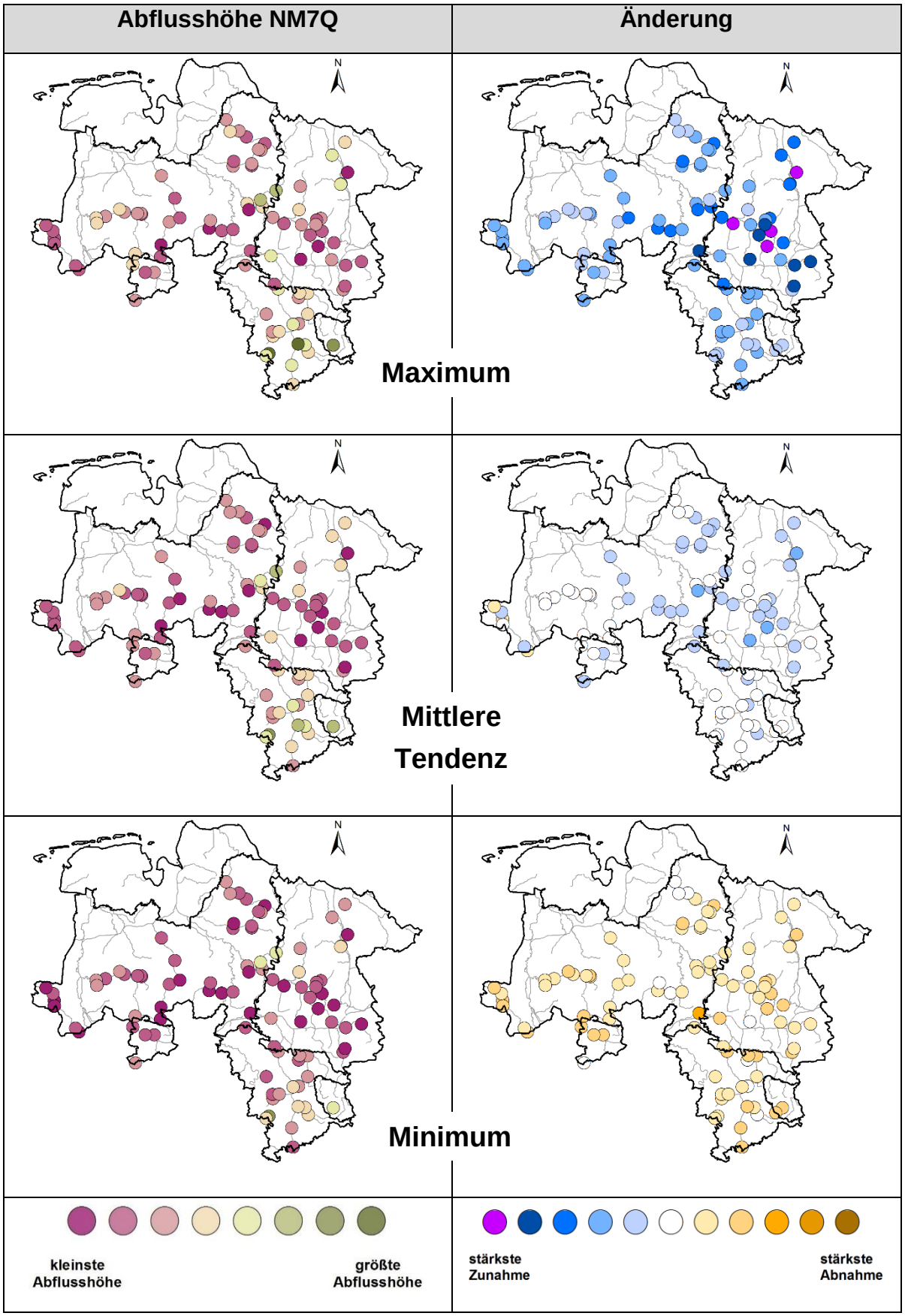


Abbildung 3-68: Niedrigwasser-Abflusshöhe des NM7Q bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (April bis März) in der nahen Zukunft (2021-2050)

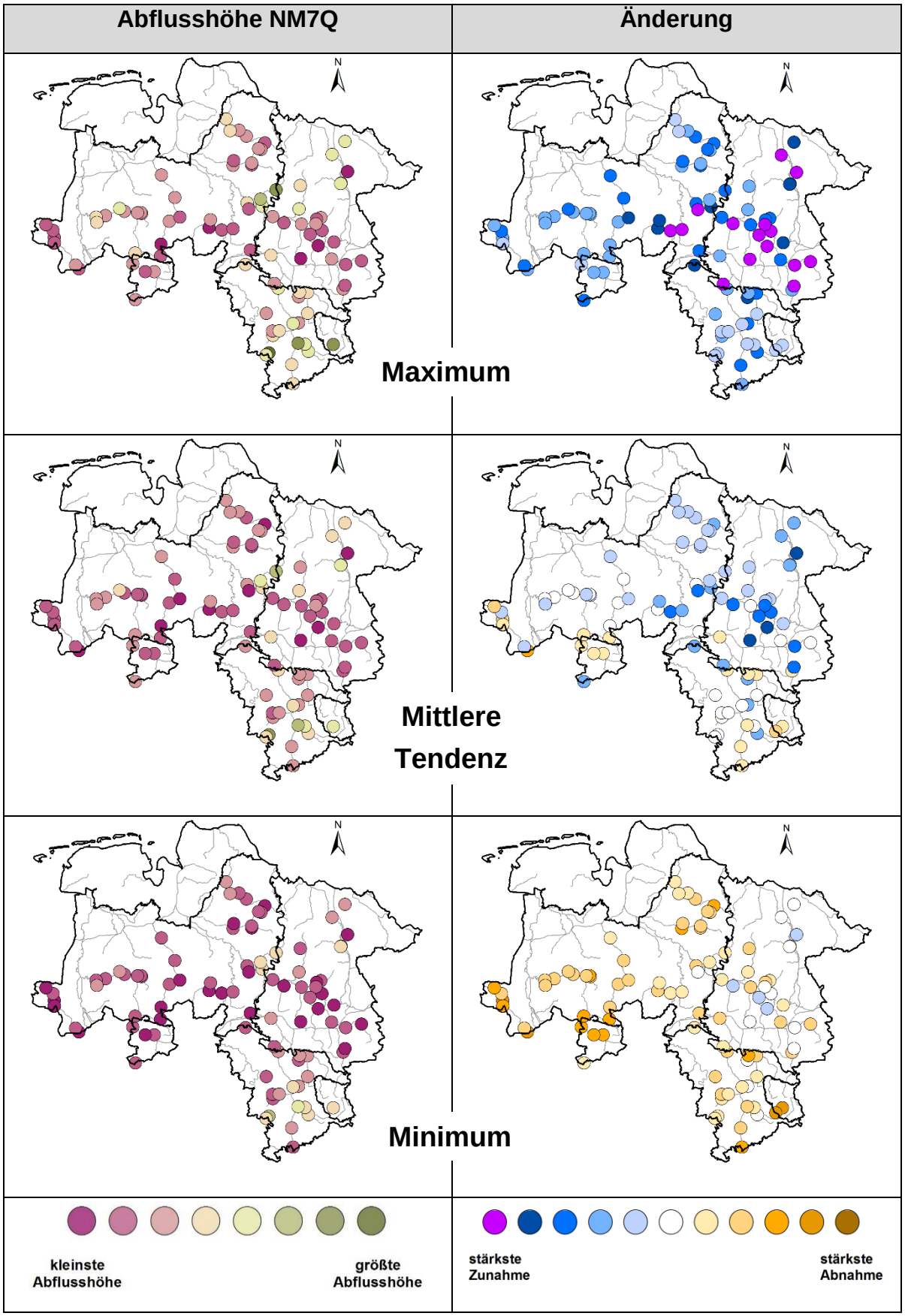


Abbildung 3-69: Niedrigwasser-Abflusshöhe des NM7Q bzw. deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Gesamtjahr (April bis März) in der fernen Zukunft (2071-2100)

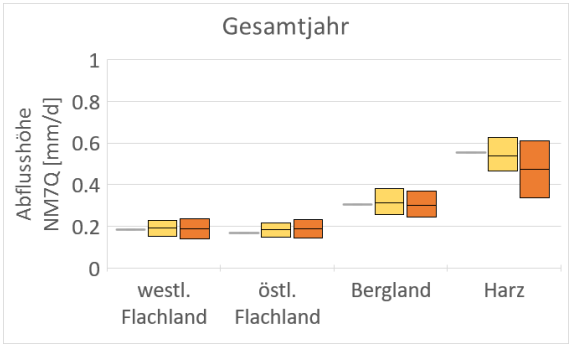
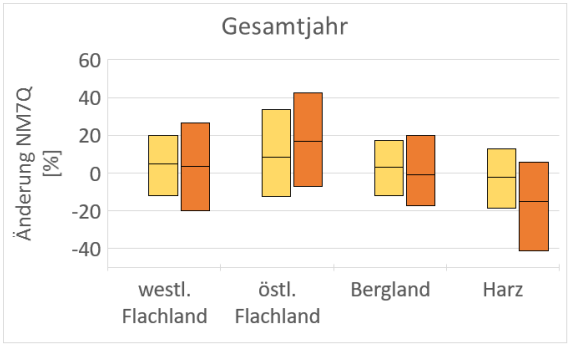
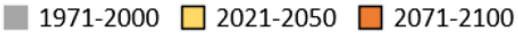
Abflusshöhe NM7Q	Änderung
	
	

Abbildung 3-70: Zusammenfassung der Niedrigwasser-Abflusshöhe des NM7Q und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

3.2.7 Klimawirkung Talsperrenbewirtschaftung

3.2.7.1 Wirkungsketten

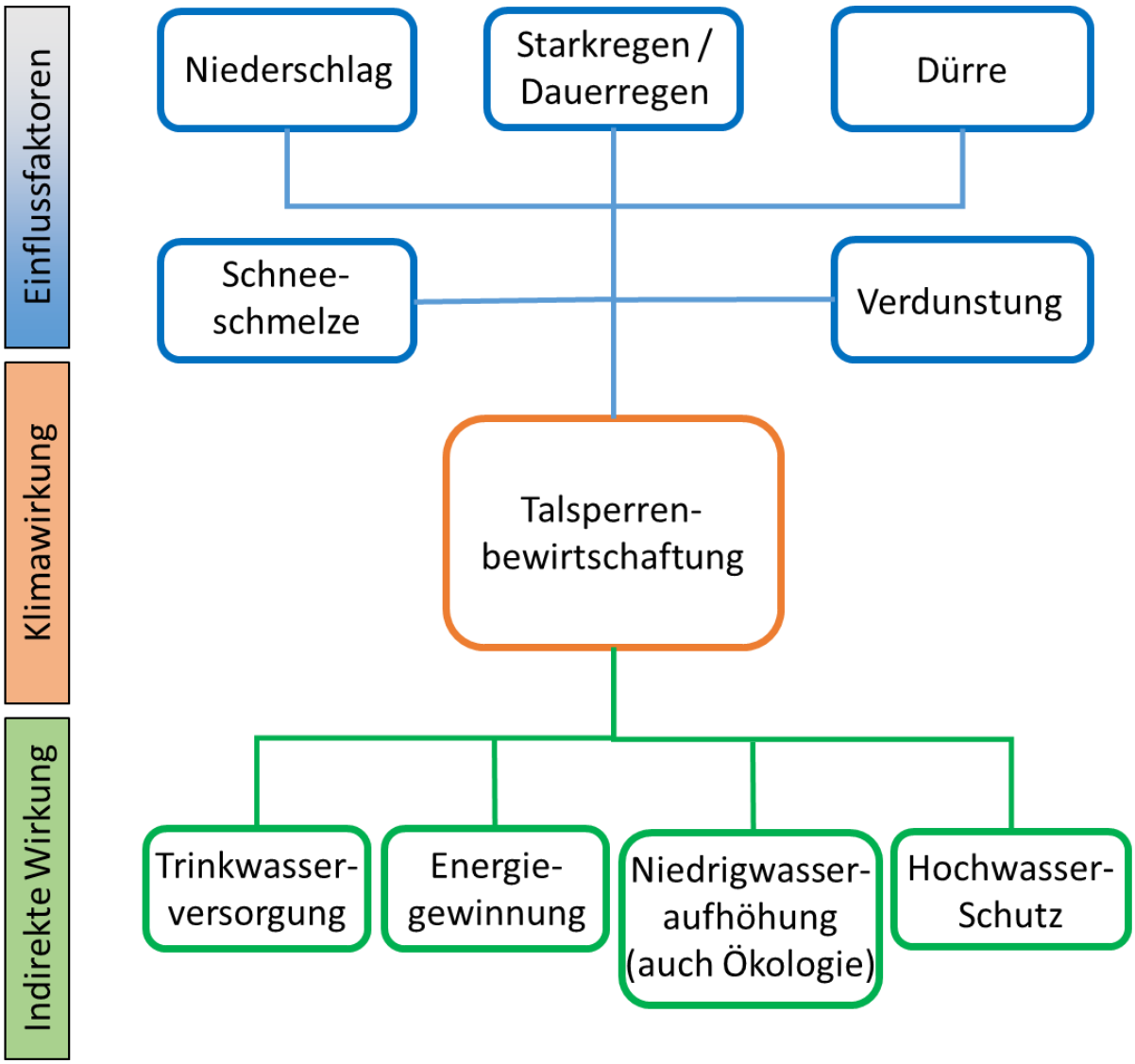


Abbildung 3-71: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Talsperrenbewirtschaftung im Themenfeld Oberflächengewässer

Die Bewirtschaftung von Talsperren erfolgt im Allgemeinen nach 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 die Verdunstung bestimmt wird. Niederschlag bedeutet Abfluss, der, je nach Anforderung, teilweise oder fast gänzlich im Stauraum einer Talsperre gespeichert wird. Extreme Niederschlagsereignisse ziehen entsprechende Zuflussmengen nach sich, die den Stauraum innerhalb kürzester Zeit füllen können. Auf der anderen Seite können ausbleibende

Niederschläge sowie hohe Temperaturen (und damit verbundene Verdunstungsverluste) bei gleichzeitiger kontinuierlicher Wasserabgabe aus der Talsperre für verschiedene Zwecke dazu führen, dass der Stauraum nach und nach entleert wird. Dadurch ist der Füllstand der Anlage in der Regel jahreszeitlich ständigen Veränderungen unterworfen. Auf Basis des Wasserangebotes und dem aktuellen Füllstand gilt es verschiedene Nutzungsansprüche (dauerhaft) zu bedienen. Hierbei können auch mehrere Funktionen durch eine einzige Anlage erfüllt werden, man spricht von sog. Multifunktionsspeichern. Das Wasser einer Talsperre kann z.B. als Trinkwasser zur Verfügung gestellt werden, nachdem es ggf. entsprechende Aufbereitungsverfahren durchlaufen hat. Es kann zur Energiegewinnung genutzt werden, indem Turbinen von Kraftwerken damit angetrieben werden. Oder es kann dafür genutzt werden, um eine bestimmte Wassermenge bzw. einen Wasserstand im Unterlauf der Anlage zu gewährleisten, z.B. zum Erhalt ökologischer Funktionen oder für die industrielle Nutzung (Kühlwasser, Brauchwasser). Alle diese Funktionen erfordern eine Abgabe von Wasser aus der Talsperre. Ebenso kann es aber auch notwendig sein, dass Abfluss zurückgehalten wird, z.B. im Hochwasserfall, damit die Flüsse stromabwärts weniger stark ausufern und Anlieger zu Schaden kommen. Um den (konkurrierenden) Anforderungen in Abhängigkeit von den limitierenden Randbedingungen gerecht zu werden, werden Betriebsregeln für die Wasserabgabe und den saisonalen Füllungsgrad aufgestellt, nach denen die Anlagen gesteuert bzw. bewirtschaftet werden.

3.2.7.2 Indikatoren und Operationalisierung

Aufgrund fehlender Wirkmodelle, die die Bewirtschaftung der Talsperren in ausreichendem Maße wiedergeben, sowie aufgrund nur vereinzelt vorliegender Proxy-Indikatoren (z.B. Zeitreihen zum Niederschlag, Zu- und Abflussdaten der Talsperren) erfolgte die Operationalisierung der Talsperrenbewirtschaftung anhand eines Experteninterviews mit dem Betreiber der Talsperren im Harz, der Harzwasserwerke GmbH (HWW), die gleichzeitig den größten Wasserversorger in Niedersachsen darstellt. Als Vorversorger anderer Wasserversorger sowie Zulieferer für Stadtwerke und Unternehmen stellen die HWW jährlich rund 95 Mio. m³ Trinkwasser zur Verfügung und zählen damit zu den zehn größten Wasserversorgern in Deutschland.

Die Bewirtschaftung der sechs großen Stauseen im Westharz sowie der im 20. Jahrhundert gebauten Talsperren an Söse, Oder, Ecker, Oker, Innerste und Grane dient vor allem dem Hochwasserschutz, der Trinkwassergewinnung, der Energieerzeugung und der Aufhöhung des Niedrigwasserabflusses im Unterlauf der Talsperren. Je nach räumlicher Verteilung der Niederschläge hat sowohl die Hochwasserschutzwirkung als auch die Niedrigwasseraufhöhung eine überregionale Bedeutung auf einer Einzugsgebietsfläche von rund 4300 km². Je nach Hochwasserentstehungsgebiet erstreckt sich dieser Bereich über die Flussgebiete der Oder-Söse-Rhume-Leine (Northeim), der Innerste-Leine (Hildesheim/Sarstedt/Hannover) und der Ecker-Oker-Aller (Braunschweig). Die HWW

betreiben zudem zwölf Wasserkraftwerke, die mit einer Leistung von etwa 35 Mio. kWh/Jahr rund 39.000 t/Jahr CO_2 einsparen (bezogen auf fossile Energieträger).

Die sechs Talsperren werden als Multifunktionsspeicher betrieben, d.h. sie erfüllen mehrere Aufgaben gleichzeitig. Neben den oben genannten Funktionen zählen hierzu außerdem die Freizeitnutzung, sowie die Seen- und Gewässerökologie. Alle einzelnen Funktionen werden gleichrangig betrachtet und die Anlagen dementsprechend betrieben. Damit haben sowohl die klimatischen Verhältnisse als auch der Wasserbedarf sowie die ökologische Wirkung Einflüsse auf die Bewirtschaftungsstrategien. Die jeweiligen Betriebspläne werden für Laufzeiten von 30 Jahren beantragt.

In der jüngeren Vergangenheit haben vor allem der Wasserbedarf sowie die Anforderungen seitens der Ökologie (EU-Wasserrahmenrichtlinie) im Zusammenhang mit dem Klimawandel an Bedeutung gewonnen. Ähnliches gilt auch für die Rohwasserqualität, die durch Kooperation mit der Land- und Forstwirtschaft dauerhaft verbessert werden soll und die gerade in Extremzeiten zu einem hohen Aufwand in der Trinkwasseraufbereitung führen kann. Dementsprechend müssen die Bewirtschaftungsregeln angepasst werden. In diesem Zusammenhang als besonders relevant angesehen werden sowohl extreme Hochwasserereignisse als auch extreme Trockenzeiten mit wenig Niederschlag und hohen Luft- und Wassertemperaturen in sehr kurzer jährlicher Abfolge. Diese Situation stellt die Bewirtschaftung der Talsperren vor besondere Herausforderungen, wenn es um die Erfüllung der multifunktionalen Aufgaben geht. Eine wichtige Strategie ist daher auch die frühzeitige Einschätzung der zu erwartenden klimatischen und hydrologischen Verhältnisse in der (nahen) Zukunft.

3.2.7.3 Ergebnisse und Bewertung

Die klimawandelbedingten Auswirkungen auf das aktuelle Wettergeschehen sowie die damit verbundenen (extremen) hydrologischen Verhältnisse sind im Westharz in den letzten Jahren bereits deutlich zu spüren gewesen. Dies zeigen nicht nur die Ereignisse der jüngsten Vergangenheit, wie das Hochwasser 2017 (überwiegend im Nordharz) oder die extreme Trockenheit 2018 (niedrigste Niederschlagssumme von Februar bis September an der Station Clausthal seit 1857) verdeutlichen. Auch die allgemeine Niederschlagsverteilung bzw. die Niederschlagsdefizite und –überschüsse der letzten Jahre belegen einen Wandel, hervorgerufen gerade durch die vergangenen 10 (überwiegend trockenen) Jahre. Sowohl die Auswertungen der Hochwasser als auch der Gebietsniederschläge und –abflüsse zeigen in fast allen Einzugsgebieten rückläufige Trends. Dies zeigt sich vor allem in den Wintermonaten, in denen die Niederschläge zwar relativ gleichbleibend sind, aber weniger Schnee zu verzeichnen ist. Gleichzeitig stiegen die Wassertemperaturen in den Stauseen. Räumlich differenziert betrachtet nehmen die Niederschläge im Hoch- und Südharz allmählich ab, während es zu Zunahmen im Bereich des nördlichen Harzvorlandes kommt (teilweise außerhalb des Wirkungsbereiches der Talsperren).

Für die nahe Zukunft wurde in der neuesten Bewilligung (Nordharzverbundsystem) mit einer Laufzeit von 30 Jahren der Effekt des Klimawandels bereits berücksichtigt. Dies gilt sowohl für die Anlagensicherheit, den Hochwasserschutz einschließlich Niedrigwasseraufhöhung, aber auch für die Trinkwasserversorgung und Gewässerökologie. Als zusätzliche Aufgabe wurde eine erneute Überprüfung der Situation in Bezug auf den Klimawandel nach 15 Jahren festgelegt. Auch zukünftige Neubewilligungen werden diesen Sachverhalt stets zu berücksichtigen haben.

Aufgrund der Planungs- und Laufzeiten von Talsperren, der projizierten klimabedingten meteorologischen Veränderungen und des daraus resultierenden zusätzlichen Bedarfs bzw. des veränderten Dargebots und der veränderten Qualität von Trinkwasser, nehmen die HWW auch die möglichen Entwicklungen in der fernen Zukunft in den Fokus. Sie sind an verschiedenen Projekten beteiligt, die den Umgang mit vorhandenen und zukünftigen Ressourcen betrachten. Hierzu zählt zum Beispiel das Projekt „Wasserspeicher Harz – Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung der Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und großtechnischer Energiespeicherung“. Hierbei geht es um die Entwicklung von Anpassungsstrategien zum Erhalt und zur Verbesserung der genannten Funktionalitäten im Harz und Harzvorland. Ein weiteres Projekt ist das „Wasserversorgungskonzept Niedersachsen 2020“, des Niedersächsischen Umweltministeriums, bei dem das übergeordnete Ziel die langfristige Sicherstellung der niedersächsischen Wasserversorgung als maßgeblicher Baustein der Daseinsvorsorge ist.

Schlussendlich wird die Betriebssicherheit der Anlagen nach Ansicht der HWW heute wie zukünftig gewährleistet bleiben. Dafür sorgt zum einen die Überwachung durch die Talsperrenaufsicht des NLWKN, zum anderen die turnusmäßige Neubewilligung der Betriebspläne alle 30 Jahre. Hierbei fließen neben aktuellen Daten und Informationen auch die neuesten Erkenntnisse aus (Klima)Forschung und Wissenschaft ein. Bei Bedarf kann zusätzlich durch Sondergenehmigungen der Talsperrenaufsicht jederzeit auf aktuelle Wetterereignisse reagiert werden (z.B. im Zuge der Trockenperiode 2018). Als Multifunktionsspeicher werden die Talsperren im Harz heute wie zukünftig eine große Bedeutung besitzen, da die Anforderungen an eine Wassermengenwirtschaft als Daseinsvorsorge, gerade unter dem Aspekt des Klimawandels, einen immer höheren Stellenwert erhalten.

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. Funktion der Speicheranlagen auswirkt (Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Trinkwasserversorgung, Energiegewinnung, Gewässerökologie). Bereits in der jüngeren Vergangenheit haben sich Veränderungen in der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung ergeben. Während Niederschlagsdefizite bisher noch ausgeglichen werden konnten (auch durch ein Verbundsystem von Überleitungen), lagen Hochwasser, ausgelöst durch starke Niederschlagsereignisse, z.T. im Bereich der

Harzvorländer und damit außerhalb des Einflussbereiches der Talsperren. In diesem Zusammenhang muss über weitergehende Anpassungsstrategien nachgedacht werden.

Es ist von einer eher geringen bis mittleren Bedeutung des Klimawandels für die Talsperrenbewirtschaftung auszugehen. Aktuell kann auf die sich abzeichnenden Veränderungen noch durch zyklisch angepasste Betriebsregeln reagiert werden. Für die ferne Zukunft müssen jedoch (vor allem aufgrund der räumlichen Verschiebung der Niederschläge) alternative Maßnahmen ins Auge gefasst werden, um die Daseinsvorsorge zu gewährleisten. Die Einschätzungen für die nahe Zukunft erfolgten mit einer eher hohen Gewissheit, die für die ferne Zukunft mit einer eher geringen bis mittleren Gewissheit.

3.2.8 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld

Laut der Vulnerabilitätsstudie für Deutschland (adelphi / PRC / EURAC, 2015) wird die allgemeine Situation der Anpassungskapazitäten im Bereich Wasserwirtschaft durch verschiedene Experten folgendermaßen eingeschätzt:

- Es ist eine tendenziell hohe Anpassungskapazität gegeben.
- Es existieren hohe technische und administrative Kompetenzen.
- Es ist mit moderaten Auswirkungen des Klimawandels zu rechnen.
- Teilweise bestehen bereits Strategien und Ansätze für wasserwirtschaftliche Planungen (z.B. die niedersächsische Anpassungsstrategie der Regierungskommission Klimaschutz (2012)).
- Es sollten Maßnahmen bevorzugt werden, die Win-Win-Situation erzeugen (d.h. die Ressourcen schonen und zu höherer Effektivität führen), möglichst robust sind (positive Wirkung in einem breiten Spektrum möglicher Klimaentwicklungen entfalten) und eine hohe Flexibilität besitzen (erlaubt zukünftige Anpassung von Maßnahmen).
- Das Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawandels sind bei öffentlichen Akteuren gegeben, aber das Verständnis bzw. die Akzeptanz von Anpassungsstrategien setzt gute Kommunikation, vor allem im Bereich privater Nutzer voraus.

Diese Einschätzungen können grundsätzlich auch für Niedersachsen angenommen werden. Bzgl. bereits bestehender Überlegungen und Optionen zur Anpassung sind in der niedersächsischen Anpassungsstrategie bereits eine Vielzahl von Maßnahmen aufgeführt, die ein zukünftiges Vorsorge- und Risikomanagement im Zuge des Klimawandels und seiner Folgen beschreiben. Hierzu zählen u.a.

- die Bau- und Siedlungstätigkeit in hochwassergefährdeten Bereichen unterbinden
- die Nutzung der Instrumentarien des Hochwasserrisikomanagements (Förderung natürlicher Rückhalt, Hochwasservorsorge, technischer Hochwasserschutz)
- die vorausschauende Planung von Maßnahmen unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit
- Maßnahmenprogramme und Bewirtschaftungspläne zur EG-Wasserrahmenrichtlinie (Bevorzugung von gegenüber dem Klimawandel robusten und effizienten Maßnahmen, insbesondere bei einer langen Bestandsdauer der Maßnahmen)
- die Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
- Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen und ggf. Anpassung von wasserrechtlichen Bescheiden
- Priorisierung von Nutzungen und Festlegung von Schwellenwerten für ggf. notwendige Nutzungseinschränkungen
- Verbesserung der Durchgängigkeit und Morphologie von (Fließ-)Gewässern
- Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Fläche

- Nutzung der Synergien von Hoch- und Niedrigwassermanagement (z.B. Förderung natürlicher Wasserrückhalt und dezentrale Niederschlagsversickerung)

Die wasserwirtschaftliche Praxis in Niedersachsen besitzt bereits langjährige Erfahrungen mit Hochwasserflächenmanagement, technischem Hochwasserschutz und der Hochwasservorsorge. Dieses Wissen muss um die möglichen Klimafolgen und Konsequenzen für die Planung erweitert werden. Dies erfolgt derzeit bereits u.a. durch verschiedene Studien auf Ebene der Forschung und / oder Verwaltung. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen auch in der fachlichen Praxis Anwendung finden. Weiterhin ist die bedarfsgerechte bzw. zukunftsorientierte Förderung von Hochwasserschutzmaßnahmen sowie von Maßnahmen in und an Gewässern als prioritäre Aufgabe in Verwaltung und Politik zu sehen. Entsprechende Regelungen erfolgen aktuell z.B. durch die „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung von Vorhaben des Hochwasserschutzes im Binnenland“ sowie die „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Fließgewässerentwicklung“. Zudem sollte auch das integrative Hochwassermanagement weiter vorangetrieben werden, da die zukünftigen, durch den Klimawandel bedingten Herausforderungen kaum durch räumlich begrenzte und sektoral fokussierte Einzelmaßnahmen bewältigt werden können.

Die Erfahrungen im Bereich Niedrigwasser sind dagegen bisher eher gering, entsprechende Vorsorgestrategien häufig noch unzureichend. Der Bedarf an eine ausreichende Wasserversorgung ist aufgrund der Vielzahl an Nutzungsansprüchen (z.B. Trinkwasser, Brauchwasser, Kühlwasser, Energiegewinnung) und ökologischen Anforderungen (aquatische Ökosysteme im und am Gewässer) hingegen als hoch anzusehen. Im Hinblick auf mögliche Verschärfungen der saisonalen und regionalen Niedrigwasserverhältnisse in Zukunft ist mit erheblichen ökologischen und ökonomischen Folgen sowie verstärkten Nutzungskonflikten zu rechnen. Hier bedarf es weiterer Analysen und Studien. Auch diese Ansätze sollten integrativ erfolgen, um Synergien mit anderen Themenfeldern zu nutzen (z.B. Grundwasser) und Niedrigwassermanagement überregional umzusetzen.

Zur Erfassung und Beobachtung der aktuellen und zukünftigen Verhältnisse an den Oberflächengewässern existieren bereits heute ausgedehnte Monitoringsysteme, wie z.B. Pegelmessnetze und Gewässergütemessnetze. Die Daten dieser Systeme werden konsequent genutzt und ausgewertet, um Veränderungen in den Abflussverhältnissen frühzeitig zu erkennen.

4 Ausgewählte Themenfelder im Handlungsfeld Boden

4.1 Klimawirkungen im Themenfeld Boden

4.1.1 Allgemeine Beschreibung des Themenfeldes

Die von der Bundesregierung im Dezember 2008 beschlossene Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) hat den Boden als ein eigenständiges Handlungsfeld identifiziert. Böden erfüllen eine Vielfalt von Funktionen im Ökosystem: Auf der einen Seite sind sie Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen sowie Regulatoren im Energie-, Wasser- und Stoffhaushalt der Landökosysteme. Des Weiteren dokumentieren und archivieren Böden Zeugnisse der Natur- und Kulturgeschichte. Auf der anderen Seite sind sie eine Lebensgrundlage des Menschen, der Böden in vielfältiger Weise nutzt. Böden dienen als Anbaufläche für Nahrungsmittel, Futtermittel sowie pflanzliche Rohstoffe. Aus den genannten Funktionen ergeben sich enge Beziehungen, insbesondere zu den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Wasserwirtschaft“. Zudem sind Böden auch Erholungsraum oder fungieren als Standort für Verkehrswege, Leitungstrassen, Industrieanlagen und Gebäude. Sie sind auch Standort für regenerative Energien wie Windenergie und Biogasproduktion. Böden sind dabei nicht vermehrbar und kaum erneuerbar. Daher dürfen sie nur nach dem Prinzip der Vorsorge genutzt und müssen geschützt werden.

Der Boden ist die Schnittstelle zwischen Atmosphäre, Lithosphäre sowie Hydrosphäre und spielt eine Schlüsselrolle für den Austausch klimarelevanter Gase. Als Kohlenstoffsenke oder Kohlenstoffquelle beeinflusst er einerseits maßgeblich das Klima. Andererseits wirkt das Klima unmittelbar auf den Boden. Nahezu alle im Boden ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse werden durch die Temperatur und durch die Feuchtigkeit gesteuert. Mit der zunehmenden Erwärmung durch den Klimawandel unterliegen diese Parameter einer Veränderung. So geht der Klimawandel mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode einher, das Pflanzenwachstum startet im Frühjahr eher und endet im Herbst später. Bei der erwarteten gleichzeitigen Abnahme des Niederschlages in den Sommermonaten wird weniger Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung stehen. Die Auswirkungen von Erwärmung und Trockenheit sind von Standort zu Standort, je nach Wasserspeichervermögen des Bodens und Grundwassernähe, unterschiedlich. Insbesondere bei einer geringen Menge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, sind deutlich negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum bei einer fortschreitenden Erwärmung die Folge. Im Allgemeinen muss mit einer Verschlechterung der Eignung vieler Böden als Pflanzenstandort gerechnet werden. Neben häufigeren Trockenperioden sind weitere klimawandelbedingte Veränderung des Niederschlagregimes zu erwarten. Es wird mit einer Zunahme von Starkregenereignissen gerechnet, die die Bodenerosionsgefährdung deutlich erhöhen.

Die Empfindlichkeit des Bodens in Niedersachsen ist aufgrund der verschiedenen Standortbedingungen und je nach betrachteter Klimawirkung sehr unterschiedlich. Die

vorhandenen Landschaftsräume umfassen ein äußerst umfangreiches bodentypologisches Inventar. Dieses reicht von den über den Gezeitenrythmus beeinflussten Böden der Küste über die fruchtbaren Böden der Flußlandschaften, eiszeitlich geprägte Böden der Geest zu deutlich exponierten Böden des Berglandes. Darüber hinaus sind niedersachsenweit auch Niedermoore, Hochmoore sowie durch den Menschen deutlich geprägte Böden (z.B. Tiefumbruchböden und Plaggenesche) anzutreffen (BENZLER ET AL., 1997). Eine eingehendere räumlich differenzierte Darstellung kann der Bodenkarte 1:50 000 (BK50), verfügbar auf dem NIBIS® Kartenserver, entnommen werden (LBEG, 1999/2014). Die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden in Niedersachsen werden im Folgenden anhand der Klimawirkungen und der Empfindlichkeiten des Bodens für die Bodenerosion (durch Wasser), das Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung) und den Zusatzwasserbedarf dargestellt.

4.1.2 Klimawirkung potenzielle Erosion durch Wasser

4.1.2.1 Wirkungsketten

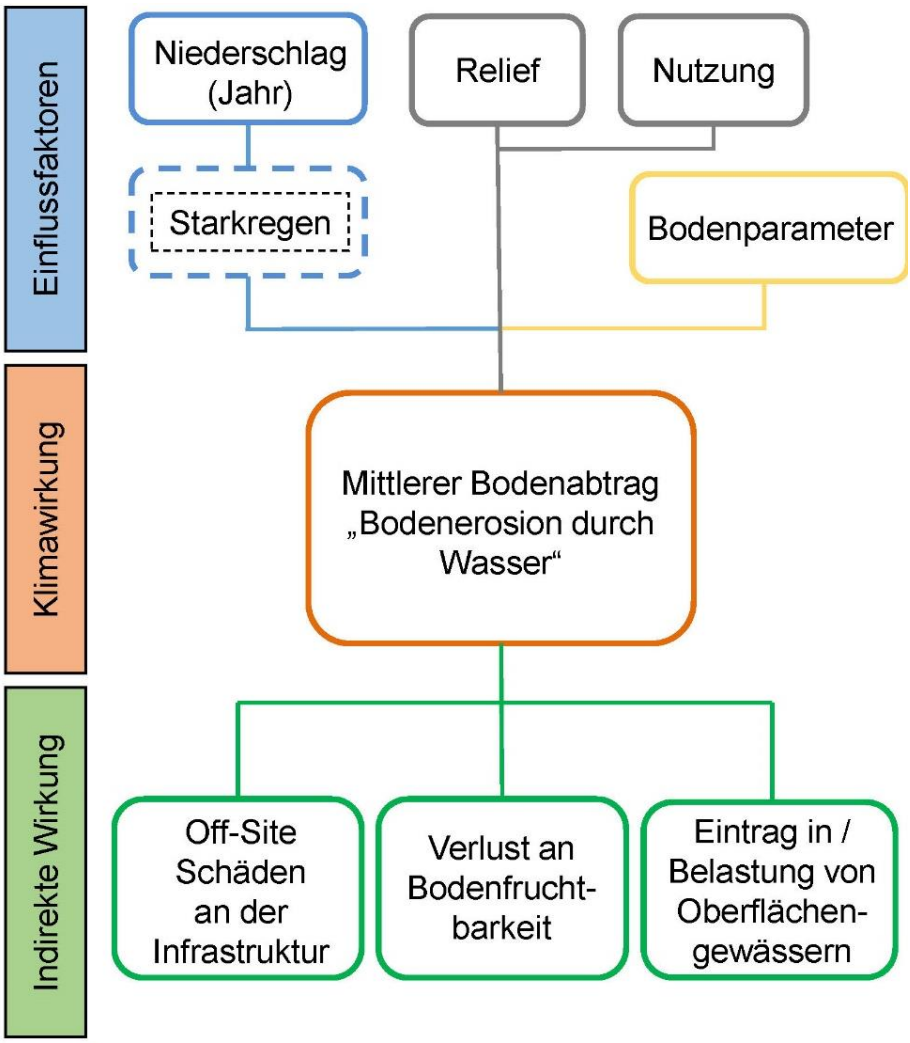


Abbildung 4-1: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung potenzielle Bodenerosion durch Wasser (MbA) - ABAG

Bodenmaterial kann durch Wasser und Wind abgetragen werden (Bodenerosion). Der betrachtete Prozess der durch Wasser verursachten Bodenerosion ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Hierzu gehören die klimatischen Bedingungen (insbesondere die des Niederschlagsregimes), die Reliefeigenschaften (Hangneigung und Hanglänge), die Nutzung und angebaute Kultur bzw. Fruchtfolgen sowie die Bodenbearbeitung und bodenkundliche Standortparameter. Von den bodenkundlichen Standortparametern ist neben der Aggregatstabilität und dem Humusgehalt die Bodenart des Oberbodens von ausschlaggebender Bedeutung. Insbesondere Böden mit hohen Schluff- und Feinsandanteilen und einer Hangneigung von über 2% unterliegen verstärkt der

Wassererosionsgefährdung. Die prognostizierten Klimaveränderungen, die eine Zunahme der Winterniederschläge und der Starkregentage voraussagen, werden einerseits im Winter zu immer häufigeren und länger andauernden Phasen der Wassersättigung führen, andererseits einen vermehrten Oberflächenabfluss infolge von extremen Niederschlagsereignissen (häufigere und intensivere Starkregenereignisse im Sommer) bewirken. Die durch den Klimawandel zu erwartende Verschiebung großer Anteile der Niederschlagsmenge in den Winter bis zum Frühjahr, also in Zeitabschnitte mit geringer Bodenbedeckung, erhöht die Anfälligkeit ackerbaulich genutzter Flächen für Bodenerosion zusätzlich. Die Gefahr der Winderosion (im Rahmen dieser Studie zunächst nicht betrachtet) wird durch längere, klimawandelbedingte sommerliche Trockenperioden ebenfalls ansteigen. Die Folgen der Bodenerosion lassen sich in On-Site-Schäden und Off-Site-Schäden unterscheiden.

On-Site-Schäden durch Bodenerosion: Die Bodenerosion führt zu einer Verminderung der Bodenfruchtbarkeit, da besonders wertvolle Bodensubstanz der oberen Bodenkrume abgetragen wird. Dies kann bei exponierten Standorten und voranschreitender Profilverkürzung zu einer Abnahme der Wasser- und Nährstoffkapazität und damit zu einer Verringerung der Wasserspeicher-, Filter- und Pufferfunktion der Böden führen. Als unmittelbare Folgen der Bodenerosion können auf landwirtschaftlichen Nutzflächen auch Verschlämmungsbereiche oder Rinnen- und Grabensysteme entstehen, welche die wasserhaushaltlichen Eigenschaften oder die Bearbeitbarkeit verschlechtern. Zudem kann durch Winderosion eine mechanische Schädigung der Feldfrucht verursacht werden.

Off-Site-Schäden durch Bodenerosion: Durch die Ablagerung des erodierten Bodenmaterials ist die Verschmutzung von angrenzenden Wegen, Gräben und Häusern möglich. Bei dauerhaftem Bodenabtrag sind angrenzende Gewässer durch fortschreitende Verlandung gefährdet. Letztlich führt die Bodenerosion auch zum Eintrag und zur Akkumulation von Nährstoffen, Pestiziden und Schwermetallen in Gewässer und benachbarte Ökosysteme, welches zu erhöhten Kosten bei Unterhaltung und Säuberung von Gewässern und Verkehrswegen führt.

4.1.2.2 Indikatoren und Operationalisierung

Bodenerosion durch Wasser sowie die Quantifizierung des mittleren Bodenabtrages (MBA) kann über die validierte Methode der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) realistisch bewertet werden. Die ABAG ist eine seit Jahrzehnten etablierte Modellgrundlage und basiert auf der Zusammenführung der Einflussfaktoren „Erosivität der Niederschläge“ (R-Faktor), den „Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor“ (C-Faktor), der „Bodenerodierbarkeit“ (K-Faktor), des „Topographiefaktors“ (LS-Faktor) sowie „Erosionschutzfaktors“ (P-Faktor). Dabei ist die Erosivität der Niederschläge (R-Faktor) eine durch den Klimawandel direkt veränderliche Größe.

Die Berechnung des R-Faktors in Niedersachsen wird auf der Grundlage der Verknüpfungsregel 6.4.10 (MÜLLER & WALDECK 2011) aus dem mittleren Jahresniederschlag (N_j) ermittelt:

$$R = 0{,}0905 * N_j - 21{,}08 \qquad \textbf{Formel 4-1}$$

Durch die UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ wurde die über die ABAG-Modellierung erzeugte Datenqualität und der Grad der Gewissheit als hoch beurteilt. Ein Nachteil der Umsetzung der Methodik mit Jahresniederschlägen ist die geringe Sensitivität gegenüber der prognostizierten Veränderung von Extremwetterereignissen (Starkniederschläge). Einzelne Starkregenereignisse können jedoch im Vergleich zu anderen Niederschlägen mit geringerer Intensität einen erheblichen und überproportionalen Einfluss auf die Bodenerosion besitzen. An einer Möglichkeit zur Implementierung der Starkregenereignisse in das Modell, bzw. an einer gesonderten Gefährdungseinschätzung für Regionen mit erhöhten Extremwetterwahrscheinlichkeit wird gegenwärtig gearbeitet.

Im Rahmen dieser Studie wurde die **potenzielle** Erosionsgefährdung ermittelt, da die notwendigen Eingangsdaten zur Berechnung der **aktuellen** Erosionsgefährdung, in der die Fruchtfolge und eventuell vorhandene Erosionsschutzmaßnahmen in die Gefährdungsabschätzung einbezogen werden, nicht vorliegen. Der Erosionsschutzfaktor (P) bleibt hierbei also unberücksichtigt. Der „Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor“ bzw. „Fruchtfolgefaktor“ (C) wird als 1 angenommen (Schwarzbrache). Der Bodenabtrag (A) für die potenzielle Erosionsgefährdung errechnet sich somit aus A = R * K * L * S.

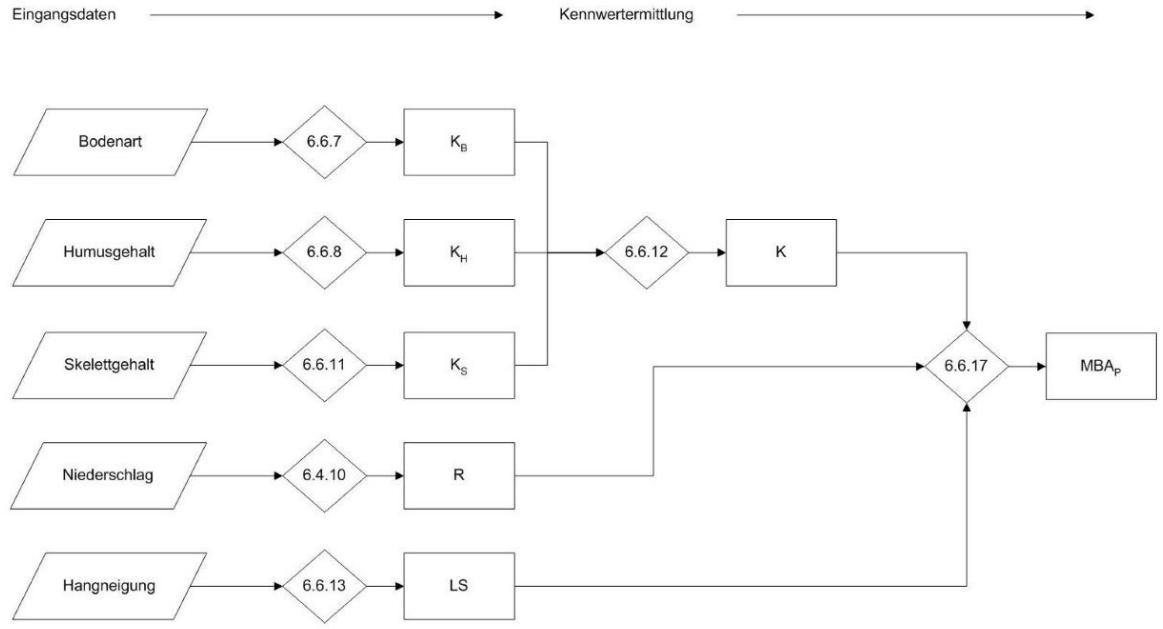


Abbildung 4-2: Potentielle Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser (ABAG) (MBAp) nach Methode 5.24 (MÜLLER & WALDECK, 2011).

Die am LBEG im MethodenManagementSystem (MeMaS) implementierte und hier genutzte Methodik (Abbildung 4-2, Methode 5.24 nach GeoBerichte 19 von MÜLLER & WALDECK, 2011) ist eine vereinfachte Form der ABAG. Die Kenngröße des „mittleren potenziellen jährlichen Bodenabtrages“ wird in t/ha und Jahr ermittelt. Erosionsprozesse durch Schmelzwasser werden bei der am LBEG angewandten Methodik nicht abgebildet, da entsprechende Datengrundlagen nicht verfügbar sind. Als Grundlage der Ermittlung wurde die Bodenkarte i.M. 1:50.000 (BK50) verwendet. Im Datensatz der BK50 sind alle für die nach Methode 5.24 notwendigen bodenkundlichen Eingangsdaten (Bodenart, Humusgehalt, Skelettgehalt) verfügbar. Die Normierung und kartografische Darstellung der Ergebnisse für die Wirkmodellierung mit Klimaprojektionsdaten (siehe Tabelle unten und Legende zur Ergebniskarte) orientiert sich an der DIN 19708 (Deutsches Institut für Normung (2011) Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN 19708. – Berlin (Beuth). Diese bildet auch die Grundlage für die Bewertung des mittleren potenziellen Bodenabtrages in den Auswertungsmethoden des Bodenschutzes nach MÜLLER & WALDECK (2011) (Verknüpfungsregel 6.6.17). Die aktualisierte DIN 19708 von 2017 konnte hier nicht verwendet werden, da die Berechnungen des Bodenabtrages vor der Umsetzung in dem Wirkmodell stattfanden. Dies ist jedoch mit keiner Einschränkung der Ergebnisse verbunden.

Tabelle 4-1: Bewertung des mittleren potenziellen Bodenabtrages nach Verknüpfungsregel 6.6.17 (MÜLLER & WALDECK, 2011)

[t/ha/a]	Erosionsgefährdung	
	Bezeichnung	**Kurzzeichen**
< 0,5	keine	E_{nat} 0
0,5 –< 2,5	sehr geringe	E_{nat} 1
2,5 –< 5	geringe	E_{nat} 2
5 –< 7,5	mittlere	E_{nat} 3
7,5 –< 15	hohe	E_{nat} 4
≥ 15	sehr hohe	E_{nat} 5

Zur besseren Darstellbarkeit der unter der Nutzungsannahme „Schwarzbrache“ extrem bodenerosionsgefährdeten Standorte (insbesondere im niedersächsischen Bergland), wurden die Gefährdungsklasse „sehr hoch“ im Rahmen dieser Studie um drei weitere Stufen ergänzt (siehe Tabelle 4-2). Das Änderungssignal für den mittleren potenziellen Bodenabtrag wurde über die Abnahme oder Zunahme der absoluten Werte des ermittelten Bodenabtrages klassifiziert. In grau dargestellte Flächen wurden nicht bewertet.

Tabelle 4-2: Klasseneinteilung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser bzw. der Änderungssignale für den mittleren potenziellen Bodenabtrag (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Mittlerer Bodenabtrag [t/ha/a]
	> 45
	30 - 45
	15 - 30
	7,5 - 15
	5 – 7,5
	2,5 - 5
	0,5 – 2,5
	< 0,5

Legende	Änderung des mittleren Bodenabtrages [t/ha/a]
	> +45
	+35 bis +45
	+25 bis +35
	+15 bis +25
	+5 bis +15
	-5 bis +5
	-15 bis -5
	-25 bis -15
	-35 bis -25
	-45 bis -35
	< -45

4.1.2.3 Ergebnisse und Bewertung

Die potenzielle Bodenerosion durch Wasser wird vorrangig durch die Reliefenergie des Geländes beeinflusst. So liegen die Flächen mit der höchsten potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser im Süden Niedersachsens, im Bereich des Berg- und Hügellandes und des Harzes (siehe Abbildung 4-3). Gleichzeitig treten im Harz die höchsten Jahresniederschläge auf, sodass dort die **Klimawirkung** insgesamt am stärksten ausgeprägt ist. Die Hinderniswirkung des Harzes setzt den ankommenden Luftmassen aus dem Westen einen Widerstand entgegen, woraus erheblicher Steigungsregen folgt. Die Küste sowie das Flachland Niedersachsens zeigen innerhalb des Referenzzeitraumes aufgrund der geringen Reliefenergie grundsätzlich eher eine geringe potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser. In Abhängigkeit der Referenzperiode und der Betrachtung des schwachen bzw. starken Wandelszenarios variiert die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser augenscheinlich nur geringfügig. Dies ist vor allem auf die Klassifizierung der Farbgebung bzw. dem Verbleib in der jeweiligen Klasse für die potenzielle Erosionsgefährdung zurückzuführen (siehe Tabelle 4-2).

Bei Betrachtung des **Änderungssignals** sind hingegen in Abhängigkeit des Wandelszenarios deutliche Zu- bzw. Abnahmen erkennbar. Die Veränderungen sind hierbei erwartungsgemäß

in den Bereichen mit großer Hangneigung (Harz, Berg- und Hügelland) am stärksten ausgeprägt (siehe Abbildung 4-4 bis Abbildung 4-6). Sowohl in der nahen (2021-2050) als auch in der fernen (2071-2100) Zukunft sind die mittleren Änderungssignale sehr gering (die Änderung des potenziellen Bodenabtrages liegt in der fernen Zukunft für Niedersachsen bei unter 5 %). Die Ergebnisse für die Prognose eines schwachen Wandelszenarios zeigen Abnahmen während sich für die Prognose eines starken Wandelszenarios z.T. deutliche Zunahmen des mittleren potenziellen Bodenabtrages ausprägen. Dies ist aufgrund des geringeren Jahresniederschlages in der Betrachtung des schwachen Wandelszenarios und des hohen Jahresniederschlages für das starke Wandelszenario und der sich dadurch in entsprechende Richtungen verändernden R-Faktoren, erwartungsgemäß. Beispielsweise ergibt sich für das starke Wandelszenario in der fernen Zukunft für das Berg- und Hügelland eine Zunahme des mittleren potenziellen Bodenabtrages von ca. 40 % (Anstieg von 47,1 t/ha/a im Referenzeitraum auf über 65 t/ha/a in fernen Zukunft). Die bereits hohe potenzielle Erosionsgefährdung im Berg- und Hügelland kann somit beim Eintreten eines starken Wandelszenarios weiter verstärkt werden. Im Harz wird unter diesem Szenario sogar noch ein höherer mittlerer potenzieller Bodenabtrag prognostiziert (Zunahme von über 50 t/ha/a in der fernen Zukunft im Vergleich zum Referenzzeitraum). Die Veränderung der Absolutwerte der mittleren potenziellen Bodenabträge für das Flachland und die Küste sind deutlich geringer (unter 5 t/ha/a). Bei einem starken Wandelszenario sind hier im mengenmäßigen Vergleich zum Berg- und Hügelland geringe Zunahmen zu erwarten (Anstieg von 0,2 t/ha/a an der Küste bis 1,2 t/ha/a im östlichen Flachland für die ferne Zukunft). Die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser der Küste und des westlichen Flachlands würde somit unter einem starken Wandelszenario in der fernen Zukunft folglich weiterhin „sehr gering“ sein, während sie sich im östlichen Flachland von „gering“ auf „mittel“ erhöht (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-6). Im Gegensatz dazu werden für das schwache Wandelszenario für alle Regionen langfristig Abnahmen um etwa 20 % prognostiziert. Unter diesem Wandelszenario würde der mittlere potenzielle Bodenabtrag zwar abnehmen, die potenzielle Erosionsgefährdung würde sich im Gebietsmittel jedoch nicht verändern. Hervorzuheben ist, dass die Klimawirkung einzelner Extremereignisse (Starkregen) auf die Bodenerosion bei der hier genutzten Methodik unberücksichtigt bleibt. Nach Aussage der UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ nimmt die Wahrscheinlichkeit dieser Ereignisse und der dadurch resultierenden Erosionsschäden jedoch zukünftig zu. Eine Erweiterung des methodischen Ansatzes um den Aspekt „Starkregen“, welche im Rahmen dieser Studie bislang nicht realisierbar war, ist daher für die weitere Wirkmodellierung der Bodenerosionsgefährdung anzustreben. Unter der Annahme, dass Starkregenereignisse zunehmen und den gleichmäßig fallenden Landregen teilweise ersetzen, ist von einer Zunahme der Erosionsgefährdung durch Wasser auszugehen. Zusätzlich wird die erwartete Zunahme von Trockenperioden diesen Anstieg noch verstärken. Folgt ein Starkregenereignis auf eine längere Trockenphase, so ist aufgrund der höheren Verschlämmungsneigung mit einem besonders starken Erosionsereignis zu rechnen - auch auf Böden mit weniger Reliefenergie als die im Berg- und Hügelland. Erwartungsgemäß wird sich somit die Bodenerosion auf den bereits heute gefährdeten Gebieten deutlich verstärken. Weitere

„Hotspots“ der Bodenerosionsgefährdung entstehen nur in einer untergeordneten Betrachtung.

Die **Bedeutung** der zu erwartenden Änderungen liegt besonders in den On- und Off-Site Schäden durch Extremereignisse (vor allem Starkniederschläge nach einer längeren Trockenperiode). Die Folgen der Bodenerosion durch Wasser können das gesamte Bundesland betreffen, mit reliefbedingtem Schwerpunkt auf den Süden Niedersachsens. So können in Zukunft verstärkt Einschränkungen der Nährstoffverfügbarkeit bzw. verminderte Bodenfruchtbarkeit durch den Verlust an organischer Substanz sowie eine Schädigung des Saatguts resultieren. Als Resultat können deutliche Ertragseinbußen in der Landwirtschaft auftreten. Darüber hinaus können durch die Extremereignisse zukünftig mehr Schäden an Verkehrsflächen (Off-Site-Schäden) vorkommen.

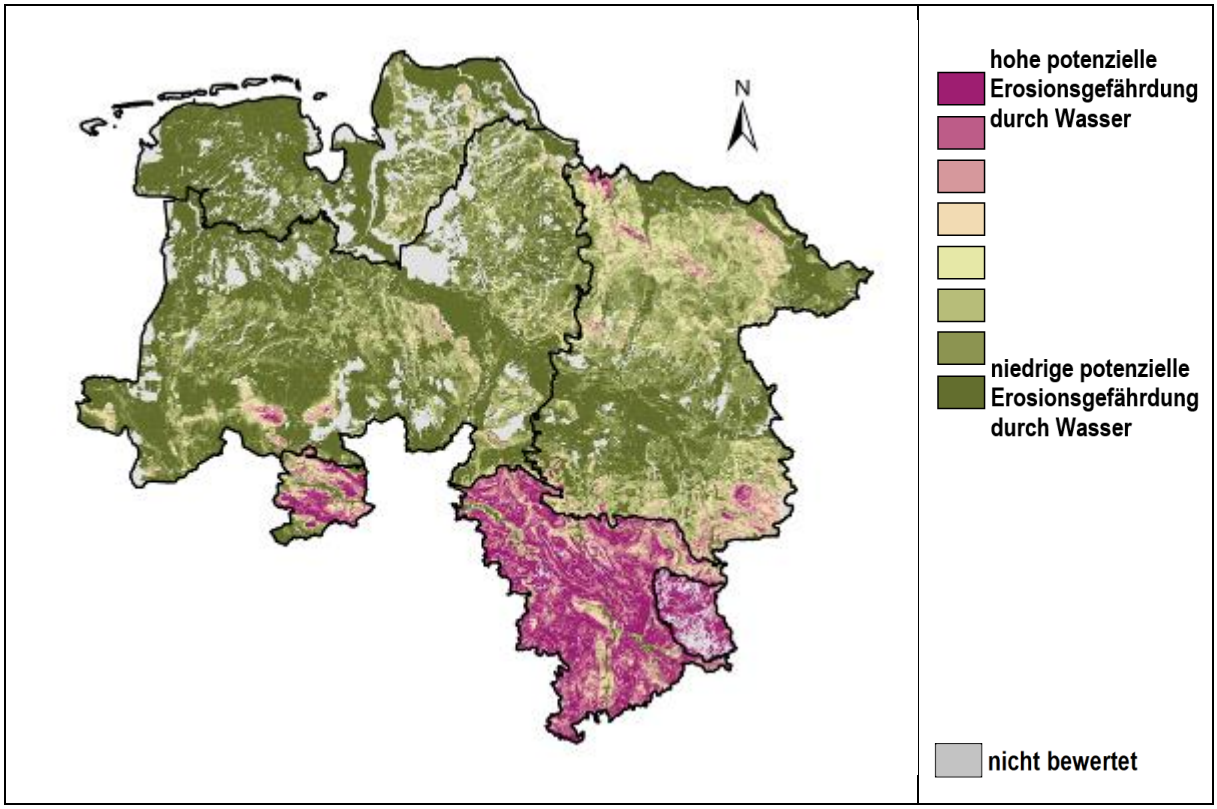


Abbildung 4-3: Mittlerer potenzieller Bodenabtrag (potenzielle Bodenerosion durch Wasser) im Jahr (Januar bis Dezember) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

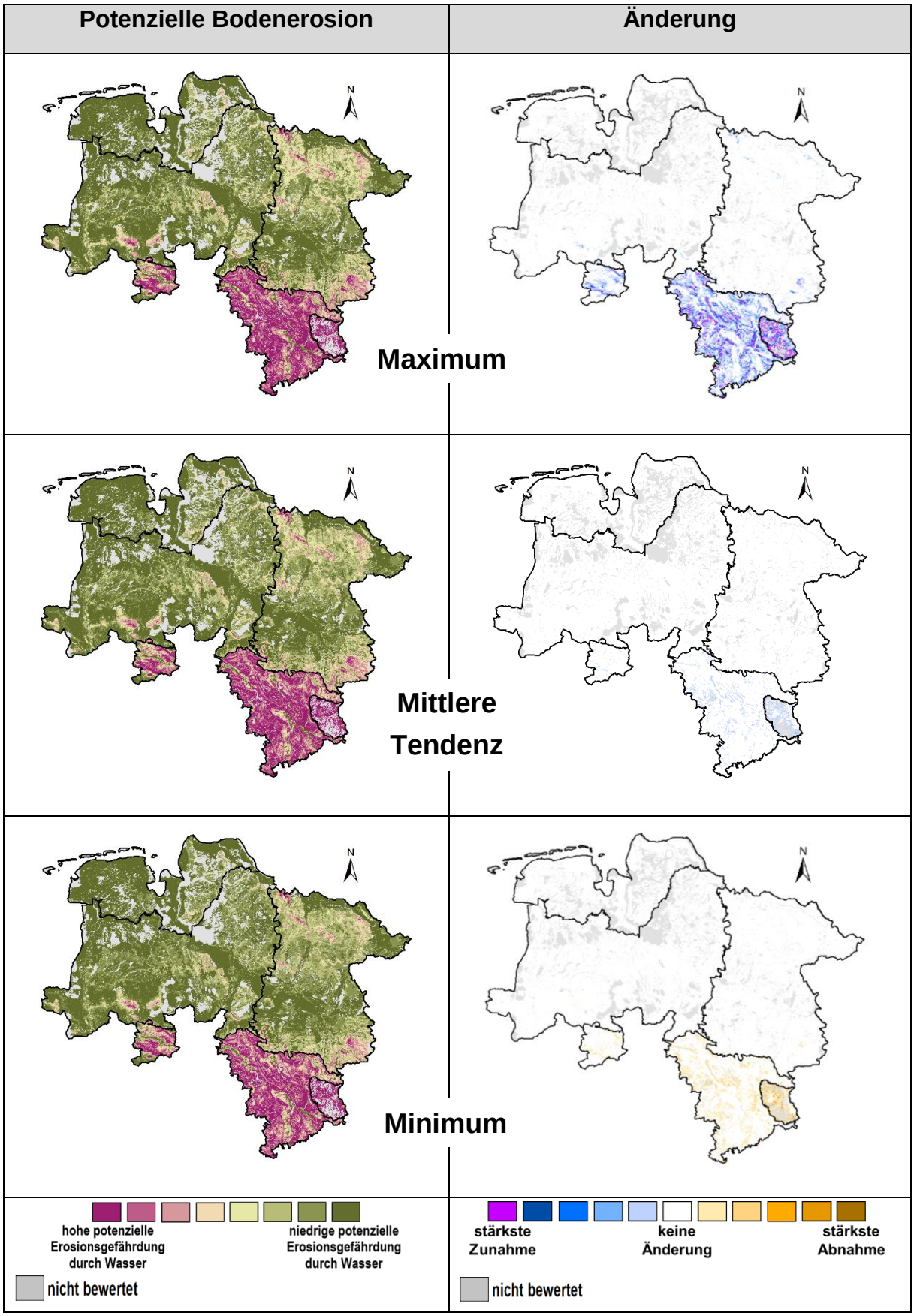


Abbildung 4-4: Potenzielle Bodenerosion durch Wasser bzw. Veränderungen des mittleren pot. Bodenabtrages (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Jahr in der nahen Zukunft (2021-2050)

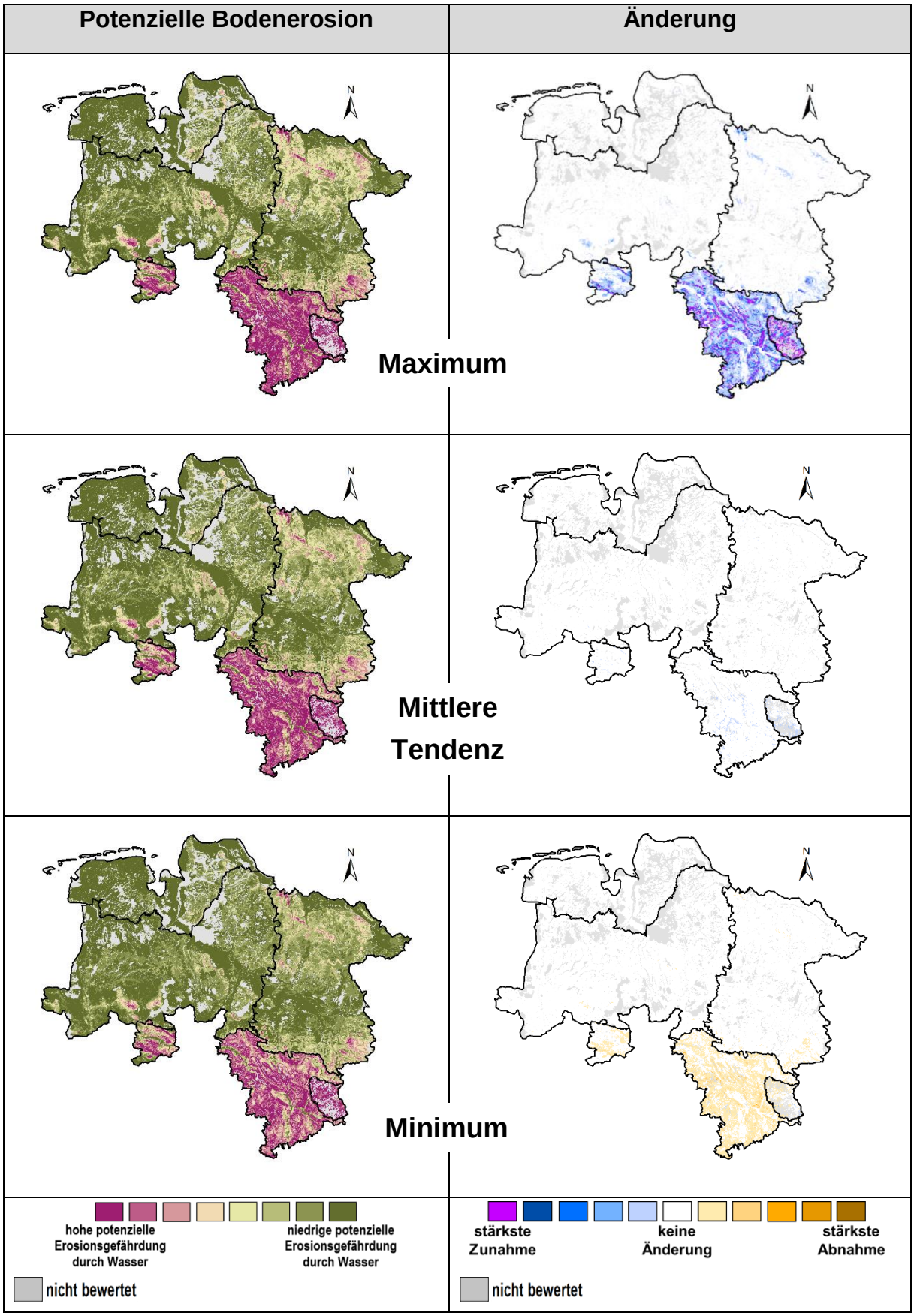


Abbildung 4-5: Potenzielle Bodenerosion durch Wasser bzw. Veränderungen des mittleren pot. Bodenabtrages (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Jahr in der fernen Zukunft (2071-2100)

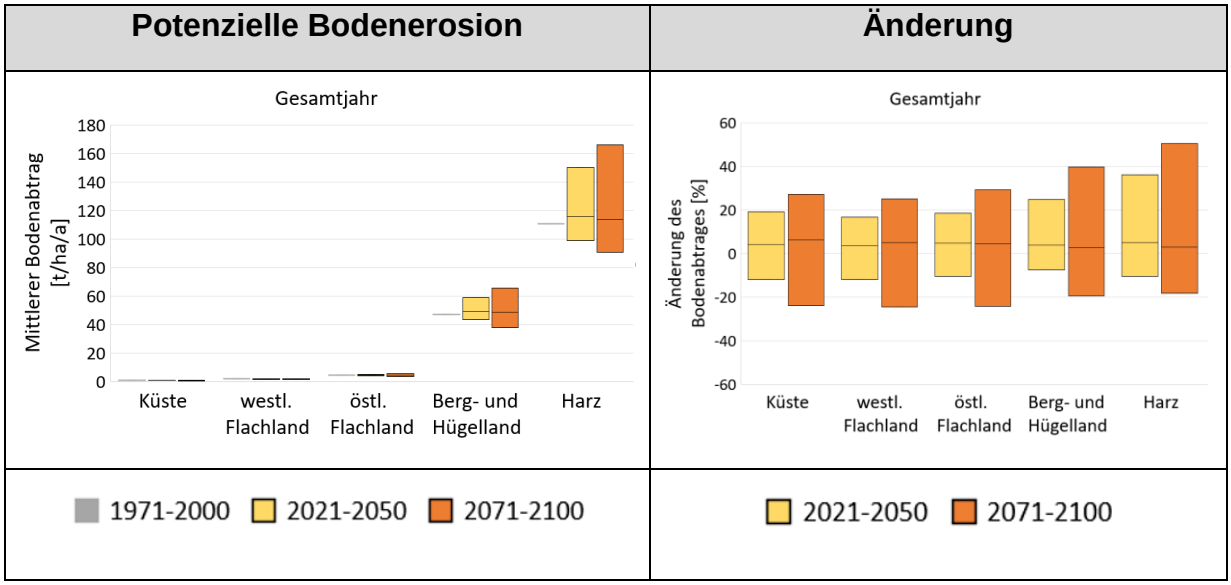


Abbildung 4-6: Zusammenfassung der potenziellen Bodenerosion durch Wasser und Veränderungen des mittleren potenziellen Bodenabtrages (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

4.1.3 Klimawirkung Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung)

4.1.3.1 Wirkungsketten

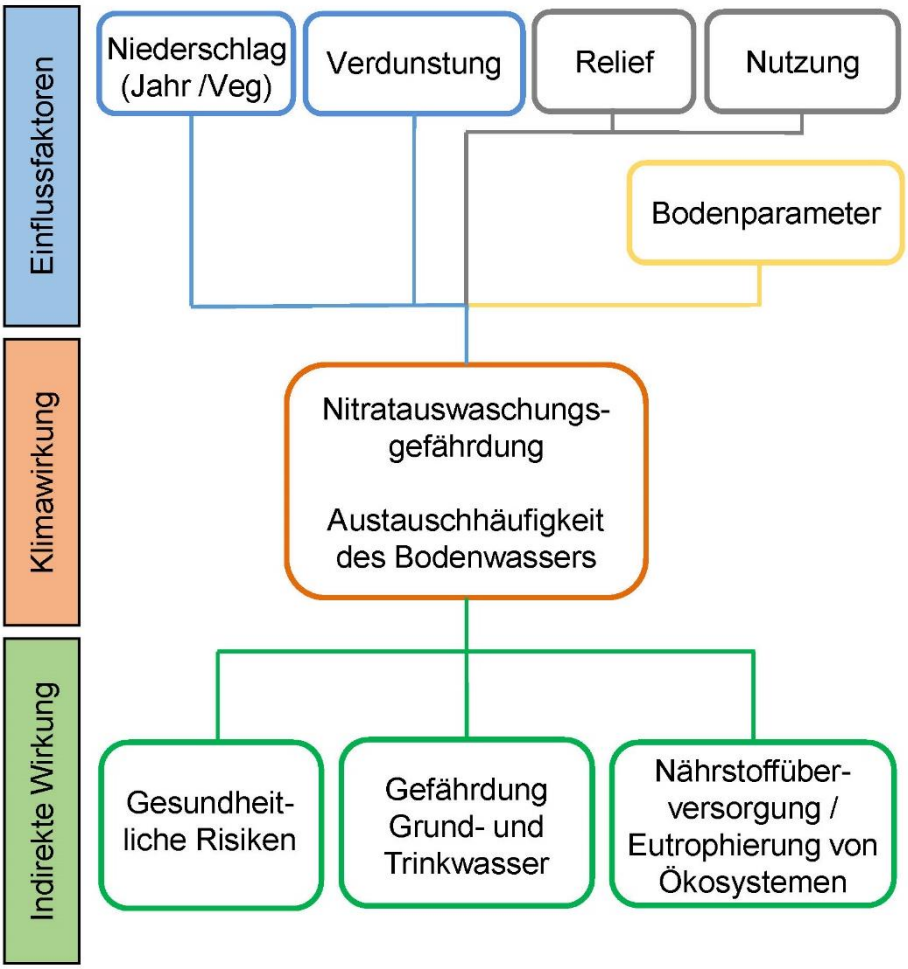


Abbildung 4-7: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung)

Das Verlagerungs- und Auswaschungsrisiko für im Boden nicht sorbierbare Stoffe wie Nitrat, kann über die Kenngröße „Austauschhäufigkeit des Bodenwassers“ mit Einschränkungen (siehe Kapitel 4.1.3.2) methodisch abgebildet werden. Die Austauschhäufigkeit wird durch klimatische und bodenkundliche Einflussgrößen sowie durch weitere standortspezifische Parameter wie das Relief und die Bodennutzung bestimmt. Das Klima hat in der Wirkungskette über die Höhe und Verteilung der Niederschläge sowie die standortspezifische Verdunstung einen entscheidenden Einfluss auf das Auswaschungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe. Die prognostizierte Zunahme der Sommertrockenheit mit einer stärker werdenden Austrocknung der Böden, insbesondere der Oberböden in der Hauptvegetationsperiode, wird zu einer Änderung der Nährstoffdynamik führen. Da der Transport von Düngenährstoffen zur

Pflanzenwurzel und die Aufnahme zahlreicher Pflanzennährstoffe an das Vorhandensein von Wasser gekoppelt sind, werden die Nährstoffverfügbarkeit und die Düngewirkung während der Vegetationsperiode (ohne zusätzliche Beregnung) eingeschränkt. Aus diesem Grund und durch den erwarteten zunehmenden Trockenstress steigt das Risiko von Mindererträgen mit schlechter Nährstoffausnutzung. Als Folge können höhere Nährstoffüberhänge im Herbst auftreten. Durch die Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr ist gleichzeitig mit höheren Sickerwasserraten im Winter und Frühjahr (also im Zeitraum ohne bzw. mit geringer Nährstoffaufnahme) zu rechnen. Die durch den Klimawandel zu erwartende stärkere Beanspruchung der bodenfunktionalen Leistungen, insbesondere die der Filter-, Puffer- und Regulationsfunktion des Bodens im Wasserhaushalt, wird in Hinsicht auf das Auswaschungsrisiko gelöster Stoffe zu einer Erhöhung des standortspezifischen Verlagerungsrisikos führen. Dies kann wiederum die Qualität des Grundwassers gefährden bzw. den Aufwand für die Trinkwasseraufbereitung erhöhen. Durch ein höheres Verlagerungsrisiko werden zudem grundwasserabhängige Ökosysteme aufgrund von Nährstoffanreicherung und Eutrophierung bedroht.

4.1.3.2 Indikatoren und Operationalisierung

Die Austauschhäufigkeit (AH) des Bodenwassers zeigt das standörtliche Verlagerungsrisiko von nicht sorbierbaren Stoffen, wie zum Beispiel Nitrat. Die AH schätzt jedoch nicht die tatsächliche Verlagerung von Nitrat in den Grundwasserkörper ab, da weder die Nitratkonzentration des Sickerwassers noch etwaige Abbauprozesse berücksichtigt werden. Dennoch ist die AH ein geeigneter Indikator um das standörtliche Verlagerungsrisiko einzustufen, da eine hohe Austauschhäufigkeit anzeigt, dass das Sickerwasser nicht lange im Boden verbleibt und dadurch weder von Pflanzen genutzt, noch die nicht sorbierbaren Stoffe gut zurückgehalten werden können.

Für die Kennzeichnung eines Standortes hinsichtlich seines standörtlichen Verlagerungsrisikos werden Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes herangezogen. Diese Methodik wird seit einigen Jahrzehnten in der Beratung zum Grundwasserschutz genutzt und kann damit als praxiserprobt sowie allgemein anerkannt angesehen werden. Ermittelt wird hierbei der Anteil der jährlich ausgetauschten Bodenlösung im Bodenwasserspeicher **AW_J [%*a^{-1}]**. Dafür müssen bodenphysikalische und bodenwasserhaushaltliche Kenngrößen generiert werden. Dabei erfolgt die Berechnung von AW_J auf Basis der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, FKWe) und der Sickerwasserrate (SWR) bzw. der Austauschhäufigkeit (AH):

$$AWj\ \left[\frac{\%}{a}\right] = \frac{SWR*100}{FKWe} = AH * 100 \qquad \textbf{Formel 4-2}$$

Der Anteil der jährlich ausgetauschten Bodenlösung im Bodenwasser **AW_J** entspricht somit der Austauschhäufigkeit AH in Prozent. Zur Vereinfachung und aufgrund der bisher üblichen Bezeichnung wird AW_J im Folgenden Synonym zur Austauschhäufigkeit verwendet. Die Berechnung bezieht sich dabei jedoch immer auf die mit der Formel 4-2 berechneten Werte.

Tabelle 4-3: Anteil der jährlich ausgetauschten Bodenlösung im Bodenwasserspeicher in Abhängigkeit von Feldkapazität im effektiven Wurzelraum und Sickerwasserrate (MÜLLER & WALDECK, in Druckvorbereitung)

FKWe [mm]	SWR [mm * a^{-1}]					
	50	100	150	200	300	400
	AW_J [% * a^{-1}]					
50	100	200	300	400	600	800
100	50	100	150	200	300	400
150	33	67	100	133	200	267
200	25	50	75	100	150	200
250	20	40	60	80	120	160
300	17	33	50	67	100	133
400	13	25	38	50	75	100
500	10	20	30	40	60	80

Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers wird hier somit stark vereinfacht als gleichbedeutend mit dem standörtlichen Verlagerungsrisiko von Nitrat bzw. der Nitratauswaschungsgefährdung (NAG) angenommen. Die Bewertung des standörtlichen Verlagerungsrisikos (Nitratauswaschungsgefährdung) ergibt sich hierbei aus einer Klassifizierung der Austauschhäufigkeit.

Tabelle 4-4: Bewertung des standörtlichen Verlagerungsrisikos (NAG) (MÜLLER & WALDECK, in Druckvorbereitung)

Bewertung des standörtlichen Verlagerungsrisikos					
AW_J [% * a^{-1}]	≤ 70	>70– 100	>100– 150	>150– 250	> 250
	sehr gering	gering	mittel	groß	sehr groß

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie basieren auf der Auswertungsmethode 5.1.6 der „Auswertungsmethoden im Bodenschutz“ (Abbildung 4-8, MÜLLER & WALDECK, 2011). Die Grundlage für diese Ermittlung bildet die DIN 19732 (2011). Die Methode zur Ermittlung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum ist im MethodenManagementSystem (MeMaS) des LBEG implementiert. Für die Berechnung der Sickerwasserrate wurde das überarbeitete TUB_BGR-Verfahren verwendet (MÜLLER & WALDECK, in Druckvorbereitung). Im Unterschied zu früheren Ansätzen werden durch das TUB_BGR-Verfahren die nichtlinearen Sickerwasserraten vom pflanzenverfügbaren

Bodenwasser und von den klimatischen Einflüssen am jeweiligen Standort besser berücksichtigt (BAFG, o.J.). Zusätzlich stellt es eine bundesweit einheitliches Verfahren dar (KRUG, D., STOLZ, W. & STEGGER, U, 2004).

Für die Ermittlung wurden die Profil- und Horizontdaten der Bodenkundlichen Karte i.M. 1:50.000 (BK50) verwendet. Im Datensatz der BK50 sind alle für die nach Methode 5.1.6 notwendigen bodenkundlichen Eingangsdaten (Bodenart bzw. Torfart, Humusgehalt, Skelettgehalt etc.) verfügbar. Für die Kennwertermittlung werden die bodenkundlichen Basisdaten durch Reliefdaten (Hangneigung, Hangexposition), Daten zur Bodennutzung (Differenzierung nach Acker, Grünland, Forst) und Klimaprojektionsdaten ergänzt. Aufgrund des schwer zu modellierenden Oberflächenabflusses auf stärker geneigten Flächen ist die in die Berechnung eingehende Sickerwasserrate nicht immer ermittelbar. Es gelten hierbei neigungsstufenabhängige Gültigkeitsbereiche. Ab einer Hangneigung von mehr als 3,5 %, d.h. bis einschließlich Neigungsstufe 1, sind die Gleichungen des TUB_BGR-Verfahrens auf Ackerflächen nicht mehr anwendbar. Für andere Flächen wie Forst und Grünland gilt ein Grenzwert von 18 %. Aus diesem Grund kann die Austauschhäufigkeit für einen großen Flächenanteil des niedersächsischen Berglandes nicht abgebildet werde.

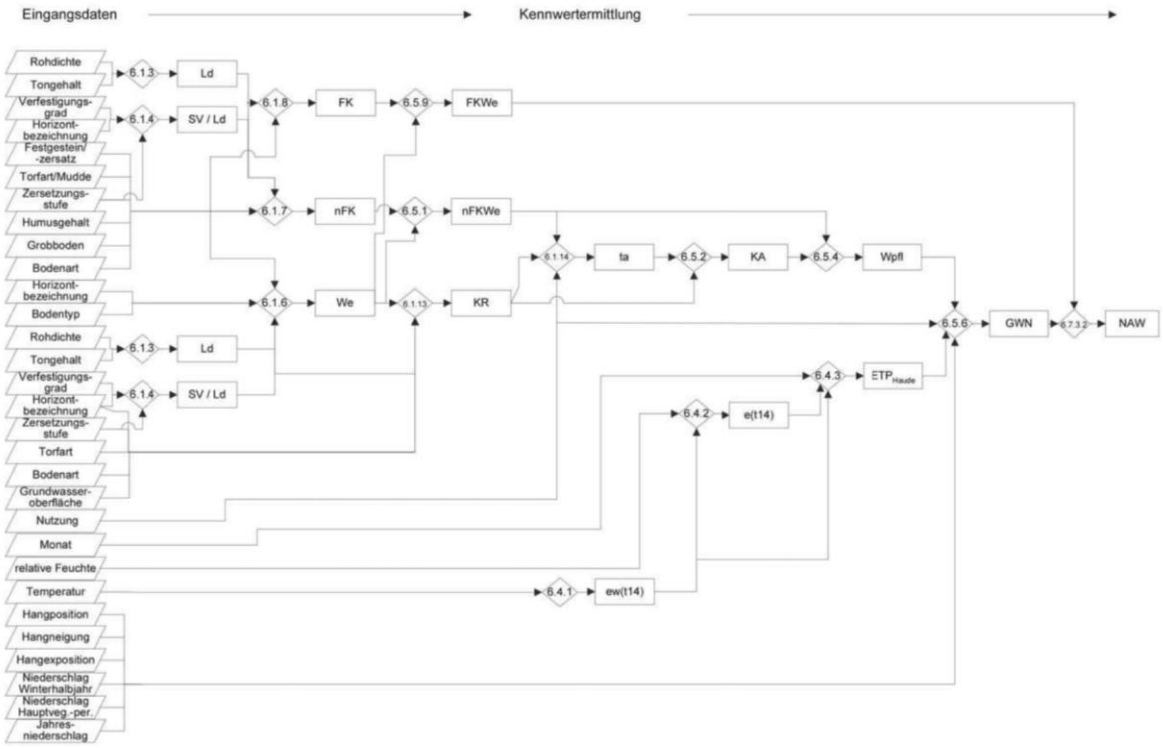


Abbildung 4-8: Darstellung der Austauschhäufigkeit (Nitratauswaschungsgefährdung) nach der Methode 5.16 im Geobericht 19 von MÜLLER & WALDECK (1. Auflage, 2011). Im Rahmen dieser Studie erfolgte die Berechnung der Sickerwasserrate (bei der Verknüpfungsregel 6.5.6) nach dem TUB_BGR-Verfahren (Müller und Waldeck, in Druckvorbereitung). In dem aktualisierten Bericht von 2019 entspricht die Verknüpfungsregel 6.7.3.2 der Nummer 6.7.10 (Berechnung der Austauschhäufigkeit).

Für die Ergebnisdarstellung der prognostizierten Klimawirkung wurde in dieser Studie die Klassifizierung zur Bewertung des standörtlichen Verlagerungsrisikos nach Tabelle 4-4. übernommen. Die Änderung des Klimasignals wurde auf Grundlage der durch die Wirkmodellierung für die in den Projektionszeiträumen ermittelten Bandbreite in Intervallen von 50 %*a^{-1} klassifiziert. In grau dargestellte Flächen wurden nicht bewertet.

Tabelle 4-5: Klasseneinteilung des standörtlichen Verlagerungsrisikos bzw. der Änderungssignale für das standörtliche Verlagerungsrisiko des Bodenwassers (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Standörtliche Verlagerungsrisiko **AW_J [%*a^{-1}]**	
	> 250	NAG 5
	150 bis <250	NAG 4
	100 bis <150	NAG 3
	70 bis <100	NAG 2
	< 70	NAG 1

Legende	Änderung des standörtlichen Verlagerungsrisikos **AW_J [%*a^{-1}]**
	> +225
	+175 bis +225
	+125 bis +175
	+75 bis +125
	+25 bis +75
	-25 bis +25
	-25 bis -75
	-75 bis -125
	-125 bis -175
	-175 bis -225
	> -225

4.1.3.3 Ergebnisse und Bewertung

Die stärkste **Klimawirkung** für das Verlagerungsrisiko nicht sorbierbarer Stoffe liegt erwartungsgemäß im Bereich der sandigen Geestböden (siehe Abbildung 4-9), insbesondere im zentralen Teil Niedersachsens (westliches und östliches Flachland). Hier werden klimawandelbedingt zunehmende Sickerwassermengen bei geringen Wasserspeicher-

kapazitäten der Böden zu einer Erhöhung des Verlagerungsrisikos nicht sorbierbarer Stoffe, wie z.B. Nitrat, aus dem Boden in das Grundwasser führen. Das südliche Niedersachsen reagiert auf die Klimaänderungen weniger empfindlich, da aufgrund der hohen Wasserspeicherkapazitäten der vorherrschenden Lössböden höhere Niederschlagsmengen besser gespeichert werden können. Eine Ausnahme bildet hier der Harz. Zunächst ist hervorzuheben, dass im Harz keine flächendeckenden Auswertungen vorliegen, da eine Berechnung der Austauschhäufigkeit nur bei Hangneigungen unter 3,5 % (für Ackerflächen) bzw. unter 18 % (für Grünland und Forst) vorgenommen wird. Bei größeren Hangneigungen findet neben einer Versickerung des Wassers in den Boden vermehrt Oberflächenabfluss statt. Insgesamt weisen die bewerteten Flächen des Harzes ein hohes Verlagerungsrisiko nicht sorbierbarer Stoffe auf. Dies liegt zum einen daran, dass hier flachgründige Podsole oder Podsol-Braunerden auftreten und zum anderen an der hohen Klimawirkung im Harz (niedersachsenweit höchste jährliche Niederschlagssumme). Jedoch liegen im Harz hauptsächlich Forstflächen vor, womit eine Stoffverlagerung von zum Beispiel Nitrat eine geringe Relevanz besitzt.

Im mittleren Trend gibt es kaum **Änderungssignale** in dem Verlagerungsrisiko nicht sorbierbarer Stoffe (siehe Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-12), weder in der nahen (2021-2050) noch in der fernen Zukunft (2071-2100). Bei Betrachtung der Bandbreite, d.h. den Werten des schwachen (abnehmende Niederschlagsmenge) bzw. starken (zunehmende Niederschlagsmenge) Wandelszenarios, kann es in einzelnen Jahren zu deutlichen Abweichungen vom Mittel kommen. Die stärksten Änderungssignale für das Verlagerungsrisiko nicht sorbierbarer Stoffe liegen für die nahe bzw. ferne Zukunft erwartungsgemäß im Bereich der sandigen Geestböden Niedersachsens. Die Zunahmen des Verlagerungsrisikos sind für die Betrachtung des starken Wandelszenarios für die nahe Zukunft im Bereich der Geestlandschaften quantitativ ähnlich und räumlich nur gering differenziert. Für die ferne Zukunft wird hingegen eine deutliche Zunahme im Bereich der Lüneburger Heide, des Landkreis Rotenburg (Wümme) und des Landkreis Cuxhaven bei einem starken Wandel prognostiziert. Punktuell treten hier Änderungen der Austauschhäufigkeit von mehr als 225 %*a^{-1} auf. In der fernen Zukunft werden im Mittel bei einem starken Wandelszenario Zunahmen von etwa 30 %*a^{-1} im Berg- und Hügelland, 55 %*a^{-1} im östlichen Flachland bzw. mehr als 60 %*a^{-1} im westlichen Flachland und der Küste sowie um die 90 %*a^{-1} im Harz erwartet. Die prozentuale Zunahme des Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe ist im Harz jedoch deutlich geringer als an der Küste. Dort fällt die prozentuale Zunahme im Vergleich aller Gebiete am stärksten aus (siehe Abbildung 4-12). Bei einem schwachen Wandelszenario zeigt sich aufgrund der abnehmenden Niederschlagsmenge eine Verringerung des Verlagerungsrisikos. Die Abnahmen bewegen sich dabei in einer ähnlichen Größenordnung wie die bereits bei einem starken Wandelszenario dargelegten Zunahmen.

Die **Bedeutung** des Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe (wie z.B. Nitrat) liegt in dem Stoffeintrag in das Grundwasser. Als Folge können Beeinträchtigungen der Gewässer-ökologie entstehen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass es klimawandelbedingt zu einer

Zunahme des standörtlichen Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe kommen kann. Dabei liegen die zu erwartenden Änderungen für viele Flächen bei einer Erhöhung der NAG-Stufe. Es ist somit unabdingbar, dass sowohl für die gegenwärtige als auch die zukünftige Situation Maßnahmenprogramme sowie standortdifferenzierte Nutzungs- und Bewirtschaftungspläne umgesetzt und erweitert werden.

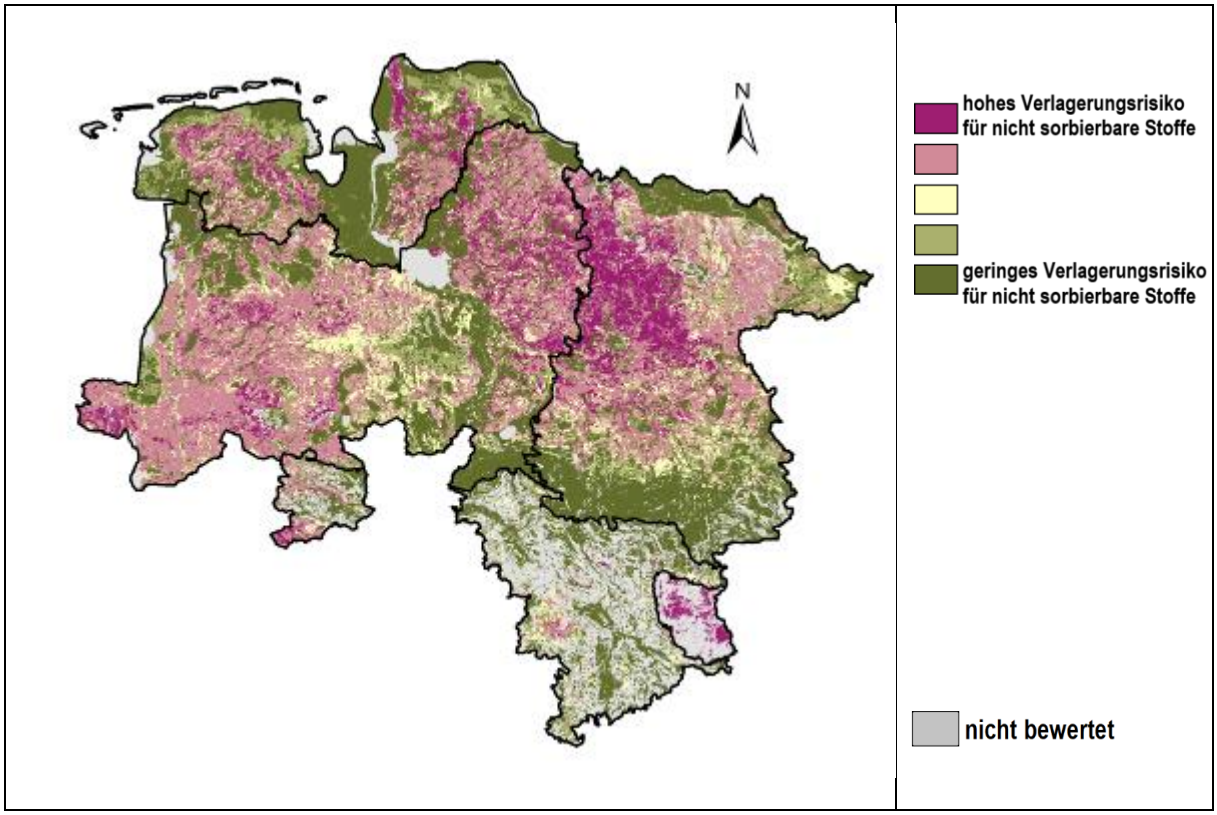


Abbildung 4-9: Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe im Jahr (Januar bis Dezember) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

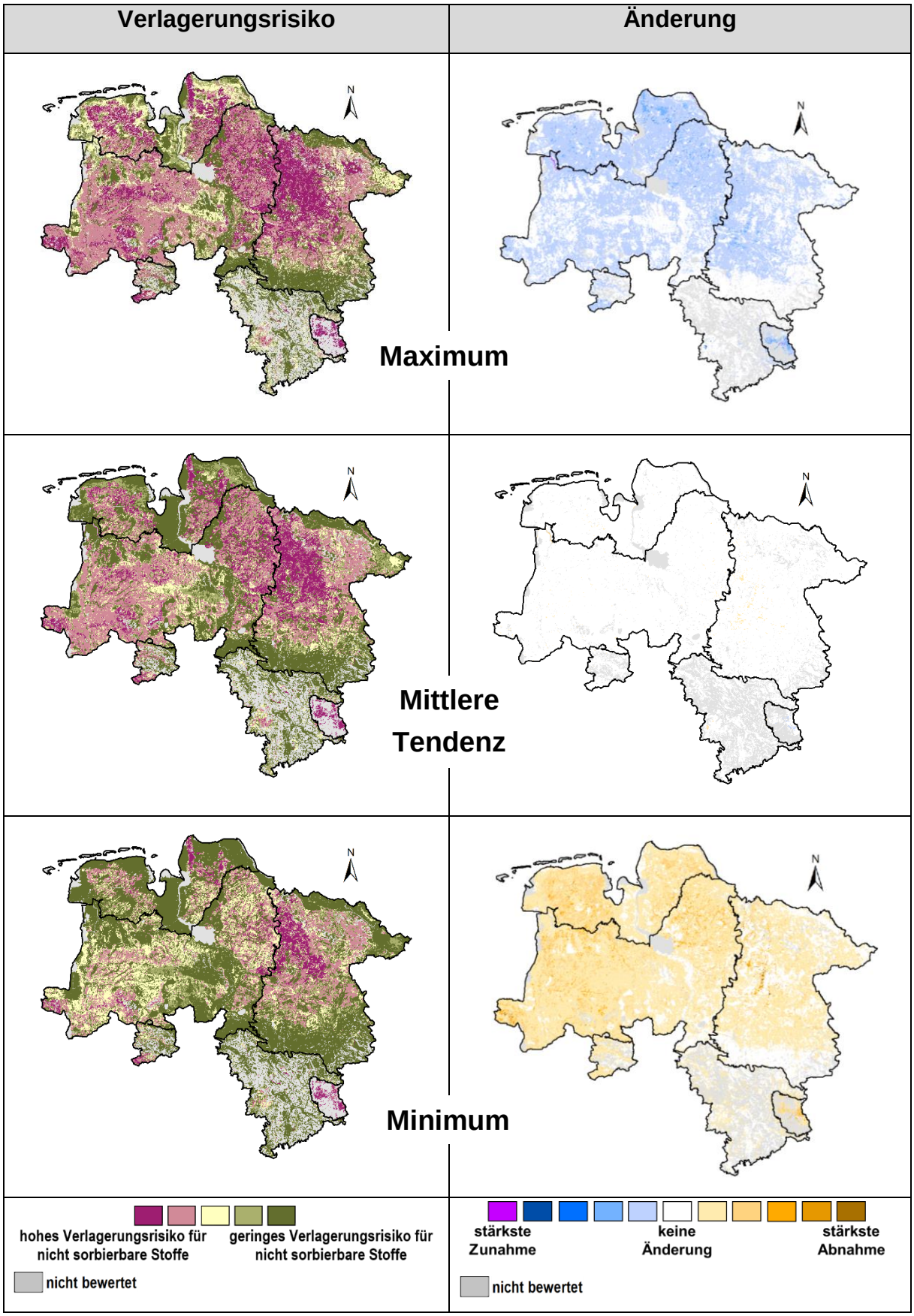


Abbildung 4-10: Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Jahr (Jan bis Dez) in der nahen Zukunft (2021-2050)

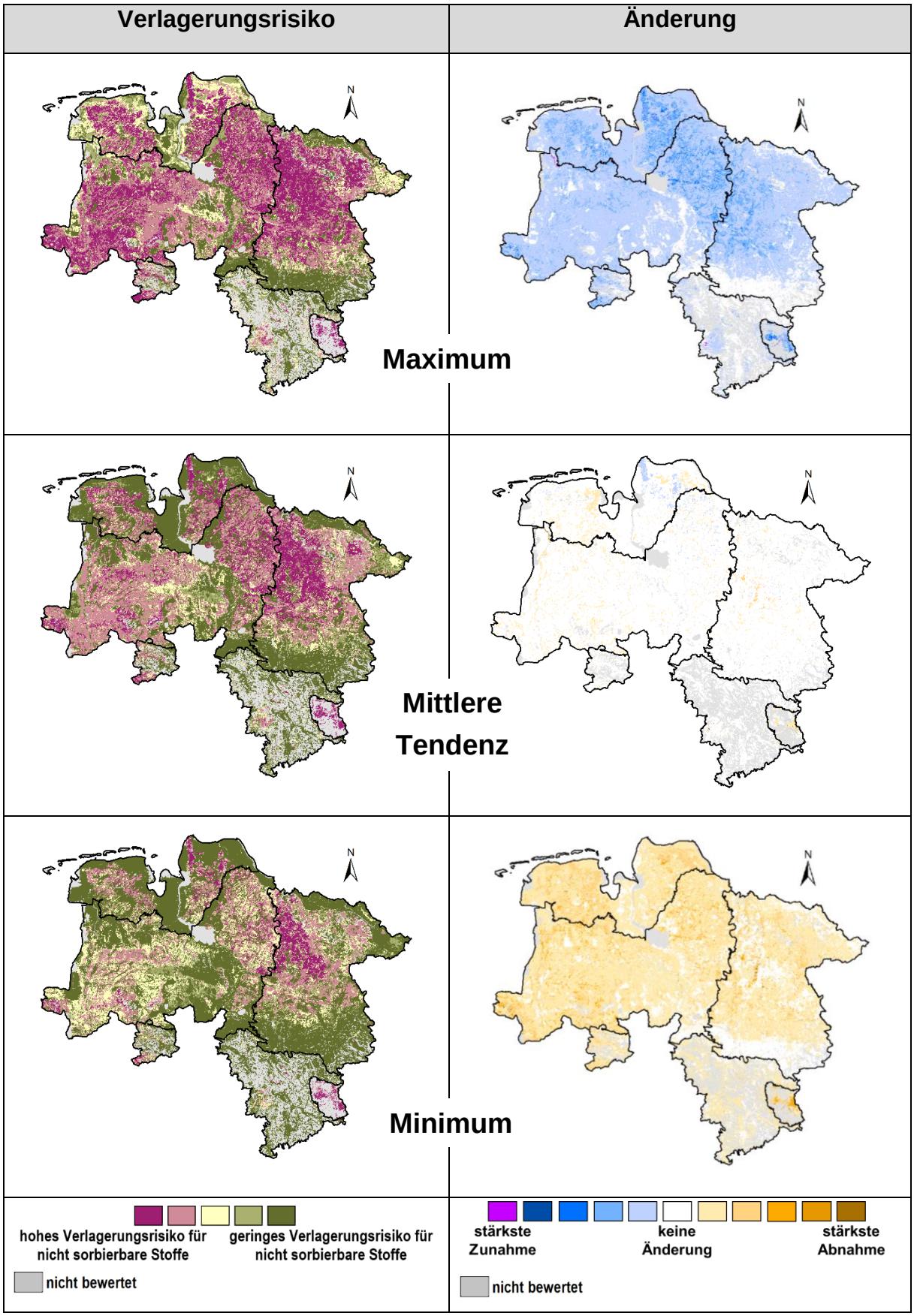


Abbildung 4-11: Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) im Jahr (Jan bis Dez) in der fernen Zukunft (2071-2100)

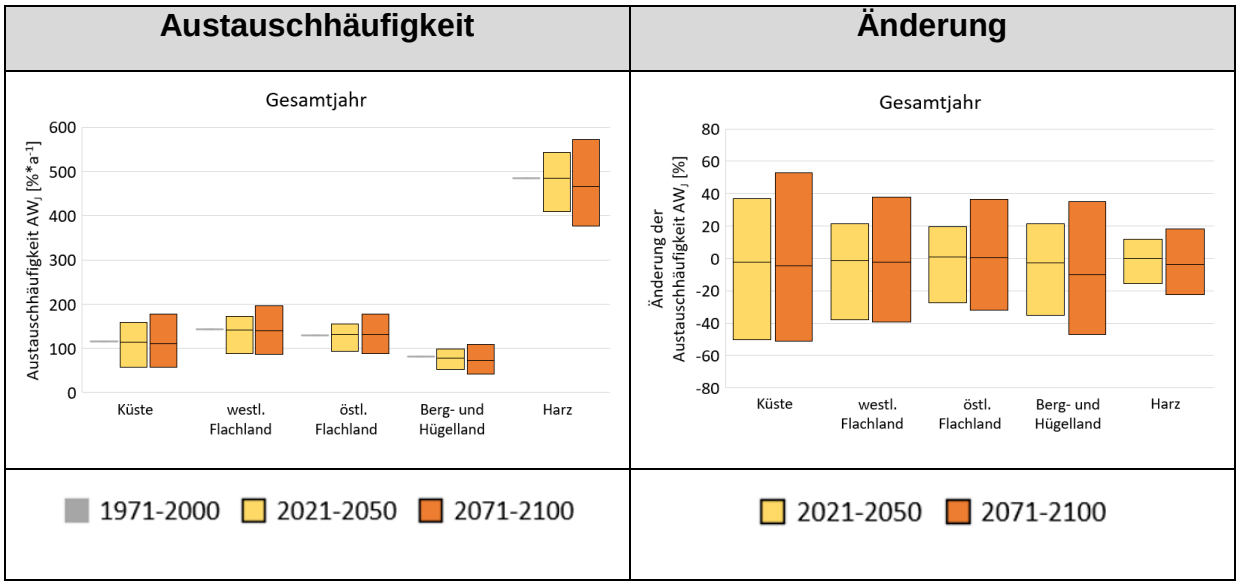


Abbildung 4-12: Zusammenfassung der Austauschhäufigkeit von nicht sorbierbaren Stoffen und deren Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

4.1.4 Klimawirkung Zusatzwasserbedarf

4.1.4.1 Wirkungsketten

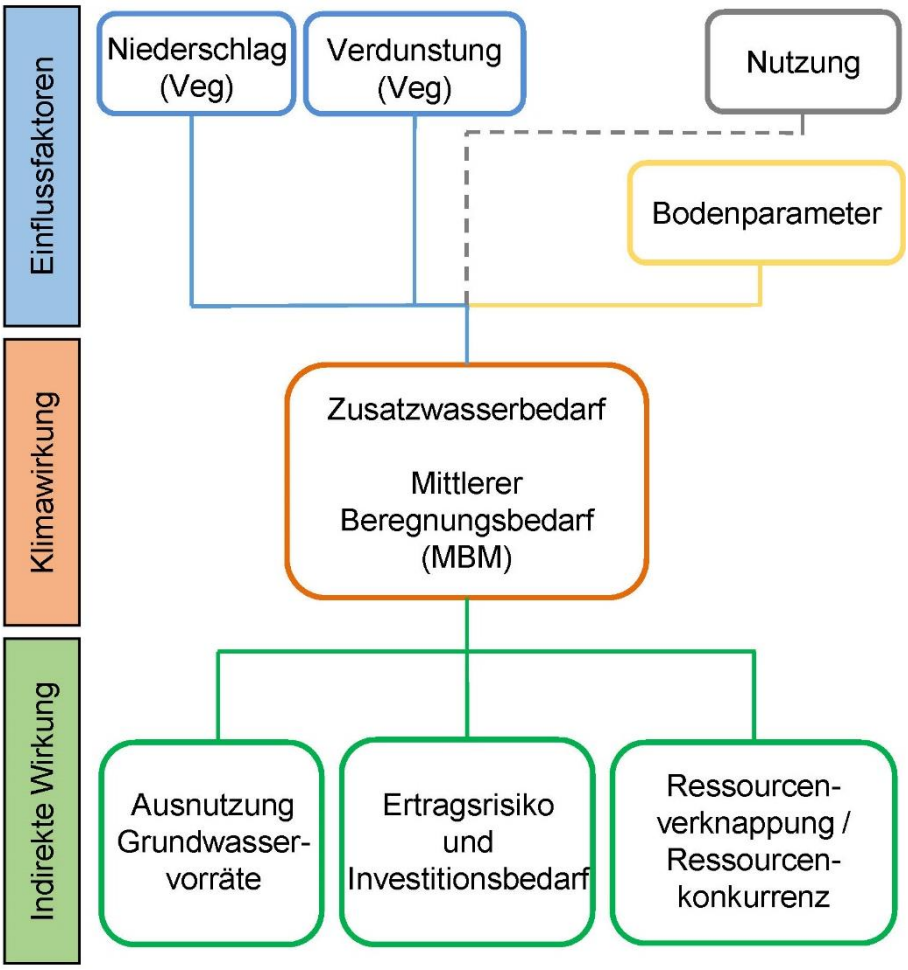


Abbildung 4-13: Vereinfachtes Schema zu den Wirkungsketten der Klimawirkung „Zusatzwasserbedarf“

Die klimawandelbedingten saisonalen Verlagerungen der Niederschläge (Zunahme der Niederschläge im Winter, Rückgang der Niederschläge im Sommer) bei gleichzeitigem Temperaturanstieg haben bei höherer Verdunstung in der Hauptvegetationsperiode eine abnehmende klimatische Wasserbilanz zur Folge - das Wasserbilanzdefizit nimmt folglich zu. Zusätzlich wird im Sommer eine stärkere Ausnutzung der Bodenwasservorräte erfolgen. Wieviel ein Boden an Wasser aufnehmen kann, ist dabei von seiner Wasserspeicherfähigkeit abhängig und kann kleinräumlich deutlich variieren. Die Fähigkeit des Bodens Wasser zu speichern wird durch die Bodentextur (Porenvolumen und Porengrößenverteilung), die Vorsättigung zu Beginn der Vegetationsperiode und den Steingehalt bestimmt. Die Dauer und die Anzahl von Trockenperioden werden durch den Klimawandel zukünftig zunehmen. Als Folge steigen die Gefahr von Trockenstress für die Vegetation und das Risiko für

Ertragseinbußen für die Landwirtschaft. Um dem entgegen zu wirken steigt der Zusatzwasserbedarf und in Folge dessen wird seitens der Landwirtschaft die Notwendigkeit zur Erhöhung der Feldberegnung gesehen. Dies betrifft einerseits die benötigten Wassermengen andererseits auch die absolute Beregnungsfläche. Es ist daher mit einer verstärkten Nutzung des Grundwasserdargebots zur Feldberegnung und mit zunehmenden Nutzungskonflikten um die Ressource „Grundwasser“ zu rechnen. In diesem Zusammenhang sind auch Auswirkungen auf oberflächennahe grundwasserabhängige Ökosysteme zu beachten.

4.1.4.2 Indikatoren und Operationalisierung

Nach der DWA-M590 (2017) hängt die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen von einer Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren, wie regionale klimatische Verhältnisse, Grundwasserverhältnisse, Kulturart/-sorte und Bodenart bzw. –typ ab. Für die Kennzeichnung eines Standortes hinsichtlich seines Zusatzwasserbedarfes steht im MethodenManagementSystem (MeMaS) des LBEG eine entsprechende Methode zur Verfügung (Methode 5.14 im GeoBerichte 19). Unter dem Zusatzwasserbedarf wird hierbei die mittlere jährliche Beregnungsmenge definiert, welche zur Aufrechterhaltung von 40 % der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) erforderlich ist. Der Zusatzwasserbedarf kann mit diesem Verfahren fruchtartenspezifisch ermittelt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurde dabei ein Mittelwert für Getreide (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste) und Hackfrüchte (Zuckerrüben, Kartoffeln, Mais) genutzt. Die Berechnung des Mittelwerts wurde gewählt, weil es keine flächendeckende Karte der aktuell angebauten Fruchtarten gibt und die Prognose über die zukünftigen Anbaufrüchte zu vage ist. Der Zusatzwasserbedarf kann anhand des „Mittleren Beregnungsbedarfes“ auf der Grundlage der Kennwerte „Beregnungswirksame Klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode“, „nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes“ sowie des „Pflanzenverfügbaren Bodenwassers“ in mm/Vegetationsperiode ermittelt werden (siehe Tabelle 4-6). Eine Klassifizierung und Bewertung des Zusatzwasserbedarfs ist über die Tabelle 4-7 gegeben.

Tabelle 4-6: Mittlere Beregnungsmenge bei Getreide und Hackfrüchten (MÜLLER & WALDECK, 2011)

KWBb [mm/v]	nFKWe/W_{pfl} [mm]									
	50	65	85	100	125	150	175	200	240	300
50	44	35	23	14	2	–	–	–	–	–
25	59	50	38	29	16	4	–	–	–	–
0	74	65	52	42	30	17	4	–	–	–
-25	88	78	66	57	43	29	15	2	–	–
-50	102	92	79	69	55	40	26	13	–	–
-75	115	105	90	80	65	51	36	23	3	–
-100	128	116	100	92	75	60	46	32	13	–
-125	140	128	112	100	85	69	55	40	22	3
-150	152	137	120	110	93	77	62	48	30	11
-175	163	147	130	118	100	84	70	55	37	18
-200	174	156	138	126	107	90	76	60	43	24
-225	184	165	145	132	113	96	82	65	48	29
-250	194	172	151	138	117	101	87	70	52	33
-275	204	179	156	142	121	104	92	73	55	36
-300	212	185	161	146	124	107	95	76	57	38

Der Zusatzwasserbedarf kann anhand des „Mittleren Beregnungsbedarfes“ auf der Grundlage der Kennwerte „Beregnungswirksame Klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode“, „nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes“ sowie des „Pflanzenverfügbaren Bodenwassers“ in mm/Vegetationsperiode ermittelt werden (siehe Tabelle 4-6). Eine Klassifizierung und Bewertung des Zusatzwasserbedarfs ist über die Tabelle 4-7 gegeben:

Tabelle 4-7: Kennwertklassifizierung der mittleren Beregnungsmenge (MÜLLER & WALDECK, 2011)

Mittlere Beregnungsmenge [mm/v] Beregnungseinsatz 40 % nFK	Beregnungsklasse	Zusatzwasserbedarf
0–20	1	kein
>20–60	2	gering
>60–100	3	mittel
>100–140	4	hoch
>140	5	sehr hoch

Für die Ermittlung wurden die Profil- und Horizontdaten der Bodenkarte i.M. 1:50.000 (BK50) verwendet. Im Datensatz der BK50 sind alle für die nach Methode 5.14 notwendigen bodenkundlichen Eingangsdaten (Bodenart bzw. Torfart, Humusgehalt, Lagerungsdichte etc.) verfügbar. Der hier genutzte Ansatz zur Ermittlung des Zusatzwasserbedarfs orientiert sich an DWA-Merkblättern zur Wasserwirtschaft (DWA-M590, 2017) und wurde bereits in mehreren Projekten und Kooperationsvorhaben mit der Landwirtschaft eingesetzt. Das Verfahren kann somit als valide angesehen werden.

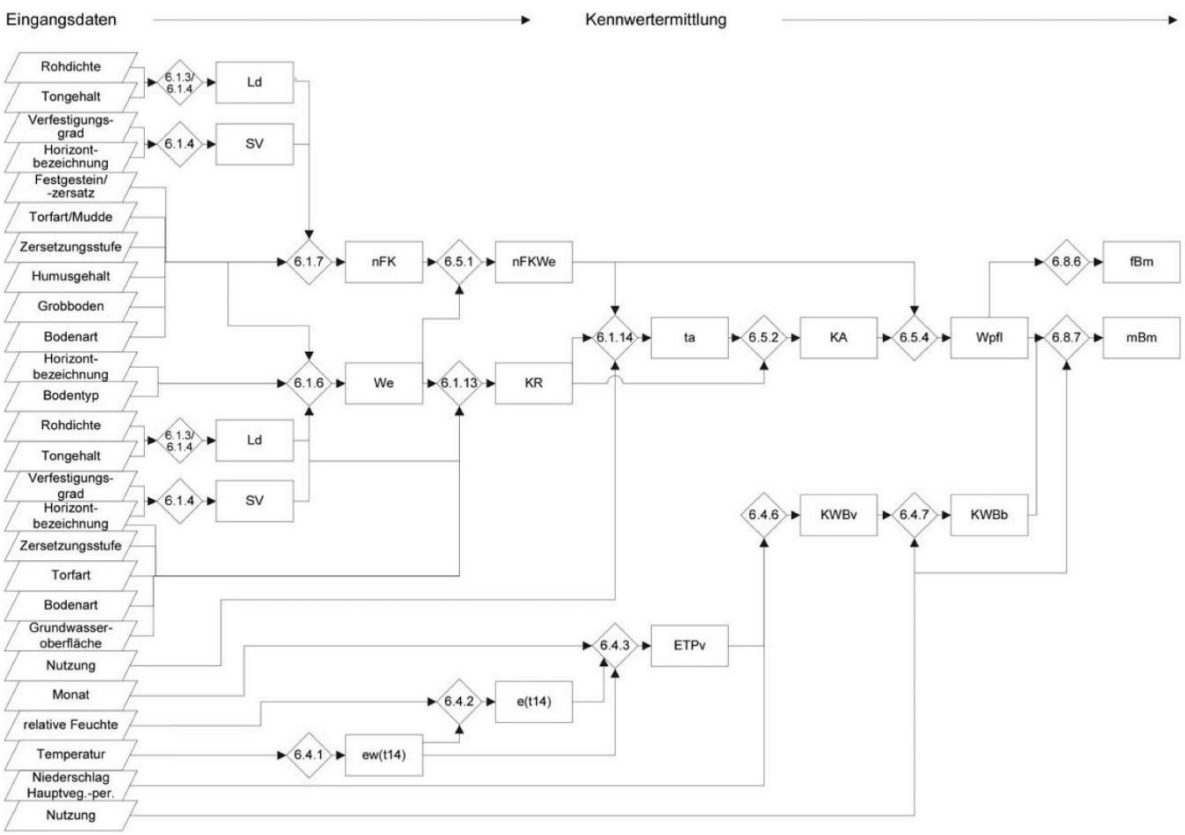


Abbildung 4-14: Zusatzwasserbedarf Methode 5.14 im Geoberichte 19 von MÜLLER & WALDECK, 2011.

Hervorzuheben ist, dass sich die Auswertungen zum Zusatzwasserbedarf nur auf ackerbaulich genutzte Flächen beziehen. Folglich werden theoretisch denkbare Zusatzwassermengen für Grünland oder Forst nicht dargestellt. Die hier genutzte Klassifizierung und Bewertung des Zusatzwasserbedarfs entspricht den Vorgaben aus den „Auswertungsmethoden zum Bodenschutz (MÜLLER & WALDECK (2011), siehe Tabelle 4-7). Die Änderung des Zusatzwasserbedarfs im Vergleich der Klimaprojektionszeiträume „nahe Zukunft“ und „ferne Zukunft“ zum Referenzzeitraum wurde in 10 mm Intervallen klassifiziert. In grau dargestellte Flächen wurden nicht bewertet.

Tabelle 4-8: Klasseneinteilung der mittleren Beregnungsmenge (Zusatzwasserbedarf) bzw. der Änderungssignale (gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000)

Legende	Zusatzwasserbedarf (mm/V)
	> 180
	140 bis 180
	100 bis 140
	60 bis 100
	20 bis 60
	< 20

Legende	Änderung des Zusatzwasserbedarf (mm/V)
	> +50
	+40 bis +50
	+30 bis +40
	+20 bis +30
	+10 bis +20
	-10 bis +10
	-10 bis -20
	< -20

4.1.4.3 Ergebnisse und Bewertung

Die stärkste **Klimawirkung** des Zusatzwasserbedarfes liegt für den Referenzzeitraum im zentralen Teil Niedersachsens (vor allem im östlichen, z.T. auch im westlichen Flachland), im Bereich der sandigen und grundwasserfernen Geestböden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit (siehe Abbildung 4-15). Dabei ist die Klimawirkung im Osten Niedersachsens am höchsten, weil dort die Klimatische Wasserbilanz, bedingt durch die geringeren Niederschlagsmengen (von West nach Ost zunehmende Kontinentalität), am niedrigsten ist. Für die Küste sowie das Berg- und Hügelland ist die Klimawirkung nur schwach ausgeprägt, da diese Regionen von den höheren Niederschlagsmengen sowie von Böden mit höherer Wasserspeicherkapazität profitieren. Der Übergang der eher sandigen Böden im Norden zu den Löss- und Verwitterungsböden im Süden des östlichen sowie westlichen Flachlandes ist im Zusatzwasserbedarf deutlich erkennbar. Anzumerken ist, dass für die forstwirtschaftlich genutzten Teile Niedersachsens keine Aussagen getroffen werden können, da für die Berechnung ausschließlich Flächen mit Ackernutzung berücksichtigt wurden.

Im mittleren Trend gibt es kaum **Änderungssignale** für die nahe Zukunft (2021-2050; siehe Abbildung 4-16). Hingegen sind in der fernen Zukunft (2071-2100) im Mittel deutliche Zunahmen des Zusatzwasserbedarfes für alle Regionen (von etwa 15 % im östlichen Flachland bis zu 45 % im Berg- und Hügelland) zu erwarten (siehe Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18). Bei einem „trockenen“ Szenario (dies entspricht beim Zusatzwasserbedarf im Gegensatz zu den anderen untersuchten Klimawirkungen dem starken Wandelszenario) würde sich der Wassermangel in den heute bereits bekannten Regionen erhöhen und räumlich

erweitern. So erfolgt für das Flachland in der fernen Zukunft aufgrund einer zu erwartende Zusatzwassermenge von durchschnittlich etwa 30 mm eine Änderung auf die Beregnungsklasse „hoch“ (100 mm – 140 mm) für das starke Wandelszenario. Dies entspricht einer Zunahme des Zusatzwasserbedarfes um die 30 % - 40 %. Stellenweise können auch höhere Bedarfe erreicht werden. Unter diesem Wandelszenario erfährt auch die Region der Küste eine Änderung der Beregnungsklasse (von „gering“ zu „mittel“). Im Berg- und Hügelland werden die Veränderungen aufgrund des günstigeren Wasserspeichervermögens der anzutreffenden Böden zwar moderater, aber dennoch spürbar ausfallen. So wird für die ferne Zukunft bei einem starken Wandelszenario eine Zunahme der Zusatzwassermenge um etwa 35 mm prognostiziert. Der Zusatzwasserbedarf liegt im niedersachsenweiten Vergleich damit am geringsten. Die Beregnungsklasse ändert sich jedoch auch hier von „gering“ zu „mittel“. Für das schwache Wandelszenario („nasses“ Szenario) wird zunächst für die nahe Zukunft eine deutliche Abnahme der Zusatzwassermenge von etwa 17 % im östlichen Flachland bis zu 35 % an der Küste prognostiziert. Dies schwächt sich jedoch zur fernen Zukunft auf Abnahmen von 12 % im östlichen Flachland bis unter 30 % an der Küste ab. Der Grund dafür ist, dass einige Modelle zur Mitte des Jahrhunderts zunächst deutlich höhere Niederschlagsmengen projizieren, diese jedoch zum Ende des Jahrhunderts wieder zurückgehen. Bis zum Ende des Jahrhunderts sind so Abnahmen im Zusatzwasserbedarf um maximal etwa 16 mm (Küste) unter dem schwachen Wandel zu erwarten. Dadurch ist keine Verbesserung der Beregnungsklasse zu erwarten. Für den Harz konnte keine Aussage zum Änderungssignal getroffen werden (vgl. Abbildung 4-18), da der Stichprobenumfang für die Ackerflächen als zu gering eingestuft wurde.

Die **Bedeutung** der zu erwartenden Änderungen ist vor allem in den Gebieten des niedersächsischen Flachlandes besonders hoch. Bereits heute sind diese Gebiete aufgrund der sandigen, grundwasserfernen Böden von Sommertrockenheit betroffen (z.B. Landkreis Uelzen oder Samtgemeinde Ostheide). Im Zuge längerer Trockenperioden werden die ansässigen Landwirte in Zukunft in der Vegetationszeit voraussichtlich noch häufiger beregnen müssen um keine Ertragseinbußen hinnehmen zu müssen. Die Bedeutung der Beregnung steigt somit weiter, da in trockenen Jahren das Wasser immer mehr zu einem begrenzenden Faktor wird, welcher über die Beregnung zugeführt werden muss. Steigende Zusatzwassermengen und steigende Entnahmen aus den Grundwasserkörpern können auch negative Auswirkungen für grundwasserabhängige Landökosysteme nach sich ziehen (siehe dazu Kapitel 3.1). Die Sicherung der Wasserversorgung bei gleichzeitigem Schutz der Grundwasserkörper wird eine zentrale Herausforderung Niedersachsens sein.

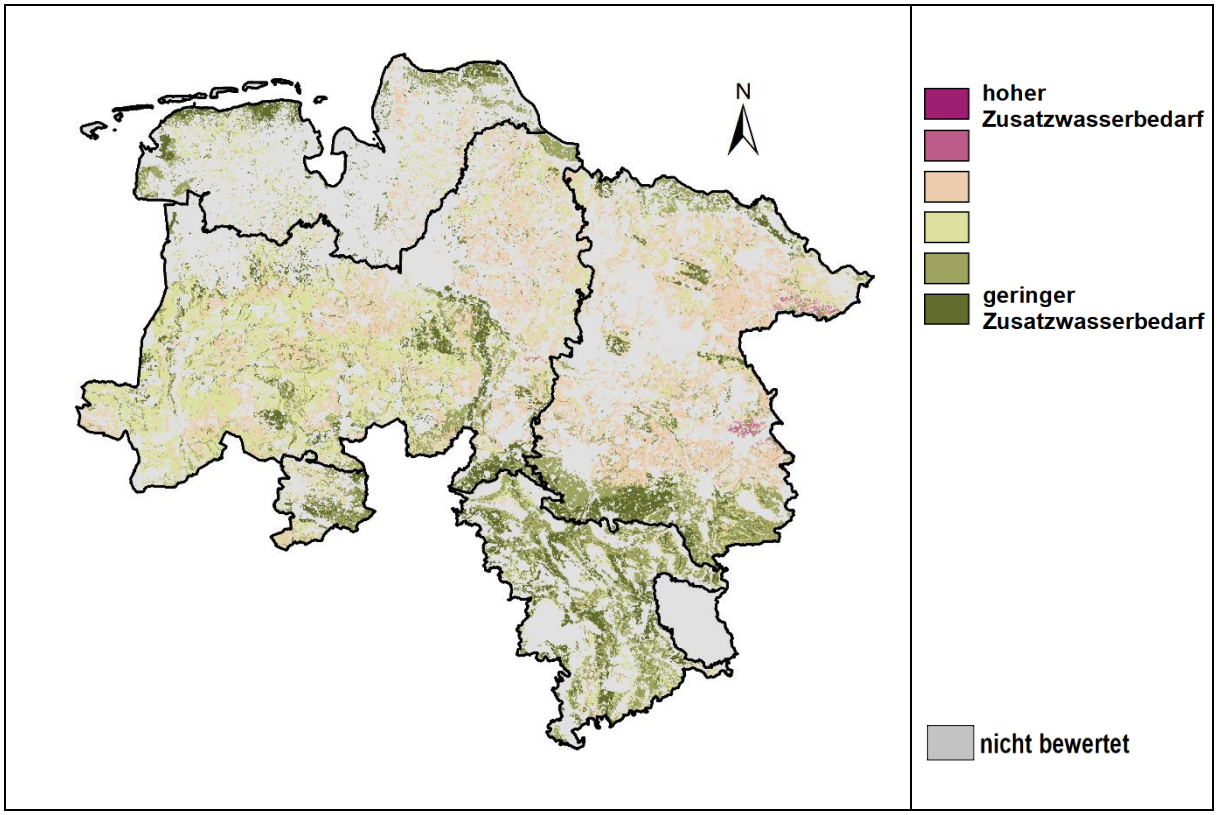


Abbildung 4-15: Zusatzwasserbedarf in der Hauptvegetationsperiode (April bis September) für den Referenzzeitraum (1971-2000)

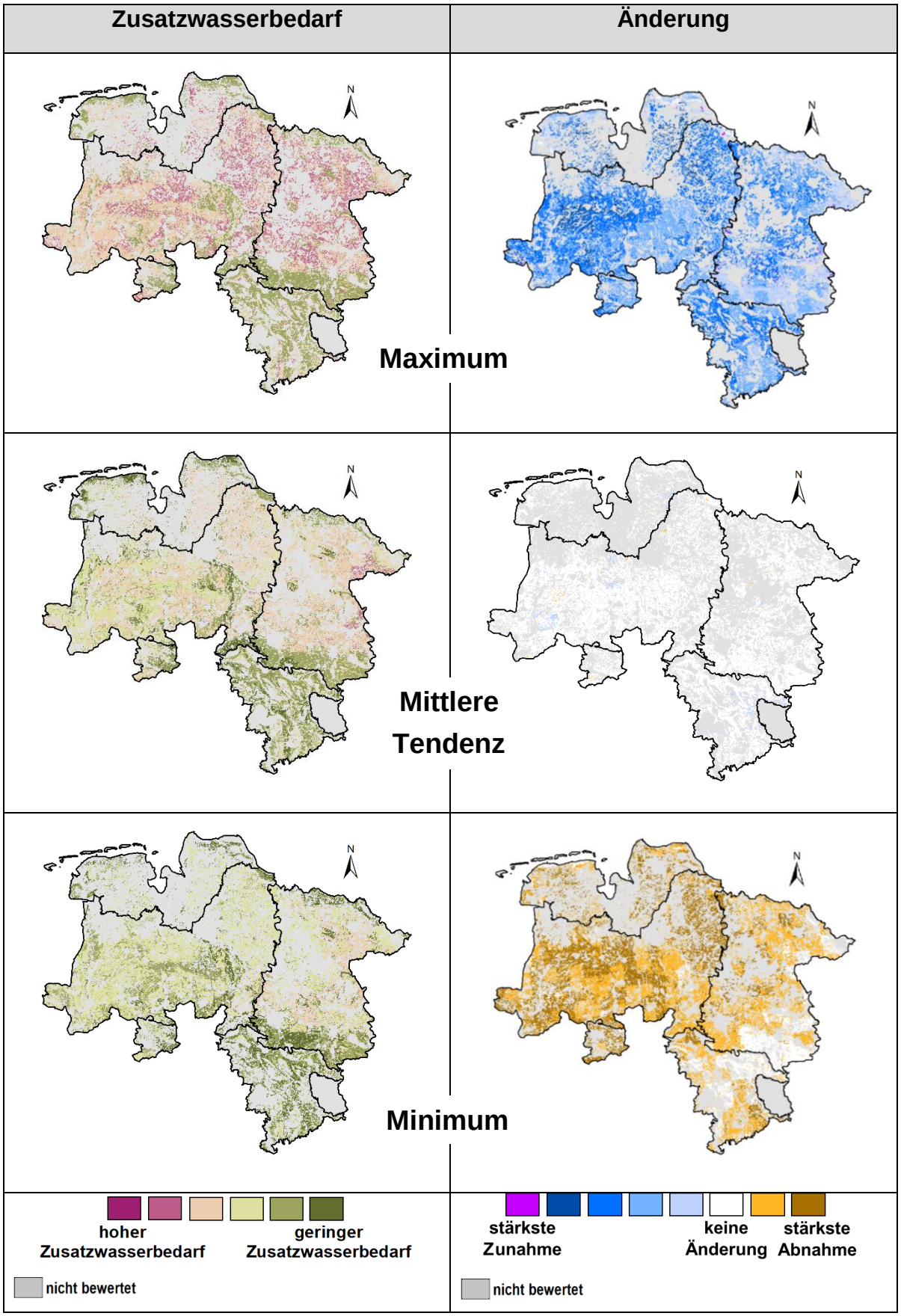


Abbildung 4-16: Zusatzwasserbedarf bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) in der Hauptvegetationsperiode (Apr bis Sep) in der nahen Zukunft (2021-2050)

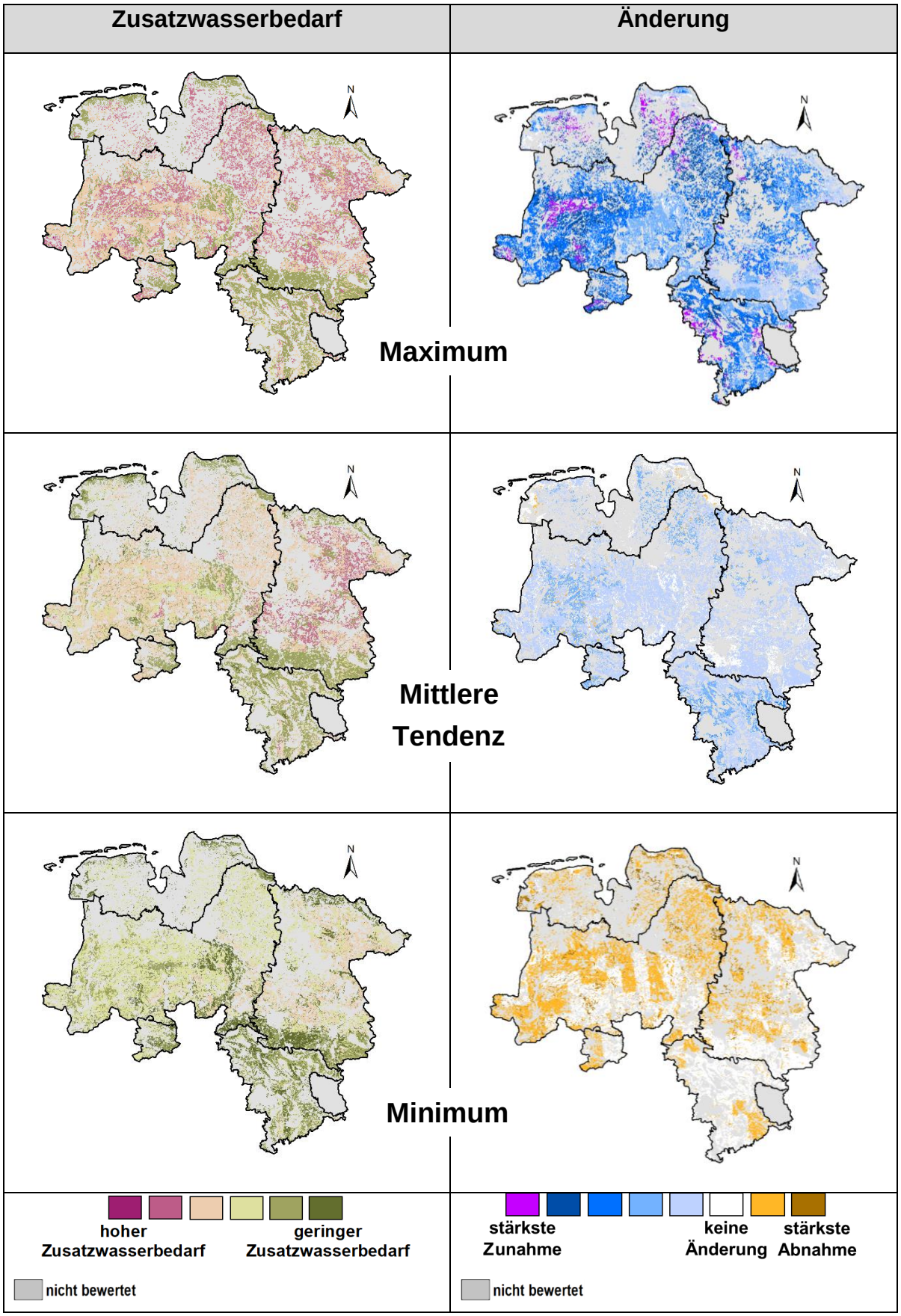


Abbildung 4-17: Zusatzwasserbedarf bzw. dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) in der Hauptvegetationsperiode (Apr bis Sep) in der fernen Zukunft (2071-2100)

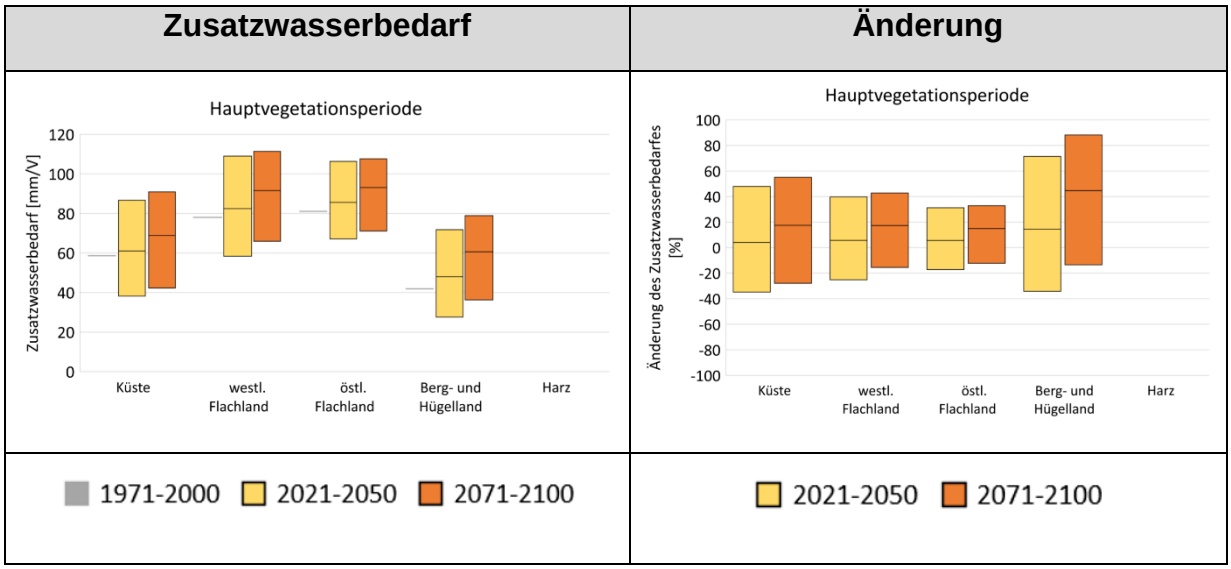


Abbildung 4-18: Zusammenfassung des Zusatzwasserbedarfs und dessen Veränderungen (gegenüber dem Referenzzeitraum) als Gebietsmittel der fünf Regionen

4.1.5 Allgemeine Anpassungskapazitäten im Themenfeld

Im Folgenden werden die Anpassungskapazitäten im Themenfeld Boden für die drei untersuchten Klimawirkungen (Erosion durch Wasser, Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung) sowie Zusatzwasserbedarf) herausgestellt.

Anpassungsmöglichkeiten bzgl. der Erosion durch Wasser stehen für den Boden in einer großen Anzahl und Vielfalt zur Verfügung. Gezielte Bodenschutzmaßnahmen sind bereits Gegenstand von Förderprogrammen in den Sektoren „Landwirtschaft“ und „Naturschutz“. Maßnahmen zur Vermeidung von Erosion und zum Schutz der Bodenstruktur sowie die Einhaltung weiterer Umweltstandards sind in der „Gute Fachliche Praxis“ in der Landwirtschaft (z.B. Bodenerosionsschonende Bewirtschaftung) und seit dem 01.01.2005 in der Cross Compliance festgesetzt und hier z.B. an die Auszahlung von Prämien gekoppelt. Zu den Anpassungsmaßnahmen, die der Vorsorge zur Verringerung der Wassererosionsgefährdung dienen, gehören allgemeine acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen (z.B. Minimierung der Zeitspannen ohne Bedeckung), erosionsreduzierende Bodenbearbeitung (z.B. durch „Konservierende Bodenbearbeitung“) sowie die Begrünung von besonders erosionsgefährdeten Abflussbahnen. Ob im ausreichenden Maß eine Anpassung zur Verringerung oder Vermeidung von Bodenerosion umgesetzt wird, liegt letztendlich in der Hand des Bodennutzers. Die Auswirkung des Klimawandels auf die Bodenerosion wird, wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, regional und lokal differenziert in Erscheinung treten. Die Anpassungsmaßnahmen sollten daher auch entsprechend verfügbar sein und eingesetzt werden können. Deutlich schwieriger gestaltet sich die Anpassung an Bodenerosionsereignisse, welche durch Extremereignisse hervorgerufen und potenziell überall in Niedersachsen auftreten können.

Gezielte Bodenschutzmaßnahmen zur Verringerung des Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe (z.B. Nitrat) sind bereits Gegenstand von Förderprogrammen in den Sektoren „Landwirtschaft“ und „Naturschutz“. Dabei setzen diese Förderprogramme an einer Minderung der Stoffeinträge an. Aus der Praxis des kooperierenden Grundwasserschutzes stehen ebenfalls etablierte Maßnahmen zur Verringerung von Stoffeinträgen zur Verfügung. In der Landwirtschaft sind zusätzlich verschiedene Maßnahmen zur Verringerung der Ertragsunsicherheit und Verminderung von Nährstoffüberhängen vorhanden, wie beispielsweise gezielte und standortabhängige Beregnung in Trockenzeiten, Anpassung der Düngestrategie (in Kombination mit Beregnung) und Anpassung der Fruchtfolgen mit wärmeliebenderen und trockenheitsresistenteren Arten und Sorten, welche sich durch einen geringeren Wasserbedarf auszeichnen. So kann auch bei geringen Niederschlagsmengen eine Nährstoffaufnahme erfolgen und weniger Stoffe durch das Sickerwasser verlagern. Gleichzeitig ist aufgrund der zu erwartenden Nutzungskonflikte, besonders bei der Grundwassernutzung, eine Anpassung des Wassermanagements mit ressourcenschonender Nutzung erforderlich. Anpassungen werden auch hinsichtlich Vegetation und Bewirtschaftung erfolgen müssen.

In der Landwirtschaft sind verschiedene Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung der Ertragsunsicherheit aufgrund von Trockenheit vorhanden. Als Beispiele sind die gezielte und standortabhängige Beregnung in Trockenzeiten sowie die Anpassung der Fruchtfolgen mit wärmeliebenderen und trockenheitsresistenteren Arten und Sorten, die sich durch einen geringeren Wasserbedarf auszeichnen, zu nennen. Je nach Schwerpunkt der Fruchtartenwahl können höhere (z.B. bei verstärktem Anbau von Zuckerrüben oder Winterweizen) oder niedrige (z.B. verstärkter Anbau von Wintergerste oder Mais) regionsspezifische Zusatzwasserbedarfe entstehen. Feldberegnung gehört in vielen Teilen Niedersachsens bereits zur bewährten Praxis und ist in der Landwirtschaft ein wichtiges Instrument zur Reduzierung des Ertragsrisikos geworden. Eine Anpassungskapazität ist damit unter Berücksichtigung der lokalen Wasserverfügbarkeit und der betrieblich-ökonomischen Gegebenheiten in der Landwirtschaft gegeben. Die Anpassung an trockenere Klimabedingungen während der Hauptvegetationsperiode kann anhand der zu beobachtenden Zunahme von Anträgen und beanspruchter Beregnungsmenge seitens der Beregnungsverbände bereits festgestellt werden. Gleichzeitig ist aufgrund der zu erwartenden Nutzungskonflikte, besonders bei der Grundwassernutzung, eine Anpassung des Wassermanagements mit ressourcenschonender Nutzung sicherlich erforderlich.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die im Zuge der vorliegenden Klimawirkungsstudie analysierten *Klimawirkungen* sowie die zugehörigen *Indikatoren* und Operationalisierungsmethoden sind in Tabelle 5-1 nochmals aufgeführt.

Tabelle 5-1: Im Zuge der Klimawirkungsstudie betrachtete Klimawirkungen sowie die Indikatoren und Methoden zu deren Operationalisierung

Klimawirkung	Indikator(en)	Operationalisierung
Themenfeld Grundwasser		
Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser	Grundwasserneubildung	Wirkmodell (mGROWA18)
Themenfeld Oberflächenwasser		
Durchfluss	Mittlere Abflusshöhe	Wirkmodelle (PANTA RHEI, HBV-IWW)
Flusshochwasser (Scheitelabfluss)	Scheitel-Abflusshöhe (HQ100)	Wirkmodelle (PANTA RHEI, HBV-IWW)
Flusshochwasser (Häufigkeit)	Anzahl großer Abfluss-ereignisse (POT99)	Wirkmodelle (PANTA RHEI, HBV-IWW)
Sturzfluten	Sturzflutpotenzial	Proxyindikatoren (Starkregen, Reliefenergie)
Niedrigwasser	Niedrigwasserabflusshöhe (NM7Q)	Wirkmodell (PANTA RHEI, stat. Prognosemodell)
Talsperrenbewirtschaftung	---	Experteninterview (Harzwasserwerke)
Themenfeld Boden		
Potenzielle Erosion durch Wasser	Mittlerer potenzieller Bodenabtrag	Wirkmodell (MeMaS)
Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungs-gefährdung)	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers	Wirkmodell (MeMaS)
Zusatzwasserbedarf	Mittlere Beregnungsmenge	Wirkmodell (MeMaS)

Im **Themenfeld Grundwasser** zeigen die Untersuchungsergebnisse für Gebiete, wie Talniederungen, den nordöstlichen Rand Niedersachsens sowie Teile der Küste, die bereits in der Referenzzeit eine niedrige Grundwasserneubildung bzw. –zehrung aufweisen, im Mittel der Ergebnisbandbreite eine weitere Abnahme in der fernen Zukunft. Im Harz, im Berg- und Hügelland sowie in weiten Teilen des Flachlandes, in denen eine hohe Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser gegeben ist, zeigt sich in der fernen Zukunft im Mittel eine weitere Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate von bis zu 50 mm/a. Für die nahe Zukunft werden im Mittel nur geringe Änderungen simuliert. Bei Betrachtung des Gesamtjahres ist für Niedersachsen in keinem der beiden untersuchten Zeiträume ein eindeutiger Trend zu erkennen. Im Sommerhalbjahr, wenn der Bedarf an Grundwasser durch den Menschen und die Vegetation am höchsten ist, zeigt sich hingegen ein Trend einer abnehmenden Grundwasserneubildungsrate, der eine Folge der Niederschlagsverschiebung hinein in die Wintermonate ist. Eine Mehrzahl der Simulationen geht zwar davon aus, dass das sommerliche Defizit durch eine stetige Zunahme der Grundwasserneubildung im Winter im Mittel wieder ausgeglichen werden kann. Dennoch ist durch eine fortschreitende innerjährliche Verschiebung der Grundwasserneubildungsrate und damit der Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser zu erwarten, dass zukünftig verstärkt negative indirekte Wirkungen auf z.B. Grundwasserabhängige Landökosysteme, Trinkwasserverfügbarkeit und Landwirtschaft sowie Schäden an Gebäuden auftreten können.

Die Analysen im **Themenfeld Oberflächengewässer** haben gezeigt, dass die Abflusshöhen, d.h. der abflusswirksame Niederschlagsanteil, bei Mittel- und Hochwasser im Bereich des Harzes grundsätzlich am größten sind, gefolgt vom Berg- und Hügelland. Dies gilt sowohl in der Gegenwart als auch in der Zukunft. Ein ähnliches Muster zeigt sich auch bei den Sturzfluten. Umgekehrt verhält es sich bei der Häufigkeit von kleineren Hochwassern. Diese ist in der Zukunft vor allem in den flacheren Regionen (Küste, westliches und östliches Flachland) stärker ausgeprägt. Auch beim Niedrigwasser zeigen die Flachland-Regionen die deutlichsten Ausprägungen, d.h. in diesem Fall die geringsten Abflusshöhen. Die Änderungssignale im Harz zeigen je nach Wandelszenario z.T. unterschiedliche Tendenzen (schwaches Szenario → Abnahmen, starkes Szenario → Zunahmen), so dass es hier keine Sicherheit bzgl. der zukünftigen Entwicklungsrichtung der Mittel- und Hochwasserabflüsse gibt. In den übrigen Regionen kann in den meisten Fällen mit einer Zunahme der Abflüsse gerechnet werden (mittleres und starkes Szenario). Abgesehen von diesen Mustern ist es generell das schwache Wandelszenario in der nahen Zukunft sowie der Niedrigwasserabfluss, wo häufig leichte Abnahmen signalisiert werden. Insgesamt gibt es große Unterschiede hinsichtlich der analysierten Kenngrößen und deren Änderungssignalen zwischen den Regionen im Themenfeld Oberflächengewässer. Im Harz und Bergland liegen aktuell und zukünftig zumeist die deutlichsten Wirkungen des Klimawandels hinsichtlich der (größten) Absolutwerte, mit Ausnahme der Niedrigwasserverhältnisse. Die größten zukünftigen Veränderungen (häufig Zunahmen) sind dagegen eher in den Flachland-Regionen und an der Küste zu verzeichnen.

Die Ergebnisse für das **Themenfeld Boden** sind aufgrund der divergierenden Standortbedingungen je nach Klimawirkung räumlich sehr unterschiedlich. Besonders empfindlich reagiert bei der Klimawirkung „Potenzielle Bodenerosion durch Wasser“, sowohl beim „schwachen“ als auch beim „starken“ Wandelszenario, das südliche Niedersachsen (Berg- und Hügelland). Die bereits bestehende potenzielle Erosionsgefährdung nimmt für die Klimaprojektionszeiträume deutlich zu. Für stark exponierte Standorte wie im Berg- und Hügelland sind bei der Prognose eines „starken Klimawandels“ im Mittel bis zu 40 % höhere potenzielle Bodenabtragsmengen zu verzeichnen. Die höchste Bedeutung für die Klimawirkung „Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungs-gefährdung)“ liegt erwartungsgemäß im Bereich der sandigen Geestböden, insbesondere im zentralen, nördlichen Teil Niedersachsens. Durchschnittlich ist, für die Prognose eines „starken Klimawandels“, hier mit einer Erhöhung der Austauschhäufigkeit um bis zu 40 % (westliches Flachland) im Vergleich zum Referenzzeitraum zu rechnen. Das südliche Niedersachsen verhält sich bei dieser Klimawirkung weniger sensitiv, da klimawandelbedingt höhere Sicherwassermengen durch die hohen Wasserspeicherkapazitäten der Lössböden aufgefangen werden können. Die Ergebnisse der Auswertung zum Zusatzwasserbedarf sind denen des Verlagerungsrisikos sehr ähnlich. Auch hier liegt die stärkste Klimawirkung des Zusatzwasserbedarfes in der nahen sowie fernen Zukunft im Bereich der Böden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit. Bei einem trockenen Wandelszenario würde sich daher der Wassermangel in den heute bereits betroffenen Gebieten deutlich erhöhen sowie räumlich erweitern und so auch in den anderen Regionen zwar moderater, aber dennoch spürbar ausfallen.

Insgesamt erscheinen die Ergebnisse auf Basis der gewählten Operationalisierungsmethoden für die drei betrachteten Themenfelder im Kontext des weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5) fachlich plausibel. Dies betrifft sowohl die räumlichen Muster als auch die Tendenzen unter dem schwachen bzw. starken Wandelszenario. Diese Erkenntnis belegt die Eignung der angewandten Methoden, speziell der verwendeten Impaktmodelle, die Wirkungen bzw. Folgen des Klimawandels auch unter extremen Randbedingungen und auf Grundlage komplexer Zusammenhänge realistisch abbilden zu können.

6 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde die im Zuge der Niedersächsischen Anpassungsstrategie durchgeführte Analyse von Klimafolgen methodisch weiterentwickelt und regional differenziert.

Für ganz Niedersachsen wurden die zu erwartenden Klimawirkungen in den Handlungsfeldern Oberflächengewässer, Grundwasser und Boden detailliert und systematisch analysiert und dargestellt. Die Ergebnisse wurden auf fünf topographisch-klimatologische Regionen aggregiert, um darüber hinaus fachlich begründete „Wirkungs-Hotspots“ zu identifizieren. Abschließend wurden für jedes Themenfeld allgemeine Anpassungskapazitäten beschrieben. Damit stellt die vorliegende Studie einen wichtigen Beitrag zur Niedersächsischen Anpassungsstrategie dar. Die Ergebnisse und die damit erarbeiteten Datengrundlagen stehen nun für weiterführende Untersuchungen zu regionalen Anpassungsstrategien zur Verfügung.

Aufgrund der zeitlichen und personellen Kapazitäten erfolgte hierbei neben einer methodischen Begrenzung auf eine Klimawirkungsstudie auch eine Fokussierung auf bestimmte Handlungsfelder und großräumig regionale Aussagen.

Daran anknüpfend werden derzeit folgende Möglichkeiten einer Weiterentwicklung der Studie diskutiert:

- Methodische Weiterentwicklung: Durchführen einer vollständigen Vulnerabilitätsanalyse, d.h. eine Ergänzung der Klimawirkungsanalyse um eine Bewertung der jeweiligen Anpassungskapazität und der Vulnerabilität von Regionen und Sektoren
- Sektorale Ausweitung: Ausweitung der Untersuchung auf weitere Sektoren der Niedersächsischen Klimaanpassungsstrategie
- Verwendung weiterer Klimaszenarien: Ergänzung der Untersuchung um weitere Klimaszenarien (z.B. RCP 2.6), um eine größere Bandbreite möglicher Klimaänderungen abzudecken

Ob und in welchem Zeitrahmen diese Arbeitspakete umgesetzt werden, wird derzeit im Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen abgestimmt.

7 Literaturverzeichnis

adelphi / PRC / EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem (31.05.2018)

BENZLER, J.-H., BOESS, J., CAPELLE, A., GEHRT, E., HEINEKE, H., KUESS, J. MÜLLER, U. OELKERS, K.-H., ROESCHMANN, G. SCHNEIDER, J. & SPONAGEL, H. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. J. Appl. Meteor. Climatol. **57**, 477-491. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1

BFG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (o.J.): Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden.

http://geoportal.bafg.de/dokumente/had/45Sickerwasserrate.pdf (12.03.2019)

BUTH, M., KAHLENBORN, W., GREIVING, S., FLEISCHHAUER, M., ZEBISCH, M., SCHNEIDERBAUER, S. & SCHAUSER, I. (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/uba_2017_leitfaden_klimawirkungs_und_vulnerabilitatsanalysen.pdf (17.04.2018)

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. J. Appl. Meteor. Climatol. 57, 477-491. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1

DIN 19708 (2017): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN 19708. – Berlin (Beuth)

DIN 19732 (2011): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen. DIN 19732. – Berlin (Beuth)

DRACHENFELS, O. V. (1990): Naturraum Harz – Grundlagen für ein Biotopschutzprogramm. Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen. Heft 19: 100 S., 42 Farbfotos.

DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2017): Merkblatt DWA-M 590 – Wasserwirtschaftliche Bewertung zur Entnahme von Wasser zur Bewässerung (978-3-88721-420-3); Hennef.

ELBRACHT, J., MEYER, R. & REUTTER, E. (2016): Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **3**; Hannover.

ERTL, G., BUG, J.F., ELBRACHT, J., ENGEL, N. & HERRMANN, F. (in Druckvorbereitung): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte; Hannover.

HEIDT, L. & MÜLLER, U. (2012): Einfluss des Klimawandels auf den regionalen Bodenwasserhaushalt und die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit in Niedersachsen. – Geoberichte 20: 53–84, 41 Abb., 7 Tab.;Hannover (LBEG).

HERRMANN, F., HÜBSCH, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KELLER, L., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F. (2017): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen - Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung, 61 (4): 245-261.

HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H., & WENDLAND, F., (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57(5): 206-224. DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_2

HOSKING, JRM. & WALLIS, JR. (1997): Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. Cambridge University Press.

JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg. Environ. Change 14, 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2

Klimanavigator (2018): https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/012038/index.php (14.05.2018)

KRUG, D., STOLZ, W. & STEGGER, U. (2004): Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens zur Berechnung der Sickerwasserrate auf Basis der BÜK 200. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]; Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Karten/Downloads/Berechnung_Sickerwasserrate.html (12.03.2019)

LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2007): GK 50 – Geologische Karte 1:50.000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.

LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (1999/2014): BÜK 50 – nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1:50.000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.

LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2016): Geoberichte 3, Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. Hannover.

LSN - Landesamt für Statistik Niedersachsen (2013): Statistische Berichte Niedersachsen Q I 1 -3j / 2013. Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung 2013. Korrigierte Version vom 05.10.2016; Hannover.

LINDSTRÖM G, JOHANSSON B, PERSSON M, GARDELIN M & BERGSTRÖM S (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201.1-4, S. 272-288.

LINKE et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen. http://www.kwis-rlp.de/fileadmin/website/klimakompetenzzentrum/Klimawandelinformationssystem/Leitlinien_Fassung_vom-2017-10-24.pdf (01.04.2019)

LWI-HYWAG, IFW (2012): PANTA RHEI Benutzerhandbuch – Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht).

MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**: 415 S., 37 Abb., 335 Tab.; Hannover.

MÜLLER, U. & WALDECK, A. (in Druckvorbereitung): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**: 415 S., 37 Abb., 335 Tab.; Hannover.

MU - Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2013): Klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsen; Hannover.

NLWKN (2019): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Gesamtbericht des Projektes KliBiW Themenbereich Niedrigwasser. (in Vorbereitung)

NLWKN (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Gesamtbericht des Projektes KliBiW Themenbereich Hochwasser. NLWKN Schriftenreihe Oberirdische Gewässer 41, Norden.

Regierungskommission Klimaschutz (2012): Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (Hrsg.), Hannover.

ReKliEs-De (2018): http://reklies.hlnug.de/startseite (14.05.2018)

SEEDORF, H. H. & MEYER, H.-H. (1992): Landeskunde Niedersachsen – Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes, Band 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung, Neumünster.

TEUTSCHBEIN, C. & SEIBERT, J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. J. Hydrol. 456-457: 12 – 29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052

WALLNER, M. (2015): Räumlicher und zeitlicher Transfer von hydrologischen Modellparametern und deren Anwendung in der Klimawandelforschung, Leibniz Universität Hannover, Hannover.

8 Anhang

Indikatoren Factsheets

(in Anlehnung an BUTH et al., 2017)

Indikator „Grundwasserneubildung“ zur Klimawirkung „Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser“

Indikator-ID	**GW-01**
Handlungsfeld	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft
Indikator	Grundwasserneubildung
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Grundwasserneubildungsrate als Grundlage für die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser
Klimawirkung	Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser
Indikationsfeld	Wasserverfügbarkeit
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung der Grundwasserneubildungsrate
Wirkmodell	
Name des Modells	mGROWA18
Eingangsdaten (Klima)	Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung Berechnung der FAO-Grasreferenzverdunstung nach MÜLLER und WALDECK (in Vorbereitung)
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	HERRMANN et al. 2013 und ERTL et al., in Vorbereitung
Zeitbezug	Simulation der Grundwasserneubildungsrate von 1971 bis 2100. Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Bilineare Interpolation der Klimadaten auf ein 500x500 m Raster
Schwellenwerte	keine

Literaturhinweise	ENGEL, N., MÜLLER, U. & SCHÄFER, W., (2012): BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **20**: 85-98; Hannover. ERTL, G., BUG, J.F., ELBRACHT, J., ENGEL, N. & HERRMANN, F. (in Druckvorbereitung): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte; Hannover. HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F., (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **57** (5): 206-224. DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_2 MÜLLER, U. & WALDECK, A., (in Druckvorbereitung): Auswertungsmethoden im Bodenschutz Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**: 195-198; Hannover.

Indikator „Mittlere Abflusshöhe“ zur Klimawirkung „Durchfluss“

Indikator-ID	**OW-01**
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)
Indikator	Abflusshöhe bei Mittelwasserabfluss MQ
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die mittlere Abflusshöhe über das Jahr bzw. verschiedene Jahreszeiten in Millimetern (Wassersäule)
Klimawirkung	Durchfluss
Indikationsfeld	Abflussverhältnisse
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung; Umrechnung des mittleren Abflusses (in m³/s) in die Abflusshöhe (in mm/Tag)
Wirkmodell	
Name des Modells	PANTA RHEI, HBV-IWW
Eingangsdaten (Klima)	Temperatur (Mittel, Min, Max), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	Projekt KliBiW Phase 4
Zeitbezug	Simulation der Abflüsse von 1971 bis 2100 auf Tageswertbasis; Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Klimamodelldaten im 10x10 km Raster; Abflüsse auf Einzugsgebietsebene für 143 Pegel in ganz Niedersachsen
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,1 bis 4,2 mm
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Modellergebnisse (Abflüsse in m³/s) werden für jeden Pegel einzeln ermittelt; anschließend erfolgt die Umrechnung in die Abflusshöhe (mm/Tag); das schwache Wandelszenario stellt das Minimum, das starke Wandelszenario das Maximum der Bandbreite dar
Schwellenwerte	keine
Bemerkungen	Die Werte für das Minimum / Maximum wurden auf Basis der Abflüsse aus einem Ensemble von 8 Klimamodellketten berechnet, die mittlere Tendenz entspricht dem Median (CNRM-CM5_RCA4, EC-EARTH_HIRHAM5, EC-EARTH_RACMO22E, EC-

	EARTH_RAC4, HadGEM2-ES_RCA4, IPSL-CM5A-MR_RCA4, MPI-ESM-LR_CCLM4, MPI-ESM-LR_RCA4)
Literaturhinweise	NLWKN (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht KliBiW Phase 4, Hochwasser. Norden

Indikator „Abflusshöhe beim HQ100“ zur Klimawirkung „Flusshochwasser (Scheitelabfluss)“

Indikator-ID	**OW-02**
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)
Indikator	Abflusshöhe HQ100 [in mm]
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Abflusshöhe beim Scheitelabfluss eines 100jährlichen Abflussereignisses in Millimeter (Wassersäule)
Klimawirkung	Flusshochwasser (Scheitelabfluss)
Indikationsfeld	Abflussverhältnisse
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung; extremwert-statistische Analyse der Jahreshöchstabflüsse (in m³/s); Umrechnung in die Abflusshöhe (in mm/Tag)
Wirkmodell	
Name des Modells	PANTA RHEI, HBV-IWW
Eingangsdaten (Klima)	Temperatur (Mittel, Min, Max), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	Projekt KliBiW Phase 4
Zeitbezug	Simulation der Abflüsse von 1971 bis 2100 auf Tageswertbasis; Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Klimamodelldaten im 10x10 km Raster; Abflüsse auf Einzugsgebietsebene für 143 Pegel in ganz Niedersachsen
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,7 bis 50,1 mm
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Modellergebnisse (Abflüsse in m³/s) werden für jeden Pegel einzeln ermittelt; anschließend erfolgt die Umrechnung in die Abflusshöhe (mm/Tag); das schwache Wandelszenario stellt das Minimum, das starke Wandelszenario das Maximum der Bandbreite dar
Schwellenwerte	keine
Bemerkungen	Die Werte für das Minimum / Maximum wurden auf Basis der Abflüsse aus einem Ensemble von 8 Klimamodellketten berechnet (CNRM-CM5_RCA4, EC-EARTH_HIRHAM5, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RAC4, HadGEM2-ES_RCA4, IPSL-CM5A-MR_RCA4, MPI-ESM-LR_CCLM4, MPI-ESM-LR_RCA4)

Literaturhinweise	NLWKN (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht KliBiW Phase 4, Hochwasser. Norden

Indikator „Anzahl großer Abflussereignisse“ zur Klimawirkung „Flusshochwasser (Häufigkeit)“

Indikator-ID	**OW-03**
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)
Indikator	Anzahl großer Abflussereignisse (POT99)
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Anzahl von Tagen, an denen das 99%-Langzeitquantil des Abflusses aus dem Zeitraum 1971-2000 überschritten wird
Klimawirkung	Flusshochwasser (Häufigkeit)
Indikationsfeld	Abflussverhältnisse
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung; Berechnung des 99%-Langzeitquantils der Abflussmenge im Referenzzeitraum 1971-2000; Ermittlung der Anzahl der Tage, an denen diese Abflussmenge erreicht/überschritten wird
Wirkmodell	
Name des Modells	PANTA RHEI, HBV-IWW
Eingangsdaten (Klima)	Temperatur (Mittel, Min, Max), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	Projekt KliBiW Phase 4
Zeitbezug	Simulation der Abflüsse von 1971 bis 2100 auf Tageswertbasis; Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Klimamodelldaten im 10x10 km Raster; Abflüsse auf Einzugsgebietsebene für 143 Pegel in ganz Niedersachsen
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,4 bis 51,5 Tage
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Modellergebnisse (Abflüsse in ^{3}/s) werden für jeden Pegel einzeln ermittelt; anschließend wird das 99%-Quantil (der Tagesabflüsse) für den Zeitraum 1971-2000 berechnet; abschließend wird die Anzahl der Tage ermittelt, an denen diese Abflussmenge erreicht/überschritten wird; das schwache Wandelszenario stellt das Minimum, das starke Wandelszenario das Maximum der Bandbreite dar
Schwellenwerte	Das 5fache der Häufigkeit aus dem Referenzzeitraum (Basis: 3,65 für das Jahr, 0,9 für die Saisons) wird als oberster Grenzwert festgelegt; da sonst die räumlich-optische Differenzierung zu schwach ausfällt (aufgrund einiger wenige Pegel mit geringen Abflüssen im Referenzzeitraum und verhältnismäßig großen Zunahmen in der Zukunft)

Bemerkungen	Die Werte für das Minimum / Maximum wurden auf Basis der Abflüsse aus einem Ensemble von 8 Klimamodellketten berechnet (CNRM-CM5_RCA4, EC-EARTH_HIRHAM5, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RAC4, HadGEM2-ES_RCA4, IPSL-CM5A-MR_RCA4, MPI-ESM-LR_CCLM4, MPI-ESM-LR_RCA4)
Literaturhinweise	NLWKN (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht KliBiW Phase 4, Hochwasser. Norden

Indikator „Sturzflutpotenzial“ zur Klimawirkung „Sturzfluten“

Indikator-ID	**OW-04**
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)
Indikator	Sturzflutpotenzial
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Potenzial des Auftretens von Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Abhängigkeit von der Hangneigung (Gefälle).
Klimawirkung	Sturzfluten
Indikationsfeld	Abflussverhältnisse
Analysemethode	Proxyindikatoren
Berechnung der Klimawirkung	Additive Verknüpfung von Klimasignal (Starkregen) und Sensitivität (Reliefenergie); normierte Klimawirkung = (normiertes Klimasignal + normierte Sensitivität) / 2
Sub-Indikatoren	
Klimasignal / Wirkung 1. Ordnung	Starkregentage (N > 20 mm/d)
Quelle(n)	Deutscher Wetterdienst (Stationsdaten)
Zeitbezug	Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Klimamodelldaten im 10x10 km Raster; über ganz Nds normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,0 bis 17,3 Tage (pro Jahr)
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Anzahl der Starkregentage wurde pro Rasterzelle (10x10 km) ermittelt; anschließend Normalisierung zwischen null und eins (null: geringste Anzahl an Starkregentagen, eins: höchste Anzahl an Starkregentagen)
Schwellenwerte	keine
Bemerkungen	Starkregentage sind definiert als Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag; die Werte für das Minimum / Maximum wurden auf Basis der Daten aus einem Ensemble von 8 Klimamodellketten berechnet (CNRM-CM5_RCA4, EC-EARTH_HIRHAM5, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RAC4, HadGEM2-ES_RCA4, IPSL-CM5A-MR_RCA4, MPI-ESM-LR_CCLM4, MPI-ESM-LR_RCA4)
Sensitivität	Reliefenergie (Standardabweichung des Gefälles)
Quelle(n)	Digitales Geländemodell (DGM10) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie

Zeitbezug	Datenbestand 2015
Raumbezug / Maßstab	Höhendaten 10 x 10 m; mittlere Standardabweichung des Gefälles je Rasterzelle (10 x 10 km) der Klimadaten
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,0 bis 73,3 (Grad Steigung); 0,0 bis 10,2 (Standardabweichung)
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Standardabweichung des Gefälles wird pro Rasterzelle (10 x 10 km) berechnet; anschließend Normalisierung zwischen null und eins (null: geringste Reliefenergie, eins: höchste Reliefenergie)
Schwellenwerte	keine
Bemerkungen	keine
Literaturhinweise	keine

Indikator „Abflusshöhe bei Niedrigwasser NM7Q“ zur Klimawirkung „Niedrigwasserabfluss“

Indikator-ID	**OW-05**
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)
Indikator	Abflusshöhe bei Niedrigwasser NM7Q
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Abflusshöhe bei Niedrigwasser in Millimetern (Wassersäule)
Klimawirkung	Niedrigwasser
Indikationsfeld	Abflussverhältnisse
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung; Umrechnung des Niedrigwasserabflusses NM7Q (in m³/s) in die Abflusshöhe (in mm/Tag)
Wirkmodell	
Name des Modells	PANTA RHEI, statistisches Prognosemodell
Eingangsdaten (Klima)	Temperatur (Mittel, Min, Max), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	Projekt KliBiW Phase 5
Zeitbezug	Simulation der Abflüsse von 1971 bis 2100 auf Tageswertbasis; Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Klimamodelldaten im 10x10 km Raster; Abflüsse auf Einzugsgebietsebene für 178 Pegel in ganz Niedersachsen
Wertebereich (vor Normalisierung)	0,0 bis 0,7 mm/Tag
Skalierung / Berechnungs-vorschrift	Die Modellergebnisse (Abflüsse in m³/s) werden für jeden Pegel einzeln ermittelt; anschließend erfolgt die Umrechnung in die Abflusshöhe (mm/Tag); das schwache Wandelszenario stellt das Minimum, das starke Wandelszenario das Maximum der Bandbreite der Abflusshöhen im Niedrigwasserfall dar
Schwellenwerte	keine
Bemerkungen	Die Werte für das Minimum / Maximum wurden auf Basis der Abflüsse aus einem Ensemble von 14 Klimamodellketten berechnet, die mittlere Tendenz entspricht dem Median (CNRM-CM5_CCLM4, CNRM-CM5_RCA4, EC-EARTH_CCLM4, EC-EARTH_HIRHAM5, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RAC4, HadGEM2-ES_CCLM4, HadGEM2-ES_RACMO22E, HadGEM2-ES_RCA4, IPSL-CM5A-

	MR_RCA4, MPI-ESM-LR_CCLM4, MPI-ESM-LR_RCA4, MPI-ESM-LR-r1_REMO, MPI-ESM-LR-r2_REMO)
Literaturhinweise	NLWKN (2019): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht KliBiW Phase 5, Niedrigwasser. Norden (in Vorbereitung)

Indikator „Mittlerer potenzieller Bodenabtrag“ zur Klimawirkung „Potenzielle Erosion durch Wasser“

Indikator-ID	**BO-01**
Handlungsfeld	Landwirtschaft, Bodenschutz
Indikator	Mittlerer potenzieller Bodenabtrag
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt den mittleren potenziellen Bodenabtrag [in Tonnen pro Hektar und Jahr] als Grundlage für die potenzielle Erosion durch Wasser
Klimawirkung	Potenzielle Erosion durch Wasser
Indikationsfeld	Bodenstruktur
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung des mittleren potenziellen Bodenabtrages durch die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG)
Wirkmodell	
Name des Modells	MeMaS
Eingangsdaten (Klima)	Niederschlag
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	MÜLLER, U. & WALDECK, A., (in Druckvorbereitung)
Zeitbezug	Simulation des mittleren potenziellen Bodenabtrages von 1971 bis 2100. Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Maßstab 1:50 000 (aufgrund der Verwendung der BK50)
Schwellenwerte	keine
Literaturhinweise	MÜLLER, U. & WALDECK, A., (in Druckvorbereitung): Auswertungsmethoden im Bodenschutz Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**; Hannover.

Indikator „Austauschhäufigkeit des Bodenwassers“ zur Klimawirkung „Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung)“

Indikator-ID	**BO-02**
Handlungsfeld	Landwirtschaft, Wasserwirtschaft
Indikator	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers als Grundlage für das Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung)
Klimawirkung	Verlagerungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe (Nitratauswaschungsgefährdung)
Indikationsfeld	Bodenwasserverlagerung
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung des Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe aus der Austauschhäufigkeit der Bodenlösung im betrachteten Bodenraum
Wirkmodell	
Name des Modells	MeMaS
Eingangsdaten (Klima)	Niederschlag, relative Luftfeuchte, Temperatur
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	MÜLLER, U. und WALDECK, A., (in Druckvorbereitung)
Zeitbezug	Simulation der Austauschhäufigkeit von 1971 bis 2100. Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Maßstab 1:50 000 (aufgrund der Verwendung der BK50)
Schwellenwerte	keine

Literaturhinweise	MÜLLER, U. & WALDECK, A., (in Druckvorbereitung): Auswertungsmethoden im Bodenschutz Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**; Hannover. KRUG, D., STOLZ, W. & STEGGER, U. (2004): Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens zur Berechnung der Sickerwasserrate auf Basis der BÜK 200. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]; Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Karten/Downloads/Berechnung_Sickerwasserrate.html (12.03.2019)

Indikator „Mittlere Beregnungsmenge“ zur Klimawirkung „Zusatzwasserbedarf“

Indikator-ID	**BO-03**
Handlungsfeld	Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt
Indikator	Mittlere Beregnungsmenge
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die mittlere Beregnungsmenge als Grundlage für den Zusatzwasserbedarf
Klimawirkung	Zusatzwasserbedarf
Indikationsfeld	Wasserverfügbarkeit
Analysemethode	Wirkmodell
Berechnung der Klimawirkung	Modellierung des Zusatzwasserbedarfs durch die mittlere Beregnungsmenge
Wirkmodell	
Name des Modells	MeMaS
Eingangsdaten (Klima)	Niederschlag, relative Luftfeuchte, Temperatur
Eingegangene Sensitivitätsdaten	keine
Quelle(n)	MÜLLER, U. und WALDECK, A., (in Druckvorbereitung)
Zeitbezug	Simulation der mittleren Beregnungsmenge von 1971 bis 2100. Auswertung des Referenzzeitraumes (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100)
Raumbezug / Maßstab	Maßstab 1:50 000 (aufgrund der Verwendung der BK50)
Schwellenwerte	Keine
Literaturhinweise	MÜLLER, U. und WALDECK, A., (in Druckvorbereitung): Auswertungsmethoden im Bodenschutz Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [Hrsg.]: GeoBerichte, **19**; Hannover.