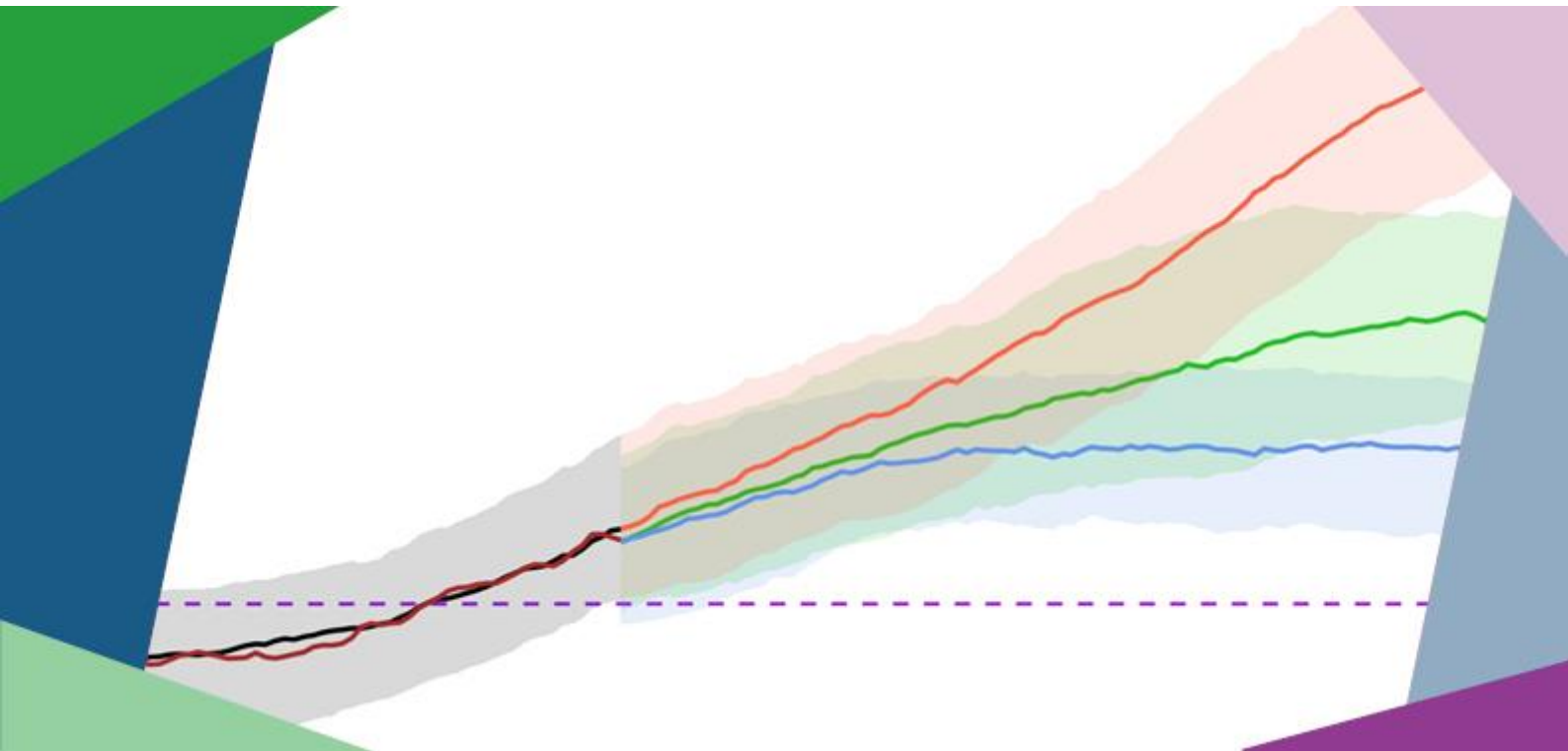


Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre

S. Hänsel, C. Brendel, C. Fleischer, A. Ganske, M. Haller, M. Helms, C. Jensen, K. Jochumsen, S. Krähenmann, J. Möller, E. Nilson, C. Rasquin, M. Rauthe, E. Rudolph, N. Schade, K. Stanley, B. Wachler, T. Deutschländer, B. Tinz, A. Walter, N. Winkel, P. Krahe, S. Höpp



Themenfeld 1: Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen

Zitiervorschlag

Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, Stanley S, Wachler B, Deutschländer T, Tinz B, Walter A, Winkel N, Krahe P und Höpp S (2020) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.01

Impressum

Digitale Publikationsreihe des Themenfeldes 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ zu den Forschungsergebnissen der Schwerpunktthemen aus der 1. Forschungsphase (2016–2019).

Das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) hat die Forschungsarbeiten im Rahmen des Ressortforschungsprogramms BMVI Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ gefördert.

Internet: www.bmvi-expertennetzwerk.de

Autoren:

Deutscher Wetterdienst (insb. Kapitel 2 und 3):

Dr. Stephanie Hänsel, Dr. Stefan Krähenmann, Christoph Brendel, Dr. Thomas Deutschländer, Dr. Michael Haller, Simona Höpp, Dr. Monika Rauthe, Kelly Stanley, Dr. Birger Tinz, Dr. Andreas Walter

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (insb. Kapitel 4):

Dr. Anette Ganske, Dr. Nils Schade, Jens Möller, Corinna Jensen, Dr. Kerstin Jochumsen

Bundesanstalt für Gewässerkunde (insb. Kapitel 5):

Dr. Enno Nilson, Claudius Fleischer, Dr. Martin Helms, Peter Krahe

Bundesanstalt für Wasserbau (insb. Kapitel 6):

Dr. Elisabeth Rudolph, Caroline Rasquin, Benno Wachler, Dr. Norbert Winkel

Redaktionsschluss:

April 2020

Titelbild

Grafik: DWD

DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.01

Inhalt

Kurzfassung.....	1
1 Zielstellung.....	3
2 Grundlagen der Klimamodellierung und Bewertung.....	4
2.1 Globale und regionale Klimamodelle.....	4
2.2 Klimaszenarien.....	6
2.3 Interpretation von Klimamodelldaten.....	8
3 Klimamodellauswertungen im Binnenbereich.....	11
3.1 Einleitung.....	11
3.2 Referenzdatensätze.....	11
3.2.1 HYRAS-Rasterdatensätze.....	12
3.2.2 TRY-Basisdatensatz.....	14
3.2.3 Reanalysedaten.....	15
3.3 Klimaprojektionsdaten.....	16
3.3.1 Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe.....	16
3.3.2 Vorgehen bei der Bias-Adjustierung.....	18
3.3.3 Regionalisierung der Klimaprojektionsdaten.....	20
3.3.4 DWD-Kern-Ensemble.....	20
3.3.5 Konvektionserlaubende Simulationen.....	21
3.4 Festlegungen zur Vorgehensweise bei den Auswertungen.....	24
3.4.1 Betrachtete Zeitscheiben.....	24
3.4.2 Räumliche und zeitliche Auflösung der Daten.....	24
3.4.3 Vorgehen bei der Ensembleauswertung.....	24
3.4.4 Betrachtete Klimavariablen und Kennwerte.....	25
4 Untersuchungen zur Nord- und Ostsee und deren Küsten.....	26
4.1 Einleitung.....	26
4.2 Referenzdaten.....	27
4.2.1 Nord- und Ostseeklimatologie.....	27
4.2.2 Verwendete Reanalysen.....	28
4.2.3 Validierte Parameter.....	28
4.3 Klimamodell-Auswertungen an der Küste und über See.....	30
4.3.1 Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe.....	31
4.3.2 Vorgehen bei der Modellauswertung.....	32
4.3.3 Bereitstellung eines „charakteristischen Jahres“.....	36
4.4 Szenarien zum Meeresspiegelanstieg.....	36
4.4.1 Einführung zum globalen Meeresspiegelanstieg.....	36
4.4.2 Szenarien des globalen Meeresspiegelanstiegs.....	37
4.4.3 Szenarien für den regionalen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee.....	39
4.5 Fallstudie NOK.....	39
4.5.1 Vorgehen.....	39
4.5.2 Zusammenarbeit mit der BfG (WSV-Auftrag).....	41

5	Auswerterahmen Hydrologie.....	42
5.1	Einleitung.....	42
5.2	Datengrundlagen und Modelle.....	42
5.2.1	Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2013" (KLIWAS).....	42
5.2.2	Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2019".....	43
5.3	Produkte 1. Ordnung, Produktvarianten.....	44
5.3.1	Abflusszeitreihen.....	45
5.3.2	Ensemblereduktion auf Impaktebene: Szenarienkorridore und repräsentative Simulationen.....	47
5.3.3	Bereitstellung von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit.....	48
5.3.4	Bereitstellung von Stundenwerten.....	49
5.3.5	Generierung von Abflussreihen zur Absicherung von Aussagen im Extrembereich.....	49
5.3.6	Änderung von Wasserhaushaltsgrößen.....	49
5.3.7	Bereitstellung charakteristischer Abflussjahre und Abflussganglinien längerer Zeiträume.....	50
5.3.8	Produktvariante "Extremes Jahr".....	51
5.4	Produkte 2. Ordnung: Kennwerte, Indikatoren.....	53
5.4.1	Aufbereitungstyp Grafik.....	54
5.4.2	Aufbereitungstyp Tabelle.....	55
5.4.3	Aufbereitungstyp Karte.....	56
6	Hydrodynamische Auswertungen im Küstenbereich.....	57
6.1	Einleitung.....	57
6.2	Untersuchungsgebiet.....	57
6.3	Wichtige Eingangsgrößen.....	58
6.4	Durchführung der hydrodynamischen Untersuchungen.....	59
6.5	Kennwerte der Hydrodynamik.....	60
6.5.1	Tidekennwerte.....	61
6.5.2	Tideunabhängige Kennwerte.....	63
6.6	Weitergabe der Ergebnisse.....	63
7	Fazit.....	64
8	Literatur.....	66
9	Abkürzungsverzeichnis.....	73
10	Anhang.....	76

Kurzfassung

Dieses Dokument steckt den Rahmen für die Auswertung und Bewertung der Auswirkungen von Klimawandel und Extremwetterereignissen auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland innerhalb des Themenfeldes 1 des BMVI-Expertennetzwerks ab. Die wesentlichen Festlegungen sind in Tabelle 0-1 zusammen gestellt. Dabei ist prinzipiell zwischen den Untersuchungen für den Binnen- und den Küstenbereich zu unterscheiden, wo unterschiedliche Modellinstrumente für die Auswertungen zur Verfügung stehen. Die aus den generierten Klimavariablen abgeleiteten Klimaindizes, welche für die Bewertung der Klimawirkungen verwendet werden, sind in Anlage 5 aufgeführt.

Tabelle 0-1: Zusammenstellung der Eckpunkte des *Auswerterahmens* für regionale Klimaprojektionen.

	Untersuchungsgebiet		
	Binnen		Küste
Betrachtungsgegenstand	Aufbereitete regionale Klimamodelle	Hochaufgelöste Klimasimulation	gekoppelte regionale Ozean-Atmosphäre-Modelle
Verwendete Modelle	RCM-Ensemble aus EURO-CORDEX und ReKliEs entsprechend Tabelle 3-2	COSMO-CLM Version 4.8 (INT2LM Version 1.19)	Ensemble gekoppelter Modelle entsprechend Tabelle 4-1
Klimaszenario	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5	RCP 8.5	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
Zeiträume verfügbarer Daten	<u>Beobachtungen</u> Raster/HYRAS: 1951–2010 (ggf. bis 2015)	TRY-Basisdatensatz (Auflösung: 1 km ² , h): 1995–2012	Nord- und Ostseeklimatologie
	<u>Reanalysen:</u> COSMO-REA6: 1995-2015 (EURO-CORDEX Domain; Gitterweite 6 km, h)		
	<u>Klimamodelle:</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Historische Läufe für 1951–2005 (z. T. späterer Start [z. B. 1970]); ▪ Szenarienläufe für 2006–2100 möglich (z. T. früheres Ende [z. B. 2099] oder nur für Teilzeiträume simuliert) 		
Ausgewertete Zeitscheiben bzw. Zeiträume	1971–2000: Historischer Lauf, Evaluierungslauf, <i>Bezugszeitraum</i> (z. B. für Bias-Adjustierung und Änderungssignale) 2031–2060: Mitte des 21. Jahrhunderts, <i>nabe Zukunft</i> 2071–2100: Ende des 21. Jahrhunderts, <i>ferne Zukunft</i>		1951–2005: Historischer Lauf, Evaluierungslauf 2006–2100: Klimazukunft
	Auswertungen für den Gesamtzeitraum 1951/71–2100 z. B. über gleitende 30-jährige Mittel oder die Anwendung des Kernschätzerverfahrens		
Horizontale und zeitliche Auflösung	Gitterweite ca. 5 km (Regionalisierung von 12 km Simulationen) Tagesdaten (s. Abschnitt 3.4.2)	Gitterweite ca. 2,8 km; 1 h, 6 h, Tagesdaten	Ca. 3,6 bis 24 km 1 h, 6 h, Tagesdaten (siehe Abschnitt 4.3)
Untersuchungsgebiet	Deutschland und Flusseinzugsgebiete (Abbildung 3-1)	COSMO-DE PLUS (Abbildung 3-5)	Küstengebiete Nord- und Ostsee
Ensembleauswertung	Ja, unter Nutzung des 15. und 85. Perzentils	Nein	Nein, aufgrund des sehr kleinen Ensembles

	Untersuchungsgebiet		
	Binnen		Küste
Betrachtungsgegenstand	Aufbereitete regionale Klimamodelle	Hochaufgelöste Klimasimulation	gekoppelte regionale Ozean-Atmosphäre-Modelle
Ausgabevariablen, berechnete Indizes und Auswertemethoden	Temperatur (Mittel, Min., Max.), Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Wind (mittlere Geschwindigkeit, Richtung), ggf. Luftdruck Berechnung verschiedener Klimakennwerte und kombinierter Indizes entsprechend Anlage 5 Ggf. extremwertstatistische Auswertungen	Generell wie für die gröber aufgelösten RCMs (s. linke Spalte) Weitere verfügbare Variablen s. a. Anlage 6	Windgeschwindigkeit (Häufigkeitsverteilungen, Extreme), Windrichtung (Häufigkeitsverteilungen), Windstau und Wasserstand (sowohl verschiedene Perzentile wie auch Extremwertstatistik), Indizes für Vorfeuchte und Ereignisniederschlag
Bias-Adjustierung	Ja, multivariate Adjustierung mittels Quantile Mapping für die Variablen Temperatur (Mittel, Min., Max.) und relative Luftfeuchte; Quantil-Mapping für den Niederschlag Linear Scaling für die Globalstrahlung (s. Abschnitt 3.3.4)	Nein	Nein, da qualitativ hochwertige Referenzfelder fehlen
Datenabgabe ▪ Projektion ▪ Format	ETRS89_LCC netCDF	geographical lat-lon netCDF	abhängig vom Klimamodell netCDF

1 Zielstellung

Eine der vielen Herausforderungen, die mit dem fortschreitenden Klimawandel einhergehen, ist die nachhaltige Anpassung des Sektors „Verkehr“ an die zukünftigen Gegebenheiten. Um den Betrieb von Verkehr und Verkehrsinfrastruktur verlässlich zu gewährleisten, müssen zunächst die Ursachen und die zeitliche wie räumliche Verteilung der durch den Klimawandel verursachten Risiken und Betroffenheiten ermittelt werden. Darauf aufbauend kann die Verwundbarkeit von Verkehr und Verkehrsinfrastruktur bestimmt und bewertet werden. Diesen Aufgaben widmet sich das Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln. Das BMVI-Expertennetzwerk strebt dabei eine integrale, d. h. alle potentiell betroffenen Verkehrsträger einbeziehende Sichtweise an.

Die Basis für Untersuchungen zu klimawandelbedingten Risiken in Deutschland bilden Simulationen aus numerischen Modellen (Klima- und Impaktmodelle), die atmosphärische, ozeanische und hydrologische Größen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts liefern. Durch die Bereitstellung dieser Informationen unter verschiedenen Emissionsszenarien ermöglicht das Schwerpunktthema *Szenarienbildung* gemeinsame Datengrundlagen und Rahmenbedingungen für die Arbeiten in Themenfeld 1.

Dieses Dokument dient der Beschreibung der in den verschiedenen Schwerpunktthemen des Themenfeldes 1 des BMVI-Expertennetzwerks verwendeten Daten und Methoden. Dabei orientieren wir uns an den „Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, die 2015 durch das Bund-Länder-Fachgespräch "Interpretation regionaler Klimamodelldaten" erarbeitet wurden. Ergänzt werden diese auf Klimaprojektionsdaten bezogenen Festlegungen durch Festlegungen zu weiteren relevanten Szenarien und Auswertungsschritten zu Meeresspiegel, Hydrologie und Wattentwicklung. Ziel ist es, einen möglichst übersichtlichen und vereinheitlichten Rahmen für die Auswertungen im Themenfeld 1 zu schaffen. Auch werden meteorologische, ozeanische und hydrologische Vergleichsdaten aus Messungen eingeführt, die zur Validation dienen.

Die in diesem Papier formulierte Vorgehensweise soll die Aktivitäten im Themenfeld 1 mit konsistenten Methoden verknüpfen und eine Grundlage für ein einheitliches Verständnis bei der Bedienung der Schnittstellen zwischen dem Schwerpunkt *Szenarienbildung* und den anderen Schwerpunktthemen im Themenfeld schaffen. Darüber hinaus ermöglicht es eine grundlegende Vergleichbarkeit der Ansätze des BMVI-Expertennetzwerks mit Klimafolgenanalysen anderer Projekte, die sich in ihrer Vorgehensweise an den oben genannten Leitlinien orientieren.

Für die Klimawirkungsanalysen der Verkehrsträger werden zur Bewertung der Auswirkungen spezifischer klimatischer Einflüsse und Extremereignisse relevante Kennwerte einschließlich impaktrelevanter Schwellenwerte dieser Indizes benötigt. Diese Indizes wurden in den Behörden in Zusammenarbeit mit Praxisvertretern der Verkehrsträger im Rahmen von Projektarbeiten und Workshops bestimmt und in den Schwerpunktarbeitsgruppen des Themenfeldes 1 basierend auf Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten exemplarisch generiert. Die Bereitstellung für die Praxis erfolgt teilweise über Klimaberatungsdienste (DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“), die sich gegenwärtig im Aufbau befinden. Die Vorstellung des Kataloges relevanter Kennwerte ist daher neben den allgemeinen Leitlinien zum Umgang mit Klimaprojektionsdaten ein wichtiges Ziel des vorliegenden Dokumentes. Eine Weiterentwicklung ist für die nächste Phase des BMVI-Expertennetzwerks angedacht.

2 Grundlagen der Klimamodellierung und Bewertung

Stephanie Hänsel, Christoph Brendel, Michael Haller, Stefan Krähenmann, Monika Rauthe, Kelly Stanley, Andreas Walter (Deutscher Wetterdienst)

2.1 Globale und regionale Klimamodelle

Globale Klima- und Erdsystemmodelle: Für die Simulation des zukünftig zu erwartenden Klimas werden vorwiegend globale und regionale Klimamodelle eingesetzt. Bei diesen Modellen handelt es sich um Zirkulationsmodelle, die unter Verwendung physikalischer Gleichungen und Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Treibhausgaskonzentration Projektionen des zukünftigen Klimas liefern. Aktuelle globale Klimamodelle (GCMs) setzen sich aus einem allgemeinen Zirkulationsmodell für die Atmosphäre und den Ozean und zusätzlichen Modellen für weitere Komponenten des Klimasystems zusammen (Roeckner 2003). In diesen sind etliche Komponenten des Klimasystems, wie die Atmosphäre, der Ozean, die Kryosphäre und die Landoberfläche, durch den Austausch von Energie, Impuls und Masse (z. B. Wasser, Aerosol, Kohlendioxid (CO_2), etc.) miteinander gekoppelt. Diese als Erdsystemmodelle (ESMs) bezeichneten GCMs wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten zunehmend komplexer. So ist die neueste Version des MPI-ESM (ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie) dank eines gekoppelten Kohlenstoffkreislaufs in der Lage, auch Rückkopplungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffkreislauf selbst darzustellen (Stevens et al. 2013). Durch diese Erweiterungen wurden einige mit den Annahmen zu den Randbedingungen des Klimasystems zusammenhängende Unsicherheiten in langjährigen Klimaprojektionen verringert. Dennoch werden einige bedeutende Prozesse, unter anderem die postglaziale Landhebung oder das Abschmelzen der arktischen und antarktischen Eisschilde, die zum Meeresspiegelanstieg beitragen, in diesen Modellen noch nicht berücksichtigt.

Klimaprojektionsläufe: Anders als in Wettervorhersagemodellen startet der Klimaprojektionslauf nicht mit dem aktuellen Zustand des Klimasystems, sondern mit einem Gleichgewichtszustand des Klimasystems, welches durch anthropogene Einflussnahme gestört wird. Die räumliche und zeitliche Entwicklung prognostischer Variablen wie etwa der Temperatur, der Windvektoren, der Dichte und des Luftdrucks in der Atmosphäre oder der Strömungsgeschwindigkeiten und des Salzgehalts des Ozeans, werden nach dem Start eines Klimamodelllaufs durch die numerische Lösung relevanter physikalischer Gleichungen in kleinen (infinitesimalen) Schritten für zukünftige Zeitpunkte berechnet. Diese Gleichungen repräsentieren die fundamentalen Erhaltungssätze von Energie, Impuls und Masse. Die Größen zur Beschreibung des Zustandes der Atmosphäre oder des Ozeans werden an zuvor definierten Punkten innerhalb eines dreidimensionalen Gitters berechnet. Der horizontale Abstand dieser Gitterpunkte bestimmt die horizontale Auflösung und beträgt auch in aktuellen Erdsystemmodellen zwischen 100 km und 300 km. Zudem können die Ozean- und die Atmosphärenkomponente eines ESM in unterschiedlichen Gitterweiten rechnen (horizontal sowie vertikal). Vertikal reichen die Schichten der atmosphärischen Komponente eines ESM im Allgemeinen bis in die Mesosphäre (ca. 80 km Höhe), wobei der Abstand dieser Schichten zueinander zur Erdoberfläche hin abnimmt. Die vertikale Auflösung nimmt auch in der Ozeankomponente eines Modells mit der Entfernung von der Oberfläche ab.

Parametrisierung: Eine Reihe wichtiger ozeanischer und atmosphärischer Prozesse, die durch das zu grobmaschige Modellgitter der ESMs nicht explizit dargestellt werden können, müssen parametrisiert werden. Man spricht in diesem Fall auch von sub-skaligen Prozessen. Dies betrifft beispielsweise den Transfer solarer und terrestrischer Strahlung, die Phasenänderung des Wassers, die Niederschlagsbildung sowie turbulente und konvektive Austauschprozesse in der Atmosphäre und im Ozean. Die Parametrisierung eines physikalischen Prozesses stellt eine wesentliche Vereinfachung der Realität dar und führt zu einem Informationsverlust, der für einige Fragestellungen erhebliche Auswirkungen haben kann.

Downscaling: Um konkrete Auswirkungen des globalen Klimawandels auf einzelne Regionen bzw. Fragestellungen der Klimafolgenforschung, etwa im Bereich der Wasser-, Land-, Versicherungswirtschaft oder des Küstenschutzes, genauer zu untersuchen, reicht die räumliche Auflösung eines ESM zumeist nicht aus. Um Informationen in ausreichender Genauigkeit bereitzustellen, werden seit einigen Jahren systematisch regionale Klimasimulationen mit regionalen Klimamodellen durchgeführt. Diese regionalen Klimasimulationen werden zumeist auf kontinentaler oder subkontinentaler Skala realisiert. Bei der Regionalisierung der atmosphärischen Komponente der Simulation kann prinzipiell zwischen dynamischen und empirisch-statistischen Ansätzen des Herunterskalierens (*Downscaling*) unterschieden werden, wobei beiden gemein ist, dass zur Initialisierung und am Rand des zu regionalisierenden Gebietes jeweils Daten einer umfassenden, z. B. globalen Klimaprojektion benötigt werden.

Dynamische regionale Klimamodelle: Die Simulation innerhalb des begrenzten Gebietes wird beim dynamischen Downscaling von einem regionalen Klimamodell (RCM) übernommen, bei welchem, ähnlich wie bei globalen ESMs, die Teilkomponenten des Klimasystems weitestgehend miteinander gekoppelt sind. Das RCM startet mit den Ergebnissen eines umfassenden Klimamodells und erhält in gewissen zeitlichen Abständen (z. B. nach einer oder sechs Stunden) als seitlichen Antrieb neue Randwerte des umfassenden Klimamodells. Innerhalb des Modellgebietes des regionalen Klimamodells läuft die Simulation hingegen vollkommen unabhängig von jener des antreibenden Klimamodells.

Dank der immer höheren Auflösung regionaler Klimaprojektionen können kleinskalige Prozesse, die z. B. nahe der Erdoberfläche auftreten und durch das Relief und die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden, mittlerweile deutlich besser abgebildet werden. Diese und weitere atmosphärische Prozesse, die nicht mehr parametrisiert werden müssen, führen dazu, dass Phänomene wie Gebirgsüberströmungen, Wolken- und Niederschlagsbildung, Luv und Lee bedingte Niederschlagsunterschiede, Berg- und Talwindssysteme sowie die Land-See Wind Zirkulation realistischer wiedergegeben werden können.

Regionale Ozeanmodelle werden derzeit in einer horizontalen räumlichen Gitterweite von ~5 km bis 50 km betrieben und bilden damit kleinräumige Prozesse an Küsten, wie z. B. die Ausbreitung und Vermischung von Flusswassereinträgen, nur unzureichend ab. Auch werden für vertikale Vermischungsprozesse Parametrisierungen verwendet.

Statistisch basierte regionale Klimamodelle: Beim empirisch-statistischen Downscaling (ESD) globaler atmosphärischer Klimaprojektionsdaten stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Hierzu zählen z. B. WETTREG (Wetterlagenbasierte Regionalisierung), STARS (Statistical Analogue Resampling Scheme) und EPISODES (Empirical Statistical Downscaling for Seasonal, Decadal up to Centennial Time Series). WETTREG und EPISODES (Kreienkamp et al. 2019) untersuchen die statistische Beziehung zwischen dem großräumigen Zustand der Atmosphäre und den regionalen Wetterbedingungen. Dies geschieht unter der Annahme, dass zwischen lokalem Klima und globalen Zirkulationsmustern eine physikalisch erklärbare Beziehung besteht. Basierend auf diesen Beziehungen werden synthetische Zeitreihen meteorologischer Parameter erstellt. Bei STARS werden beobachtete Zeitreihen von Klimavariablen neu sortiert, um lineare Klimatrends (i. d. R. der Mitteltemperatur) berücksichtigen zu können. Statistische Modelle haben oft Schwierigkeiten, nichtlineare Effekte im Klimasystem wie z. B. abrupte Sprünge zu simulieren, da sie keine nichtlinearen statistischen Ansätze einbeziehen. Da statistische Modelle aus der Vergangenheit lernen und ihre internen Parametrisierungen anhand des vergangenen Klimas optimiert werden, sind statistische Modelle nur über Umwege (Extrapolation oder Delta-Methode) in der Lage, Klimazustände zu simulieren, die im Laufe der Parameteroptimierung nicht aufgetreten sind. Die Ergebnisse statistischer Modelle sind daher für nichtlineare Entwicklungen und über die beobachteten Klimazustände hinausgehende Entwicklungen fehleranfällig.

Für den Ozean wurde beispielsweise die regionale Höhe des Meeresspiegels mit einem statistischen Verfahren aus Ergebnissen von Globalmodellen bestimmt, siehe Kapitel 3.2 im NOSCCA (North Sea Region Climate Change Assessment) -Report (Quante und Colijn 2016). Da nicht klar war, ob die statistischen

Beziehungen, die in der Vergangenheit galten, auch in Zukunft gelten, wurde in späteren Jahren der regionale Meeresspiegelanstieg allein mithilfe von dynamischen Modellen bestimmt. Auch für andere ozeanische Variablen, wie z. B. die signifikante Wellenhöhe, gibt es statistische Verfahren, die aber vor allem im lokalen Bereich ihre Anwendung finden.

Klimawirkungsmodelle: Klimamodelle liefern wichtige Grundlagen für die Bewertung von Klimafolgen, decken allerdings nicht das komplette Spektrum der erforderlichen Daten ab. So können aus Klimamodellergebnissen beispielsweise keine Aussagen zu Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht, zu den Abflüssen oder Wassertemperaturen an einzelnen Flussabschnitten gewonnen werden. Es ist daher üblich, an die Klimamodelle weitere Modelle zu koppeln, so genannte Klimawirkungsmodelle (manchmal auch Wirkmodelle, Klimafolgenmodelle oder Impaktmodelle), die diese Daten generieren. Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung im Themenfeld 1 werden in diesem Dokument die Klimawirkungsmodelle „Hydrologie“ und „Hydrodynamik Küste“ genannt. Ergebnisse dieser Bausteine sind in die Schwerpunkte *Szenariobildung*, *Klimawirkungsanalyse*, *Hochwasser*, *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, *Anpassungsoptionen*, *Fokusgebiete Küste* und *Fokusgebiete Binnen* eingeflossen. Weitere im Themenfeld 1 verwendete Wirkmodelle beschreiben die Hydrodynamik und die Wassergüte der Flüsse (s. Bericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*; Nilson et al. (2020)). Ferner liegen statistisch-empirische Ansätze zur Bewertung von Wirkungszusammenhängen im Bereich gravitativer Massenbewegungen vor (s. Bericht *Hangrutschungen*, Lohregel et al. (2020)).

2.2 Klimaszenarien

Während globale und regionale Klimamodelle in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht haben, besteht weiterhin das Dilemma der geringen Prognostizierbarkeit zukünftiger Treibhausgasentwicklungen in der Atmosphäre. Um diese Unsicherheiten zu bewältigen formulieren die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Weltklimarat) unterschiedliche Szenarien der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung der Welt als Grundlage für sich teils stark unterscheidende Klimaszenarien (vgl. Abbildung 2-1).

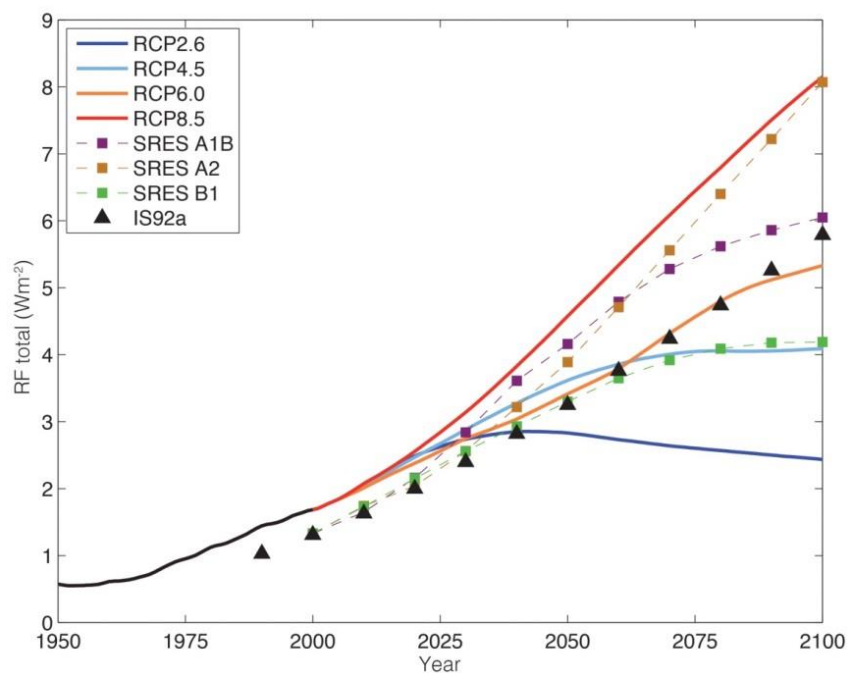


Abbildung 2-1: Zeitliche Entwicklung des Strahlungsantriebs verschiedener Szenarien (RCP, SRES und IS92a; IPCC 2013, Abbildung 1-15).

Im 2. Sachstandsbericht des IPCC (1996) wurden Annahmen bezüglich des zeitlichen Verlaufs und der Intensität zukünftiger Treibhausgasemissionen sowie daraus resultierender atmosphärischer Konzentrationen in den Szenarien IS92a (keine aktiven Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen getroffen) bis IS92f zusammengefasst. Die Analysen des 4. Sachstandsberichts des Weltklimarates im Jahr 2007 basieren auf den sogenannten SRES-Szenarien, die im „Special Report on Emission Scenarios“ vorgestellt wurden. Diese Szenarien trafen Annahmen über die weitere weltweite demographische, ökonomische, politische und technologische Entwicklung und ermittelten daraus den zukünftigen Ausstoß an Treibhausgasemissionen und die resultierende Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre beeinflusst den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und somit die Temperatur der Erdoberfläche und des Ozeans. Klimamodelle berücksichtigen die projizierte zusätzliche Absorption langwelliger Wärmestrahlung der Erdoberfläche durch die Treibhausgase sowie die dadurch erhöhte atmosphärische Gegenstrahlung (Strahlungsantrieb).

Die im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates im Jahr 2013 genutzten Szenarien beschreiben die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre mit Hilfe gekoppelter, repräsentativer Pfade des Strahlungsantriebs¹ in W/m² (Repräsentative Konzentrationspfade; Representative Concentration Pathways, RCP; van Vuuren et al. (2011)). Diese RCP-Szenarien (Tabelle 2-1) wurden für den Zeitraum 2005–2100 mittels gekoppelter Energie-Ökonomie-Klima-Landnutzungs-Ozean-Modelle unter Vorgabe des Strahlungsantriebs am Ende des Jahrhunderts ermittelt. Das RCP4.5 steht beispielsweise für einen Strahlungsantrieb von 4,5 W/m² im Jahre 2100 gegenüber 1850.

Tabelle 2-1: Charakterisierung der vier RCP-Szenarien.

Szenario	Szenarien-Entwicklung
RCP8.5 (<i>Weiter-nie-bisher</i>)	Das CO ₂ -Äquivalent beträgt im Jahr 2100 über 1370 ppm Ähnlich dem A2 SRES-Szenario
RCP6.0	Szenario der Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei einem CO ₂ -Äquivalent von ca. 850 ppm Ähnlich dem A1B SRES-Szenario
RCP4.5 (<i>moderat</i>)	Anstieg des CO ₂ -Äquivalents bis 2100 auf 650 ppm ähnlich zum B1 SRES-Szenario
RCP2.6 (<i>Klimaschutzszenario</i>)	Anstieg der Treibhausgaskonzentration bis 2020 auf ca. 490 ppm, danach Rückgang der Konzentration Ähnlich dem im EU-Projekt ENSEMBLES ² erstellten E1-Stabilisierungsszenario Das Szenario entspricht in etwa dem sogenannten 2°-Ziel der Vereinbarungen von Paris (Weltklimagipfel COP21; <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> , UNFCCC)

Die Bezeichnung "repräsentativ" weist darauf hin, dass es sich um Repräsentationen für einen größeren Satz an Szenarien handelt. Die vier Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 stehen beispielsweise für eine größere Anzahl von in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlichten Szenarien. Die in Abbildung 2-1 dargestellten Verläufe des Strahlungsantriebs sind repräsentativ für die jeweiligen Szenarien. Das Szenario RCP8.5 (*Weiter-nie-bisher*) entspricht einer Welt, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Verbrennung fossiler Energieträger fußt. RCP4.5 geht von einer *moderaten* Entwicklung aus und ist ressourcenschonend orientiert. RCP2.6 (*Klimaschutzszenario*) zeichnet ein optimistisches Bild, dessen Emissionspfad nur durch einen baldigen Stopp aller

¹ Der Strahlungsantrieb bezeichnet die anthropogene Steigerung der Rückstrahlung.

² ENSEMBLES: Projekt innerhalb des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Kommission (<http://ensembles-eu.metooffice.com/>)

Treibhausgasemissionen zu erreichen wäre. Mit diesem Szenario könnte, bei aktiver Entfernung von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen aus der Atmosphäre nach dem Jahr 2050, das im Rahmen der COP 21 in Paris 2015 verabschiedete Ziel, der Begrenzung des anthropogen verursachten Klimawandels auf deutlich unter 2°C (möglichst 1,5°C) im Vergleich zum vorindustriellen Niveau, erreicht werden.

Innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks wird mit einem auf diesen RCP-Szenarien basierenden Klimamodellensemble gearbeitet. Dabei werden die verschiedenen RCP-Szenarien getrennt betrachtet, wobei die Anzahl der pro Szenario zur Verfügung stehenden regionalen Klimasimulationen und somit die jeweilige Ensemblegröße variiert. Um die Einordnung der im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks erzielten Ergebnisse zu früheren SRES-basierten Studien, wie z. B. im Rahmen des KLIWAS³-Projektes, zu gewährleisten, werden entsprechende Vergleichsstudien durchgeführt.

2.3 Interpretation von Klimamodelldaten

Bei regionalen Klimamodellsimulationen zur Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert handelt es sich um annahmen-basierte Projektionen möglicher Klimazustände. Eine exakte Vorhersage des zukünftigen Klimas ist aufgrund der folgenden Faktoren nicht möglich:

- 1) **Auswahl der Klimaszenarien:** In Zusammenarbeit von tausenden Wissenschaftlern aus verschiedenen Fachrichtungen und Nationen wird im Auftrag des Weltklimarates regelmäßig, im Abstand von mehreren Jahren, der wissenschaftliche Sachstand des Klimawandels, der Auswirkungen und Risiken evaluiert. Grundlage für die wissenschaftlichen Analysen zum zukünftigen Klimawandel stellen dabei Szenarien – sprich Annahmen – über die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert und darüber hinaus dar. Alle Szenarien besitzen zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung per Definition eine gleich hohe Eintrittswahrscheinlichkeit, was eine große Spannweite der möglichen zukünftigen Klimazustände zur Folge hat. Daher ist es wichtig, sich bei der Auswertung von Klimaprojektionen nicht nur auf ein Szenario zu beschränken, sondern die Ergebnisse verschiedener Szenarien vergleichend zu bewerten.
- 2) **Beschränkung der Modellgenauigkeit:** Manche physikalischen Prozesse im Klimasystem können von Klimamodellen nicht oder nur unvollständig wiedergegeben werden. Diese epistemisch genannte Unsicherheit lässt sich zumindest teilweise durch die Kombination mehrerer unterschiedlicher Global- und Regionalmodelle oder durch unterschiedliche Beschreibung bzw. Parametrisierung der physikalischen Prozesse in einem Modell abschätzen. Auch mit immer höherer Leistungsfähigkeit von Großrechnern im Verbund mit einer immer höheren räumlichen Auflösung der Klimamodelle bleiben Modelle jedoch weiterhin stark vereinfachte Abbilder der komplexen natürlichen Systeme. Die daraus resultierenden Abweichungen zu den Beobachtungen können bestenfalls verringert werden.
- 3) **Interne Variabilität des Klimas:** Das Klimasystem ist ein nichtlineares System komplexer Dynamik, was zu einer sogenannten aleatorischen Unsicherheit führt. Die natürliche Variabilität des Klimas umfasst auch die interne Variabilität, die durch verschiedene Prozesse und Rückkopplungen im System entsteht und unterschiedliche Zeitskalen überspannt. Zur Erfassung solcher natürlichen Schwankungen sind Analysen langer, mehrere Dekaden umfassender Zeitskalen notwendig. Beobachtungszeitreihen in der für diese Analysen nötigen Qualität liegen global gesehen nur wenige vor. Allerdings erlaubt auch der Vergleich verschiedener Simulationsläufe desselben Klimamodells unter identischen Randbedingungen, jedoch mit leicht geänderten Anfangsbedingungen, eine Abschätzung der internen Klimavariabilität. Bei Klimatrendanalysen sollten Änderungssignale im Vergleich zur internen Variabilität betrachtet werden, um so das Änderungssignal eindeutig von der internen Variabilität differenzieren zu können.

³ KLIWAS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (www.kliwas.de)

- 4) **Ungenauigkeiten in der Modellkaskade:** Durch die stufenweise Verfeinerung der räumlichen Auflösung eines (Mehrfach-) Nesting in einer Modellkette, entstehen ebenfalls Unsicherheiten, denn Ungenauigkeiten (z. B. in der Modellphysik) der gröber aufgelösten Modelldaten beeinflussen ebenfalls den genesteten Modelldatensatz.

Klimamodellensembles: Aufgrund der geschilderten Unsicherheitsfaktoren ist das Ergebnis eines einzelnen Modellaufes als nur bedingt belastbar einzuschätzen. Um die Spannbreite der zukünftigen Klimaänderung abschätzen und möglichst robuste Ergebnisse über eine mögliche Klimazukunft ableiten zu können, hat sich in der Praxis die Auswertung von Klimamodellensembles durchgesetzt. Hierbei sollte für jedes Szenario eine möglichst große Anzahl an Global-Regionalmodell-Kombinationen berücksichtigt werden, welche die aus der Modellwahl resultierenden Unsicherheiten ausgewogen bewertet. Maßnahmen wie z. B. lange Zeitreihen und veränderte Anfangsbedingungen im Modell erhöhen zusätzlich die Belastbarkeit der Ensembleaussagen. Generell ist bei der Bewertung von Klimamodellensembleaussagen zu berücksichtigen, dass die Anzahl der globalen Klimaprojektionen begrenzt ist und darüber hinaus nicht alle möglichen Kombinationen von Global- und Regionalmodell gerechnet wurden (sehr hoher Rechenaufwand) und somit durch das Ensemble ggf. nicht die gesamte Bandbreite aller möglichen Entwicklungen aufgezeigt wird. Zudem weisen einzelne Modelle innerhalb des Ensembles Gemeinsamkeiten auf, die aus der jeweiligen Modellentwicklung und der Übernahme spezifischer Modellkomponenten oder Parametrisierungen von anderen Modellierergruppen resultieren. Dadurch kann es selbst in einem großen Modellensemble zu einer verzerrten Darstellung der zukünftig für einzelne Klimaparameter oder Regionen zu erwartenden Entwicklung kommen (z. B. bei der Berechnung von Mittelwerten oder der Bildung von Quantilen).

Bedeutung hochqualitativer Beobachtungsdatensätze: Klimamodelle können die natürlichen Prozesse im Klimasystem bisher nur eingeschränkt repräsentieren und sind daher mit systematischen Fehlern (beispielsweise einem Bias) behaftet. Falls ein geeigneter, hochqualitativer Beobachtungsdatensatz zum Vergleich mit Klimamodelldaten existiert, kann eine Minimierung dieser Modellfehler durch entsprechende statistische Korrekturverfahren vorgenommen werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Interpretation der Klimamodelldaten, z. B. in Bezug auf die Analyse von Veränderungen von Klimakennwerten sowie für viele Klimafolgenmodellierungen. Jedoch sind diese hochqualitativen Datensätze nicht für alle relevanten Variablen vorhanden. So existieren bisher nur zeitlich grob aufgelöste Vergleichsdatensätze für Windfelder über Land sowie nur wenige Datensätze für ozeanische und atmosphärische Variablen auf See. Ein Ansatz, diese Lücke zu schließen, stellen sogenannte Reanalysedaten dar, die gegenwärtig bei der Bestimmung modellinterner Ungenauigkeiten verstärkt zum Einsatz kommen. Allerdings liegen diese Datensätze zurzeit noch nicht in klimatologisch relevanten Zeitskalen (mindestens 30 Jahre) vor.

Hochqualitative Beobachtungsdatensätze sind nicht nur für die hier geschilderten Ansätze zur Evaluierung von Klimamodellen und der Adjustierung systematischer Klimamodellfehler wichtig, sondern werden auch für die Bewertung rezenter Klimatrends, für Prozessstudien zu den Zusammenhängen von Klimavariablen und Indizes der atmosphärischen bzw. ozeanischen Zirkulation und für die Validierung von Impaktmodellen herangezogen.

Umgang mit systematischen Modellfehlern: Viele Wirkmodelle nutzen als Eingangsdaten absolute meteorologische Werte (im Normalfall Messwerte). Zudem basieren viele in der Klimafolgenforschung verwendete Klimaindizes auf absoluten Schwellenwerten. Neben der Betrachtung relativer Werte (z. B. Änderungen bestimmter Perzentile der Häufigkeitsverteilungen) ist die Anwendung von Bias-Adjustierungsverfahren z. Zt. ein übliches Mittel, um Klimaprojektionen für Anwendungen nutzbar zu machen. Dabei werden die modellinternen Fehler basierend auf dem Vergleich zwischen dem historischen Modelllauf (*historical*) und Beobachtungsdaten in einer mindestens 30-jährigen Referenzperiode abgeschätzt und soweit möglich korrigiert. Die zur Bias-Adjustierung existierenden Verfahren sind unterschiedlich komplex und reichen von einfachen Skalierungsansätzen, über eine Anpassung der Verteilungsfunktion einzelner Variablen bis hin zu multivariaten Ansätzen. Der Vergleich verschiedener Bias-Adjustierungsansätze im Rahmen des Projektes

“Bias Adjustment Intercomparison Project” zeigte, dass es nicht “die beste” Methode gibt. Einige Methoden liefern jedoch über die verschiedenen untersuchten Statistiken (z. B. saisonale Mittelwerte, Variabilität, Extremwerte, Indizes, etc.) eine ausgewogenere Performance als andere. Dabei hängt die Leistungsfähigkeit des Adjustierungsverfahrens nicht nur von der Methodik selbst ab, sondern auch von den zu korrigierenden Klimamodelldaten (unterschiedliche Arten von Bias). Generell wird eine Prüfung des Biasadjustierungsverfahrens für einen unabhängigen Zeitabschnitt außerhalb der 30-jährigen Referenzperiode empfohlen (Stocker et al. 2015), um z. B. eventuelle Instationaritäten im Bias zu identifizieren.

Bei der Verwendung bias-adjustierter Daten ist zu berücksichtigen, dass diese immer noch erhebliche Abweichungen zu den beobachteten Klimacharakteristika aufweisen können, je nachdem auf welche Eigenschaft des Datensatzes (z. B. Mittelwert oder Verteilung) die Anpassung erfolgte. Zudem kann sich die Korrektur eines Parameters auf die Interpretation anderer Parameter auswirken (insb. abgeleitete Größen) oder die räumliche Korrelation der Parameter verändern. Damit wird eine neue Quelle der Unsicherheiten in die Bewertung der Klimawirkungen mittels Klimaprojektionsdaten eingeführt.

Bewertung von Änderungssignalen: Generell werden aufgrund der beschriebenen systematischen Abweichungen zwischen Modellen und Beobachtung relative Änderungssignale (Szenarienlauf vs. *historical*) als robuster betrachtet als absolute Klimasignale der Szenarienläufe. Bei den häufig angewandten zeitscheibenbasierten Auswertungen muss die (multi-) dekadische Variabilität im Klimasystem (siehe Ganske et al. (2016)) berücksichtigt werden. Die größten Änderungssignale müssen nicht zwangsläufig in der letzten 30-jährigen Betrachtungszeitscheibe 2071–2100 auftreten, sondern können sich durch die Überlagerung der natürlichen Klimavariabilität mit dem anthropogenen Änderungssignal auch deutlich früher im Modellensemble zeigen. Eine Möglichkeit, die Klimaänderungssignale von der multidekadischen Variabilität zu differenzieren, besteht darin, deutlich längere als die üblichen 30-jährigen Zeitscheiben zu betrachten. Alternativ sollte zusätzlich der zeitliche Verlauf der Änderungen durch Zeitreihen dargestellt und bewertet werden.

3 Klimamodellauswertungen im Binnenbereich

*Stephanie Hänsel, Stefan Kräbenmann, Christoph Brendel, Thomas Deuschländer, Michael Haller, Simona Höpp, Monika Rauthe, Kelly Stanley, Birger Tinz, Andreas Walter
(Deutscher Wetterdienst)*

3.1 Einleitung

Verschiedene Extremereignisse wie Hitzeperioden, Überschwemmungen, Niedrigwassersituationen, Stürme und Hangrutschungen haben in den letzten Jahren gehäuft zu Unterbrechungen der Verkehrsflüsse und Schäden an den Verkehrsinfrastrukturen geführt. Diese Störungen des Verkehrssystems gehen zum Teil mit hohen sozioökonomischen Verlusten einher. Das trifft insbesondere dann zu, wenn durch die Extremereignisse mehrere Verkehrsträger gleichzeitig betroffen sind. Mit der fortgesetzten Erwärmung der Erdoberfläche wird in der Zukunft verstärkt mit negativen Auswirkungen auf den Transport gerechnet. Daher ist eine Anpassung des Transportsystems an die zu erwarteten Klimaänderungen notwendig, insbesondere wenn es sich um langlebige Verkehrsinfrastrukturen handelt. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen. Für das deutsche Bundesverkehrssystem untersucht das Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks daher systematisch die derzeitigen und zukünftigen Klimawirkungen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Die dafür im Binnenbereich verwendeten Datengrundlagen (Referenzdaten und Klimaprojektionsdaten) sowie die methodischen Festlegungen in Bezug auf die Bewertung von Klimaänderungen in Deutschland werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

Die vorgestellten Daten, Methoden und Festlegungen bilden die Grundlage für die nachfolgenden Analysen zu spezifischen Klimawirkungen in den potentielle Gefahren für das Verkehrssystem adressierenden Schwerpunkten SP-103 *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020), SP-104 *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020), SP-105 *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) und SP-106 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020). Zudem sind sie die Voraussetzung für die Integration der spezifischen Analysen in einen vergleichbaren methodischen Rahmen der Klimawirkungsanalyse innerhalb des SP-102 *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020). Die aufbauend auf den hier vorgestellten Datensätzen innerhalb des SP-106 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* vorgenommenen Impaktmodellierungen im hydrologischen Bereich sowie die dabei angewandten Methoden und produzierten Datensätze sind im Kapitel 5 „Auswertungsrahmen Hydrologie“ beschrieben.

Untersucht man Klimaänderungen in Küstennähe oder über See – wie dies im Themenfeld 1 innerhalb des Schwerpunkthemas SP-108 *Fokusgebiete Küsten* erfolgt – so werden meist neben Änderungen der Atmosphäre auch jene des Ozeans untersucht. Für diese Untersuchungen werden daher meist Ergebnisse regionaler gekoppelter Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle (OARCMs) verwendet. Daten- und methodenbedingt sind Ensembleauswertungen für den Küsten- und Binnenbereich unterschiedlich, weshalb die für Klimawirkungsanalysen im Küstenbereich verwendeten Daten und Methoden separat im Kapitel 4 „Untersuchungen zur Nord- und Ostsee und deren Küsten“ dargestellt werden.

3.2 Referenzdatensätze

Auf Beobachtungsdaten beruhende Referenzdatensätze werden für die Evaluierung von Klimamodellen, zur Adjustierung systematischer Klimamodellfehler, zur Bewertung rezenter Klimatrends sowie für Prozessstudien zu den Zusammenhängen von Klimavariablen und Indizes der atmosphärischen bzw. ozeanischen Zirkulation verwendet. Die Datensätze werden aber auch als Antriebsdaten für Impaktmodelle (z. B. hydrologische Modelle) benutzt, um diese ebenso zu validieren.

3.2.1 HYRAS-Rasterdatensätze

Für den Binnenbereich der Bundesrepublik liegen dichte meteorologische Beobachtungsdaten in Tageswertaufösung vor. Da die meisten großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland auch ausländische Anteile besitzen, ist die Einbeziehung ausländischer Daten in den Referenzdatensätzen notwendig. Die Basis dafür bilden die bereits im Ressortforschungsprojekt KLIWAS (Frick et al. (2014) erstellten Referenzdaten HYRAS (Hydrologische Rasterdaten) mit einer räumlichen Auflösung von $5 \times 5 \text{ km}^2$ für die deutschen Flusseinzugsgebiete (siehe Abbildung 3-1). Dabei stand sowohl die räumliche (jetzt inklusive Odergebiet) und zeitliche (jetzt 1951–2015) Erweiterung, als auch die Weiterentwicklung und Verbesserung der Verfahren zur hochaufgelösten Regionalisierung im Fokus. Neben den bekannten Variablen Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte aus den KLIWAS-Datensätzen wurden nun auch Verfahren für Globalstrahlung sowie für Minimum- und Maximumtemperatur entwickelt, um den Bedarf für alle Verkehrsträger zu decken. Ein Überblick zu den verschiedenen HYRAS-Versionen gibt Tabelle 3-1.

In einem ersten Schritt wurden die in KLIWAS erstellten Referenzdaten HYRAS räumlich und zeitlich erweitert. Da sich die meisten Flusseinzugsgebiete Deutschlands auch auf das Ausland erstrecken, fließen neben den Stationswerten des deutschen Messnetzes auch ausländische Daten in die Interpolation mit ein. Entsprechend wurden für die Fortschreibung der Referenzdaten ausländische Stationsdaten gesammelt und aufbereitet.

Mit Hilfe von Interpolationsverfahren werden Messwerte von räumlich unregelmäßig verteilten Messstationen auf ein regelmäßiges Gitter übertragen. Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, die, je nach der gewünschten räumlichen und zeitlichen Auflösung, dem betrachteten Klimaelement oder der Dichte des verwendeten Stationsnetzes, am besten für eine Interpolation geeignet sind. Abbildung 3-2 zeigt schematisch das Vorgehen für die Erstellung aller HYRAS-Rasterdatensätze.

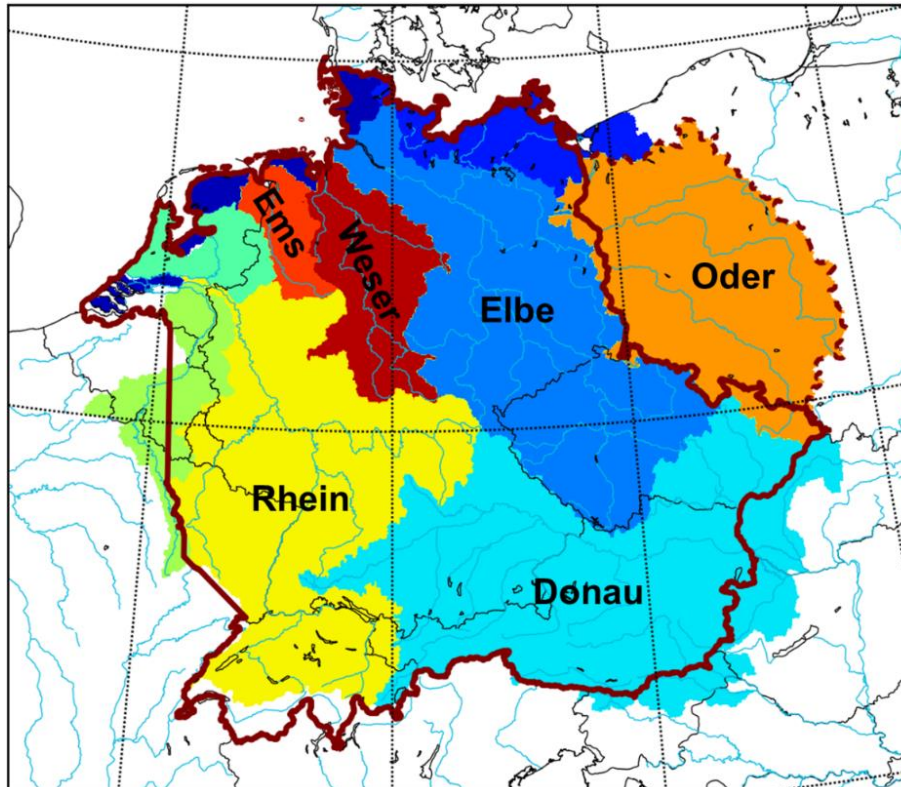


Abbildung 3-1: Deutsche Flusseinzugsgebiete (farbige Flächen) und Gebiet von HYRAS-2015 (durchgezogene rote Linie: HYRAS-2015, Basis für Bias-Adjustierung und Wirkmodelle; gestrichelte Linie: HYRAS-2015a, Ausweitung um die polnische Oder; Details in Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Übersicht zu den HYRAS-Versionen und der Namensgebung sowie deren Verwendung. Blau hinterlegt ist die zuletzt abgegebene Version im BMVI-Expertennetzwerk, die als Grundlage für die offiziellen klimatologischen Analysen dient.

	PR	TAS	HURS	TMIN	TMAX	RSDS	Anmerkungen
HYRAS-2006	v2.0	v1.01	v1.01	—	—	(v0.21)*	Datensätze im Rahmen des KLI-WAS-Ressortforschungsprojekts. Zeitraum: 1951–2006
HYRAS-2015	v2.1	v3.0	v3.0	v3.0	v3.0	v1.0	Datensätze im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks; Basis für Bias-Korrektur und Antriebsdaten für Wirkmodelle. Zeitraum: 1951–2015
HYRAS-2015a	v3.0	v4.0	v4.0	v4.0	v4.0	—	Ausweitung der Datensätze um das Einzugsgebiet der polnischen Oder. Zeitraum: 1951–2015

*inoffizielle Version

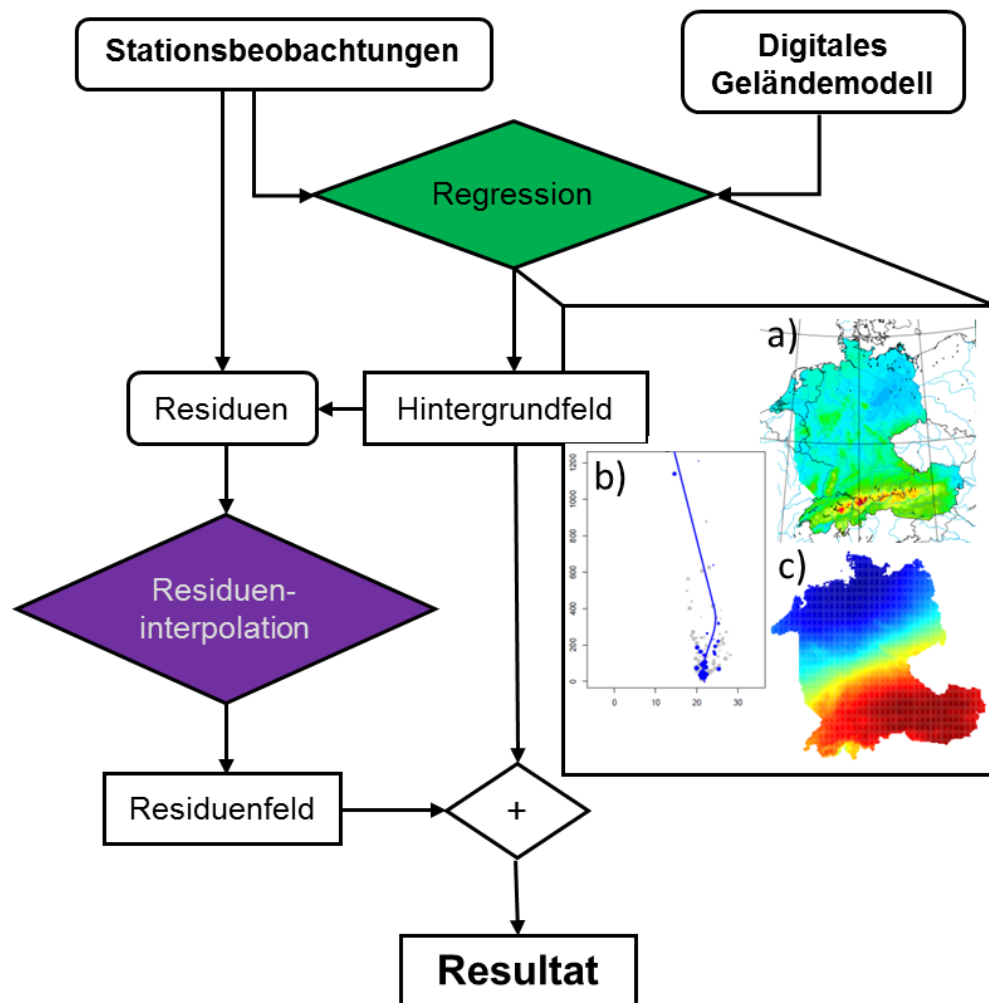


Abbildung 3-2: Schema der HYRAS-Rastermethoden mit a) Hintergrundfeld aus langjährigem Monatsmittel für PR, b) nicht-linearem Höhenprofil für TMAX, TAS, TMIN, HURS und c) monatlicher Hauptkomponente für RSDS.

Für die Aktualisierung der Rasterdatensätze des **Niederschlags** (PR) wurde als Basis das REGNIE-Verfahren (Rauthe et al. 2013) mit klimatologischen Hintergrundfeldern (Abbildung 3-2a) verwendet, das in der Methodik stellenweise modifiziert wurde. Hierbei wird eine multiple lineare Regression, die orographische Gegebenheiten berücksichtigt, mit einer inversen Distanzgewichtung kombiniert. Die **Temperatur** (TAS, TMIN, TMAX) und die **relative Luftfeuchte** (HURS) beruhen auf einer Kombination nichtlinearer Temperaturprofile (Abbildung 3-2b) mit nichteuklidischer Residueninterpolation (Krähenmann et al. 2018). Der Rasterdatensatz der **Globalstrahlung** (RSDS) wird aus der Kombination von Stationsmessdaten und Satellitendaten erstellt. Dabei werden Hintergrundfelder der Globalstrahlung berechnet, die bei einer multiplen linearen Regression die Muster der Hauptkomponentenanalyse des CM-SAF-Datensatzes (Pfeifroth et al. 2017) (Abbildung 3-2c) sowie Höhe, Länge und Breite benutzen. Bei den Stationsmessdaten werden die Sonnenscheindauernmessungen mit Hilfe des Angström-Ansatzes in Globalstrahlung umgerechnet und beides per inverser Distanzgewichtung interpoliert. Detailliertere Informationen zu den Verfahren können dem Fachbericht zu den HYRAS-Daten entnommen werden (Razafimaharo et al. 2019).

Im Gegensatz zu allen anderen Variablen gibt es bezüglich des Niederschlags eine Besonderheit, die sich bis in die hydrologische Modellierung auswirkt. Beim Niederschlag gibt es einen grundsätzlichen, nicht vernachlässigbaren systematischen Messfehler. Dieser setzt sich aus den folgenden Teilen zusammen:

- Überwehungsfehler als Folge der Windexposition des Messgerätes
- Benetzungsverlust (Befeuchtung der Auffangfläche)
- Verlust durch Spritzwasser und Schneeverfrachtung
- Verdunstungsverlust der Sammelkanne

Diese Messfehler sind gerätespezifisch und hängen zudem von der Messgerätaufstellung (z. B. Windfeld), der Jahreszeit (Regen oder Schnee) und den aktuellen meteorologischen Bedingungen (Niederschlagsintensität, Windstärke, Temperatur) ab. Generell ist im Mittel von einer Unterschätzung von ca. 10% auszugehen, die insbesondere bei Schnee oder hohen Windgeschwindigkeiten aber auch wesentlich höher ausfallen kann. Um diese Messfehler weitgehend realistisch korrigieren zu können, werden entsprechend diverse Umgebungs- und Geräteparameter benötigt.

In einer aufwendigen Studie wurde für den früher in Deutschland üblichen Hellmann-Niederschlagsmesser eine passende Korrektur entwickelt (Richter 1995). Diese ist aber nicht ohne weiteres auf andere Geräte übertragbar. Zudem sind wichtige Informationen zur Umgebung sowie zu den aktuellen Temperatur- und Windbedingungen nicht an jeder Station vorhanden. Insbesondere bei den ausländischen Stationen ist dem Deutschen Wetterdienst (DWD) in der Regel über den Gerätetyp und die Aufstellungsbedingungen nichts bekannt. Aufgrund dieser fehlenden Randinformationen ist es nicht möglich die dem HYRAS-Datensatz zugrundeliegenden Daten sinnvoll zu korrigieren. Trotz der Implikationen für die Bias-Korrektur als auch für die hydrologische Modellierung, wird deshalb auf eine Niederschlagskorrektur verzichtet, da diese, wenn überhaupt, nur sehr pauschal und damit fehlerbehaftet möglich wäre.

3.2.2 TRY-Basisdatensatz

Der TRY (Test Reference Years)-Basisdatensatz (Krähenmann et al. 2018), ein Rasterdatensatz für Deutschland in 1 km² Auflösung, umfasst stündliche, tägliche und monatliche Karten. Er beinhaltet zwölf Klimavariablen (u. a. Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit) und überspannt den Zeitraum 1995–2012. Der Datensatz wurde in erster Linie zur Aktualisierung der deutschen Testreferenzjahre, einem Datensatz der technischen Klimatologie, erstellt. Dank seiner hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung besitzt er jedoch ein breites Anwendungsspektrum.

Die Methode zur Erstellung der Rasterdaten ist der jeweiligen Variablen angepasst. Die Rasterkarten der Lufttemperatur basieren beispielsweise zur Gänze auf Stationsdaten. Um Inversionslagen möglichst gut

modellieren zu können, kombiniert das Interpolationsverfahren ein nichtlineares Temperaturprofil mit Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW), wobei ein nichteuklidisches Distanzmaß verwendet wurde. Daneben wurde zudem der Wärmeinseleffekt in urbanen Räumen berücksichtigt.

Der Winddatensatz ist ein Verschnitt aus hochauflösenden Reanalysedaten (COSMO-CLM (Consortium for small scale modelling – Climate limited-area model); siehe Abschnitt 3.2.3) und Stationsmesswerten. Das von der Reanalyse gelieferte Hintergrundfeld stündlicher Windgeschwindigkeiten mit einer Gitterweite von 2,8 km wurde mit Hilfe von Stationsdaten bias-adjustiert. Da Modellwind und Modellrauigkeit als Flächenmittelwerte vorliegen, Stationswerte dagegen punktuell gültig sind, wurden die jeweiligen Werte zunächst vergleichbar gemacht. Dazu wurden beide Datensätze basierend auf Konzepten der Grenzschichtmeteorologie transformiert. Anschließend wurden die Abweichungen zwischen Modell- und Stationswind, unter Berücksichtigung der Topographie, mittels linearer Regression interpoliert.

Aufgrund der hohen Qualität des TRY-Basisdatensatzes im Vergleich zu Stationsdaten und anderen Rasterprodukten, dient der Winddatensatz im Themenfeld 1 zur Erstellung von Extremwertkarten für das 95., das 98. und das 99. Perzentil. Insbesondere wird der Datensatz im Schwerpunkt *Sturmgefahren* verwendet.

Zusätzlich wurde aus COSMO-CLM Klimasimulationsdaten, angetrieben mit Reanalysen, der sogenannte Böenfaktor berechnet. Er ist das Verhältnis von Windböe zu Mittelwind. Für niedrige Windgeschwindigkeiten (kleiner 10 m/s) ist er im Bereich von 1 bis 10, nähert sich aber für hohe Windgeschwindigkeiten einem Wert zwischen 1,2 und 1,5 an (Born et al. 2012). Dieser Böenfaktor wurde auf die entsprechenden Perzentilkarten des TRY-Basisdatensatzes angewendet, sodass ein Wert der Windböen für jeden Gitterpunkt des Rasters und für die entsprechenden Perzentile angegeben werden kann.

3.2.3 Reanalysedaten

Die Reanalysedaten des Modells COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015) liefern physikalisch konsistente und lückenlose Zeitserien, die das Gebiet EURO CORDEX-11 (Coordinated Downscaling Experiment) in einer räumlichen Auflösung von 6 x 6 km² abdecken. COSMO-REA6 vereint Daten des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO mit Beobachtungsdaten. Die Beobachtungsdaten werden mittels des Nudging-Schemas von COSMO assimiliert, ergänzt mit Schnee, Meeresoberflächentemperaturen und Bodenfeuchte und den lateralen Randbedingungen von ERA-Interim⁴ (Dee et al. 2011). Derzeit überspannt der Datensatz den Zeitraum 1995–2017.

Bollmeyer et al. (2015) zeigten, dass dieser hoch aufgelöste regionale Reanalysedatensatz im Vergleich zur globalen Reanalyse von ERA-Interim insbesondere in der Darstellung kleinskaliger Variabilität einen Mehrwert liefert. Besonders die raum-zeitliche Genauigkeit von Niederschlagsereignissen konnte im Vergleich zu dynamischem Downscaling ohne Datenassimilation signifikant verbessert werden.

Im Themenfeld 1 werden die Daten von COSMO-REA6 für die Bias-Adjustierung und dem anschließenden statistischen Downscaling der mittleren Windgeschwindigkeit im 10 m Höhe sowie des Luftdrucks in Meereshöhe verwendet. Beide Größen sind derzeit nicht Teil des HYRAS-Datensatzes und der Reanalysedatensatz bietet mit seiner erwiesenen Qualität eine adäquate Alternative. Für die Anwendung im Themenfeld 1 werden die REA6-Daten mittels des Verfahrens „conservative interpolation“ von 6 x 6 km² auf 5 x 5 km² gebracht, um eine räumlich konsistente Bereitstellung aller bias-adjustierten Klimaprojektionsdatensätze zu ermöglichen.

⁴ ERA-Interim ist eine viel genutzte globale atmosphärische Reanalyse, deren Daten in 1979 beginnen. Sie wird vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) produziert und soll langfristig die vorherige atmosphärische Reanalyse ERA-40 ersetzen.

3.3 Klimaprojektionsdaten

3.3.1 Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe

Eine der Kernaufgaben des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk besteht in der Ableitung robuster Änderungssignale für Klimakennwerte mit Relevanz für den Verkehrssektor unter Berücksichtigung bestehender Szenarien- und Modellunsicherheiten. Grundlage sind dabei regionale Klimaprojektionen für die Atmosphäre, die im Rahmen des EURO-CORDEX-Projektes (dem europäischen Zweig innerhalb der CORDEX Initiative) für drei verschiedene Emissionsszenarien (*Klimaschutzszenario*, *moderat* und *Weiter-wie-bisher*) erzeugt und bereitgestellt wurden. Das Modellgebiet umfasst Europa und Nordafrika (siehe Abbildung 3-3), mit einer horizontalen Gitterweite von 0.44° („EUR-0.44“; ≈ 50 km) bzw. 0.11° („EUR-0.11“; ≈ 12 km). Weitere Informationen sind unter <http://www.euro-cordex.net/> verfügbar. Ergänzt wird dieses Ensemble durch weitere im Rahmen des ReKliEsDe-Projekts⁵ durchgeführte Simulationen. Zu allen RCP-basierten Simulationen stehen auch die entsprechenden historischen Läufe zur Verfügung.

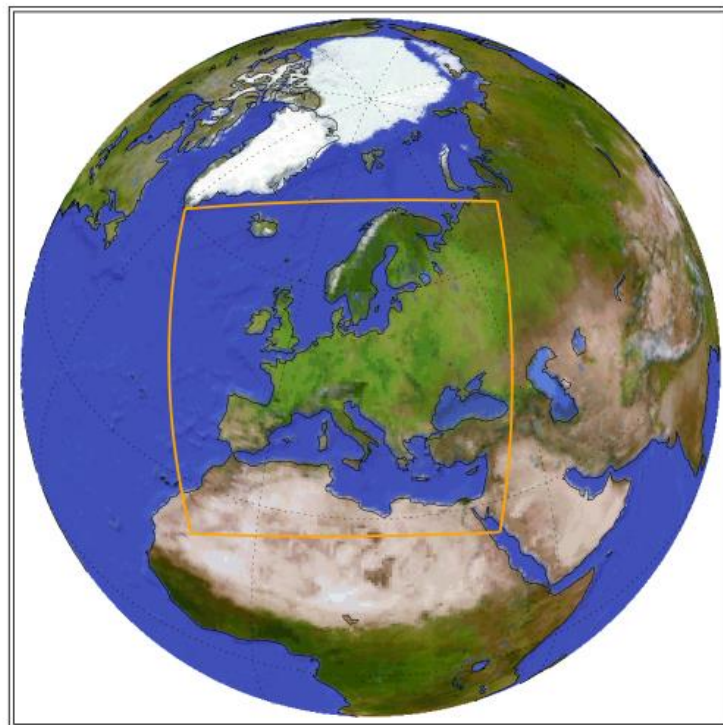


Abbildung 3-3: EURO-CORDEX Modellgebiet.

Um die Klimaänderungen und -wirkungen über Deutschland basierend auf möglichst einheitlichen Datengrundlagen zu bewerten wurde im BMVI-Expertennetzwerk das DWD-Referenzensemble v2018⁶ verwendet (Tabelle 3-2), das auch die Grundlage der Bewertungen im Rahmen der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 des Bundes bilden soll. Damit eine über viele Klimaindikatoren und Impactmodelle hinweg konsistente Datengrundlage ermöglicht wird, wurden in das DWD-Referenzensemble nur jene regionalen Klimaprojektionen aufgenommen, für die die in Tabelle 3-3 aufgeführten Variablen zur Verfügung stehen.

⁵ ReKliEs-De: Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (<http://reklies.hlnug.de>)

⁶ https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtlc_rcp-daten-satz_node.html

Tabelle 3-2: Übersicht über das DWD-Referenzensemble v2018 und das DWD-Kern-Ensemble v2018 (gekennzeichnet mit *) mit den verwendeten Global- und Regional-Modell-Paaren pro RCP-Szenario und Illustration ihrer Herkunft (blau: EURO-CORDEX, grün: ReKliEs-De).

GCM /RCM	RCP2.6					RCP4.5					RCP8.5				
	CCLM	RACMO	RCA4	REMO	WRF	CCLM	RACMO	RCA4	REMO	WRF	CCLM	RACMO	RCA4	REMO	WRF
CanESM2											r1*			r1	
EC-EARTH	r12*	r12*	r12			r12	r1*	r12*			r12	r1*	r1	r12	r1
HadGEM2-ES		r1*	r1			r1*	r1	r1			r1*	r1	r1	r1	r1
IPSL-CM5A-MR								r1					r1		
MIROC5	r1*										r1			r1*	
MPI-ESM_LR	r1		r1	r1	r1	r1		r1	r1*	r2*	r1		r1	r1	r1*
Zahl Ensemblemember	11 (*5)					12 (*6)					21 (*6)				

Im Verlauf der Projektbearbeitung gab es mehrere Änderungen in der Zusammensetzung des Ensembles. Einige Läufe wurden aufgrund von Modellfehlern von den Modellierergruppen zurückgezogen, andere konnten aufgrund von festgestellten Qualitätsproblemen nicht im finalen Ensemble berücksichtigt werden (siehe Anlage 1). Die Möglichkeit der Einbeziehung empirisch-statistischer Verfahren als alternative Downscalingansätze, wie sie im Rahmen von ReKliEs für Deutschland bereitgestellt wurden, wurde lange diskutiert. Letztendlich konnten sie in der derzeitigen Version des DWD-Referenzensembles aufgrund von Qualitätsproblemen bei einigen Parametern nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 3-3: Liste der für die Impaktmodellierungen und Klimaindikatorberechnungen relevanten Variablen und Informationen zum angewendeten Bias-Adjustierungsverfahren sowie dem für die Adjustierung verwendeten Referenzdatensatz.

Bodennahe klimarelevante Variablen	Variablenbezeichnung im ESGF (Short Name)	Bias-Adjustierungsverfahren	Verwendeter Referenzdatensatz
Lufttemperatur in 2 m	tas	Multivariate Quantile Mapping	HYRAS-TAS-v3.0
Minimumtemperatur in 2 m	tasmin		HYRAS-TMIN-v3.0
Maximumtemperatur in 2 m	tasmax		HYRAS-TMAX-v3.0
Relative Luftfeuchte oder	hurs		HYRAS-HURS-v3.0
Spezifische Luftfeuchte in 2 m	huss		HYRAS-TDEW-v3.0
Niederschlag	pr	Quantile Mapping	HYRAS-PR-v2.1
Windgeschwindigkeit in 10 m	sfeWind	Quantile Mapping	COSMO-REA6
Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer	rsds sund	Linear Scaling	HYRAS-RSDS-v1
Bodenluftdruck oder Luftdruck über den Meeresspiegel	ps psl	Linear Scaling	COSMO-REA6

3.3.2 Vorgehen bei der Bias-Adjustierung

Für viele Parameter, die bei Untersuchungen im Binnenland verwendet werden, stehen Beobachtungsdaten in ausreichender Dichte und Qualität zur Verfügung, sodass gegitterte Referenzdatenfelder erstellt werden konnten (siehe Abschnitt 3.2). Für diese Größen können daher auch Bias-Adjustierungen der Ergebnisse der atmosphärischen RCMs durchgeführt werden. In Tabelle 3-3 ist zusammengestellt, welcher Referenzdatensatz und welche Adjustierungsmethode für den jeweiligen Klimaparameter angewendet wurde.

Zur Durchführung der Bias-Adjustierung existieren unterschiedliche Methoden, die je nach betrachtetem Parameter, Region, Klimamodell und verfügbarem Referenzdatensatz unterschiedlich gute – im Sinne von geringer Abweichung von verschiedenen betrachteten Charakteristika zwischen Modell und Referenzdatensatz – Ergebnisse liefern:

- **Schwellenwert-Anpassung:** Kenntage wie beispielsweise Sommertage basieren auf festen Schwellenwerten. Weisen die Klimaprojektionen einen Bias auf, führt dies zu einer systematischen Über- oder Unterschätzung der Kenntage. Ein einfacher Korrekturansatz besteht darin, jenen Schwellenwert einer Klimasimulation zu identifizieren, der dieselbe Anzahl von Über- oder Unterschreitungen aufweist wie jener in den Referenzdaten. Für den Projektionszeitraum wird dann dieser angepasste Schwellenwert verwendet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass sich das Klima sowie abgeleitete Kennwerte zukünftig linear ändern, eine Voraussetzung die oft nicht erfüllt ist. Zudem liefert dieser Korrekturansatz keine für Impactmodellierungen geeigneten Datensätze.
- **Linear Scaling:** Ein ebenfalls simples Verfahren ist die Anpassung des Modellwerts durch einen konstanten Versatz oder eine konstante prozentuale Modifikation. Voraussetzung ist eine annähernd lineare Beziehung zwischen Modell- und Beobachtungsdaten. Ziel der linearen Skalierung ist eine möglichst perfekte Übereinstimmung monatlicher Mittelwerte der korrigierten Modelldaten mit beobachteten Werten. Die Adjustierung basiert dabei auf monatlichen Korrekturwerten, die aus den Differenzen zwischen beobachteten und modellierten Werten abgeleitet werden.
- **Quantil-Mapping-Verfahren** passen die fehlerbehafteten Häufigkeitsverteilungen der Projektionsdaten über eine mittlere Abbildungsvorschrift an jene von realen Beobachtungen an. Dabei werden der Mittelwert, die Standardabweichung sowie einzelne Quantile angepasst. Zudem werden auch die Extrema korrigiert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Häufigkeitsverteilungen stationär sind, was in einem sich ändernden Klima allerdings nicht für alle Klimaparameter zutreffend sein muss.
- Wie bei einer linearen Skalierung, werden beim Quantil-Mapping sämtliche Klimavariablen voneinander unabhängig korrigiert. Diese individuelle Bearbeitung der verschiedenen Parameter geht häufig mit dem Verlust der meteorologischen (physikalischen) Konsistenz einher. Beim Einsatz komplexer Multiparameter-Wirkmodelle, wie beispielsweise einem Wasserhaushaltsmodell, kann dies zu ungenauen oder gar falschen Ergebnissen führen.
- Die **multivariate Bias-Adjustierung** stellt eine Erweiterung des Quantil-Mapping-Verfahrens dar. Neben der Korrektur der statistischen Momente wird auch sichergestellt, dass die Konsistenz der einzelnen Klimavariablen zueinander erhalten bleibt.

Zur Korrektur der im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks verwendeten atmosphärischen Klimaprojektionen im Binnenland wurde ein neues, multivariates Bias-Adjustierungsverfahren (Cannon 2018) getestet und final auf die temperaturgebundenen Parameter (Mittel-, Minimum- und Maximumtemperatur sowie Luftfeuchte) angewandt. Dieses Verfahren kombiniert die Anpassung marginaler Verteilungen via univariatem Quantil-Delta-Change-Mapping (QDCM), unter Beibehaltung der projizierten Änderungen in den simulierten Quantilen, mit einer Anpassung der Abhängigkeitsstruktur zwischen den Variablen durch multivariate Skalierung.

Während das Quantil-Mapping auf marginale Verteilungen eines multivariaten Datensatzes abzielt und dabei die Abhängigkeitsstruktur der Variablen zueinander unter Umständen verschlechtert, korrigiert der multivariate lineare Bias-Adjustierungs-Algorithmus die Abhängigkeitsstruktur, jedoch nicht die komplette marginale Verteilung. Im BMVI-Expertennetzwerk kommt die R-basierte Funktion MBCn (Cannon 2018), die Quantil-Mapping mit multivariater linearer Skalierung kombiniert, zur Anwendung.

Grundsätzlich sind im Rahmen einer Bias-Adjustierung drei Typen von Datensätzen involviert: historische Referenzdaten (z. B. Beobachtungen), historische Klimamodelldaten und Klimaprojektionsdaten, die zumindest teilweise außerhalb des historischen Zeitraums liegen. Wird Quantil-Mapping auf modellierte Variablen im historischen Zeitraum angewandt, besitzen bias-adjustierte Daten definitionsgemäß dieselbe marginale Verteilung wie jene der Referenzdaten.

Wenn Quantil-Mapping auf Projektionsdaten angewendet wird, deren Wertebereich außerhalb des Bereichs historischer Simulationsdaten liegt, muss eine Extrapolation erfolgen. Methoden wie Quantil-Delta-Change-Mapping (QDCM; Olsson et al. (2009)) machen zusätzlich Gebrauch von Simulationsdaten im Projektionszeitraum. In diesen Verfahren werden projizierte Änderungen in den Quantilen der Klimaprojektion mit Hilfe einer Quantil-für-Quantil-Adjustierung konserviert. Die Extrapolation ist somit bereits im Verfahren mit enthalten. Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wurde daher von QDCM Gebrauch gemacht.

In QDCM werden Mess- sowie Modellwerte (für historischen und zukünftigen Zeitraum) zunächst aufsteigend sortiert und Perzentilen zugeordnet. Der Vergleich modellierter und beobachteter Perzentile liefert für jedes Perzentil einen bestimmten Bias (bzw. Adjustierungswert). Die historischen bzw. projizierten Modelldaten werden anschließend perzentilweise mit dem entsprechenden Adjustierungswert behandelt. Da aufgrund der Klimaänderung die höchsten Temperaturwerte und somit auch die höchsten Perzentile erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts auftreten, würden Werte am Ende des 21. Jahrhunderts besonders häufig mit einem Adjustierungswert behandelt, der im historischen Zeitraum nur für hohe Perzentile gilt. Ein großer Teil der Werte zu Beginn des Projektionszeitraums (ab 2006) würde dagegen mit einem Korrekturwert behandelt, der im historischen Zeitraum einem mittleren oder niedrigen Perzentil entspricht. Um dieses Problem zu umgehen, wurde ein „Moving-Window-Ansatz“ angewendet: die Klimaprojektionsdaten wurden jeweils für 35-Jahreszeitscheiben sortiert bzw. adjustiert sowie die mittleren 15 Jahre abgespeichert.

Der Algorithmus nach Cannon besteht aus drei Phasen: a) Anwendung einer zufälligen orthogonalen Rotation auf die Ausgangs-, Projektions- und Beobachtungsdaten; b) Korrektur der marginalen Verteilungen der rotierten Daten; c) Anwendung einer inversen Rotation. Diese drei Schritte werden wiederholt ausgeführt, bis die multivariate Verteilung der modellierten und der beobachteten Daten im historischen Zeitraum übereinstimmt. Der Rotationsschritt erlaubt die Anwendung von Quantil-Mapping auf Linearkombinationen der originalen Variablen. Zu beachten ist, dass das Ergebnis der Bias-Adjustierung aufgrund der zufälligen Rotation nicht deterministisch ist. Folglich weisen die Ergebnisse zweier identer Bias-Adjustierungsanwendungen geringe Unterschiede auf. Die Differenz ist für mittlere Werte gering, für Extrema kann sie jedoch einige Prozent betragen.

Da der Niederschlag über dem HYRAS-Gebiet nur schwach mit den temperaturbasierten Variablen korreliert ist ($R^2 < 0.1$), erzielte die Anwendung des multivariaten Verfahrens auf den Niederschlag in Kombination mit temperaturbasierten Parametern besonders für Extrema keine robusten Ergebnisse. Daher wurde entschieden den Niederschlag univariat mit Hilfe von QDCM zu adjustieren. Zu beachten ist ferner, dass das QDCM-Verfahren nur auf Werte bis zum 99,9. Perzentil angewendet wurde, da Niederschlagsmengen oberhalb des 99,9. Perzentils in den Referenz- und Projektionsdaten nicht ausreichend repräsentiert sind. Für Werte oberhalb des 99,9. Perzentils wurde der Adjustierungswert linear extrapoliert.

Die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit (sfcWind) wurde mittels Quantil-Mapping bias-adjustiert. Grund hierfür ist ebenfalls deren geringe Korrelation mit den übrigen Klimaparametern. Wie für den Niederschlag wurden nur Werte bis zum 99,9. Perzentil berücksichtigt, für höhere Werte wurde der Adjustierungswert linear extrapoliert. Ferner wird darauf hingewiesen, dass sowohl Extrema als auch Werte in höheren Lagen

und an der Küste im Referenzdatensatz (COSMO-REA6) einen Bias aufweisen (für hohe Windgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s), der aufgrund mangelnder Stationsdaten nicht genau identifiziert werden kann.

Untersuchungen zeigten, dass die Globalstrahlungswerte (RSDS) lediglich für längere Mittelungsperioden vertrauenswürdig sind. Daher wurde entschieden RSDS mittels linearer Skalierung basierend auf Monatsmittelwerten der HYRAS-Daten zu korrigieren.

Der Luftdruck in Meereshöhe (PSL) wurde ebenfalls mittels linearer Skalierung bias-adjustiert. Das einfache und schnelle Verfahren ist ausreichend, da PSL einen relativ geringen Wertebereich (Extrema weichen weniger als 5% vom langjährigen Mittelwert ab) abdeckt sowie relativ einfach zu modellieren ist.

Die Güte der Bias-Adjustierung sowie die Stationarität des Modellfehlers wurde – für ausgewählte RCMs mit Daten ab 1951 – bewertet. Dabei wurden die adjustierten Zeitreihen verglichen, die zum einen basierend auf der Zeitscheibe 1951–1980 und zum anderen basierend auf 1971–2000 abgeleitet wurden. Im Fall eines stationären Modellfehlers wird der anzubringende Korrekturwert unabhängig vom verwendeten *Bezugszeitraum* sein. Eine komplette Unabhängigkeit der beiden Zeiträume ist aufgrund der vorliegenden Daten (Beginn der Reihen frühestens 1951 und Ende der historischen Läufe in 2005) leider nicht möglich.

3.3.3 Regionalisierung der Klimaprojektionsdaten

Die Regionalisierung der bias-adjustierten Resultate regionaler Klimamodelle erfolgte mittels multipler linearer Regression (typische Verteilungsmuster der jeweiligen Klimavariablen dienen als Prädiktoren) sowie anschließender Interpolation der Regressionsresiduen. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass ein regionales Klimamodell grobskalige Muster der zu regionalisierenden Klimavariablen korrekt wiedergibt. Feinskalige Strukturen der jeweiligen Klimavariablen werden im Regionalisierungsverfahren durch die aus hochauflösenden Referenzdaten gewonnenen typischen Muster aufgeprägt. Die typischen Verteilungsmuster wurden durch Anwendung einer Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, kurz PCA) auf Beobachtungsdaten gewonnen. Die PCA wurde für jeden Kalendermonat einer ausreichend langen Zeitreihe (> 10 Jahre) eines hochauflösenden Referenzdatensatzes (Beobachtungs- oder Modelldatensatz in der Zielauflösung) angewendet.

Die PCA ist ein multivariates statistisches Verfahren, das häufig im Bereich der Atmosphärenwissenschaften verwendet wird (Wilks 2006). Sie erlaubt es in meteorologischen Raum-Zeit-Feldern einen Satz typischer räumlicher Muster zu finden, die den größten Teil deren Varianz beschreiben. Generell ermöglicht die PCA die große Zahl oft hoch miteinander korrelierter Variablen (redundante Information) auf deutlich weniger Variablen zu reduzieren. Die neuen Variablen stellen Linearkombinationen der originalen Variablen dar und werden derart gewählt, dass ein möglichst großer Teil der Varianz der originalen Variablen erklärt wird. Das Ziel der PCA, die Reduktion der Dimensionalität, wird erreicht, indem nur die ersten „n“ Hauptkomponenten verwendet werden.

3.3.4 DWD-Kern-Ensemble

Ausgehend von den DWD-Referenz-Ensembles v2018 für die Szenarien *Klimaschutz*, *moderat* und *Weiterwie-bisher* steht für Deutschland zu jedem RCP-Szenario ein DWD-Kern-Ensemble v2018 mit einer geringeren Anzahl von Klimaprojektionen zur Verfügung (Tabelle 3-2). Die DWD-Referenzensembles sind eine Zusammenstellung aller zu einem gegebenen RCP verfügbaren regionalen Klimaprojektionen, die technische und wissenschaftliche Mindeststandards erfüllen. Sie stellen aber keine repräsentative Stichprobe möglicher Klimaänderungen dar. Häufungen von ähnlichen Klimasignalen sind auf Ähnlichkeiten (Redundanzen) zwischen den verwendeten Klimamodellen zurückzuführen. Die Verteilung innerhalb der Referenzensembles erlaubt deshalb keine Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit von Klimaänderungen.

Die DWD-Ensemblereduktion vermindert die Redundanz der Referenzensembles, indem sehr ähnliche Projektionen aus den Ensembles entfernt werden (Dalelane et al. 2018). Sie beruht auf der Methode von Sanderson et al. (2015). Die Bandbreite der Ensembles bleibt bei der Reduktion weitestgehend erhalten.

Diese deckt mögliche zukünftige Klimaentwicklungen innerhalb eines Szenarios ab und stellt somit einen wichtigen Teil der Klimainformation (Unsicherheit) dar. Die Auswahl der Klimaprojektionen für das DWD-Kernensemble bevorzugt Klimaprojektionen mit möglichst unterschiedlichen Klimaänderungssignalen und ist kein Qualitätsmerkmal.

Um die DWD-Kernensembles für eine möglichst hohe Anzahl von Anwendungen und Sektoren sinnvoll anwendbar zu machen, wurden zu deren Erstellung eine Vielzahl von klimatologischen Parametern in regionaler und monatlicher Stratifikation sowie die in *nabe* (2021–2050) und *ferne Zukunft* (2071–2100) unterteilten Klimaänderungssignale berücksichtigt:

- Lufttemperatur
- Niederschlagssumme
- Starkniederschlag (Extrem-Index)
- Niederschlagsandauer (Persistenz-Index)
- Windgeschwindigkeit

In Abbildung 3-4 sind die Änderungssignale dieser fünf Kenngrößen unter dem RCP8.5 zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) für das DWD-Referenzensemble gegenübergestellt. Die Darstellung erfolgt dabei differenziert für den Winter und den Sommer. Die Modelle des DWD-Kernensembles (rote Kreuze in Abbildung 3-4) liegen für viele der betrachteten Parameter am Rand der Verteilung des gesamten Ensembles. Bzgl. der Lufttemperatur bleibt mindestens 90 % und bzgl. der restlichen Parameter mindestens 80 % der Bandbreite des Klimasignals im Referenzensemble erhalten. Die DWD-Kernensembles ermöglichen somit Klimafolgenabschätzungen mit einer geringen Anzahl an Klimaprojektionen bei annähernd vollständiger Erhaltung der Bandbreite.

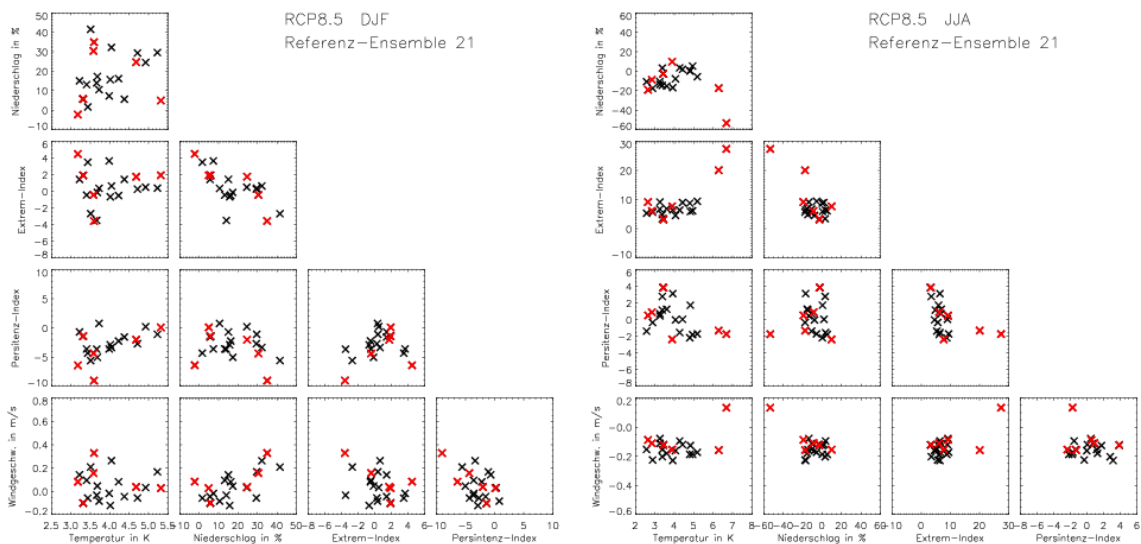


Abbildung 3-4: Vergleich der Bandbreiten der Klimaänderungssignale des DWD-Kern- und des DWD-Referenz-Ensembles für das *Weiter-wie-bisber-Szenario* (RCP8.5) zwischen dem *Referenzzeitraum* (1961–1990) und der *fernen Zukunft* (2071–2100) bzgl. der 5 berücksichtigten Klimaparameter im saisonalen Mittel für Winter (links) und Sommer (rechts). Die Kreuze stellen die modell-spezifischen Änderungssignale dar; die Projektionen des DWD-Kernensembles sind rot markiert.

3.3.5 Konvektionserlaubende Simulationen

Nach gängiger Meinung in der Klimaforschung (z. B. Prein et al. (2015)) haben hochaufgelöste, konvektionserlaubende Klimaprojektionen das Potential, Extremereignisse realistischer darzustellen. Insbesondere die explizite Berechnung von hochreichender Konvektion verspricht bessere Ergebnisse, sowohl in Bezug

auf die Niederschlagsmengen als auch hinsichtlich deren zeitlicher Verteilung. Den Projektpartnern im BMVI-Expertenetzwerk sollen daher hochaufgelöste Klimaprojektionen bereitgestellt werden, um detaillierte Aussagen zum Klimawandel in Deutschland einschließlich möglicher Änderungen im Auftreten von Extremereignissen (z. B. Sturmereignisse und Starkniederschläge) machen zu können.

Für die Erstellung eines Datensatzes hochauflösender Klimaprojektionen wird das beim DWD eingesetzte regionale Klimamodell COSMO-CLM verwendet. Das COSMO-CLM⁷ ist ein nicht-hydrostatisches regionales Klimamodell, das in fast allen wesentlichen Komponenten mit dem operationellen Wettervorhersagemodell COSMO übereinstimmt, aber für Langzeitsimulationen optimiert und seit über 10 Jahren stetig weiterentwickelt wurde. Es kann mit verschiedenen Gitterweiten von 50 km bis zu 1 km verwendet werden.

Anders als bei Simulationen grob aufgelöster globaler Klimamodelle, gilt das hydrostatische Gleichgewicht der Atmosphäre für räumliche Skalen unterhalb von 10 km nur noch bedingt. Dieses Gleichgewicht ergibt sich aus der Gravitation der Erde und dem statischen Auftrieb, der durch Dichteunterschiede in der Luft verursacht wird. Für regionale atmosphärische Klimaprojektionen mit einer konvektionserlaubenden Skala (< 3 km) müssen nicht-hydrostatische Effekte berücksichtigt werden. In diesen ist die Simulation vertikal beschleunigter Luftbewegungen, die durch hydrostatische Modelle nicht dargestellt werden können, notwendig. Um auf die Zielauflösung einer konvektionserlaubenden regionalen Klimaprojektion zu gelangen, ist in der Regel ein sogenanntes Verschachteln (Nesting) notwendig. Das heißt, es werden Zwischenschritte beim Herunterskalieren der globalen Klimaprojektionsdaten benötigt. CCLM wird über die Ränder mit globalen Modellen (GCMs) oder gröber aufgelösten Regionalmodellen (RCMs) angetrieben (Tabelle 3-2). So wird mit Hilfe des „Dynamischen Downscaling“ grob aufgelöste Information an ein engmaschigeres Gitternetz weitergegeben.

Physikalische Prozesse, die auf geringeren räumlichen Skalen im Vergleich zum Modellgitter ablaufen, (sogenannte subskalige Prozesse) werden durch Parametrisierungen angenähert berechnet. Bei Simulationen mit einer Gitterweite von mehr als 3 km sind das beispielsweise die Turbulenz und die Konvektion. Für hochaufgelöste Simulationen (Gitterweiten < 3 km) wird die Konvektionsparametrisierung (teilweise oder ganz) abgeschaltet, d.h., die Konvektion wird vom Modell explizit berechnet. Dies führt beispielsweise zu einer deutlich verbesserten Simulation kleinräumiger Extremniederschläge. Weiterhin notwendige Parametrisierungen betreffen bei den hochaufgelösten Simulationen z. B. die flache atmosphärische Konvektion, die keinen Niederschlag verursacht.

Das Modell CCLM verfügt über bis zu 50 Höhengichten, die aus geländefolgenden Koordinaten bestehen, wobei die unterste Schichtmitte in einer Höhe von etwa 10 m liegt, die oberste in etwa 22 km. Das Modell prognostiziert und diagnostiziert die verschiedensten Variablen und gibt diese in einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Stunde aus. Variablen wie die 2 m-Temperatur werden beispielsweise diagnostisch aus der untersten Modellschicht und den Bodenwerten abgeleitet. Weitere Informationen zum CCLM sind unter <http://www2.cosmo-model.org/> sowie <http://www.clm-community.eu/> zu finden.

Zur Analyse einer konvektionserlaubenden Klimaprojektion wurden die folgenden Klimasimulationen durchgeführt:

- Ein CCLM-Evaluierungslauf über den Bezugszeitraum 1971–2000, angetrieben mit Reanalysedaten (ERA-40 und ERA-Interim) sowie
- ein CCLM-Lauf über den Zeitraum 1971–2100, angetrieben mit einem 12 km EURO-CORDEX-Lauf.

Der CCLM-Lauf deckt damit sowohl den historischen Zeitraum von 1971–2000 als auch die beiden Zukunftszeitscheiben „Mitte des Jahrhunderts“ (2031–2060) und „Ende des Jahrhunderts“ (2071–2100) ab, ist jedoch transient durchgerechnet worden.

⁷ Im Folgenden wird COSMO-CLM mit CCLM abgekürzt.

Als Antrieb dient das gekoppelte Globalmodell MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate). Mit Hilfe eines Zweifach-Nestings (von 150 km MIROC5 auf 12 km und von 12 km auf 2,8 km) wird somit ein hochaufgelöster Klimaprojektionslauf für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete (COSMO-DE-plus, siehe Abbildung 3-5) zur Verfügung gestellt.

Die verfügbare zeitliche Frequenz der Ausgabe beträgt 1 Stunde. Damit werden insbesondere die Variablen Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Wind (Geschwindigkeit und Richtung), Windböen sowie Luftdruck und Globalstrahlung ausgegeben. Die Qualität und Weiterverwendbarkeit der Stundenwerte des Windes kann jedoch nicht ohne weiteres geprüft werden, da hierfür nicht die entsprechenden Beobachtungsdaten vorliegen.

Da sich aus einem einzelnen Modelllauf noch keine robusten Änderungssignale des zukünftigen Klimas ableiten lassen, wurden im Rahmen des EURO-CORDEX-Projektes mehrere Modelle (global und regional) verwendet, wie bereits in Abschnitt 3.3.1 dargelegt. Auch auf lokaler Ebene sind robuste Änderungssignale gefragt. Jedoch kann aus Zeit- und Kostengründen nicht von jedem Ensemblemitglied mit Hilfe von dynamischem Downscaling ein hochaufgelöster Modelllauf generiert werden. Eine andere Herangehensweise ist daher das statistische Downscaling. Dieses beinhaltet die Entwicklung einer empirischen Beziehung zwischen einem historischen großräumigen Atmosphärenzustand (z. B. Zirkulation) und lokalen Klimabedingungen. Damit können zukünftige großräumige Bedingungen, dargestellt von einem GCM (*predictor*), für die Projektion auf das zukünftige lokale Klima (*predictand*) verwendet werden (Trzaska und Schnarr 2014).

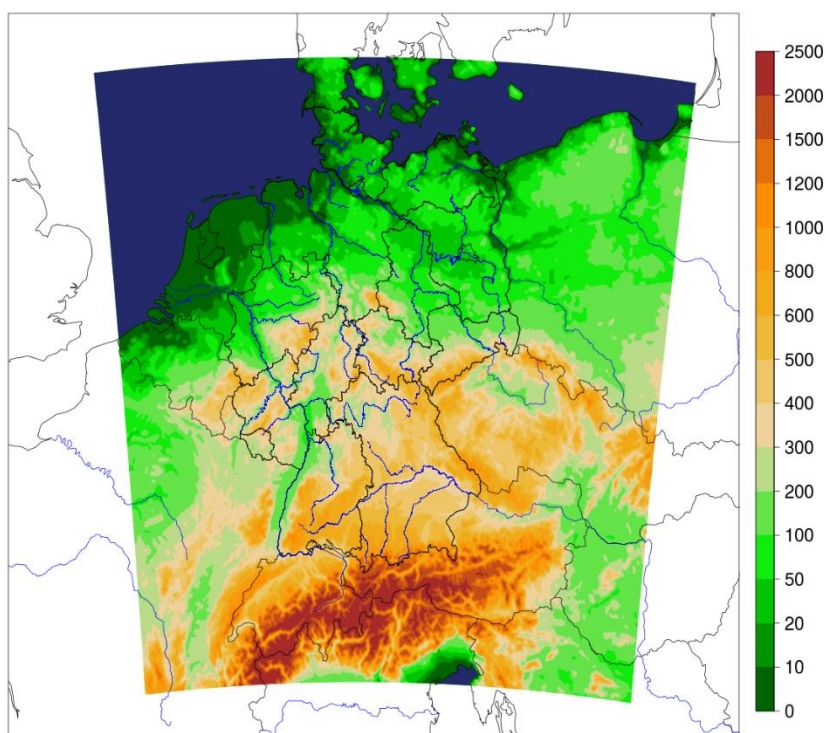


Abbildung 3-5: COSMO-DE-plus Modellgebiet.

Im BMVI-Expertennetzwerk wird ein Ansatz verfolgt, der die Vorteile beider Verfahren nutzt: zunächst wird mit Hilfe des dynamischen Downscalings ein Globalmodell auf 2,8 km verfeinert und anschließend mit statistischem Downscaling die Verfeinerung auch für die anderen Globalmodelle durchgeführt. Somit hat man die ganze Bandbreite der möglichen Klimaänderungssignale auch auf lokaler Ebene mit 2,8 km Gitterweite verfügbar. Für das statistische Downscaling wird das in Abschnitt 3.3.3 beschriebene Verfahren verwendet.

3.4 Festlegungen zur Vorgehensweise bei den Auswertungen

3.4.1 Betrachtete Zeitscheiben

Die Klimadaten werden in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1951–2015 basierend auf Beobachtungsdaten und für 1971–2100 (teilweise auch ab 1951) basierend auf Klimaprojektionsdaten aufbereitet und ausgewertet. Dabei werden für die RCM-Daten die historischen Läufe bis 2005 und ab 2006 die RCP-basierten Simulationen verwendet. Im BMVI-Expertenetzwerk werden folgende Zeitscheiben für die Auswertung der Änderungssignale des Klimamodellensembles verwendet:

- 1971–2000: *Bezugszeitraum* / Modellvalidierung
- 2031–2060: Mitte des Jahrhunderts / Mittelfristiger Planungshorizont / *nabe Zukunft*
- 2071–2100: Ende des Jahrhunderts / Langfristiger Planungshorizont / *ferne Zukunft*

Die Zeitscheibe 1971–2000 wird als Bezugszeitraum für die Berechnung der Klimaänderungssignale verwendet, da ein Teil der Klimaprojektionsdaten erst ab 1970 vorliegt und somit eine konsistente Betrachtung des Ensembles für die in KLIWAS verwendete Referenzperiode 1961–1990 nicht möglich ist. Zur Wahrung des zeitlichen Abstandes zwischen *Bezugszeitraum* und *nabe Zukunft* im Vergleich zu anderen Projekten wie KLIWAS, verschiebt sich dadurch auch die Zeitscheibe der *naben Zukunft* von 2021–2050 auf 2031–2060. Eine Verschiebung der Zeitscheibe *ferne Zukunft* ist nicht möglich, da die regionalen Klimaprojektionsdaten nur bis 2099 bzw. 2100 vorliegen. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitscheiben ist beim Vergleich mit den KLIWAS-Ergebnissen mit abweichenden Änderungssignalen zu rechnen. Soweit es die Datenlage zulässt, wird der Einfluss der Verschiebung des *Bezugszeitraumes* und der Verwendung der neuen Emissionsszenarien differenziert untersucht.

Bei der Interpretation von zeitscheibenbasierten Änderungssignalen ist des Weiteren der Einfluss der multidekadischen Klimavariabilität zu berücksichtigen, da diese die Aussagekraft der Zeitscheibenauswertungen für einige Klimaparameter beeinträchtigen kann. So weit wie möglich werden auch komplette Zeitreihen und/oder längere Zeitscheiben in die Untersuchungen aufgenommen.

3.4.2 Räumliche und zeitliche Auflösung der Daten

Die verwendeten regionalen Klimaprojektionen liegen in einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag und einer räumlichen Gitterweite von etwa 12 km vor. Um im KLIWAS Projekt entwickelte Konzepte und Methoden weiterhin anwenden zu können, werden im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks verwendete Klimaprojektionen mittels geeigneter statistischer Verfahren auf ein 5 x 5 km Gitter übertragen (basiert auf dem Gitter des HYRAS-Datensatzes; ETRS89-LCC). Grundsätzlich werden die Daten für Deutschland und die großen Flusseinzugsgebiete bereitgestellt (siehe Abbildung 3-1).

3.4.3 Vorgehen bei der Ensembleauswertung

Um robuste Änderungssignale relevanter Kennwerte unter Berücksichtigung bestehender Szenarien- und Modellunsicherheiten abzuleiten, wird basierend auf einer möglichst großen Anzahl an Klimaprojektionen, die Spannbreite möglicher zukünftiger Klimazustände abgebildet. Dabei werden verschiedene globale und regionale Modelle miteinander kombiniert. Über ein möglichst breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten wird die aus den verschiedenen Kombinationen resultierende Variabilität abgebildet und eine überproportionale Gewichtung einzelner Modelle verhindert. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das vorliegende Gelegenheitsensemble (*Ensemble of opportunity*) nur einen Ausschnitt der möglichen Kombinationen darstellt und somit eventuell nicht die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklungspfade abdeckt. Gemeinsamkeiten einzelner Modelle (Modellkomponenten, Parametrisierungen) können zudem die Charakteristika des Ensembles bezüglich einzelner Klimaparameter oder Regionen in eine Richtung ziehen und so eine ausgewogene Bewertung erschweren.

Im Modellierungsprozess können nie alle Einflüsse und Spannbreiten möglicher Klimaänderungen abgedeckt werden. Zudem können sich in der Modellierung getroffene Annahmen als unzutreffend bzw. als physikalisch nicht plausibel (z. B. Turbulenz- oder Konvektionsparametrisierung) herausstellen. Die resultierende Bandbreite klimatischer Änderungen wird daher als eine Teilmenge der durch das Ensemble repräsentierten Änderungen verstanden. Hier wird das 15. Perzentil als Untergrenze und das 85. Perzentil als Obergrenze möglicher Änderungen verwendet. Einerseits minimiert dies die Nutzung unwahrscheinlicher Klimaprojektionen und andererseits wird weiterhin eine große Bandbreite (70 Prozent) der durch das Ensemble abgedeckten klimatischen Änderungen betrachtet. Für die Auswertung des definierten Ensembles von Klimaprojektionen werden die Änderungssignale für einen „mittelfristigen“ (2031–2060) und einen „langfristigen“ (2071–2100) Planungshorizont, jeweils in Bezug zur *Bezugszeitraum* 1971–2000, analysiert und in Kartendarstellungen für unterschiedliche Perzentile visualisiert.

Die statistische Auswertung des Ensembles erfolgt nach RCP-Szenarien getrennt. Sie liefert eine Abschätzung der Bandbreite künftig möglicher Änderungen relevanter Klimagrößen. Dies bildet eine wichtige Grundlage für die Bewertung von Klima- und Impaktmodellen hinsichtlich der Notwendigkeit und Wirksamkeit möglicher Anpassungsmaßnahmen zur Stärkung der Resilienz der Verkehrsinfrastruktur.

3.4.4 Betrachtete Klimavariablen und Kennwerte

Für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels und von Extremwetterereignissen auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur in Deutschland werden verschiedene Klimavariablen benötigt, aus denen dann Kennwerte auf monatlicher, jahreszeitlicher und/oder jährlicher Basis berechnet werden. Der Katalog der im BMVI-Expertenetzwerk betrachteten atmosphärischen Variablen umfasst die Tages- und Monatswerte von Mitteltemperatur, Temperaturextremen, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, relativer Feuchte und Luftdruck. Zusätzlich werden noch der Wasserstand in Nord- und Ostsee und an der Küste, die Wellenhöhen und -richtungen und der Windstau untersucht.

Für den Zeitraum 1951–2015 liegen Referenzfelder der Variablen aus täglichen Beobachtungsdaten in einer räumlichen Auflösung von 5 km x 5 km vor, für den Zeitraum 1971–2100 (zum Teil auch früherer Beginn und/oder nur bis 2099) liegen die Variablen für RCM-Simulationen vor. Die Felder von Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen wurden dabei in der gleichen zeitlichen und räumlichen Auflösung erstellt. Eine Validierung und ggf. Korrektur (siehe Abschnitt 3.3.4) der Klimamodelldaten mittels der Referenzdatensätze erfolgt für den Zeitraum 1971–2000.

Für die Facharbeiten im Themenfeld 1 werden vielfältige Klimaindizes benötigt, die auf stündlichen bis monatlichen Klimadaten beruhen. Nicht alle davon können gleichermaßen robust aus Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten abgeleitet werden. Dies betrifft insbesondere Indizes, die auf stündlichen Daten beruhen sowie solche, die sehr hohe Schwellenwerte und damit sehr seltene Ereignisse betreffen. Im Projekt werden generell in täglicher Auflösung vorliegende und auf 5 km herunterskalierte RCM-Daten für die Ableitung beobachteter und durch das Modellensemble für die Zukunft projizierter Veränderungen verwendet. Zusätzlich werden auch die Ergebnisse hochauflösender Klimasimulationen einbezogen, welche potentiell die Ableitung von auf stündlichen Daten beruhenden Kennwerten erlauben und in der Lage sind das Verhalten kleinräumiger Extreme realistischer zu simulieren (siehe Abschnitt 3.3.5). Eine Evaluierung und Adjustierung dieser (subtäglichen) Daten ist allerdings nicht in gleicher Form wie für das DWD-Referenzensemble möglich, da für die vorliegende zeitliche Auflösung keine entsprechenden Referenzdatensätze vorliegen.

Die Liste der innerhalb des Themenfeldes 1 für die Beobachtungen und Klimaprojektionen berechneten Klimaindizes ist in Anlage 5 zusammengestellt. Diese Liste wurde im Projektverlauf im Dialog zwischen den Partnerbehörden fortlaufend aktualisiert. Viele der seitens des BMVI-Expertenetzwerks berechneten Klimaindizes werden auch in der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 (KWVA-2021) des Bundes verwendet.

4 Untersuchungen zur Nord- und Ostsee und deren Küsten

*Anette Ganske, Nils Schade, Jens Möller, Corinna Jensen, Kerstin Jochimsen
(Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie)*

4.1 Einleitung

Die Küstengebiete sind als Siedlungs- und Wirtschaftsraum und mit ihrer Verkehrsinfrastruktur aus Wasserstraßen, Bahn- und Straßenverbindungen den Wetterextremen und dem Klimawandel im besonderen Maße ausgesetzt. Seegang und Sturmfluten in Verbindung mit einem steigenden Meeresspiegel können die Stabilität der Küsten beeinträchtigen. Die Risiken für die Bewohnbarkeit sowie die (land)wirtschaftliche und verkehrliche Nutzbarkeit der Küstengebiete, die jetzt schon teilweise unter Meeresspiegel liegen, drohen zu steigen. Zudem können Küstengebiete nicht nur durch Sturmfluten bzw. Sturmhochwasser überflutet werden: Die Entwässerung von Flüssen, die in die Nord- oder Ostsee münden, kann durch hohe Wasserstände von Nord- und Ostsee behindert werden. So führen seit einiger Zeit starke und/oder lang anhaltende Niederschläge vermehrt zu Überschwemmungen von landwirtschaftlich genutzten Gebieten, beispielsweise in den Auen der Eider, wenn bei einem erhöhten Wasserstand vor der Küste die Entwässerung über Nord-Ostsee-Kanal (NOK) und Eider nur eingeschränkt möglich ist. Deshalb stehen sowohl ein sicheres Leben in der Küstenzone als auch die Wirtschaft und die Verkehrsinfrastruktur des Bundes in dieser Region unter dem Druck, sich an veränderte klimatische Bedingungen des 21. Jahrhunderts anpassen zu müssen.

Wie auch im Binnenbereich werden im Fokusgebiet *Küsten* Mess- und Klimamodelldaten ausgewertet, um diese veränderten Bedingungen in der *nahen* und *fernen Zukunft* zu untersuchen. In Küstennähe und über See sind die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre dabei besonders wichtig:

- Bei starkem auflandigem Wind können Sturmfluten entstehen, die zu Überflutungen führen. Die Höhe einer Sturmflut hängt jedoch nicht nur von der Stärke des Windes, sondern auch von der Windrichtung, von der Windlauflänge, von der Gezeitenphase und vom Windstau vor den Küsten ab.
- Wellen führen neben dem mittleren Wasserstand zu einer zusätzlichen Belastung von Küstenbauwerken und gefährden den Schiffsverkehr.
- Bei auflandigem Wind wird der Wasserstand insbesondere in den großen Ästuaren erhöht. Im Elbästuar kann dies auch dazu führen, dass beispielsweise der NOK nicht mehr entwässert werden kann. Bei zeitgleich auftretenden Niederschlägen, die wiederum zu erhöhten Abflüssen führen können, könnte der Wasserstand des NOK über eine kritische Höhe hinaus anwachsen, sodass der Schiffsverkehr verringert oder im Extremfall sogar eingestellt werden muss (siehe Kapitel 4.5).

Man benötigt also konsistente Projektionen für die Atmosphäre und den Ozean in einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung, damit diese Wechselwirkungen adäquat untersucht werden können. Dies wird mit gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen realisiert (siehe Kapitel 4.3), die im Rahmen des Vorgängerprogramms KLIWAS entwickelt wurden. Damit stehen neben Informationen zum Luftdruck, Wind und Niederschlag auch Informationen zum Meeresspiegelanstieg zur Verfügung (siehe Kapitel 4.4). Zuerst müssen geeignete Modelle identifiziert und validiert werden, um sicher zu stellen, dass die Ergebnisse und Analysen vertrauenswürdig sind. Hierfür werden verschiedene Referenzdaten verwendet, die im Kapitel 4.2 beschrieben werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen auch dazu, Randwerte für die Simulationen von Tidedynamik und Sedimenttransporten auszuwählen und bereit zu stellen. Ergebnisse der Winduntersuchungen werden im Schwerpunkt *Sturmgefahren* verwendet. Die Ergebnisse aller Analysen an der Küste sind Teil der Untersuchungen im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* und liefern Erkenntnisse, die auch für die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS), die KWVA 2021 und den Aktionsplan Anpassung III verwendet werden.

4.2 Referenzdaten

Um klimabedingte Änderungen bewerten zu können, sind Referenzdaten notwendig, die einen Zeitraum abdecken, der eine Identifikation des Klimasignals gegenüber der natürlichen Variabilität der zu bewertenden Parameter zulässt. Für die Untersuchungen im Themenbereich „Küste“ werden sowohl ozeanographische als auch meteorologische Referenzdaten benötigt, die möglichst auf korrespondierenden Gittern vorliegen sollten. Dabei gibt es über See generell deutlich weniger meteorologische Messungen als über Land, da es hier kein weit verzweigtes Netz aus festen Messstationen gibt. So stammen die Beobachtungen über See von Handels-, Feuer- und Forschungsschiffen, Bojen und wenigen feststehenden Plattformen, wie z. B. FINO1, 2 und 3. Die meteorologischen Daten werden u. a. im maritimen Archiv des DWD (z. B. Schade et al. (2013)) gesammelt und einer routinemäßigen Qualitätskontrolle unterzogen. Zusätzlich werden Messungen an den Küstenstationen zum Vergleich herangezogen (Abbildung 4-1). Da es sich bei allen Daten um Punktmessungen handelt, die in der Regel zeitlich und räumlich unregelmäßig verteilt sind, sind diese in ihrer ursprünglichen Form nur bedingt zur Validation von Modelldaten geeignet.

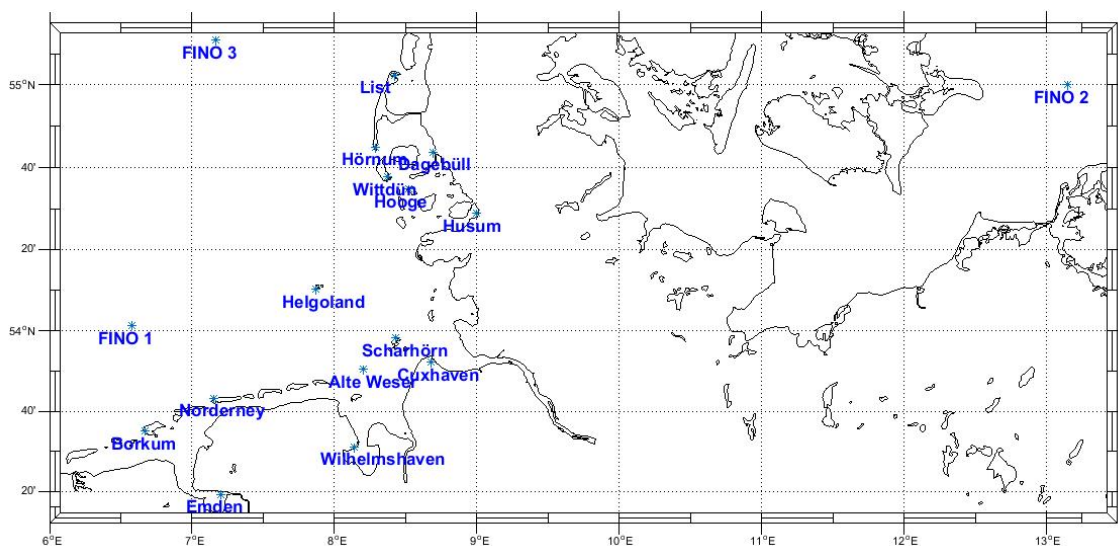


Abbildung 4-1: Auswahl der genutzten Standorte der Pegel- und Windstationen an der Deutschen Küste.

Für die Validation der räumlichen Strukturen von z. B. Luftdruck-, Wind- und Niederschlagsfeldern benötigt man Daten, die räumlich und zeitlich möglichst hoch aufgelöst auf einem festen Gitter vorliegen. Aus diesem Grund wurde für die Nord- und Ostsee eine Klimatologie auf Basis von ozeanographischen und meteorologischen Beobachtungsdaten (Kapitel 4.2.1) erstellt. Eine weitere Möglichkeit zur Validation von Modelldaten besteht in der Verwendung von Reanalysen (Kapitel 4.2.2). Zusätzlich könnten zur Validation bestimmter Parameter auch Satelliten- und/oder Radardaten verwendet werden. Zurzeit wird eine radargestützte Niederschlagsklimatologie entwickelt, mit der zukünftig Niederschlagsdaten in Küstennähe validiert werden können.

4.2.1 Nord- und Ostseeklimatologie

Die Nord- und Ostseeklimatologie (BNSC) ist eine Erweiterung der in KLIWAS entwickelten Nordseeklimatologie und entstand in Zusammenarbeit zwischen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Integrated Climate Data Center (ICDC) (Hinrichs und Jahnke-Bornemann (2017); Sadikni et al. (2018)). Die BNSC basiert auf atmosphärischen und ozeanographischen Messdaten und wird auf einem korrespondierenden regelmäßigen Gitter (Atmosphäre: $1^\circ \times 1^\circ$, Ozean: $0,25^\circ \times 0,25^\circ$) bereitgestellt. Bis jetzt wurden für die Atmosphäre jeweils bodennahe Felder für Lufttemperatur, Taupunkt, und Luftdruck berechnet. Für den Ozean gibt es Felder in mehreren Tiefenstufen jeweils für Wassertemperatur und

Salzgehalt. Alle Daten der BSNC findet man auf der Homepage des ICDC: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1.html>. Die Daten liegen in Form von Feldern von Monatsmittelwerten in den jeweiligen Gitterboxen für den Zeitraum 1950–2015 vor. Zusätzlich gibt es Felder mit klimatologischen Mittelwerten für die Zeiträume 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1981–2010 sowie die Möglichkeit, zusätzliche Zeiträume berechnen zu lassen.

4.2.2 Verwendete Reanalysen

Reanalysen werden verwendet, um die Ergebnisse der Klimamodelle zu validieren und dienen als Randwerte für die Validationsläufe der regionalen Klimamodelle. Deshalb werden verschiedene Reanalysen auch untereinander verglichen, um z. B. den Einfluss einer höheren räumlichen Auflösung auf die Ergebnisse an der Küste oder die Extremwerte zu untersuchen. Folgenden Reanalysen werden verwendet:

COSMO-REA6: Die regionale Reanalyse COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015) wurde am Hans-Ertel-Zentrum des DWD berechnet und basiert auf dem COSMO-EU-Modell mit einer Gitterweite von 6 km x 6 km mit Randbedingungen aus der globalen ERA-Interim Reanalyse. Die Wind-, Niederschlags- und Luftdruckfelder wurden stündlich für den Zeitraum 1995–2015 ausgegeben.

ERA-40: ERA-40 (Uppala et al. 2005) ist eine ECMWF Reanalyse für die Jahre von 1957–2002 mit einer räumlichen Auflösung von etwa 125 km. Die Wind-, Niederschlags- und Luftdruckfelder wurden 6-stündlich ausgegeben.

ERA-Interim: Der Nachfolger der ERA-40 ist die ERA-Interim Reanalyse (Berrisford et al. 2009). ERA-Interim wurde mit einer räumlichen Auflösung von etwa 79 km erstellt und umspannt den Zeitraum von 1979 bis heute. Die Wind-, Niederschlags- und Luftdruckfelder wurden 6-stündlich ausgegeben.

4.2.3 Validierte Parameter

Zurzeit werden im Küstenschwerpunkt nur die folgenden Parameter validiert, die für die Untersuchungen zum NOK, zu den Sturmuntersuchungen und den Analysen zu Überflutungen im Küstenbereich gebraucht werden:

Luftdruck: Der Luftdruck der BSNC wird mit Reanalyse- und Stationsdaten verglichen. Hierfür wurde die Reanalyse gewählt, die auch den Antrieb für die Validationsläufe der regional gekoppelten Klimamodelle liefert (ERA-40). Außerdem werden ERA-Interim und die regionale Reanalyse COSMO-REA6 in die Untersuchungen mit einbezogen. Diese Reanalysen werden jeweils für den mit dem jeweiligen Modell überschneidenden Zeitraum (1979–2001 bzw. 1995–2015) betrachtet. Räumlich werden alle Referenzdaten über dem Gebiet der Nord- und Ostsee untersucht (-15° W bis 30° W, 47° N bis 66° N), um möglichst alle Werte der BSNC verwenden zu können. Vor der Analyse wird stets auf das gröbere Gitter interpoliert. Für jede Gitterbox werden Jahres-, saisonales und Monatsmittel sowie das Mittel über den gesamten Zeitraum berechnet. Analysiert werden auch die Häufigkeitsverteilungen über dem gesamten Gebiet und die Korrelationen zwischen den Monatsmittel-Zeitreihen an den einzelnen Gitterpunkten.

Für kleinräumigere Veränderungen werden die Daten in Teilgebieten untersucht. Hierfür wurde die Nordsee in vier Teilgebiete und die Ostsee in drei Teilgebiete aufgeteilt (Abbildung 4-2). In den Teilgebieten werden Zeitreihen von räumlichen Mittelwerten über alle Werte auf See berechnet und damit die Unterschiede in den Jahresgängen und Häufigkeitsverteilungen analysiert. Ferner werden ausgewählte monatliche Zeitreihen von Stationsdaten entlang der Küsten jeweils den monatlichen Zeitreihen der den Stationen nächstgelegenen Gitterpunkte aus der Klimatologie und den Reanalysen gegenübergestellt (Abbildung 4-3).

Wind (10 m Höhe): Windmessungen an den Küstenstationen oder an festen Stationen auf See werden verwendet, um Modellergebnisse für bestimmte Küstenabschnitte zu validieren. Die Ergebnisse der Modelle an den korrespondierenden Gitterpunkten werden mit den Windzeitreihen der Stationen Hallig Hooge, Borkum und Scharhörn verglichen (Abbildung 4-1). Die Windfelder über See aus den Klimamodellen wer-

den nicht mit Messungen, sondern mit Reanalysen verglichen, da nur sehr wenige Messungen auf See vorhanden sind. Zudem sind die Windgeschwindigkeiten in Küstennähe räumlich sehr variabel, sodass es problematisch ist, die Messungen an einzelnen Orten mit den räumlichen Mittelwerten aus Modellen mit Gitterweiten zwischen rund 10 km und 20 km zu vergleichen. Windfelder aus Satellitendaten (ASCAT, HOAPS) können die räumlichen Muster der Windfelder auf See gut wiedergeben. Da Windfelder mit Satelliten nur über Wasser beobachtet werden und eine grobe räumliche Auflösung haben, gibt es daraus keine Informationen in Küstennähe, siehe z. B. Winterfeldt et al. (2010) und Hasager et al. (2015). Zudem liefern sie nur zeitliche Mittelwerte und somit keine Informationen über extreme Windgeschwindigkeiten.

Für die Auswertungen im BMVI-Expertennetzwerk werden die Ergebnisse der räumlich hoch aufgelösten Reanalyse COSMO-REA6 als Referenzdaten für die Windfelder in 10 m Höhe über See verwendet. Diese Reanalyse ist wegen ihrer hohen räumlichen Auflösung für die Vergleiche besonders gut geeignet. Borsche et al. (2016) haben bei einem Vergleich von COSMO-REA6 mit Messdaten gezeigt, dass die Windfelder von COSMO-REA6 eine gute Approximation für die Windfelder auf der Nordsee sind. Zudem wurde durch einen Vergleich von Windmessungen an den Forschungsplattformen FINO1-3 mit den Windwerten aus COSMO-REA6 an einzelnen Gitterpunkten gezeigt (Fery et al. 2017), dass auch die extremen Windgeschwindigkeiten von Stürmen bei COSMO-REA6 gut mit den Messungen übereinstimmen.

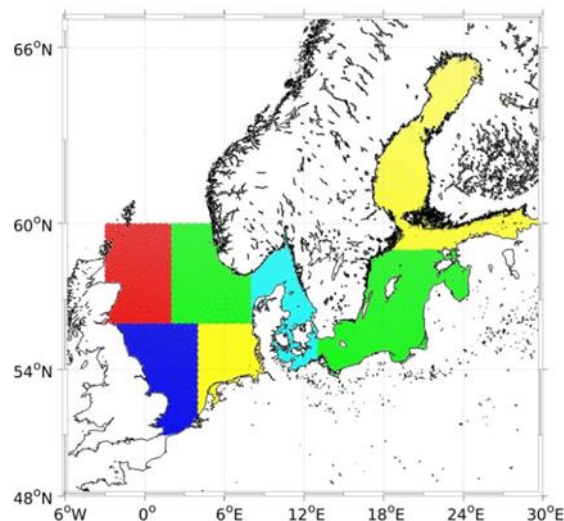


Abbildung 4-2: Teilgebiete über Nord- und Ostsee, die zur Validierung von Niederschlags-, Luftdruck- und Winddaten verwendet wurden.

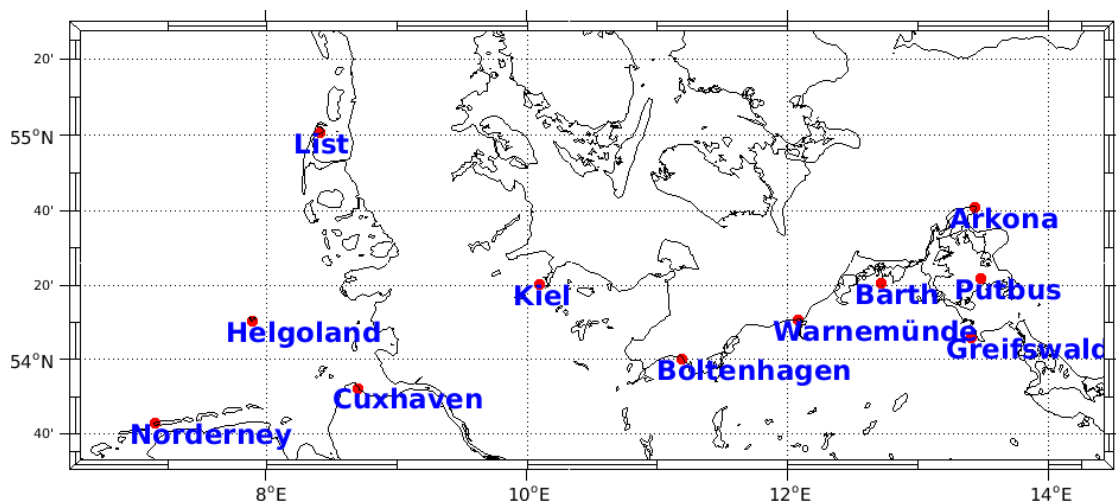


Abbildung 4-3: Küstenstationen, deren Messungen zur Validierung der Luftdruckdaten verwendet werden.

Die 10 m-Winddaten von COSMO-REA6 liegen für die Jahre von 1995–2015 in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vor. Da die Datensätze der Jahre 1996, 1998 und 1999 lückenhaft sind, wurden nur Daten aus den Jahren 1995, 1997, 2000 und 2001 für die Vergleiche mit den Evaluierungsläufen der Klimamodelle verwendet.

Niederschlag: Die Niederschlagsfelder über See werden analog zum Wind mit Reanalysen verglichen, da in-situ Messungen (Beobachtungen) über See nicht vorhanden sind. Ableitungen aus Satellitendaten sind wenig sinnvoll, da nicht der Niederschlag selbst, sondern das niederschlagsfähige Wasser in der Atmosphäre bzw. den Wolken bestimmt wird. Dieser Parameter ist in fast allen Modellen bisher parametrisiert, da die Auflösung der Modelle nicht ausreicht, um z. B. Konvektion in Gewitterzellen aufzulösen. Zudem wird die Qualität des abgeleiteten Niederschlags aus Satellitendaten derzeit nicht als aussagekräftig angesehen (pers. Kommunikation Thomas Einfalt, Einfalt & Hydrotech, Lübeck). Eine beim DWD entstandene Radarklimatologie zum Niederschlag in Küstennähe könnte in Zukunft als Referenz dienen und wird in Phase II des BMVI-Expertenetzwerks daraufhin untersucht.

Für die Auswertungen in der Phase I des BMVI-Expertenetzwerks werden darum auch für den Niederschlag die Ergebnisse der räumlich hoch aufgelösten Reanalyse COSMO-REA6 als Referenzdaten über See verwendet. Bollmeyer et al. (2015) haben bei einem Vergleich von COSMO-REA6 mit Messdaten und anderen Reanalysen gezeigt, dass die Niederschlagsfelder von COSMO-REA6 deutlich besser mit den Messungen über Land übereinstimmen und auch Tagesgang und Extreme besser abbilden als globale Reanalysen. Da über See keine weiteren Referenzdaten vorliegen (s. o.), muss im Folgenden angenommen werden, dass COSMO-REA6 auch hier besser geeignet ist als globale Reanalysen. Über Land kann u. a. auf die REGNIE Daten des DWD (z. B. Rauthe et al. (2013)) zurückgegriffen werden. Sie liegen auf einem räumlichen Gitter der Auflösung 1 km x 1 km deutschlandweit im Zeitraum von 1961 bis heute als Tagessummen vor.

Die Niederschlagsdaten von COSMO-REA6 liegen für die Jahre von 1997–2014 in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde als Gesamtniederschlag (d. h. als Summe des skaligen & konvektiven Niederschlags) vor. Für die Evaluierung werden Tagessummen des Gesamtniederschlags der Jahre 1997–2000 (ERA-40, MPI-OM/REMO, NEMO-RCA4) sowie 1997–2008 (ERA-Interim, REMO) verwendet, da für die weiteren Auswertungen im Schwerpunkt *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) auf Tagessummen basierende Indizes genutzt werden.

Wasserstand: Langjährige Zeitreihen des Wasserstands stehen am BSH in Form von Stationsdaten der einzelnen Pegelstationen zur Verfügung. Diese Zeitreihen reichen mindestens bis 1997, teilweise aber sogar bis 1843 (für Cuxhaven) zurück und sind daher mit wenigen Ausnahmen für die Analyse langjähriger Trends bzw. auch für extremwertstatistische Untersuchungen geeignet. In der Abbildung 4-1 sind die bisher genutzten Standorte der Pegelstationen (und Windstationen) an der Deutschen Küste gezeigt.

Während die ältesten Pegeldata ab 1843 nur die Scheitelwerte bei Hochwasser (HW) bzw. Niedrigwasser (NW) angeben, sind etwa ab 1918 auch stündliche Wasserstandmessungen und spätestens ab 1997 sogar Minutenwerte vorhanden. Ein Überblick über die Länge und zeitliche Auflösung der einzelnen Zeitreihen ist im Bericht des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen Projekt AMSeL („Ermittlung des MSL (Mean Sea Level) und Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen an der deutschen Nordseeküste (Trenduntersuchungen küstengefährdeter Tideketten und Verweildauern): MSL + Trends Nordsee“) (Jensen et al. 2011) zu finden.

4.3 Klimamodell-Auswertungen an der Küste und über See

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der globalen gekoppelten Klimamodelle sind räumlich zu grob, um die oben genannten Prozesse in der Nord- und Ostsee zu untersuchen. Deshalb müssen die Ergebnisse von regional gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen (OARCM) verwendet werden. Diese können entweder

aus regional gekoppelten Komponenten (z. B. MPI-OM/REMO) bestehen oder aus Regionalmodellen, die miteinander gekoppelt sind (z. B. NEMO/RCA4).

4.3.1 Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe

Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht über die Klimamodelle, die für Auswertungen im Untersuchungsgebiet verwendet werden. Dem BMVI-Expertennetzwerk stehen zurzeit nur die Ergebnisse der beiden gekoppelten Modelle MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 zur Verfügung. Mit diesem kleinen Ensemble lassen sich Prozessstudien, Studien zur internen Variabilität und zum Einfluss des antreibenden Globalmodells durchführen. Die geringe Größe des Ensembles lässt jedoch keine genauen Rückschlüsse auf die Bandbreite der möglichen zukünftigen Änderungen der untersuchten Variablen zu. Eine Erweiterung des Ensembles für die Zukunft ist geplant.

Tabelle 4-1: Übersicht über die verwendeten gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Klimamodelle und die atmosphärischen RCMs und ihren Globalmodellantrieb pro RCP-Szenario, ihre Herkunft (C: EURO-CORDEX, K: KLIWAS, R!: RACE!, S: SMHI).

RCM oder OARCM GCM	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO
MPI-ESM_LR		S	C	R!	S	C	R!	K	C
EC-EARTH		S			S			S	
GFDL-ESM2M		S			S			S	
HadGEM2-ES		S			S			S	
IPSL-CM5A					S			S	

Neben den Ergebnissen der gekoppelten Modelle werden für die Atmosphäre die Windfelder der beiden räumlich höher aufgelösten RCMs REMO und COSMO-CLM (siehe Kapitel 3.3.5) untersucht. Schaaf und Feser (2018) haben gezeigt, dass bei den Simulationen der 10 m Windgeschwindigkeiten während Stürmen die Ergebnisse von COSMO-CLM in einer Version mit 2.8 km Gitterweite besser mit den Messungen übereinstimmen als die der CLM-Version mit 24 km Gitterweite. Da es von den gekoppelten Modellen keine Simulationen mit verschiedenen räumlichen Auflösungen gibt, soll durch zusätzliche Vergleiche der Ergebnisse der räumlich gröber aufgelösten gekoppelten mit denen der räumlich hochaufgelösten ungekoppelten Modelle der Effekt einer erhöhten Auflösung auf die Windfelder an der Küste qualitativ abgeschätzt werden. Von allen im BMVI-Expertennetzwerk verwendeten Modellen werden der Wind in 10 m Höhe und der Luftdruck auf Meeressniveau jeweils in stündlicher Auflösung analysiert, sowie die Tagesmittel des Niederschlags. Zusätzlich wird aus den Ergebnissen der gekoppelten Modelle die Höhe des Meeresspiegels in stündlicher Auflösung ausgewertet.

Ungekoppeltes REMO: Das regionale Klimamodell REMO (Jacob und Podzun 1997) ist ein dreidimensionales atmosphärisches Zirkulationsmodell, das seine Randbedingungen aus den Ergebnissen eines globalen Klimamodells bekommt. Hierfür werden im BMVI-Expertennetzwerk sowohl für die Auswertungen im Binnenland als auch an der Küste und über See die REMO-Ergebnisse aus dem EURO-Cordex Projekt verwendet, die mit einer Gitterweite von 0.11° (etwa 12 km) und Randbedingungen aus dem Globalmodell MPI-ESM-LR berechnet wurden.

MPI-OM/REMO: Für das Klimamodell MPI-OM/REMO des MPI Hamburg wurde das regionale Atmosphärenmodell REMO mit dem globalen Ozeanmodell MPI-OM gekoppelt (Elizalde et al. (2014), Mathis et al. (2019)); siehe Abbildung 4-4). Die atmosphärischen Randdaten von REMO wurden mit dem Globalmodell MPI-ESM-HR erstellt. Unter Verwendung dieser gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Modelle wurden innerhalb des BMBF-Projekts RACE! je drei Läufe für die RCPs 4.5 und 8.5 gerechnet, die auch im BMVI-Expertenetzwerk verwendet werden. Die Gitterweite von REMO beträgt 0.22° (etwa 24 km). MPI-OM hat in der Nordsee Gitterweiten zwischen 5 km und 13 km.

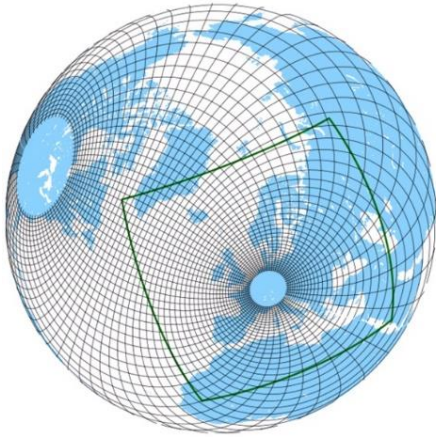


Abbildung 4-4: Gitter des globalen Ozeanmodells MPI-OM und Grenzen des Gebiets des angekoppelten Atmosphärenmodells REMO (grüne Linie). Es wurden nicht alle Gitterlinien des MPI-OM dargestellt (aus: Elizalde et al. (2014)).

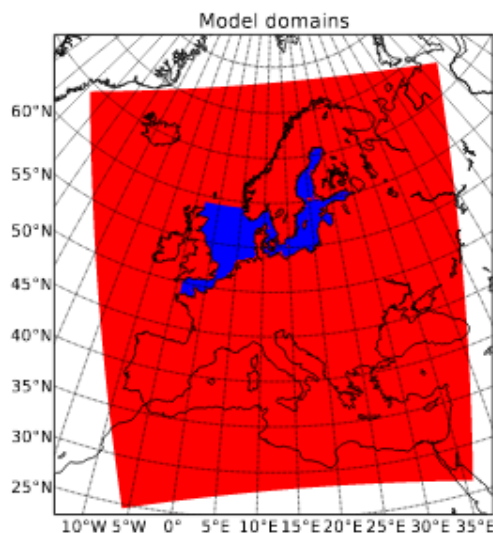


Abbildung 4-5: Modellgebiete von RCA4 (rot) und NEMO (blau) des gekoppelten OARCMs NEMO/RCA4 (aus: Dieterich et al. (2013)).

NEMO/RCA4: Für das OARCM NEMO/RCA4 des SMHI (schwedisches meteorologisches und hydrologisches Institut (Dieterich et al. 2013) wurde das regionale Ozeanmodell NEMO an das regionale Atmosphärenmodell RCA4 angekoppelt (Abbildung 4-5). Beide Modelle bekommen an ihren lateralen Rändern die Werte eines global gekoppelten Modelles. Für die drei Szenarien *Klimaschutz*, *moderat* und *Weiter-wie-bisher* stehen jeweils mehrere Läufe mit verschiedenen Globalmodellantrieben zur Verfügung. Die Gitterweite des Atmosphärenmodells RCA4 beträgt 0.11° (etwa 12 km). Das Ozeanmodell NEMO hat eine Gitterweite von 0.03° (2 sm, etwa 3,7 km).

4.3.2 Vorgehen bei der Modellauswertung

Bei der Modellauswertung werden die gleichen Parameter ausgewertet, die auch validiert wurden. Eine Ausnahme davon bildet der Luftdruck, der zwar validiert wird, von dem aber keine Projektionen direkt ausgewertet werden. Vielmehr dient der Luftdruck als Eingangsdatensatz zur Wetterlagenanalyse.

Luftdruck

Die Verteilung des Luftdrucks bestimmt die Wetterlagen und damit die Wind- und Niederschlagsfelder. Die Validierung des Luftdruckes der Validationsläufe der regional gekoppelten Klimamodelle wird mit der antreibenden Reanalyse ERA-40 sowie der Nord- und Ostseeklimatologie BNSC (s. Abschnitt 4.2.1) und der regionalen Reanalyse COSMOS-REA6 (s. Abschnitt 4.2.2) vorgenommen. Die Monatsmittelwerte der Daten werden jeweils mit den Monatsmittelwerten der Referenzdaten für zwei Zeiträume (1961–2001 bzw. 1995–2001) verglichen. Zeitliche Mittel über den gesamten Zeitraum und die Jahreszeiten sowie Häufigkeitsverteilungen und Korrelationen der Monatsmittel-Zeitreihen an den einzelnen Gitterpunkten werden betrachtet. Mittlere Jahrgänge werden als Flächenmittel über dem gesamten Gebiet betrachtet. Vor den Vergleichen wird stets auf das gröbere Gitter interpoliert.

Analysiert werden auch die Häufigkeitsverteilungen der Monatsmittel und mittlere Jahrgänge der Flächenmittel in einzelnen Teilgebieten (s. Abbildung 4-2). Außerdem werden ausgewählte monatliche Zeitreihen von Stationsdaten entlang der Küsten (s. Abbildung 4-3) jeweils mit monatlichen Zeitreihen der Validationsläufe der Modelle am nächstgelegenen Gitterpunkt verglichen.

Zur Berechnung der Wetterlagenklassen (Lamb, 1950) werden Tagesmittel verwendet. Als Eingangsdaten dienen hierfür die Luftdruck Tagesmittel der Modelle an 16 Punkten über dem Gebiet.

Wind

Der Wind in 10 m Höhe beeinflusst den Wasserstand auf See, die Wellenhöhen und -richtungen sowie die Strömungen. Für den Wasserstand an der Küste macht es einen großen Unterschied, ob der Wind auf- oder ablandig ist. Deshalb werden sowohl die Windgeschwindigkeiten als auch die Windrichtungen z. T. einzeln analysiert, aber auch ihr Zusammenwirken. Hierfür ist die Berechnung des effektiven Windes geeignet. Dabei ist die effektive Windrichtung diejenige, bei der die Wirkung des Windes auf den Wasserstand am stärksten ist. Die effektive Windgeschwindigkeit ist die orthogonale Projektion des gemessenen Windes auf die effektive Windrichtung.

Untersuchung an Küstenabschnitten – Berechnung des effektiven Windes: Die effektive Windrichtung wurde von Müller-Navarra und Giese (1999) anhand einer Regressionsbeziehung der beobachteten Wasserstanddaten aus den gleichzeitig beobachteten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen bestimmt. Die effektiven Windrichtungen hängen vom Küstenabschnitt ab, unterscheiden sich aber nur wenig an der Ostfriesischen und der Nordfriesischen Küste (Tabelle 4-2). Diese Methode wurde bereits in mehreren Projekten verwendet, siehe z. B. Koziar und Renner (2005) und Ganske et al. (2018).

Tabelle 4-2: Effektive Windrichtung für einzelne Küstenabschnitte.

Küstenabschnitt	Effektive Windrichtung
Cuxhaven	295°
Ostfriesland	315°
Nordfriesland	295°

Untersuchungen der räumlichen Strukturen: Zum Vergleich der räumlichen Strukturen der Windfelder werden zeitliche Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten und -richtungen an jedem Modellgitterpunkt im ganzen Nord- und Ostseegebiet berechnet. Für die Berechnung der Differenzen zwischen einem Klimamodell und COSMO-REA6 werden die Winddaten der Reanalyse auf das gröbere Gitter des Klimamodells linear interpoliert.

Untersuchungen des zeitlichen Verhaltens: Die zeitlichen Änderungen der Windgeschwindigkeiten und -richtungen in der Nord- und Ostsee werden mit räumlichen Mittelwerten untersucht, die für die in Abbildung 4-2 gezeigten Teilgebiete bestimmt wurden. In jedem Gebiet wird für alle Gitterpunkte über See für jeden Zeitschritt der Mittelwert über alle Windgeschwindigkeiten und über alle Windkomponenten berechnet.

Untersuchungen der Windgeschwindigkeiten: Aus den Zeitreihen der räumlich gemittelten Windgeschwindigkeiten werden in jedem Gebiet Häufigkeitsverteilungen aus allen Werten innerhalb eines Jahres bestimmt. Dafür werden Windgeschwindigkeiten in Klassen mit einer Breite von 1 m/s eingeteilt und die relativen Häufigkeiten der Werte pro Klasse bestimmt.

Die Nullhypothese, dass zwei Zeitreihen zu der gleichen Verteilung gehören, wird mit dem Kolmogorov-Smirnov-Verfahren mit einem Schwellwert von 5 % für eine fälschliche Verwerfung getestet. Um die mögliche zeitliche Veränderung der jährlichen Häufigkeitsverteilungen zu untersuchen, werden das 99., 90., 75., 50. und 25. Perzentil der jährlichen Häufigkeitsverteilungen ermittelt. Aus diesen Werten werden jeweils Zeitreihen für längere Zeiträume gebildet, z. B. von 1951–2100. Zur Darstellung der multi-dekadischen Veränderungen werden aus diesen Zeitreihen 30-jährige gleitende Mittelwerte bestimmt. Dabei wird in den Kurven der Mittelwert einer 30-jährigen Periode von z. B. 1971–2000 dem 15. Jahr der Periode – hier 1985 – zugeordnet.

Untersuchungen der Windrichtungen: Die Windrichtungen werden aus den Windkomponenten in West-Ost (U-Komponente) und Nord-Süd-Richtung (V-Komponente) berechnet. Aus den räumlich gemittelten Komponenten des Windfeldes werden Zeitreihen der Windrichtung bestimmt. Zusammen mit den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit werden zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung berechnet und als Windrose dargestellt.

Aus bestimmten Zeiträumen von einem Jahr oder 30 Jahren werden zeitliche Mittelwerte der Komponenten (\bar{U} , \bar{V}) gebildet und daraus die mittlere Windrichtung \bar{d} bestimmt. Werden die Windrichtungen von zwei Zeitreihen verglichen, kann mit dem Watson-Williams Test (Berens 2009) geprüft werden, ob die Mittlere Windrichtung der einen Zeitreihe signifikant (Signifikanzniveau 5 %) von der der anderen Zeitreihe abweicht.

Aus den mit der Windgeschwindigkeit normierten mittleren Komponenten wird auch eine Mittlere Resultierende Länge \bar{R} (Berens 2009) bestimmt:

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} / N \quad \text{mit } N: \text{Anzahl der Zeitschritte.}$$

\bar{R} ist ein Maß für die Schwankung der Windrichtung: je näher \bar{R} an 1 ist, desto mehr stimmen die Windrichtungen der einzelnen Zeitschritte mit dem Mittelwert überein.

Niederschlag & Feuchteindizes

Die Validierung der Niederschlagsdaten der regional (gekoppelten) Klimamodelle wird mit COSMO-REA6 durchgeführt, da, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, in-situ Messungen (Beobachtungen) über See nicht vorhanden sind. Neben zeitlichen und saisonalen Mitteln über den jeweiligen maximal möglichen Zeitraum (1997–2000 für die mit ERA-40 angetriebenen gekoppelten Modellläufe; 1997–2008 für den mit ERA-Interim angetriebenen ungekoppelten REMO Lauf) im Gesamtgebiet werden Häufigkeitsverteilungen sowie Jahresgänge in den einzelnen Teilgebieten (siehe Abbildung 4-2) betrachtet, um regionale Unterschiede aufzeigen zu können. Jahressummen werden ebenfalls in den einzelnen Teilgebieten verglichen, hier aber über den gesamten jeweils möglichen Zeitraum hinweg. Alle Modelldaten liegen dabei als Tagessummen vor.

Für die Untersuchung von Hochwasserereignissen im Küstengebiet finden aus dem Niederschlag abgeleitete Indizes Verwendung. Nach Klemes (1993) werden diese Ereignisse eher durch unübliche und dabei ungünstige Kombination verschiedener Einflussfaktoren hervorgerufen, als durch Extreme der einzelnen Faktoren selbst. So könnte beispielsweise eine Kombination aus Übersättigung des Bodens in Folge anhaltender Niederschläge und einem folgenden starken, aber nicht extremen Niederschlagsereignis zu Überflutungen führen (Bsp.: Dezember Hochwasser 2014 in Schleswig-Holstein; LKN-SH und LLUR-SH (2016)).

Aus den Untersuchungen von Müller et al. (2015) wird zudem ersichtlich, dass es keine allgemeingültige Lösung für alle Untersuchungsgebiete gibt, sondern regional spezifische Kombinationen von Einflussfaktoren verwendet werden müssen, um Überflutungsereignisse möglichst exakt beschreiben zu können.

Im Bereich des NOK und anderen Einzugsgebieten im Küstenraum werden darum neben dem im Küstenbereich wichtigen Außenwasserstand die Niederschlag- und Feuchteindizes von Schröter et al. (2015) untersucht. Neben den Abflussdaten an einzelnen Pegeln werden dabei die täglichen REGNIE Niederschlagssummen verwendet, um die meteorologische Ausgangssituation der Hochwasserereignisse zu beschreiben. Grundidee der Untersuchung war die Annahme, dass die Kombination von extremem Vorregen (und damit Übersättigung des Bodens) sowie eines starken, aber nicht außerordentlichen Niederschlagsereignisses zu großräumigen Überflutungen führt. Dabei wird an jedem Modellgitterpunkt (x,y) im Einzugsgebiet berechnet

- **R3d(x,y)** = Höchste 3-Tages Niederschlagssumme (Ereignisniederschlag) der Zeitreihe der gleitenden 3-Tages Niederschlagssumme in einem Intervall, das mehr als 10 Tage vom nächsten Maximum der Zeitreihe entfernt liegt (siehe Abbildung 4-6).
- **API(x,y)** = Vorfeuchte, bestimmt aus der Summe des täglichen Niederschlags, gewichtet über die letzten 30 Tage vor dem Ereignisniederschlag R3d.

Somit ist eine deutliche Trennung von auslösendem Ereignis und Vorregen sichergestellt. Die Abnahme der Bodenfeuchte durch Verdunstung und Absickern in tiefere Bodenschichten wird über die Wichtung approximiert (d. h., ein früher gefallener Niederschlag trägt weniger zur aktuellen Bodenfeuchte bei, als der kürzlich gefallene).

Mögliche zukünftige Änderungen der Indizes werden anhand der gekoppelten Modellläufe ausgewertet, die gerade im Küsten- und küstennahen Bereich Unterschiede zu ungekoppelten Modellläufen aufweisen und daher wichtige Erkenntnisse über die Niederschlagsverteilung an der Küste liefern können. Zudem werden die für die Entwässerung wichtigen Außenwasserstände aus den gekoppelten Modellen mitgeliefert.

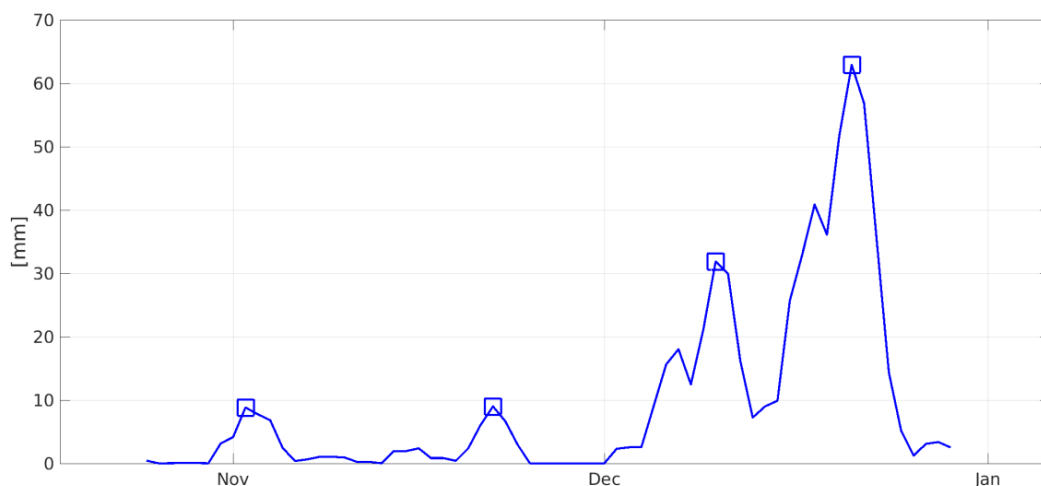


Abbildung 4-6: Relative Maxima des R3d (markiert durch Quadrate) im November/Dezember 2014, gemittelt über das Einzugsgebiet des NOK, die mehr als 10 Tage auseinanderliegen.

Wasserstand

Für den Wasserstand werden zusätzlich zu den Beobachtungsdaten aus Pegeln auch Modelldaten des oben beschriebenen MPI-OM-Klimamodells mit verschiedenen RCP-Szenarien ausgewertet. Dieses gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modell hat aufgrund des verschobenen Pols im Bereich der Deutschen Bucht eine horizontale Auflösung von etwa 5-10 km und liefert stündliche Werte. Die Modelldaten gehen von einem anderen Pegelnullpunkt als die Beobachtungsdaten aus und werden daher für einen Vergleich mit den Be-

obachtungsdaten um den entsprechenden Versatz korrigiert. Dabei haben die Beobachtungsdaten nur theoretisch alle den gleichen Pegelnullpunkt, durch Bauarbeiten oder Setzungen können diese sich im Laufe der Jahre um wenige Zentimeter ändern. Daher müssen die Beobachtungsdaten auf die in Deutschland bei Angabe von Höhen über dem Meeresspiegel verwendete Bezugsfläche für das Nullniveau (so genanntes Normalhöhennull – NHN) umgerechnet werden.

Für die Untersuchung der Änderungsraten bei den Hoch- (HW) und Niedrigwasserscheitelwerten (NW) an der deutschen Nordseeküste wurden Zeitreihen des MPI-OM Modells mit dem Szenario *Weiter-wie-bisher* benutzt. Um eventuelle Änderungen in der Verteilung abbilden zu können, wurden auch Analysen für die einzelnen Perzentile der Wasserstände durchgeführt. Diese Ergebnisse werden mit extremwertstatistischen Analysen an den gleichen Modellpunkten verglichen, die beispielsweise die Entwicklung der 50-, 100- bis zu 200-jährigen Wiederkehrwerte aufzeigen. In einem ersten Test wird geprüft, welche Verteilung an der jeweiligen Position für die Extremwertstatistik amM besten passt, in den meisten Fällen ist dies die Gumbel-Verteilung. Dann werden mit der jeweils am besten passenden Verteilung die Wiederkehrwerte berechnet. Dabei interessiert vor allem, ob sich unabhängig vom aus dem Modell berechneten mittleren Meeresspiegelanstieg auch die Höhe extremer Wasserstände in der Modellzukunft ändert. Dazu wurden jeweils 30 Modelljahre zusammengefasst und als Grundlage für die Berechnung extremer Wasserstände (mit Wiederkehrwerten von 1 bis zu 200 Jahren) mithilfe der jeweilig im ersten Test bestimmten Verteilung verwendet. Dies wurde für alle 30-Jahresperioden (von 1951–1980 bis 2071–2100) durchgeführt.

4.3.3 Bereitstellung eines „charakteristischen Jahres“

Mit einigen besonders rechenintensiven Modellen (z. B. hochauflösende Modelle der Deutschen Bucht, BAW-HH) ist es noch nicht möglich, die für klimatologische Aussagen üblicherweise angesetzten 30-Jahreszeitscheiben jeweils für die Vergangenheit und einen oder mehrere Zukunftszustände zu simulieren. Es können derzeit nur einige ausgewählte "charakteristische Jahre" (bzw. "Extreme Jahre", vgl. Abschnitt 5.3.8) durchgerechnet werden.

"Charakteristische Jahre" sind hier definiert als Jahre, die für ihre jeweilige Zeitscheibe repräsentativ sind. Es soll demnach kein extremes Jahr gewählt werden. Die Zeitscheiben sind wie zuvor festgelegt: *Nabe Zukunft* 2031–2060 und *ferne Zukunft* 2071–2100 (siehe 3.4.1)

Die Auswahl der Jahre erfolgt über Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Dabei werden die einzelnen Jahre einer Zeitscheibe mit dem Zeitscheibenmittel hinsichtlich der Windrichtung und der Windgeschwindigkeitsverteilung verglichen. Finden sich mehrere in Frage kommende Jahre, wird das Jahr mit der geringsten Abweichung in der Windgeschwindigkeit > 10 m/s gewählt. Die finale Überprüfung der Jahre erfolgt über eine Windrose, in der die generelle Charakteristik des ausgewählten Jahres zum Zeitscheibenmittel dargestellt wird.

4.4 Szenarien zum Meeresspiegelanstieg

Der globale Meeresspiegelanstieg (MSA) hat natürliche als auch anthropogene Ursachen und lässt sich mit verschiedenen Einflussfaktoren erklären. Diese Faktoren beruhen jedoch teilweise auf Abschätzungen, die noch mit relativ großen Unsicherheiten behaftet sind.

4.4.1 Einführung zum globalen Meeresspiegelanstieg

Die unten aufgelisteten Faktoren a) bis f) führen zu einer Änderung des absoluten Meeresspiegels, während sowohl die isostatische Ausgleichsbewegung (g) und lokale und regionale vertikale Landbewegungen (h) relative Meeresspiegeländerungen gegenüber dem Land nach sich ziehen:

- a) Die Erwärmung des Ozeans, die aufgrund der thermischen Ausdehnung des Ozeanwassers zu einem Anstieg des Meeresspiegels führt.

- b) Eine Änderung des hydrologischen Zyklus hat über Änderungen des Salzgehalts und damit des Ozeanvolumens Auswirkungen auf den Meeresspiegel.
- c) Veränderte Ozeanströmungen als auch Änderungen des Salzgehaltes und der Temperatur können regional eine Meeresspiegeländerung bewirken.
- d) Das Abschmelzen von Landgletschern hat einen Anstieg verfügbaren Wassers im hydrologischen Kreislauf zur Folge, wodurch letztendlich der Meeresspiegel erhöht wird.
- e) Schmelze und Abbruch antarktischer Festlandseismassen erhöht die Wassermasse im Ozean. Hierbei ist vor allem die Dynamik aufschwimmender Eismassen am Schelfrand noch sehr unsicher und lässt sich zumindest im globalen Maßstab durch Eismodelle im Moment nur unzureichend beschreiben.
- f) wie e), nur für Grönland statt der Antarktis.
- g) Die Ausgleichsbewegung der Erdkruste nach dem letzten glazialen Maximum hat eine Änderung des relativen Meeresspiegels zur Folge. Diese Ausgleichsbewegung ist besonders auf der Nordhalbkugel wegen der dortigen stärkeren Vergletscherung während der letzten Eiszeit spürbar und kann regional sowohl zu einem stärkeren relativen MSA (wie für die südliche Nordsee) als auch zu einer Abschwächung oder sogar zu einer Umkehr des relativen MSA (nördliche Ostsee) führen. Für das hier interessierende Gebiet der Nord- und Ostsee ist diese Ausgleichsbewegung nur schwer abzuschätzen, da sie stark von der jeweiligen Lage der vermuteten damaligen Grenze der größten Eisausdehnung abhängt und sich hier die Modelle besonders stark unterscheiden.
- h) Landhebungen und Landsenkungen lokalen oder regionalen Ursprungs, wie z. B. verursacht durch Entwässerungsmaßnahmen, führen zu einer Änderung des relativen Meeresspiegels.

Aus der obigen Aufzählung wird ersichtlich, dass der MSA von vielen Faktoren abhängig ist, wobei der wichtigste der vergangenen Jahrtausende die Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit darstellt.

Während für das vorige Jahrhundert etwa 50 % des Meeresspiegelanstiegs auf die Dichteänderungen des Wassers im Ozean zurückzuführen sind, wurde um etwa das Jahr 2005 herum dieser Effekt durch den der Änderungen der Eismassen als Haupttreiber des Anstiegs abgelöst (Slangen et al. 2017). Zurzeit sind die Beiträge der Landgletscher zum Meeresspiegelanstieg noch größer als die von Grönland und der Antarktis, da sie zumeist in wärmeren Klimazonen liegen (Gregory et al. 2013). Es wird erwartet, dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis stärker ansteigen wird. Das verstärkte Abschmelzen der Eismassen wird zu einer Beschleunigung des MSA führen.

In der Nordsee lag der regionale MSA im 20. Jahrhundert bei etwa 1,7 mm/a (Jensen et al. 2014) und damit etwas höher als für das globale Mittel. Dies ist hauptsächlich auf die isostatische Landsenkung im Bereich der Nordsee zurückzuführen.

4.4.2 Szenarien des globalen Meeresspiegelanstiegs

Globale Klimamodelle sind in der Lage, den Effekt von Temperatur- und Salzgehaltsänderungen, der Ozeandynamik (beispielsweise veränderten Strömungen) und des hydrologischen Zyklus auf den Meeresspiegelanstieg plausibel abzubilden (obige Faktoren a – c). Allerdings können die Klimamodelle die Änderung der Eismassen sowohl an Land als auch in der Arktis und Antarktis aufgrund der zu groben Auflösung und eines teilweise noch unzureichenden physikalischen Verständnisses nicht adäquat berechnen. Auch fehlt bei den globalen Modellen eine Kopplung zwischen Landeis, Ozean und Atmosphäre. Diese ist aber für eine realistische Modellierung der komplexen Eisdynamik notwendig. Daher nutzt man zurzeit noch Abschätzungen aus regionalen, hoch aufgelösten Eismodellen, die dann auf globale Verhältnisse für die oben erwähnten Faktoren d – f extrapoliert werden müssen. Die Unsicherheiten für diese Einflussfaktoren sind daher verhältnismäßig hoch und nach Carson et al. (2016) in etwa in der gleichen Größenordnung wie die oben erwähnten großen Unsicherheiten für die Ausgleichsbewegung der Erdkruste nach dem glazialen Maximum (oberer Faktor g).

Gleichzeitig reagieren die Eismassen besonders sensitiv auf eine Erwärmung. Vor allem die über das antarktische Festland hinaus aufschwimmenden Eisschilde könnten in Zukunft einen sehr viel größeren Beitrag zum MSA liefern, da sie nicht nur von oben durch die Atmosphäre, sondern in größerem Maßstab auch durch das wärmer werdende Ozeanwasser angetaut werden können. Damit wird deutlich, dass in den derzeitigen globalen Klimamodellen (beispielsweise aus CMIP5) die Unsicherheit gerade für den eisdynamischen Effekt besonders groß ist, von dem in Zukunft die größten Steigerungsraten zu erwarten sind. Dies erhöht die Bandbreite für Projektionen des Meeresspiegelanstiegs.

Um eine Bandbreite von Projektionen des MSA für die nächsten 100 Jahre zu erhalten, nutzt man

- a) verschiedene globale Klimamodelle,
- b) unterschiedliche RCP-Szenarien, die mit differierenden Annahmen zum künftigen CO₂-Ausstoss der Menschheit arbeiten und
- c) verschiedene oben erwähnte Abschätzungen der Eisdynamik.

Da der Meeresspiegelanstieg größtenteils von der Temperatur der Atmosphäre und des Ozeans abhängt und beide sehr sensitiv auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre reagieren, zeigen sich für lange Zeitperioden die größten Unterschiede der Projektionen des MSA zwischen den verschiedenen RCP-Szenarien und den unterschiedlichen Abschätzungen der Eisdynamik, während für kürzere (dekadische) Zeitperioden der Unterschied zwischen den einzelnen Modellen die größte Bandbreite liefert. Tabelle 4-3 gibt einen Überblick neuerer Studien zum globalen MSA, teilweise sind die Unsicherheiten mit angegeben.

Tabelle 4-3: Zusammenstellung neuerer Studien zum globalen Meeresspiegelanstieg, die teilweise nicht nur den Median (50 %) des projizierten MSA, sondern auch die Bandbreite des wahrscheinlichen (17–83 %) beziehungsweise sehr wahrscheinlichen Bereichs (5–95 %) angeben. Die angegebenen Studien sind im Anhang in der Literaturliste zu finden.

Projizierter globaler Anstieg des Meeresspiegels [in m] bis 2100 (von 2000)								
Szenario	Studie	Min	5 %	17%	50%	83%	95%	Max
RCP2.6	IPCC (2013) ^{a)}			0,26	0,4	0,55		
RCP2.6	IPCC (2013)			0,28	0,44	0,61		
RCP4.5	IPCC (2013) ^{a)}			0,32	0,47	0,63		
RCP4.5	Carson et al. (2016) ^{c)}				0,54			
RCP6.0	IPCC (2013) ^{a)}			0,34	0,48	0,64		
RCP8.5	IPCC (2013) ^{a)}			0,45	0,63	0,82		
RCP8.5	IPCC (2013)			0,52	0,73	0,98		
RCP8.5	Kopp et al. (2014)		0,52	0,62	0,79	1,00	1,21	
RCP8.5	Horton et al. (2014)		0,50	0,70		1,20	1,50	
RCP8.5	Carson et al. (2016) ^{c)}				0,71			
RCP8.5	Grinsted et al. (2015)		0,45	0,58	0,80	1,20	1,83	
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,96	1,21	1,46 b)	1,84	2,21 b)	2,47	2,73
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,71	1,04	1,36 b)	1,84	2,32 b)	2,65	2,98
Kombination	Johansson et al. (2014)		0,26	0,41	0,72	1,18	1,55	

a) MSA nicht für 2000–2100, sondern für 20-Jahres-Periode 2081–2100 gegenüber 1981–2000 berechnet

b) abgeschätzt aus Verteilung

c) MSA nicht für 2100–2000, sondern für 2081–2100 gegenüber 1986–2005 berechnet

4.4.3 Szenarien für den regionalen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee

Der regionale Meeresspiegelanstieg in der Nordsee folgt grundsätzlich dem globalen MSA, kann sich aber von diesem aufgrund einiger Einflussfaktoren unterscheiden. Die Wichtigsten dieser Faktoren, die regional bedeutsam werden können, sind im Folgenden kurz aufgelistet:

- Der Gravitationseffekt der arktischen und antarktischen Eismassen zieht die Wassermassen in seinem Nahfeld (Größenordnung 1.000 km) an. Bei einem Abschmelzen dieser Eismassen verringert sich die Eigengravitation im Nahfeld und führt zu einem Sinken des Meeresspiegels, während weiter entfernt von diesen Eismassen der Meeresspiegel überproportional steigt. Dieser Gravitationseffekt wird in Tamisiea et al. (2010) näher beschrieben. Die Nordsee befindet sich im Nahfeld des grönländischen Eisschildes und im Fernfeld des antarktischen Eises und würde dementsprechend auf unterschiedliche Abschmelzraten dieser beiden Eisschilde auch unterschiedlich reagieren.
- Regionale vertikale Landbewegungen führen für einen Großteil der Nordsee zu einem stärkeren Meeresspiegelanstieg, siehe Erläuterungen zu den obigen Faktoren g und h.
- Auch eine veränderte Strömungsdynamik sowie regionale Änderungen der Frischwasserflüsse und Temperaturen (oben als Faktor b und c aufgelistet) beeinflussen den regionalen Meeresspiegel.

Innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks wurden, ausgehend von den globalen Projektionen des MSA (Tabelle 4-3), in Absprache mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), für deren Sensitivitätsstudien für die Nordsee folgende Schwellwerte für den MSA bis 2100 (ausgehend vom Jahr 2000) ausgewählt:

- | | |
|---|------------|
| ▪ basierend auf RCP4.5 | 50 cm MSA |
| ▪ basierend auf RCP8.5 | 80 cm MSA |
| ▪ basierend auf Grinsted et al. (2015) als <i>High-End scenario</i> | 174 cm MSA |

Die Sensitivitätsstudien der BAW (siehe Kapitel 6) haben zum Ziel, den Einfluss eines veränderten Meeresspiegels auf die Hydrodynamik und die Morphodynamik im Küstenbereich und in den Ästuaren genauer zu analysieren.

4.5 Fallstudie NOK

Eine Pilotstudie mit konkretem Anwendungsbezug im Küstenschwerpunkt (Schade et al. 2020) ist die Untersuchung der Entwässerungssituation des NOK (z. B. Brockmann et al. (2008)) im Klimawandel. Da der NOK zu etwa 90% in die Elbe und zu etwa 10% in die Ostsee entwässert, hängt der Abfluss aus dem NOK stark von den Außenwasserständen ab. In der Vergangenheit kam es nach hohen Niederschlägen im Einzugsgebiet des NOK und gleichzeitig hohen Außenwasserständen vereinzelt zu stark erhöhten Wasserständen im NOK. In diesen Fällen musste der Fährverkehr über den NOK eingestellt und die Schifffahrt durch den NOK reduziert oder sogar eingestellt werden. Da im Zuge des Klimawandels die Wasserstände in Tideelbe und Ostsee ansteigen werden (siehe z. B. Jensen et al. (2014)), stellt sich die Frage, wie stark sich die Häufigkeiten von angespannten Entwässerungssituationen in der Zukunft ändern werden.

4.5.1 Vorgehen

Ungünstige Situationen für die Entwässerung bei langanhaltenden, aber nicht extremen Niederschlägen werden aus atmosphärischer Sicht anhand der beiden in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Indizes nach Schröter et al. (2015) ausgewertet: (1) Dem dreitägigen Ereignisniederschlag und (2) der 30-Tage-Vorfeuchte. Erste Ergebnisse aus Untersuchungen in Schleswig-Holstein (Schade 2017) haben bereits gezeigt, dass die beiden Indizes, hier bestimmt aus den REGNIE Niederschlagsdaten des DWD (Rauthe et al. 2013), regionale Hochwasserereignisse beschreiben können. Des Weiteren wurden im Rahmen einer Analyse im Einzugsgebiet des NOK angespannte Entwässerungssituationen untersucht, bei denen ein zusätzlich vorherrschender Windstau bzw. der Außenwasserstand in Brunsbüttel ein Entwässern des Kanals über mehrere

Tidezyklen hinweg verhindert (Ganske et al. 2017). Dabei wurde deutlich, dass bei den beobachteten Situationen fast immer ein erhöhter Außenwasserstand bzw. anhaltender Windstau vorlag der verhinderte, dass das zugeführte Wasser aus dem Kanal gebracht werden konnte.

Zusätzlich zu den am NOK beobachteten Situationen wurden die Zeitreihen der Niederschlagsindizes mit berechneten Zuflussdaten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) verglichen. Da das Einzugsgebiet des NOK nur zu ca. 40 % durch Pegel überwacht ist, sind die Zuflusswerte die einzig nutzbaren Referenzdaten. Hier ergaben sich für die Gegenwart die besten Übereinstimmungen im hydrologischen Winter. Analoge Untersuchungen anhand der oben beschriebenen gekoppelten Modelle für die Zukunft sind geplant, denn gerade diese ungünstige Kombination aus „Wasser von außen“ und „Wasser von Innen“ könnte in Zukunft vermehrt zu angespannten Situationen führen, insbesondere bei steigendem Meeresspiegel. Dieser wird in Zukunft das Zeitfenster, in dem der Kanal allein über das natürliche Gefälle entwässert werden kann, deutlich verringern und damit zu Problemen für die kanalfahrenden Schiffe führen.

Die Zeitfenster für die Entwässerung werden folgendermaßen bestimmt:

- Aus dem Evaluierungslauf des globalen gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modells (MPI-OM/REMO) werden stündliche Wasserstände für die Region Cuxhaven mit Beobachtungen validiert und dann über eine aus Beobachtungen über einen Zeitraum von 30 Jahren gewonnene Regression an Brunsbüttel angepasst, da das Modell aufgrund seiner Auflösung keinen eigenen Modellgitterpunkt für Brunsbüttel besitzt.
- Mit dieser Regressionsbeziehung wird aus den stündlichen Wasserständen des historischen und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (Lauf1) die Zeitreihe der stündlichen Wasserstände bei Brunsbüttel bestimmt. Als zusätzliche Szenarien werden das High-end-Szenario von Grinsted (1,74 m Meeresspiegelanstieg bis 2100), jeweils addiert mit Landsenkungen bei Brunsbüttel von 0,35 mm/a, 2 mm/a bzw. 4 mm/a, berechnet.
- Aus den stündlichen Wasserständen wird über eine aus Naturmessungen gewonnene Korrelation zwischen der Differenz Elbwasserstand Brunsbüttel - Zielwasserstand des NOK und der Anzahl geöffneter Schleusen und Umläufen das mögliche Entwässerungspotential für jede einzelne Stunde von 1951–2100 (im Modellszenario *Weiter-wie-bisher*) berechnet. Abbildung 4-7 zeigt diese Korrelation (mündliche Kommunikation von Frau Ebner von Eschenbach). Aus der Abbildung wird deutlich, dass dieser Zusammenhang deutlich nichtlinear ist.
- Um den Einfluss der natürlichen Variabilität etwas zu verringern, werden gleitende Mittel über 30 Jahre genutzt. So kann das Entwässerungspotential der Zukunft bei steigendem Meeresspiegel mit dem der Gegenwart verglichen werden.

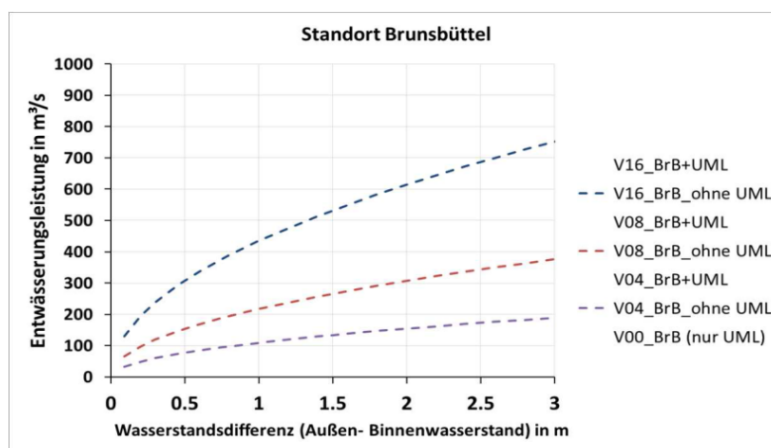


Abbildung 4-7: Entwässerungsleistung in Brunsbüttel in Abhängigkeit von Wasserstandsdifferenz und der Anzahl geöffneter Schleusen und Umläufen. Quelle: Ebner von Eschenbach (BfG), 8. Hydrol. Gespräch.

Schließlich werden gemeinsame Auswertungen, z. B. in Form von Copula-Verfahren, von hohem Außenwasserstand und hohen bzw. langanhaltenden Niederschlägen, bzw. daraus abgeleiteter Indizes, herangezogen und deren gemeinsame Auftretenswahrscheinlichkeiten sowie mögliche Änderungen dieser Wahrscheinlichkeiten in der Zukunft untersucht.

Dieser „Prädiktoren-Ansatz“ wird als Erstes für das vorliegende und validierte MPI-OM/REMO Modell im Szenario *Weiter-wie-bisher* (Lauf 1-3) untersucht, nach Validierung des SMHI-Modells werden weitere vorliegende gekoppelte Modelle und Szenarien (siehe Anlage 1) analysiert werden können. Da physikalisch konsistente Werte für Ozean und Atmosphäre benötigt werden, die nur von gekoppelten Modellen geliefert werden (siehe Abschnitt 4.3), ist eine Studie mit ungekoppelten Modellen nicht sinnvoll. Im Anschluss sollen die Ergebnisse mit den Untersuchungen der BfG verglichen werden, um den Prädiktoren-Ansatz zu validieren.

Zudem dienen die Wasserstandswerte aus den gekoppelten Modellen am Rande des Deutsche Bucht Modells der BAW als Randwerte für ihre Berechnungen.

4.5.2 Zusammenarbeit mit der BfG (WSV-Auftrag)

In einem weiteren Ansatz entwickelt die BfG im Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ein komplexes Wasserhaushalts- und Kanalmodell, welches den Zufluss aus dem Einzugsgebiet in den NOK mithilfe verschiedener Modellinputparameter (Temperatur, Niederschlag, solare Einstrahlung, etc.) im Detail bestimmt (siehe Abbildung 4-8 und Ebner von Eschenbach (2017)) und daraus einen kritischen Wasserstand im Kanal ableitet.

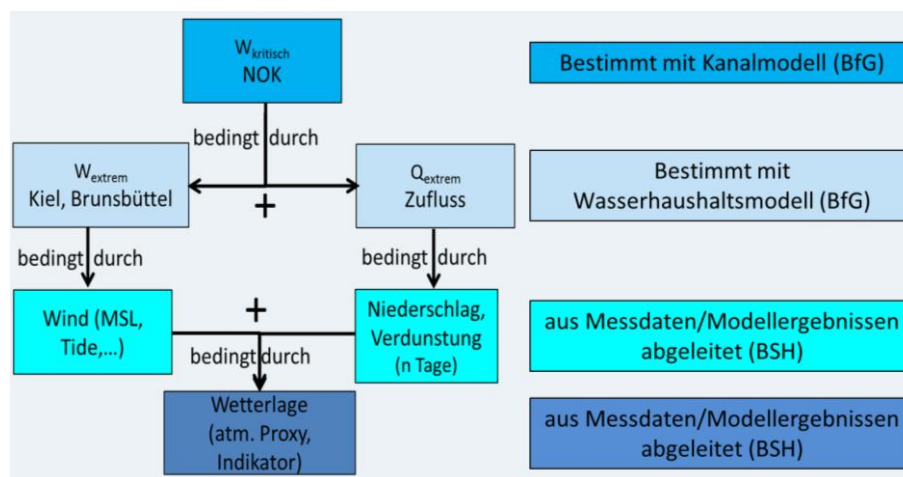


Abbildung 4-8: Graphische Darstellung der verschiedenen Ansätze der Untersuchungen am NOK.

Die BfG berechnet dazu ferner Sperrzeiten, an denen der Kanal aufgrund zu hohen Wasserstands und fehlender Möglichkeit zur Entwässerung nicht mehr befahren werden kann. Interessant ist dabei, wie sich diese Sperrzeiten in Zukunft je nach angelegtem Szenario ändern werden.

Ein Ziel des BMVI-Expertennetzwerks ist es, die beiden unterschiedlichen Ansätze „Modellsystem“ (BfG) und „Proxys/Prädiktoren“ (BSH), mit einander zu vergleichen und so die Prädiktoren-Methode zu validieren. Ist das Verfahren im Einzugsgebiet des NOK entwickelt und getestet, soll es auf weitere Einzugsgebiete, wie z. B. die Eider, angewandt werden. Insbesondere in Gebieten, in denen kein hochaufgelöstes Modell zur Verfügung steht, sollen damit vereinfachte Aussagen über künftige Entwässerung möglich sein.

5 Auswertungsrahmen Hydrologie

Enno Nilson, Claudius Fleischer, Martin Helms, Peter Krabe
(Bundesanstalt für Gewässerkunde)

5.1 Einleitung

Dieses Kapitel umreißt den Auswertungsrahmen (Datengrundlagen, Methoden und Produktportfolio), der im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks (Themenfeld 1), vor allem im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (SP-106; Nilson et al. (2020)), in Bezug auf den Abfluss (genauer: Durchfluss) an Flusspegeln im Binnenland sowie seiner möglichen zukünftigen Änderung (Abflussprojektionen) konzipiert wurde. Der Fokus liegt auf wassermengenbezogenen Fragestellungen, die neben dem Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* auch in verschiedenen anderen Schwerpunkten des Themenfeldes (*Klimawirkungsanalyse, Hochwassergefahren, Fokusgebiete Küsten* und *Fokusgebiete Binnen*) relevant sind. Darüber hinaus ergeben sich vielfältige Anknüpfungspunkte zur wasserwirtschaftlichen Klimafolgenbewertung in Deutschland insgesamt. Zu nennen sind hier insbesondere die Prozesse des WSV ClimateProofings (vgl. Schlussbericht *Anpassungsoptionen*, (Norpoth et al. 2020)), die aktuelle Novelle der KWVA-2021 und anderer Elemente der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Bundesregierung 2008).

Der vorgestellte Auswertungsrahmen wurde im Austausch mit und für Nutzergruppen innerhalb und außerhalb des BMVI-Expertenetzwerks entwickelt. Das bedeutet, dass nicht alle Produkte im BMVI-Expertenetzwerk unmittelbar zur Anwendung gekommen sind, sondern für Adressaten im erweiterten Netzwerk (Behörden des Bundes und der Länder, operative Einheiten im Verkehrsbereich, Forschungscommunity) konzipiert wurden. Der Produktkatalog gliedert sich in Produkte 1. und 2. Ordnung. Bei den Produkten der 1. Ordnung handelt es sich um „rohe“ Zeitreihendaten des Abflusses an den Ausgabepegeln und in der zeitlichen Auflösung der verwendeten Wasserhaushaltsmodelle. Diese Daten adressieren insbesondere Nutzende, die Abflussdaten als „Antrieb“ für weitere Modelle (z.B. Wassergüte, Hydrodynamik, Morphologie) oder für spezifische eigene Auswertungen benötigen. Bei den Produkten der "2. Ordnung" handelt es sich um aggregierte Informationen (Kennwerte, Indikatoren), die die wesentlichen Aspekte der Thematik Klimawirkungen auf die Wassermenge/Hydrologie kompakt sichtbar und verständlich machen. Zielgruppen sind Planer und Entscheider auf verschiedenen Ebenen oder die Beteiligten des DAS-Prozesses. Einige der Datenprodukte werden in ein dauerhaftes Datenangebot überführt, das über im Aufbau befindliche Klimaberatungsdienste (vgl. Nilson (2019)) bereitgestellt wird.

5.2 Datengrundlagen und Modelle

Im Verlauf der 1. Forschungsphase des BMVI-Expertenetzwerks wurden Datengrundlagen aus unterschiedlichen Generationen der Modellentwicklung verarbeitet. So musste zu Beginn noch auf Abflussprojektionen zurückgegriffen werden, die sich auf die Datengrundlagen des 4. IPCC Sachstandsberichtes beziehen (s. Abschnitt 5.2.1). Die im Verlauf des Forschungsprogramms erstellten Abflussprojektionen, welche die Grundlage für die finale Bewertung von Änderungen im Wasserdargebot und in der Wasserbeschaffenheit im Themenfeld 1 (Phase) darstellen, basieren auf dem Erkenntnisstand des 5. IPCC Sachstandsberichtes und sind in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

5.2.1 Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2013" (KLIWAS)

Die Abflussprojektionen BfG2013 (Nilson et al. 2014) wurden im Rahmen des Forschungsprojektes KLIWAS auf Grundlage von verschiedenen SRES-Emissionsszenarien (Nakicenovic et al. 2000), globalen Klimamodellen des CMIP3 (Meehl et al. 2007) sowie insgesamt 29 regionalen Klimamodellläufen des Projektes EU-ENSEMBLES (Van der Linden und Mitchell 2009) und nationaler Forschungsprojekte (Jacob

2006, 2009, Keuler et al. 2009) erstellt. Abbildung 5-1 zeigt ein Schema der Arbeitsschritte (sog. Modellkette), die zur Erstellung dieser Projektionen abgearbeitet wurden. Die Ergebnisse dieser Modellketten wurden einer grundlegenden Plausibilitätskontrolle unterzogen, die die Wiedergabe fundamentaler raum-zeitlicher Muster der Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$), des Niederschlags (mm) sowie der Globalstrahlung (W/m^2) im Vergleich zu Beobachtungsdaten berücksichtigte.

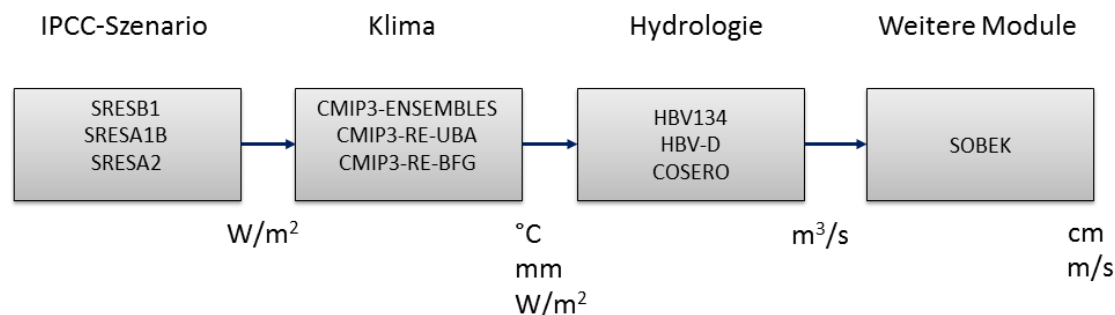


Abbildung 5-1: Schematische Modellkette und Datengrundlagen der Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2013".

Neben einigen dynamischen regionalen Klimamodellen wurden die statistischen Regionalisierungsverfahren dabei aus verschiedenen Gründen nicht in die weitere Auswertung mit einbezogen (fehlende ausländische Einzugsgebietsanteile, nicht bekannte großräumige Validierung der raumzeitlichen Felder, Annahme weitestgehend unveränderlicher Witterungscharakteristiken pro Wetterlage, Überzeichnung der Trockenheit in Zukunftsprojektionen), sodass letztlich etwa 20 Projektionen⁸ dynamischer regionaler Klimamodelle verblieben. Diese wurden einer Bias-Korrektur nach einem linearen Skalierungsansatz (Lenderink et al. 2007) unterzogen. Die Korrekturfaktoren wurden dabei für vieljährige Monatswerte des Zeitraums 1961–1990 anhand von Simulationen der regionalen Klimamodelle und von Beobachtungsdaten bestimmt. Hierbei wurden die Teileinzugsgebiete der verwendeten Wasserhaushaltsmodelle zu Grunde gelegt.

Die Wasserhaushaltssimulationen wurden mit semi-verteilten hydrologischen Modellen der Einzugsgebiete von Rhein (HBV-134) und Elbe (HBV-D) auf Tageswertbasis und als Monatswerte für die Donau (COSERO, Continuous semi-distributed runoff model) erstellt. Einige ausgewählte Abflussimulationen wurden mittels eindimensionaler hydrodynamischer Modelle weiterverarbeitet, um Wassertiefen (cm) und Strömungsgeschwindigkeiten (m/s) im Längsschnitt relevanter Flussläufe zu erhalten (s. Abschnitt 5.3.3).

5.2.2 Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2019"

Die Erstellung der Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2019" folgt prinzipiell der für die Version "BfG2013" zugrunde gelegten Logik, jedoch werden derzeit innerhalb der Modellkette verschiedene Glieder aktualisiert (Abbildung 5-2). So werden die SRES-Szenarien durch die sogenannten Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) ersetzt (vgl. Abschnitt 2.2). Die darauf aufsetzenden globalen Klimasimulationen entstammen dem CMIP5. Diese wurden bereits im Rahmen der europäischen Aktivität EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014a) sowie der nationalen Aktivität ReKliEs-DE (Hübener et al. 2017) regionalisiert (vgl. Abschnitt 3.3.1). Die Klimamodelldaten wurden im ExpN-TF1 5 km x 5 km Raster disaggregiert (vgl. Abschnitt 3.3.3) und einer multivariaten Bias-Adjustierung (siehe Abschnitt 3.3.2) unterzogen. Weitere Einzelheiten zu Klimadaten und Aufbereitungsschritten finden sich in Kapitel 3.

⁸ Kleine Unterschiede in den Ensembles zwischen den Flusseinzugsgebieten (vgl. Nilson et al. (2014)).

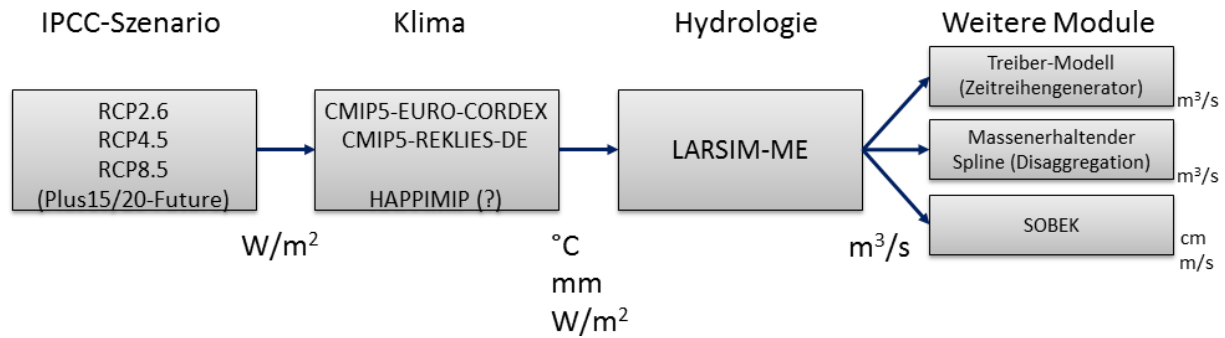


Abbildung 5-2: Schematische Modellkette und Datengrundlagen der Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2019".

Wie in KLIWAS, erfolgte auch im BMVI-Expertenetzwerk eine grundlegende Plausibilitätsbewertung aus hydrologischer Perspektive. Die Bewertungskriterien (Abdeckung der internationalen Einzugsgebiete, Verfügbarkeit aller relevanten Größen, Abbildung fundamentaler raum-zeitlicher Muster) sind bei Nilson (2020) und im BfG-Beitrag zu Kapitel 5 des Schwerpunkts *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) niedergelegt. Letztlich wurden 16 Klimaprojektionen für das Szenario *Weiter-wie-bisher*, 11 Klimaprojektionen für das Szenario *moderater Anstieg* und 10 Klimaprojektionen für das Szenario *Klimaschutz* weiterverarbeitet. Das Ensemble weicht somit in gewissem Maße von dem Referenzensemble des DWD ab.

Als Wasserhaushaltsmodell kommt nun das rasterbasierte Large Area Runoff Simulation Modell (LARSIM; Bremicker (2000)) mit regionalisierten Parametersätzen für Mitteleuropa zum Einsatz (LARSIM-ME; Richter et al. (2013); Nilson et al. (2020)). Die Produktpalette wird gegenüber den Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2013" erweitert. In Ergänzung zu den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe und Oberer Donau werden nun auch Pegel in den Einzugsgebieten von Weser und Ems vorgehalten. Neben spezifischen Auswertungen für Fragestellungen der Hydrologie, der Schifffahrt und der Wasserstraßen sowie des Wasserbaus, werden auch Auswertungen für die Verkehrsträger Straße und Schiene bereitgestellt. Auch für weitere Produktvarianten werden Methoden entwickelt. Diese betreffen neben den bereits aus der Version 2013 bekannten "Szenarienkorridoren" und "Repräsentativen Simulationen" (Abschnitt 5.3.2) und hydraulischen Daten (Abschnitt 5.3.3) auch Stundenwerte (Abschnitt 5.3.4), 100-jährige Zeitreihen (Abschnitt 5.3.5) und erweiterte Daten zur Beschreibung des Wasserhaushaltes (Abschnitt 5.3.6). Des Weiteren werden "charakteristische" bzw. "extreme" Einzeljahre definiert (Abschnitte 5.3.7 bzw. 5.3.8).

Weitere Änderungen bzgl. der Neuerstellung der BfG2019-Projektionen bzw. -Szenarien betreffen die für aggregierte Auswertungen (Produkte 2. Ordnung, s. Abschnitt 5.4) auszuwählenden Zeiträume (Zeitscheiben). Die Festlegung dieser Zeiträume folgt den allgemeinen Vereinbarungen des Schwerpunkts *Szenarienbildung* (siehe Abschnitt 3.4.1). Als *Bezugszeitraum* wird im Unterschied zu KLIWAS der Zeitraum 1971–2000 verwendet – u. a. weil Ergebnisse der entsprechenden Simulationsläufe zumeist erst ab 1970 vorliegen. Auch der Zeitraum für die *nahe Zukunft* wird geändert und bezieht sich nun auf 2031–2060.

5.3 Produkte 1. Ordnung, Produktvarianten

In diesem Kapitel wird ein Überblick über hydrologische Informationen und Produkte gegeben, die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks abgeleitet und den Netzwerkpartnern oder auch weiteren Nutzern bereitgestellt werden können. Bei den Produkten der "1. Ordnung" handelt es sich um Zeitreihendaten des Abflusses an den Ausgabepegeln und in der zeitlichen Auflösung der verwendeten Wasserhaushaltsmodelle, die unter Verwendung der verfügbaren und plausiblen Modellketten generiert wurden bzw. werden. Anwendende dieser Datenprodukte sind üblicherweise Wissenschaftler und Ingenieurbüros, deren Modelle Abflussganglinien als Eingangsgröße benötigen und die Auswertungen für spezifische Fragestellungen vor-

nehmen möchten. Hierzu gehören z. B. hydrodynamische Modelle (Schröder und Wurms 2014), Wassergütemodelle (Hardenbicker et al. 2017) oder Vegetationsmodelle (Mosner et al. 2015) bzw. Auswertungen für wasserbauliche, gewässerhygienische oder energiewirtschaftliche Fragestellungen.

5.3.1 Abflusszeitreihen

Die verwendeten Wasserhaushaltsmodelle geben den Abfluss (Q) als Tagesmittelwerte (m/s) aus. Abbildung 5-3 zeigt den Gebietsausschnitt und die Ausgabepegel des im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks für die Erstellung der BfG2019-Szenarien eingesetzten Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME. Das Modell liefert Tageswerte für Pegel in den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe, Oberer Donau, Weser und Ems. Im Vergleich zu KLIWAS werden damit tägliche Abflussreihen für die obere Donau (bisher nur Monatswerte aus dem Modell COSERO), für die Ems und für die Weser ergänzt. Im Rahmen von KLIWAS wurden 22 Modellketten untersucht, im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks 39 Modellketten (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 sowie Tabelle 3-2).

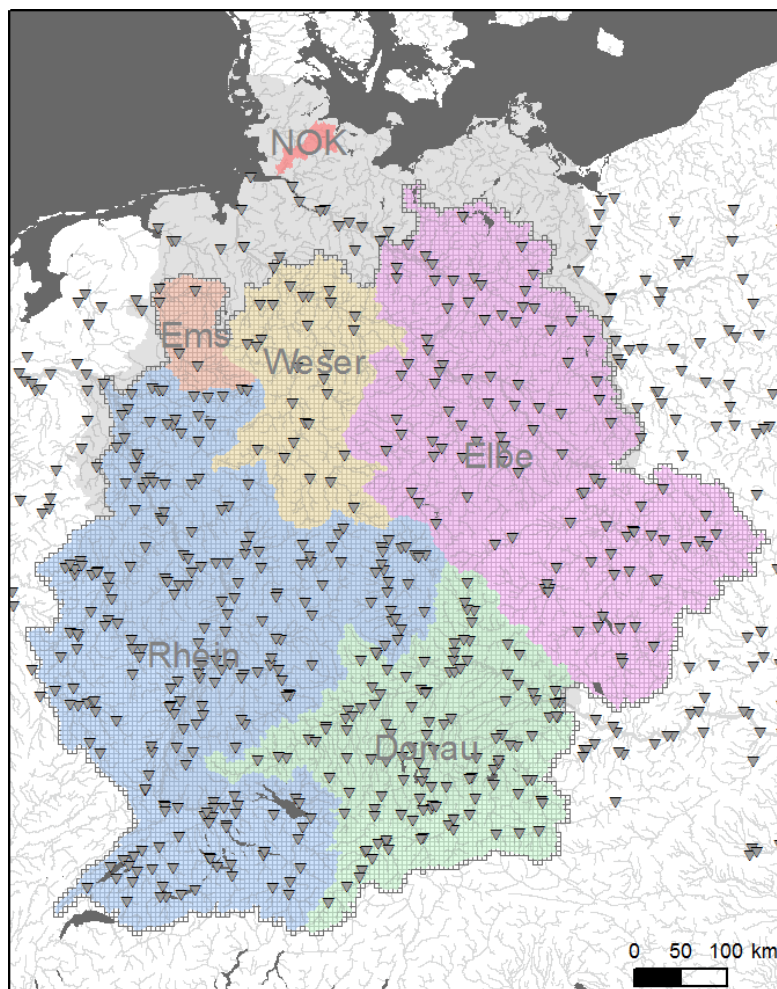


Abbildung 5-3: Gebietsabdeckung und Ausgabepegel des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME.

Im Prinzip können mit dem Modell LARSIM-ME Abfluss- und andere Wasserhaushaltsinformationen an jeder der in Abbildung 5-3 dargestellten Gitterzellen ausgegeben werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass LARSIM-ME hinsichtlich seiner raum-zeitlichen Auflösung und Prozessabbildung darauf ausgelegt ist, den quasi-natürlichen Wasserhaushalt des Binnenlandes für die Pegel an den größeren, als Bundeswasserstraßen genutzten Flüssen wiederzugeben. Pegel in kleineren sowie stark anthropogen veränderten Einzugsgebieten sind ggf. gesondert zu validieren und bedürfen ggf. zusätzlicher Prozessbeschreibungen (hierzu laufen eigene Forschungsprojekte). Aussagen für Pegel im Tidebereich werden generell nicht angeboten.

Insofern stellt das in Abbildung 5-3 dargestellte Pegelkollektiv ein umfassendes, mögliches Angebot dar. Aus diesem werden für verschiedene Anwendungen Teilkollektive ausgewählt. Zu nennen sind dabei:

- ein Pegelkollektiv „Hydrologie“ (siehe Abbildung 5-4): es umfasst Pegel, anhand derer sich Änderungen der wesentlichen hydrologischen Regimes in Deutschland treffend beschreiben lassen. Sie lassen zudem eine räumliche Differenzierung nach Teileinzugsgebieten in der Größenordnung von 10.000 km² zu. Adressat dieser Kennwerte ist die Wasserwirtschaft in Deutschland.
- ein Pegelkollektiv „Schifffahrt und Wasserstraße“: hierbei handelt es sich um Pegel, die von Schifffahrtsbetreibenden oft nachgefragt werden bzw. die für das Wasserstraßenmanagement besonders relevant sind. In Abstimmung mit der WSV wurden die Rheinpegel Maxau, Kaub und Ruhrort, die Donaupegel Pfelling und Hofkirchen, die Elbepegel Dresden, Magdeburg und Wittenberge, die Donaupegel Pfelling und Hofkirchen, die Elbepegel Dresden, Magdeburg und Wittenberge, die Weserpegel Hann.-Münden und Intschede sowie der Emspegel Versen ausgewählt. Weitere Pegel können im Bedarfsfall ergänzt werden.
- ein Pegelkollektiv „Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)“: als Grundlage für die Anwendung hochdetaillierter hydrodynamischer Modelle durch die BAW an Abschnitten des Binnenschifffahrtsstraßennetzes (im ExpN-TF1: Niederrhein) sowie in Küstengebieten (Nordsee) werden Abflussganglinien als Randbedingung benötigt. Es handelt sich um die Pegel im Bereich des Niederrheins (Köln, Bonn, Ruhrort, Rees und Lobith) und seiner Zuflüsse (u. a. Menden/Sieg), sowie um den Elbepegel Neu Darchau, den Weserpegel Intschede und den Emspegel Versen.

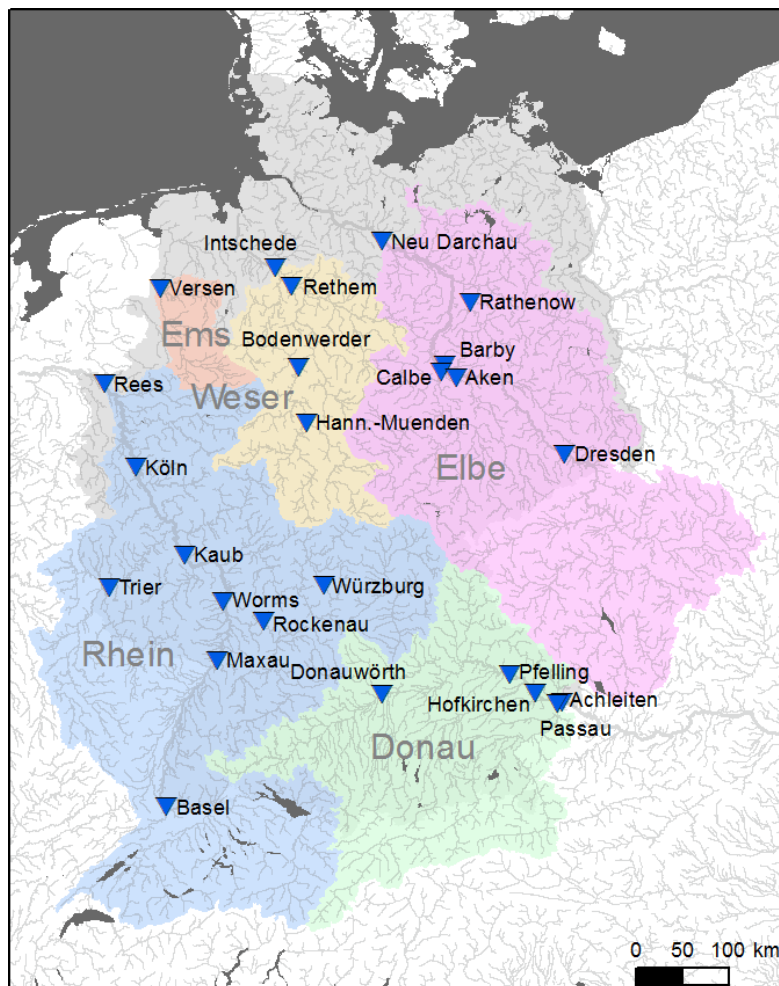


Abbildung 5-4: Pegelpunkte des Datenkollektivs "Hydrologie".

5.3.2 Ensemblereduktion auf Impaktebene: Szenarienkorridore und repräsentative Simulationen

Einige rechenintensive Modelle, die Abflussdaten als Eingangsgrößen verwenden, sind aufgrund begrenzter Ressourcen (Hardware, Projektlaufzeit) nicht immer in der Lage, das vollständige Ensemble der Abflusssimulationen zu berücksichtigen. Das gilt etwa für die Modellierung der Wassergüte und des Feststofftransports im Gewässer im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*. Es ist also wesentlich, mit einer möglichst geringen Teilmenge der Ensemblesimulationen, möglichst die gesamte Charakteristik des Ensembles abzudecken ("Ensemblereduktion"). Die Charakteristik eines Ensembles kann beschrieben werden durch (a) eine Bandbreite und (b) eine innere Struktur (Verteilung) der einzelnen Simulationen innerhalb der Bandbreite.

Bereits im Rahmen des Forschungsprogrammes KLIWAS wurde ein Verfahren der Ensemblereduktion auf Ebene der Wasserhaushaltsmodellierung eingesetzt (Nilson et al. (2014)). Das Verfahren gliedert sich in drei Schritte:

- 1) Bestimmung eines relevanten Pegels und Abflusskennwertes
- 2) die Ausweisung sogenannter "Szenarienkorridore"
- 3) und die Auswahl "Repräsentativer Simulationen".

Die Bestimmung eines Pegels und Abflusskennwertes erfolgt aus Sicht des nachgeschalteten Modellbausteins, welcher die "Repräsentativen Simulationen" nutzen soll bzw. vor dem Hintergrund der mit diesem Modell zu beantwortenden Fragestellung. So ist beispielsweise die Schifffahrt (Abladung) auf dem Rhein sehr sensitiv gegenüber sommerlichen Niedrigwasserbedingungen im Bereich des Mittelrheins, dem Nadelöhr des Schiffstransportes auf dem Rhein. Insofern wurde in diesem Fall der Pegel Kaub und ein Niedrigwasserkennwert (z. B. NM7Q⁹) als besonders relevant ausgewählt und für die Ausweisung von Szenarienkorridoren verwendet.

"Szenarienkorridore" sind Bereiche innerhalb des Gesamtensembles, in denen besonders viele Simulationen hinsichtlich eines Pegels und Kennwertes besonders ähnliche Änderungssignale ergeben und daher eng zusammenliegen. Einzelsimulationen, die ein deutlich abweichendes Verhalten zeigen, werden außer Acht gelassen. Technisch detektiert werden diese Korridore durch eine hierarchische Clusteranalyse. Abbildung 5-5 stellt das Verfahren anderen Möglichkeiten der Informationsreduktion (Minimum/Maximum, Perzentile, arithmetisches Mittel, Median) gegenüber. Weitere Hintergründe und die in KLIWAS gewählten Parameter der in KLIWAS angewendeten Clusteranalyse sind bei Nilson et al. (2014) zu finden.

In Kenntnis der Szenarienkorridore ist die Wahl der "Repräsentativen Simulationen" sehr einfach. Sofern ein nachgeschaltetes Modell aufgrund von begrenzten Rechenressourcen nur ausgewählte Simulationen verarbeiten kann, wären die Simulationen herauszugreifen, die den unteren bzw. den oberen Rand des Szenarienkorridors (bzw. der Korridore der *naben* und *fernen Zukunft*) repräsentieren.

Je nachdem, ob ein oder zwei Zukunftszeiträume bearbeitet werden sollen, reduziert sich mit dem beschriebenen Vorgehen die Anzahl der zu verarbeitenden Simulationen auf zwei (ein Zeitraum) oder vier (*nabe* und *ferne Zukunft*). Gleichzeitig bleibt ein Großteil der Bandbreite des Ensembles erhalten und es stehen Zeitreihendaten für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist, dass sich je nach relevantem Pegel und Kennwert unterschiedliche repräsentative Simulationen ergeben können. Wenn für ein Modellsystem also unterschiedliche Pegel und Kennwerte relevant sind, kann sich die Anzahl der repräsentativen Simulationen somit erhöhen.

⁹ Der Niedrigwasserabfluss NM7Q beschreibt die kleinste Abflussmenge (in m³/s) gemittelt über sieben aufeinanderfolgende Tage im Betrachtungszeitraum.

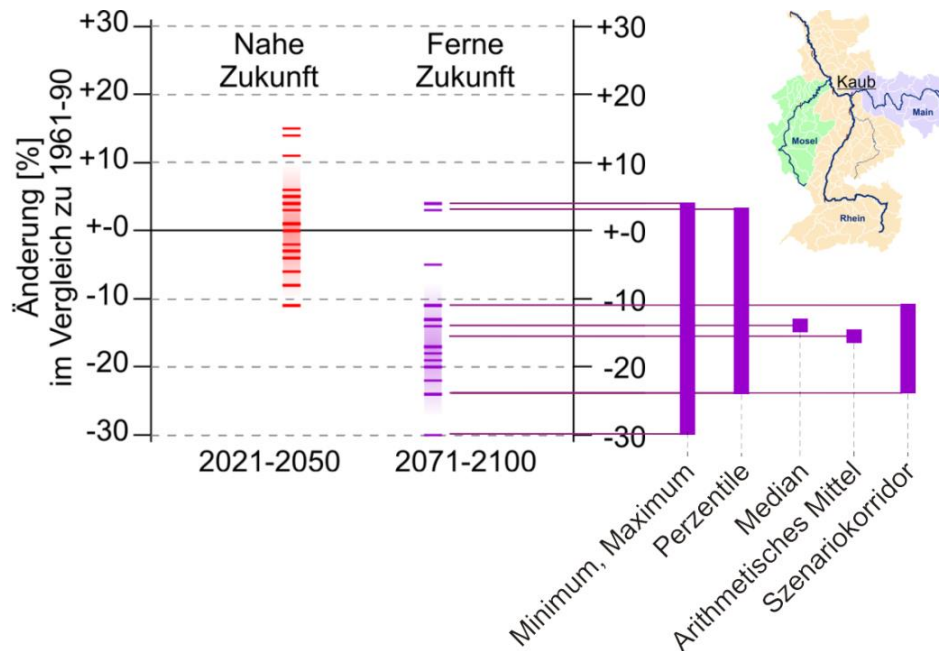


Abbildung 5-5: Schema zur Ableitung der "Szenariokorridore" und Vergleich mit anderen Verfahren zur Beschreibung eines Ensembles am Beispiel der Änderungen des Niedrigwasserabflusses am Pegel Kaub im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai-Okt., Abbildung aus Nilson et al. (2014)).

5.3.3 Bereitstellung von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit

Für verschiedene Fragestellungen sind hydrodynamische Größen (insbes. Wasserstand, Wassertiefe, Wasserspiegellage bzw. Strömungsgeschwindigkeit) relevanter als hydrologische Größen (Abfluss). Zu nennen sind hier vor allem die Schifffahrt (Bestimmung der möglichen Abladetiefe und Vortriebskosten), aber auch die Verkehrsträger Schiene und Straße (Wasserspiegellage/Überflutung an flussnahen Verkehrstrassen).

Zur Bestimmung von Daten zu Wasserstand, Wassertiefe und Wasserspiegellage in Abhängigkeit vom Durchfluss stehen mehrere Verfahren zur Verfügung.

- Aus Abflusskurven von Pegeln können am Pegelstandort selbst aus interessierenden Abflusswerten (z. B. Kenngrößen aus einer statistischen Analyse oder aus einer Simulation) die zugehörigen Wasserstandswerte ermittelt werden. Sie beziehen sich zunächst auf den Pegelnullpunkt, können mit diesem jedoch auch in Höhen über Normalnull umgerechnet werden.
- Unter Anwendung des an der BfG entwickelten web-basierten Fachdienstes FLYS (BfG 2013) kann für gegebene stationäre Abflusswerte der zugehörige Wasserstand an einem beliebigen Standort eines in diesem System enthaltenen Fließgewässers ermittelt werden. FLYS ist dabei kein hydraulisches Modell, sondern ein Instrument zur Verarbeitung (Interpolation) von verfügbaren Modellergebnissen vor dem Hintergrund gemessener geodätischer, hydrologischer und morphologischer Daten.
- Die umfassendsten Aussagen zur raumzeitlich verteilten Dynamik des Wasserstands sowie auch der Strömungsverhältnisse in Fließgewässern liefern hydrodynamisch-numerische (HN-)Modelle. Mit ihnen können auch variable Bedingungen im Fließgewässersystem (z. B. bei wasserbaulichen Anlagen) und vielfältige Ereigniseigenschaften (z. B. im Hinblick auf die Überlagerung von Hochwasserwellen an Nebenflusseinmündungen) berücksichtigt werden. Liegen Zuflussganglinien vor, werden Hochwasserwellen mit instationären HN-Modellen im Ablauf volumentreu und unter Berücksichtigung von Retentionsprozessen besser begründet simuliert, was z. B. für die Modellierung der morphodynamischen Gewässerentwicklung oder der Überflutungsdynamik von Vorländern von Bedeutung ist. Allerdings ist der Aufwand deutlich höher als bei stationären HN-Modellen.

An der Bundesanstalt für Gewässerkunde wird das HN-Modell SOBEK (Deltares 2017) genutzt. Dabei handelt es sich um eine Software, die u. a. für die stationäre oder instationäre Simulation der hydrodynamischen Prozesse in Gerinnen bzw. Netzen von Fließgewässern eingesetzt werden kann. Neben einem 1D-Modul kann dabei optional auch ein 2-D-Modul zugeschaltet werden, um Strömungsprozesse bei überschwemmten Flächen besser abzubilden. SOBEK ist somit flexibel einsetzbar und umfasst alle zuvor genannten Modellansätze.

5.3.4 Bereitstellung von Stundenwerten

Einige der von hydrologischen Daten abhängigen Modelle (z. B. der BAW) benötigen Stundenwerte. Derzeit ist eine bundesweite Wasserhaushaltssimulation auf Stundenbasis noch nicht möglich. Um diese Schnittstelle bedienen zu können, werden für ausgewählte Pegel aus den durch LARSIM-ME generierten Tagesmittelwerten Stundenwerte abgeleitet. Dies geschieht mit einer massenerhaltenden Spline-Funktion, d.h., es wird sichergestellt, dass der Mittelwert der abgeleiteten Stundenwerte identisch ist mit dem ursprünglichen Tagesmittelwert (bei linearen Interpolationen ist dies nicht gegeben). Es ist anzumerken, dass es sich hier um einen rein statistischen Arbeitsschritt handelt, der das Funktionieren der Modellwerkzeuge sicherstellt. Neue Informationen z. B. über die innertägliche Form einer Hochwasserwelle sind nicht enthalten.

5.3.5 Generierung von Abflussreihen zur Absicherung von Aussagen im Extrembereich

Extremereignisse sind (a) extrem relevant, weil potentiell gefährdend und (b) extrem selten. Aufgrund der Seltenheit ist zu hinterfragen, inwieweit Abflussreihen von 30 Jahren Länge, die im Fokus der Auswertungen im ExpN-TF1 stehen (vgl. Abschnitt 3.4.1), für Ereignisse hoher Jährlichkeit (z. B. HQ₁₀₀) repräsentativ sind. In diesem Zusammenhang stellt die Verlängerung der Abflussreihen durch besondere Verfahrensschritte (z. B. stochastische Simulation) neben extremwertstatistischen Analysen von Serien jährlicher Scheitelabflüsse HQ(a) eine weitere Option dar. Zur besseren Absicherung von Aussagen zu Abflussexremen ist es möglich an ausgewählten Pegeln je Zeitscheibe (Beobachtung oder Simulation) Reihen von mehreren Jahrhunderten zu generieren.

Eine Option ist das stochastische Modell zur Simulation von Tagesabflüssen nach Treiber (1975), das allein anhand beobachteter (oder auch mit LARSIM-ME simulierter) Abflussreihen angepasst werden kann, um diese nachfolgend statistisch äquivalent beliebig zu verlängern bzw. zu vervielfältigen. Damit kann die Streubreite des Abflussprozesses (bzw. daraus extrahierter HQ(a)-Serien) identifiziert werden, womit die Signifikanz eventueller Unterschiede in Extremwertstatistiken für verschiedene Zeiträume besser beurteilt werden kann. Auch kann die stochastische Simulation als Referenz für eine besser abgesicherte Extrapolation von Verteilungsfunktionen z. B. für HQ(a)-Serien dienen.

Eine weitere Option, die für die Arbeiten im BMVI-Expertennetzwerk eingesetzt wurde (Schwerpunkt *Hochwassergefahren, Schifffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*), ist die Bildung eines "Grand Samples". Dabei wird der positive Umstand genutzt, dass jede Auswertungszeitscheibe von i. d. R. 30 Jahren mehrfach simuliert wurde. Für das Szenario *Weiter-nie-bisher* liegen beispielsweise je Zeitscheibe 16 x 30 Jahre, also 480 Jahre für die extremwertstatistischen Auswertungen zur Verfügung.

5.3.6 Änderung von Wasserhaushaltsgrößen

Im Fokus der Arbeiten im BMVI-Expertennetzwerk steht der Verkehrssektor, jedoch ergibt sich ein umfangreicher Nutzen auch für andere Sektoren. Bereits aus dem BMVI-Forschungsprogramm KLIWAS wurde dem DAS-Prozess in mehreren Handlungsfeldern zugearbeitet. Prototypische Datenprodukte aus KLIWAS und zeitgleichen Projekten sind in Form der DAS-Indikatoren "Grundwasserneubildung" (WW-03, S. 337), "Abflusshöhe" (WW-04, S. 341) und "Differenz zwischen Wasserdargebot und genutztem Prozesswasser" (IG-04, S. 482) in den Bericht des Behördennetzwerkes Vulnerabilität eingeflossen. Das Behördennetzwerk Vulnerabilität ist ein Zusammenschluss von Bundesoberbehörden und -instituten verschiedener Ressorts. Im Auftrag der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie an den Klimawandel

(IMA-A) zielt es darauf ab die Vulnerabilität (Verbundbarkeit) sektorenübergreifend in den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie zu identifizieren und zu mindern (UBA 2015). Die einzugsgebietsweiten hydrologischen Modellierungen mit LARSIM erlauben flächendeckende Aussagen zu Änderungen verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Möglich sind Auswertungen zu Betroffenheiten durch Wasserknappheit oder zu Schneemengen. Hier können ausgehend von den Entwicklungen im BMVI-Expertenetzwerk Daten auf einer für die DAS-relevanten Raumskala entwickelt werden

5.3.7 Bereitstellung charakteristischer Abflussjahre und Abflussganglinien längerer Zeiträume

Mit einigen rechenintensiven Modellen ist es nicht möglich mehrjährige Zeitscheiben zu simulieren. Daher wird in diesem Fall auf charakteristische Jahre zurückgegriffen. Auch hier gibt es mehrere Möglichkeiten. Für die Schnittstelle zum Modell der Deutschen Bucht der BAW (DS Hamburg) wurde beispielsweise in einem separaten Projekt aus Klimamodellläufen für jede untersuchte Zeitscheibe ein charakteristisches Jahr mit Blick auf die Größe Wind und die maritimen Randbedingungen des verwendeten Modells ausgewählt (siehe Abschnitt 4.3.3). Für die binnenländischen Randbedingungen (Oberwasserzufluss) wurden mit den gleichen Klimamodellläufen Abflusswerte generiert, damit die Randwerte in sich konsistent sind. Für eine Feststofftransportmodellierung im Rheinabschnitt zwischen den Pegeln Bonn und Köln mit dem Zufluss der Sieg (Pegel Menden) durch die BAW wurden charakteristische Abflussganglinien für die Gegenwart (*Bezugszeitraum* 1971–2000) sowie für die *nahen* und *fernen Zukunft* an einem Referenzpegel wie folgt ausgewählt:

Für die Abflussganglinien aller für ein Emissionsszenario (z. B. *Weiter-nie-bisher-Szenario*) untersuchten Modellketten werden pro analysiertem Zeitraum (s. o.) zunächst jeweils vieljährlich datumsbezogen gemittelte 30-Tagesmittel berechnet. Hieraus werden wiederum die datumsbezogenen Mittelwerte für alle Modellketten des Szenarios berechnet und als saisonale Referenzstruktur bezeichnet. Pro Zeitraum wird schließlich die Modellkette bzw. Abflussganglinie als charakteristisch ausgewählt, deren Tageswerte die geringste Summe absoluter Abweichungen zur saisonalen Referenzstruktur haben. Als weiteres Auswahlkriterium wurde auch die minimale Abweichung der pro Modellkette gemittelten 30-Tagesmittel von der saisonalen Referenzstruktur herangezogen. Beispielsweise konnte für den Pegel Köln im *Bezugszeitraum* die Modellkette „CanE-r1-REMO“ als charakteristisch ausgewählt werden (siehe Abbildung 5-6). Auch in den analysierten Zukunftszeiträumen führt diese Modellkette zu den besten oder annähernd besten Anpassungen an die jeweiligen saisonalen Referenzstrukturen, sodass sie auch hier als charakteristisch angenommen werden kann. Schließlich zeigt Abbildung 5-7 das Abflussjahr 1978 der Modellkette „CanE-r1-REMO“, das im Ensemble aller analysierten Modellketten des Klimaszenarios *Weiter-nie-bisher* am Pegel Köln nach den o. g. Kriterien die charakteristischsten Eigenschaften für dieses Szenario aufweist.

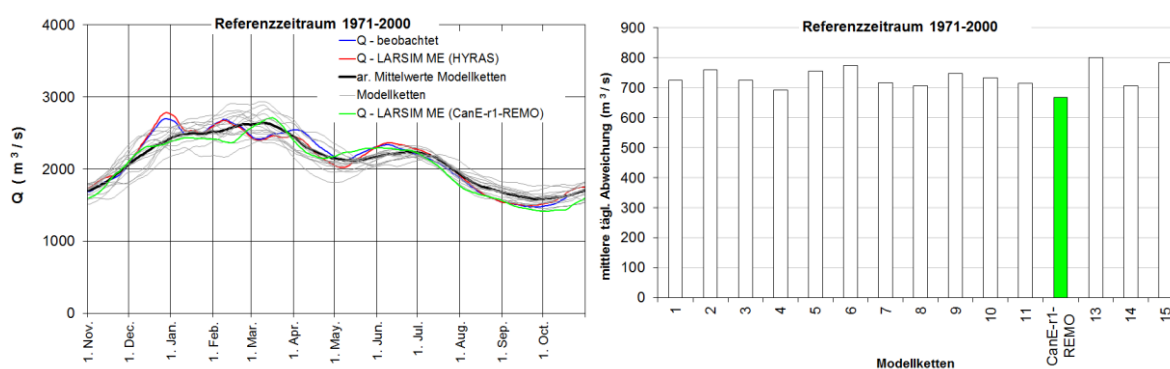


Abbildung 5-6: Beispiel für die Auswahl einer Modellkette mit charakteristischer Abflussganglinie für ein Klimaszenario (hier *Weiter-nie-bisher*), für einen Pegel (hier Köln) und für einen Zeitraum (hier *Bezugszeitraum* 1971–2000). Aus 15 Modellketten wurde hier die Modellkette CanE-r1-REMO mit anschließender Wasserhaushaltssimulation mit LARSIM-ME ausgewählt.

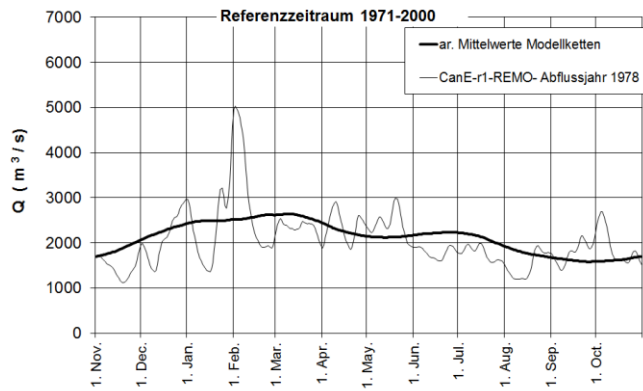


Abbildung 5-7: Beispiel für die Auswahl eines charakteristischen Abflussjahres für ein Klimaszenario (hier *Weiter-nie-bisher*), für einen Pegel (hier Köln) und für einen Zeitraum (hier Bezugszeitraum 1971–2000). Aus allen simulierten Abflussjahren von 15 Modellketten wurde hier das Abflussjahr 1978 der Modellkette CanE-r1-REMO mit anschließender Wasserhaushaltssimulation mit LARSIM-ME ausgewählt.

5.3.8 Produktvariante "Extremes Jahr"

Die Begründung für die Auswahl einzelner "Extremer Jahre" ist dieselbe wie im Fall der „Charakteristischen Jahre“ (vgl. Abschnitt 5.3.7). Besonders rechenintensive Modelle, die u. a. Abflussdaten als Eingangsgrößen verwenden, können aus Ressourcengründen nur wenige ausgewählte Jahre simulieren. Im Fall der "Extremen Jahre" werden Jahre mit potentiell besonders schadenintensiven Ereignissen gesucht, um Sensitivitätsbetrachtungen für die Verkehrsinfrastruktur durchführen zu können.

"Extreme Jahre" können einerseits anhand bestimmter statistischer Eigenschaften aus Beobachtungen oder Simulationen (Projektionen) herausgefiltert werden. Mögliche Kriterien können dabei eine extreme Intensität, die Dauer oder ein Defizit- oder Hochwasservolumen sein. Andererseits können Extremjahre gezielt konstruiert werden. Ein Ansatz hierfür ist die Rekombination extremer Episoden aus unterschiedlichen Jahren der Beobachtung/Simulation. Durch die Rekombination entstehen Extreme, die noch nie beobachtet wurden. Auf dieser Grundlage können "Stresstests" für die Verkehrsinfrastruktur oder bestimmte Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Konstruktion eines extremen Niedrigwasserjahres

Abbildung 5-8 erläutert das Prinzip der "Episodenrekombination" exemplarisch für den Typus "Extremes Niedrigwasserjahr". Im Grundsatz kann ein extremes Niedrigwasserjahr durch die Wahl des jeweils niedrigsten Abflusswerts aller Kalendertage des Beobachtungsdatensatzes generiert werden. Von diesem Vorgehen wird jedoch abgewichen, da (1) die bestehenden Autokorrelationsstrukturen des Abflusses zumindest teilweise aufgelöst würden und (2) ggf. ergänzende Informationsquellen (Dokumentationen, Medienanalyse) zur Ereignisanalyse hinzugezogen werden können, wenn größere Zeitabschnitte realitätsgetreu erhalten bleiben.

Die Konstruktion der Niedrigwasserszenarien beruht auf vier Kriterien:

- Für jeden Monat wird aufgrund der Verteilung der einzelnen Tageswerte des Beobachtungszeitraumes ein niedriger Abflussschwellenwert (FDC_{Q95}) bestimmt.
- Es werden die Jahre ausgewählt, in denen die ununterbrochene Dauer der Unterschreitung des jeweiligen Schwellenwertes (abgesehen von kurzfristigen Unterbrechungen) maximal ist (MaxD).
- Aus den im vorangegangenen Absatz genannten Gründen wird eine Mindestdauer der Niedrigwasserepisoden von 14 Tagen ($MaxD > 14$) angesetzt. Wenn kein Ereignis gefunden wird, wird der Abflussschwellenwert schrittweise (1%-Schritte) erhöht.
- Der Verknüpfungspunkt (Kalendertag) zwischen den einzelnen Niedrigwasserepisoden wird so gewählt (+/-5 Tage), dass Sprünge in den rekombinierten Zeitreihen minimiert sind.

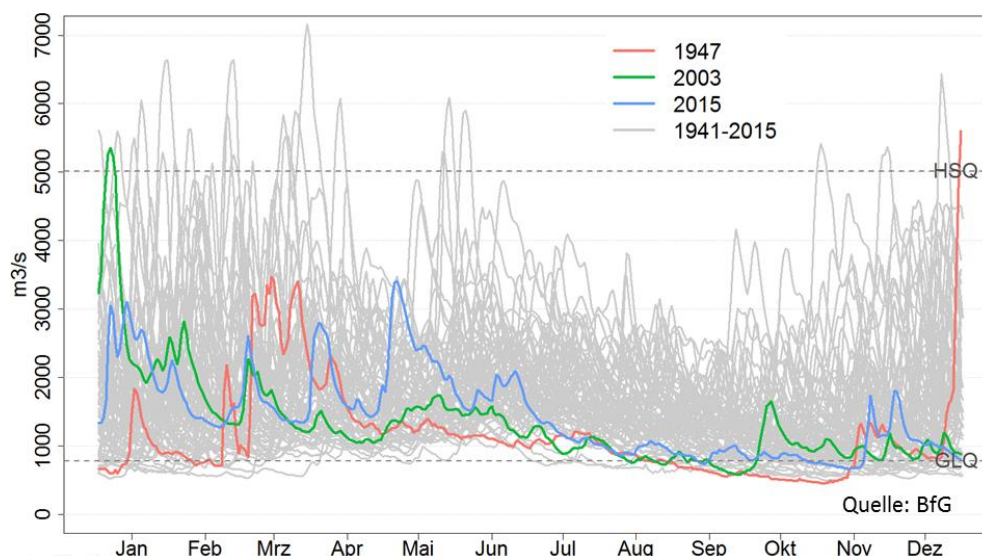


Abbildung 5-8: Grafik zur Erläuterung des Konzepts der "Episodenrekombination".

Daraufhin werden die statistischen Eigenschaften (NQ, MaxD mit Bezug auf die Schwellenwerte der Beobachtungsperiode) des so konstruierten extremen Niedrigwasserjahres erfasst. Anschließend werden ähnliche Ereignisse im Datenpool der Abflussprojektionen gesucht. Die Anzahl der Ereignisse wird für ausgewählte *Bezugszeiträume* (vgl. Abschnitt 3.4.1) ermittelt.

Konstruktion eines extremen Hochwasserjahres

Zur Konstruktion eines extremen Hochwasserjahres ist das vorgenannte, auf statistischen Kriterien beruhende Vorgehen nicht geeignet. Hier muss die hydrologische Plausibilität der Ereignisabfolgen und Hochwassergenesen sichergestellt werden. So ist beispielsweise die Rekombination von zwei zeitlich eng aufeinanderfolgenden Hochwasserereignissen infolge von Schneeschmelze zu vermeiden, da der Schnee nur einmal schmelzen kann. Auch ist zu berücksichtigen, dass Hochwasserereignisse (z. B. intensive Niederschläge) im Unterschied zu Trockenheit weniger großflächig auftreten. Somit ist eine regionale Differenzierung bedeutsamer.

Die Episodenrekombination zur Ableitung extremer Hochwasserereignisse setzt daher nicht an der Größe Abfluss, sondern an den hydrometeorologischen Feldern an. Die Auswahl von relevanten Episoden erfolgt nicht auf statistischem Wege, sondern anhand von Expertenwissen unter Berücksichtigung der für einen Pegel spezifischen Hochwassergenesen. Ein entsprechendes Vorgehen wurde bereits im Rahmen einer Studie in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) angewendet. Ziel war hier die Generierung von Szenarien extrem hoher und großflächiger Hochwasserereignisse in Deutschland, die durch eine Kombination ergiebiger Niederschläge und Schneeschmelzen gesteuert wurden. Die berücksichtigten Episoden sind Abbildung 5-9 zu entnehmen.

Als hydrometeorologische Datengrundlage werden die HYRAS-Rasterdatensätze (vgl. Abschnitt 3.2.1) verwendet. Die Daten der ausgewählten Episoden wurden als neuer hydrometeorologische Datensatz rekombiniert und dienen als Antrieb für das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME, das letztlich die Hochwasserganglinien erzeugt. Die statistischen Eigenschaften (HQ, MaxD mit Bezug auf relevante Schwellenwerte) des so konstruierten extremen Hochwasserszenarios werden erfasst und eingeordnet.

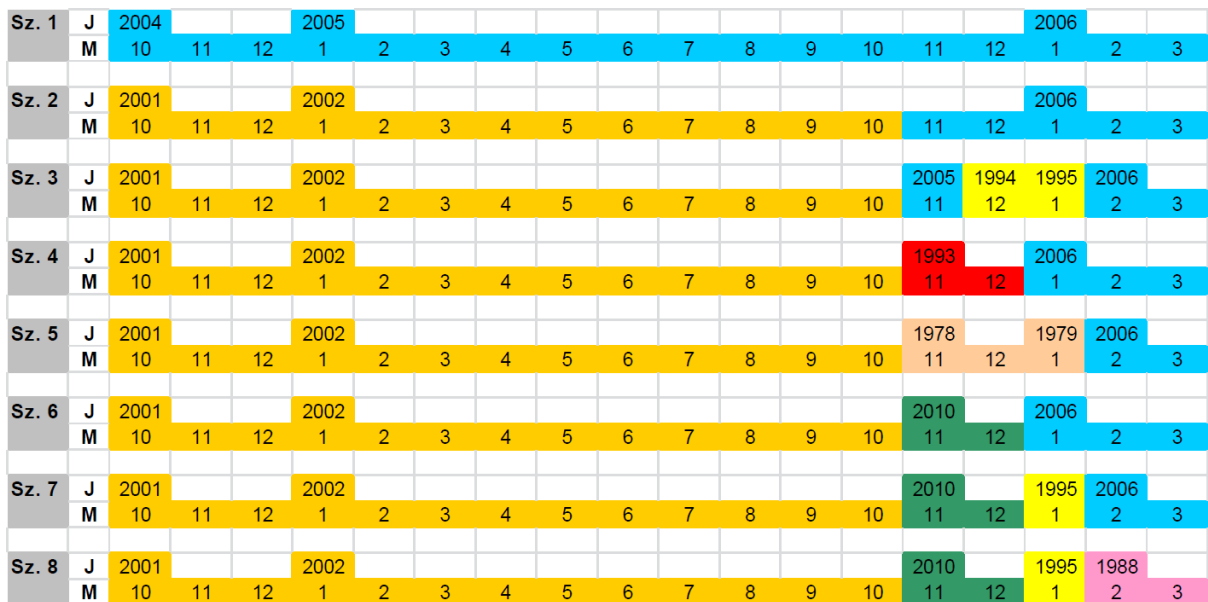


Abbildung 5-9: Exemplarische Zusammenstellung von Witterungsepisoden zur Generierung von Szenarien extrem großflächiger Schnee- und Eishochwasserereignisse in Deutschland (BfG 2012).

5.4 Produkte 2. Ordnung: Kennwerte, Indikatoren

Bei den Produkten der "2. Ordnung" handelt es sich um aggregierte Informationen (Kennwerte, Indikatoren), die die wesentlichen Aspekte der Thematik Klimawirkungen auf die Wassermenge/Hydrologie unmittelbar sichtbar machen. Zielgruppen sind u. a. Planer und Entscheider in WSV und BMVI sowie Adressaten im Kontext des DAS-Prozesses.

In Erweiterung des Angebotes der Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2013" (KLIWAS), stellt das Modul Hydrologie@BfG im Zuge der Fortschreibung der Abflussprojektionen und -szenarien "BfG2019" die in Tabelle 5-1 zusammengestellten Kennwerte bereit.

Tabelle 5-1: Prioritärer Kennwertkatalog des Moduls Hydrologie@BfG.

Abflussbereich	Kennwert	Anwendungsbereich
Mittelwasser	MQ _{Jahr}	Wasserwirtschaft
	MQ _{Halbjahr}	
	MoMQ	
	Parde-Koeffizienten	
Niedrigwasser	NM7Q _{Jahr}	Schifffahrt, Wasserstraßenmanagement inkl. Ökologie
	SumD _{Jahr} (GIQ, Schiffsgrößenbezogene Schwellenwerte)	
	MaxD _{Jahr} (GIQ, Schiffsgrößenbezogene Schwellenwerte)	
Hochwasser	MHQ _{Jahr} (robuster als HQ)	Hochwassergefahren, Bundesländer, BAST, EBA
	SumD _{Jahr} (HSQ, ggf. weitere Schwellenwerte BAST und EBA)	
	MaxD _{Jahr} (HSQ, ggf. weitere Schwellenwerte BAST und EBA)	
	HQ ₁₀₀ (Änderungen Jährlichkeit)	

Abflussbereich	Kennwert	Anwendungsbereich
Erklärungen	MQ = Mittlerer Abfluss (hydrologischer Mittelwasserkennwert), MoMQ = Mittlerer monatlicher Abfluss, NM7Q = Niedrigstes 7-Tagesmittel des Abflusses (hydrologischer Niedrigwasserkennwert), Parde-Koeffizienten = Indikator für die Saisonalität des Abflusses, d. h. das Abflussregime (rechnerisch: Quotient aus dem langjährigen Monatsabfluss und dem langjährigen Jahresabfluss), SumD = Summe der Tage über oder unter einem Schwellenwert, MaxD = Maximale ununterbrochene Dauer der Über-/Unterschreitung eines Schwellenwertes, GIQ = Mit dem Gleichwertigen Wasserstand korrespondierender Abfluss, HSQ = Mit dem Höchsten Schiffahrtswasserstand korrespondierender Abfluss, HQ ₁₀₀ = Hochwasserscheitel, der statistisch einmal alle 100 Jahre auftritt	

Die Kennwerte werden ausgehend von den unter Kapitel 5.3.1 genannten Abflusszeitreihen bereitgestellt. Weitere Kennwerte können bei Bedarf und nach Prüfung der Simulationsgüte ergänzt werden. Unter Berücksichtigung der in Deutschland anzutreffenden Abflussregime (typisches Auftreten von Hoch- und Niedrigwasserereignissen) werden die Niedrigwasserkennwerte jeweils mit Bezug auf das Wasserhaushaltsjahr (i. d. R. April bis März) berechnet, während die Mittel- und Hochwasserkennwerte mit Bezug auf das Hydrologische Jahr (November bis Oktober) bzw. Halbjahr abgeleitet werden.

5.4.1 Aufbereitungstyp Grafik

Die Kennwerte werden in drei Grafiktypen ausgegeben. Zum einen als Zeitreihengrafik 30-jähriger gleitender Mittel von Änderungssignalen eines Kennwertes gegenüber dem Mittelwert des Bezugszeitraums 1971–2000. Mit diesem Grafiktyp wird das Ausmaß der dekadischen Klimavariabilität und die zeitliche Entwicklung der Unsicherheitsspanne des Multimodellensembles sichtbar (s. Beispiel in Abbildung 5-10, links). Auf Basis der einzelnen Ensemblemitglieder lassen sich Perzentile ableiten und in eine optisch etwas leichter greifbare Abbildungsvariante überführen (Abbildung 5-10, rechts).

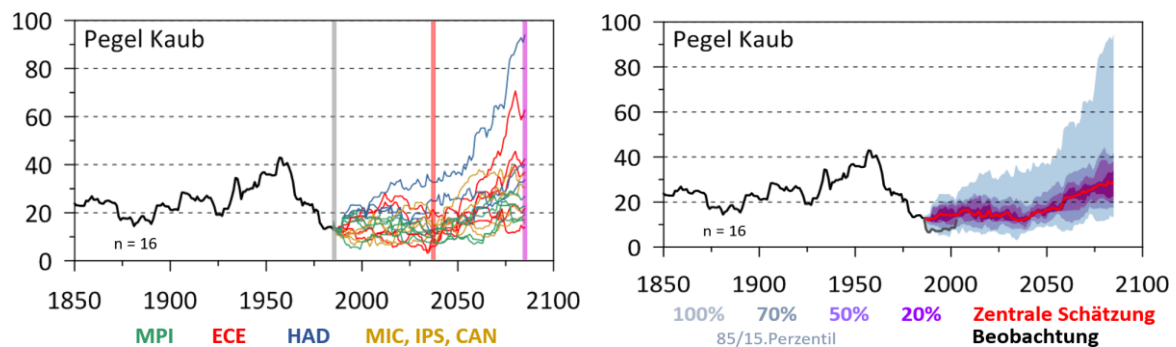


Abbildung 5-10: Beispiel Grafiktyp "Zeitreihe" (Tage unter GIQ am Pegel Kaub). Dargestellt sind Zeitreihen 30-jähriger gleitender Mittel von Änderungssignalen des Kennwertes gegenüber dem Wert des Bezugszeitraums 1971–2000 auf Basis beobachteter Pegeldata (schwarze Linie) und Abflussprojektionen der Version "BfG2019". Links: Kurvenschar (mit Farbgebung in Abhängigkeit vom verwendeten globalen Klimamodell (vertikale Balken vgl. Abbildung 5-11)). Rechts: Schattierungen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Perzentilbereichen.

Des Weiteren werden die Werte der vorrangig betrachteten Zeitscheiben (*Bezugszeitraum*, *nabe* und *ferne Zukunft*, vgl. Abschnitt 3.4.1) als separate Zeitscheibengrafik dargestellt. Die Information zur dekadischen Klimavariabilität wird somit ausgeblendet, stattdessen wird auf die Charakteristika des Multimodell-Ensembles z. B. im Längsschnitt eines Flusses fokussiert (s. Beispiel in Abbildung 5-11).

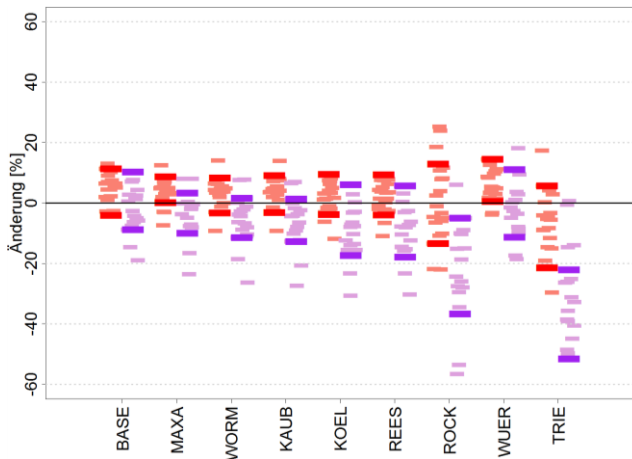


Abbildung 5-11: Beispiel Grafiktyp "Zeitscheibe". Dargestellt sind 30-jährige Mittel von Änderungssignalen eines Kennwertes der *nahen* und *fernen Zukunft* gegenüber dem Wert des Bezugszeitraums 1971–2000 (hier: auf Basis von Abflussprojektionen der Version "BfG2013"). Fett hervorgehoben sind die Ränder "Szenarienkorridore" (vgl. Abschnitt 5.3.2).

5.4.2 Aufbereitungstyp Tabelle

Um die wesentlichen Informationen für mehrere Pegel und mehrere Kennwerte ad hoc sichtbar und quantitativ fassbar zu machen, werden farblich hinterlegte Tabellen ausgegeben. Ein Visualisierungsbeispiel liefert Tabelle 5-2. Diese Tabellen enthalten für jeden Kennwert (Spalte 1) und Pegel (Spalte 2):

- a) den mittleren Wert aus der Beobachtung für den Zeitraum (hier: 1971–2000, Spalte 3),
- b) die Änderung des aus Beobachtungen abgeleiteten Werts für den Gegenwartszeitraum 1981–2010 im Vergleich zum beobachteten Referenzwert (Spalte 4),
- c) die unteren und oberen Ränder des Szenarienkorridors oder Perzentilbereichs (wahlweise für die Bandbreite des Ensembles) der Änderung des Kennwertes für beide Zukunftszeiträume im Vergleich zum simulierten Referenzwert (Spalten 5 und 6).

Tabelle 5-2: Beispiel Aufbereitungstyp "Tabelle". Entnommen bei Nilson et al. (2020), dort Tabelle 5-10.

Obere Donau	Pegel	Referenz m3/s	Gegenwart % Referenz	<i>Nahe Zukunft</i> % Referenz	<i>Ferne Zukunft</i> % Referenz
MQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	457	-2	-5 bis +10	-10 bis +10
	Pfelling	468	-2	-5 bis +10	-10 bis +15
	Hofkirchen	646	-1	-5 bis +10	-10 bis +10
	Achleiten	1424	0	0 bis +5	-10 bis +10
MQ hyd. Winter Nov-Apr RCP8.5 (16)	Schwabelweis	493	-1	0 bis +15	0 bis +30
	Pfelling	506	-1	0 bis +15	0 bis +35
	Hofkirchen	675	0	0 bis +15	0 bis +30
	Achleiten	1264	+1	+5 bis +20	+10 bis +30
MQ hyd. Sommer Mai-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	427	-3	-5 bis +5	-20 bis 0
	Pfelling	435	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Hofkirchen	625	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Achleiten	1598	-1	-5 bis 0	-25 bis -5
NM7Q Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Schwabelweis	222	-4	-10 bis +5	-20 bis 0
	Pfelling	227	-3	-10 bis +5	-20 bis 0
	Hofkirchen	340	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Achleiten	734	+1	-5 bis +10	-15 bis +10
MHQ hyd. Jahr	Schwabelweis	1478	+7	0 bis +25	0 bis +25
	Pfelling	1501	+9	0 bis +25	0 bis +25

Obere Donau	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	Nah Zukunft % Referenz	Ferne Zukunft % Referenz
Nov-Okt RCP8.5 (16)	Hofkirchen	1883	+8	0 bis +20	+5 bis +25
	Achleiten	3835	+12	0 bis +20	+5 bis +20
HQ ₁₀₀ hyd. Jahr	Schwabelweis	3400	k. A.	+10	+15
	Pfelling	3400	k. A.	+10	+15
Nov-Okt RCP 8.5 (13)	Hofkirchen	4100	k. A.	+15	+15
	Achleiten	8800	k. A.	+20	+25

Das Vorgehen zur Bestimmung der Szenarienkorridore ist in Abschnitt 5.3.2 bzw. der dort angegebenen Literatur beschrieben. Neben den zahlenmäßigen Grenzen der Szenarienkorridore sind die Spalten 5 und 6 in Tabelle 5-2 farbig hinterlegt. Die Farben signalisieren, ob die Bandbreite des entsprechenden Kennwertes überwiegend (hier zu mind. 3/4) im positiven Bereich liegt (blau, Zunahme), im negativen Bereich liegt (orange, Abnahme) oder ob indifferente Signale vorliegen (grau).

5.4.3 Aufbereitungstyp Karte

Für einige Kennwerte wird auch eine kartographische Sicht erstellt. Dies ist insbesondere für Kennwerte erfolgt, die in die verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalyse (Hänsel et al. 2020) oder in die KWVA-2021 eingehen. Abbildung 5-12 zeigt eine exemplarische Kartenserie, die ausgehend von Daten des BMVI-Expertenetzwerks durch den Prototypen des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“ erstellt wurde. Die Darstellung orientiert sich an den Vorgaben der KWVA des Bundes.

Indikator: Tage über Schwellenwert (Q01)

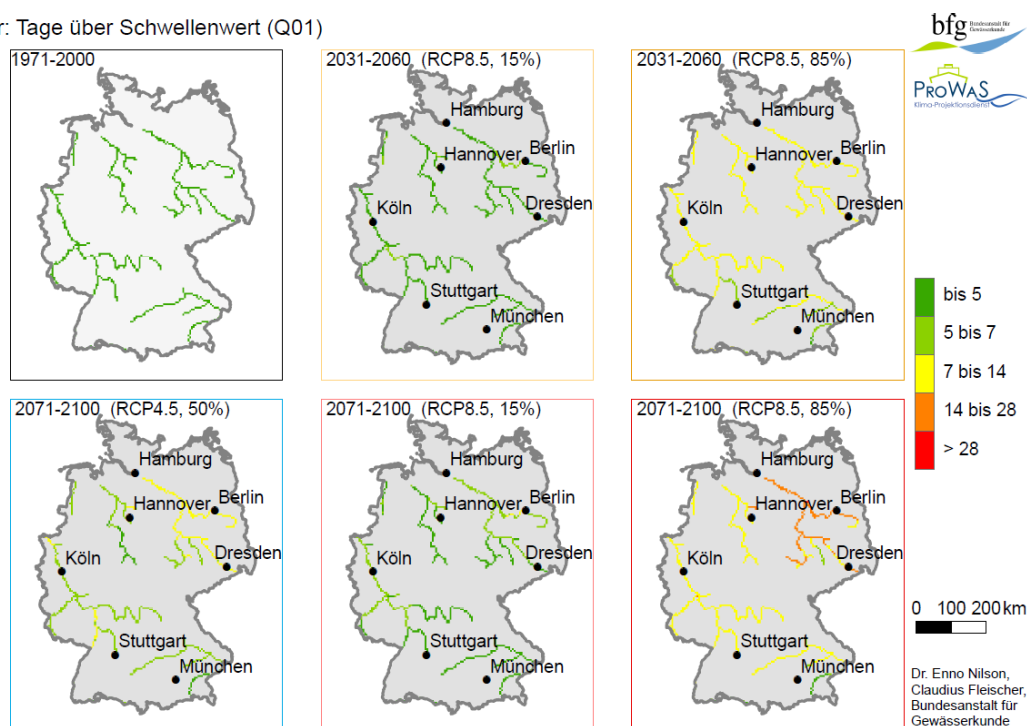


Abbildung 5-12: Visualisierungsbeispiel Karte. Änderungen der Tage über dem Schwellenwert Q01 des *Bezugszeitraums* 1971–2000 (Abfluss, der heute im Mittel an 1% der Tage eines Jahres überschritten wird). Links oben: Referenz; links unten: Szenario *moderater Anstieg, ferne Zukunft* (RCP4.5, Median von 11 Projektionen). Mitte und rechts oben: Szenario *Weiter-nie-bisher, nahe Zukunft* (RCP8.5, 15. und 85. Perzentil von 16 Projektionen). Mitte und rechts unten: Szenario *Weiter-nie-bisher, ferne Zukunft* (RCP8.5, 15. und 85. Perzentil von 16 Projektionen).

6 Hydrodynamische Auswertungen im Küstenbereich

*Elisabeth Rudolph, Caroline Rasquin, Benno Wachler, Norbert Winkel
(Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg)*

6.1 Einleitung

Im Folgenden wird der Auswerterahmen für die Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen im Küstenbereich vorgestellt. Ziel der Untersuchungen ist eine kompakte Beschreibung des heutigen Zustandes der Hydrodynamik im Küstenbereich und in den Ästuaren sowie möglicher zukünftiger Änderungen. Die Untersuchung soll Hinweise geben auf mögliche Folgen z. B. für

- die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs,
- die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen und ihrer Strombauwerke und Wehre,
- die Nutzung der Hafenanlagen als auch
- die Nutzung der Ästuare als Teil des Be- und Entwässerungssystems der tiefliegenden Gebiete im norddeutschen Küstenbereich.

Zur Beantwortung dieser Fragen werden Sensitivitätsstudien durchgeführt, die die Auswirkungen ausgewählter Szenarien, wie z. B. eines Meeresspiegelanstiegs in der Nordsee, einer Veränderung im Oberwasserzufluss der Ästuare oder einer veränderten Topographie auf die Hydrodynamik im Küstenbereich und in den Ästuaren untersuchen.

Eine kompakte Beschreibung der Hydrodynamik in einem tidebeeinflussten Gebiet ist durch die Analyse zuvor eindeutig definierter charakteristischer Merkmale (z. B. höchster und niedrigster Wasserstand, etc.) möglich. Liegen über diese charakteristischen Größen, die im Folgenden als Tidekennwerte bezeichnet werden, Zahlen vor, so können in einfacher Weise die an einem festen Ort ablaufenden Veränderungen quantifiziert werden. Darüber hinaus sind Vergleiche mit anderen Orten möglich. Unterschiedliches Systemverhalten wird dadurch präzise quantifizierbar (siehe BAW (2017)).

Im *Auswerterahmen* werden die Zeiträume und Gebiete beschrieben, für die eine Tidekennwertanalyse der Hydrodynamik, d. h. des Wasserstandes, der Strömung, des Salzgehaltes und des Schwebstoffgehaltes durchgeführt wird. Zur Beschreibung der Hydrodynamik für besondere Zeiträumen wie z. B. Sturmfluten werden tideunabhängige Kennwerte analysiert, wie z. B. der höchste im Untersuchungszeitraum aufgetretene Wasserstand.

6.2 Untersuchungsgebiet

Die deutschen Küsten von Nordsee und Ostsee einschließlich der Ästuare von Ems, Jade – Weser und Elbe werden als Bundeswasserstraßen genutzt. Das im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks betrachtete Untersuchungsgebiet beinhaltet den Bereich der deutschen Nordseeküste sowie die Ästuare von Ems, Jade – Weser und Elbe (siehe Abbildung 6-1).

Von der Abteilung Wasserbau im Küstenbereich der BAW werden im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks zum einen Sensitivitätsstudien vor dem Hintergrund des Klimawandels durchgeführt. Die ausgewählten Szenarien heben zum einen zentrale Elemente einer möglichen Zukunft hervor (Kosow und Gaßner 2008) indem die Haupteinflussfaktoren auf die Hydrodynamik im Untersuchungsgebiet wie Meeresspiegelanstieg in der Nordsee, Oberwasserzufluss in die Ästuare, Wind über dem Untersuchungsgebiet oder Topographie des Untersuchungsgebietes einzeln oder in Kombination variiert werden. Diese Sensitivitätsstudien liefern klare Wenn-Dann-Aussagen. Für eine zeitliche Zuordnung können die

Ergebnisse der Sensitivitätsstudien über die jeweils verwendeten Haupteinflussfaktoren mit den Klimaszenarien in Beziehung gesetzt werden (Seiffert et al. 2014). Zum anderen werden Zeitscheiben (ein hydrologisches Jahr) für die *nabe* (2031–2060) und die *ferne Zukunft* (2071–2100) (siehe Abschnitt 3.4.1) aus den Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 (modelliert mit dem gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell MPI-OM/REMO) untersucht.

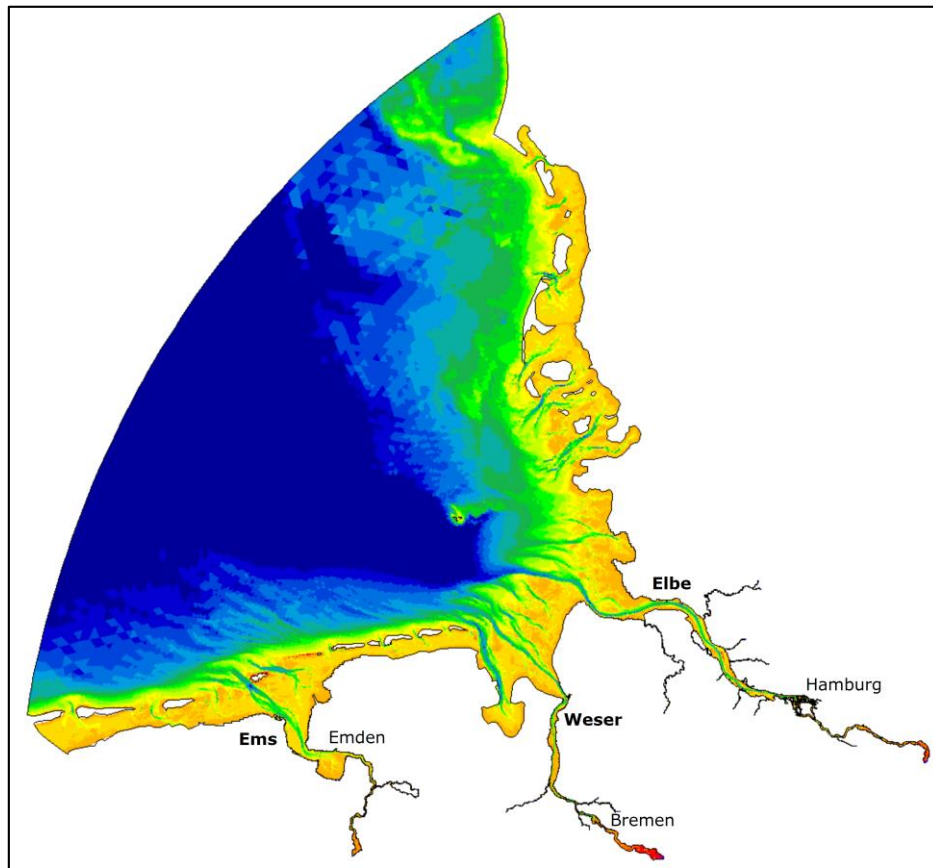


Abbildung 6-1: Untersuchungsgebiet: Topographie des numerischen Modells der Deutschen Bucht der BAW mit ausgewählten Pegelorten (Datengrundlage Jahrespeilung 2010).

6.3 Wichtige Eingangsgrößen

Meeresspiegelanstieg: Auf der Grundlage von Literaturstudien des BSH und in Absprache mit den Projektpartnern BSH und BfG werden Sensitivitätsstudien zu Meeresspiegelanstiegsszenarien für die Deutsche Bucht von 20 cm, 30 cm, 50 cm, 80 cm und 174 cm durchgeführt (s. Abschnitt 4.4). Für die jeweiligen Untersuchungszeiträume (mehrere Wochen bis ein Jahr) der Sensitivitätsstudien wird hierbei ein als konstant angenommener Meeresspiegelanstieg vorgegeben.

Wind: Für die Referenzzeiträume wird der im Untersuchungszeitraum aufgetretene Wind aus Reanalysedaten (COSMO-REA6, s. Abschnitt 4.2.2) vorgegeben. Für die Emissionsszenarien RCP4.5 (*moderat*) und RCP8.5 (*Weiter-wie-bisher*) werden jeweils Windfelder für ein charakteristisches Jahr für die *nabe* und die *ferne Zukunft* (s. Abschnitt 3.4.1) aus den Läufen des gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells vorgegeben (s. Abschnitt 4.3.3).

Abfluss: Um die Bedeutung des Abflusses für die Hydrodynamik mit und ohne Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht analysieren zu können, werden Sensitivitätsstudien mit ausgewählten Abflussszenarien durchgeführt. Hierfür werden zum einen für die jeweiligen Untersuchungszeiträume (mehrere Wochen) konstante Abflüsse vorgegeben. Diese Werte werden auf der Grundlage bereits aufgetretener Abflüsse (z. B. MNQ, MQ, HHQ aus Messungen) ausgewählt. Optional können von der BfG Abflusszeitreihen für jeweils

ein hydrologisches Jahr für die *nabe* und *ferne Zukunft* für die Emissionsszenarien *moderat* und *Weiter-nie-bisher* bereit gestellt und berücksichtigt werden (s. Abschnitt 5.3.7).

Topographie: Die Modelltopographie wird auf der Grundlage von Peildaten aus dem Jahr 2010 erstellt. Zusätzlich werden Änderungen in der Topographie auf Basis des aktuellen Wissensstandes (Literaturrecherche, siehe Endbericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020)) vorgenommen um z. B. den Einfluss veränderter Wattflächen und Prielsysteme auf die Hydrodynamik analysieren zu können.

6.4 Durchführung der hydrodynamischen Untersuchungen

Die Untersuchungszeiträume umfassen je nach Fragestellung wenige Tage (z. B. Sturmflutzeitraum), einen Spring – Nipp Zeitraum (28 Tiden) oder ein hydrologisches Jahr. Die Untersuchungen werden mit einem hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modell der Deutschen Bucht durchgeführt. Es werden die mathematischen Verfahren UnTRIM (Casulli und Walters (2000), BAW (2004)) und UnTRIM² (Casulli (2009), Casulli und Stelling (2011), Shili et al. (2014)) eingesetzt.

Zur Modellierung der ausgewählten Szenarien in den ausgewählten Zeiträumen sowie der zum Vergleich mit der heutigen Situation benötigten Referenzzeiträume werden Randwerte benötigt. Diese Randwerte beschreiben den Wasserstands- und Salzgehaltsverlauf auf dem seeseitigen Rand des Deutsche-Bucht-Modells, den Abfluss in die Ästuare und ihre Nebenflüsse sowie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck über dem Untersuchungsgebiet. Diese Randwerte können aus Messungen, Reanalysen oder Klimaszenarien abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Auswertungen der Partner DWD, BSH und BfG im BMVI-Expertenetzwerk sind Eingangsgrößen für die Untersuchungen der BAW. Für diese Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bundeswasserstraßen im Küstenbereich und in den Ästuaren werden folgende Datengrundlagen verwendet:

- Wasserstand am seeseitigen Rand zur Nordsee:
 - a. Wasserstandszeitreihen für den Referenzzeitraum (z. B. das Jahr 2010) aus einem übergeordneten Schelfmodell (z. B. der BAW oder des BSH),
 - b. Wasserstandszeitreihen für Meeresspiegelanstiegsszenarien aus übergeordnetem Schelfmodell (z. B. der BAW oder des BSH),
 - c. Wasserstandszeitreihen für Meeresspiegelanstiegsszenarien erzeugt durch Vorgabe eines konstanten „offsets“ für die Randwerte aus a.
- Salzgehalt am seeseitigen Rand zur Nordsee:
 - a. Salzgehaltszeitreihen aus einem übergeordneten Nordseemodell der BAW,
 - b. Vorgabe aus Messungen des BSH (BSH 2016),
 - c. Vorgabe aus klimatologischen Mittelwerten (BSH 2016)
 - d. Salzgehaltszeitreihen aus MPI-OM/REMO.
- Abfluss Q am binnenseitigen Rand der Ästuare (Ems bei Versen, Weser bei Intschede, Elbe bei Neu Darchau (vgl. Abschnitt 5.3.1):
 - a. für den heutigen Zustand aus Messungen (siehe z. B. Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (2015)),
 - b. für Klimaszenarien als Abflusszeitreihe z. B. aus den Wasserhaushaltsmodellen der BfG für jeweils ein hydrologisches Jahr für die *nabe* und *ferne Zukunft* für die Emissionsszenarien *moderat* und *Weiter-nie-bisher* (Datengrundlage: gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell MPI-OM/REMO, siehe Abschnitt 5.3.7),
 - c. für den heutigen Zustand oder für Klimaszenarien als konstante Vorgabe eines analysierten Abflusskennwertes z. B. MQ, MNQ, HQ oder HHQ. Diese werden von der BfG aus gemessenen oder modellierten Abflusszeitreihen analysiert.

- Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck über dem Untersuchungsgebiet:
 - a. für historische Zeiträume aus Wettervorhersage oder aus Reanalysen (z. B. COSMO-REA6 siehe Abschnitt 4.2.2, Wahl et al. (2017)),
 - b. für jeweils ein charakteristisches (hydrologisches) Jahr für die *nabe* und *ferne Zukunft* für die Emissionsszenarien *moderat* und *Weiter-wie-bisher* (Datengrundlage: gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell MPI-OM/REMO (siehe Abschnitt 4.3.3).

Als Ergebnis der hydrodynamisch-numerischen Simulation stehen für jeden durchgeführten Simulationslauf im gesamten Modellgebiet des Deutsche-Bucht-Modells z. B. Zeitreihen des Wasserstandes, der Strömung oder des Salzgehaltes zur Verfügung. Um eine kompakte Beschreibung der Hydrodynamik in einem tidebeeinflussten Untersuchungsgebiet wie der Deutschen Bucht und den angrenzenden Ästuaren zu ermöglichen, wird eine Tidekennwertanalyse, d. h. die Analyse eindeutig definierter charakteristischer Merkmale (z. B. Tidehochwasser Thw, Tideniedrigwasser Tnw) durchgeführt. Die Definition der verwendeten Tidekennwerte wird durch die DIN 4049-3 Hydrologie vorgegeben (DIN 4049-3 1994).

Der Vergleich der Tidekennwerte eines Szenarios mit den Tidekennwerten des zugehörigen Referenzzustandes ermöglicht Aussagen zum lokalen Wert und zur räumlichen Ausdehnung der Änderungen auf Grund der veränderten Randwerte. Es ist somit möglich, Änderungen auf Grund eines möglichen Klimawandels durch den Vergleich von Tidekennwerten eines Szenarios mit den Tidekennwerten des Referenzzustandes abzuleiten.

6.5 Kennwerte der Hydrodynamik

Um eine kompakte Beschreibung des heutigen Zustandes (Referenz) der Hydrodynamik im Küstenbereich und in den Ästuaren sowie möglicher Änderungen aufgrund des Klimawandels zu erhalten, werden für alle untersuchten Zustände Kennwerte der Hydrodynamik ermittelt. Diese Kennwerte werden sowohl in der Fläche für das gesamte Untersuchungsgebiet als auch auf Profilen entlang der Fahrwasser in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems bestimmt.

Zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen im Zusammenhang mit der Nutzung der Deutschen Bucht und den Ästuaren (Transportweg, Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs, Be- und Entwässerungssystem) werden verschiedene Kennwerte benötigt, so z. B.:

- Tidekennwerte des Wasserstandes (z. B. das Tideniedrigwasser Tnw) werden für die Bewertung der tideunabhängigen Erreichbarkeit des Hamburger Hafens benötigt,
- Tidekennwerte der Strömung ermöglichen die Analyse von Änderungen in den Belastungen von Sohle und Ufer der Bundeswasserstraßen,
- Tidekennwerte des Wasserstandes, der Strömung und des Sedimenttransportes werden für Fragen zur zukünftigen Unterhaltung der Bundeswasserstraßen verwendet,
- die Dauer hoher Wasserstände (Sielzugzeiten) wird zur Bewertung der Entwässerung tiefliegender Gebiete benötigt.

Im Folgenden werden beispielhaft die Definition der tideabhängigen Kennwerte des Wasserstandes, der Strömung und des Salzgehaltes sowie der tideunabhängigen Kennwerte des Wasserstandes vorgestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Kennwerte und ihrer Berechnung geben das BAWiki (wiki.baw.de) oder Lang (2003). Die Definition der Kennwerte ist in der DIN 4049-3 Hydrologie angegeben.

6.5.1 Tidekennwerte

Um die Aspekte der Gezeitendynamik der Deutschen Bucht und der Ästuare quantifizieren und vergleichen zu können, werden folgende Tidekennwerte des Wasserstandes (siehe auch Abbildung 6-2) analysiert:

- Thw Tidehochwasser
- Tnw Tideniedrigwasser
- Thb Tidehub
- Tmw Tidemittelwasser
- T_Thw Tidehochwasserzeit
- T_Tnw Tideniedrigwasserzeit

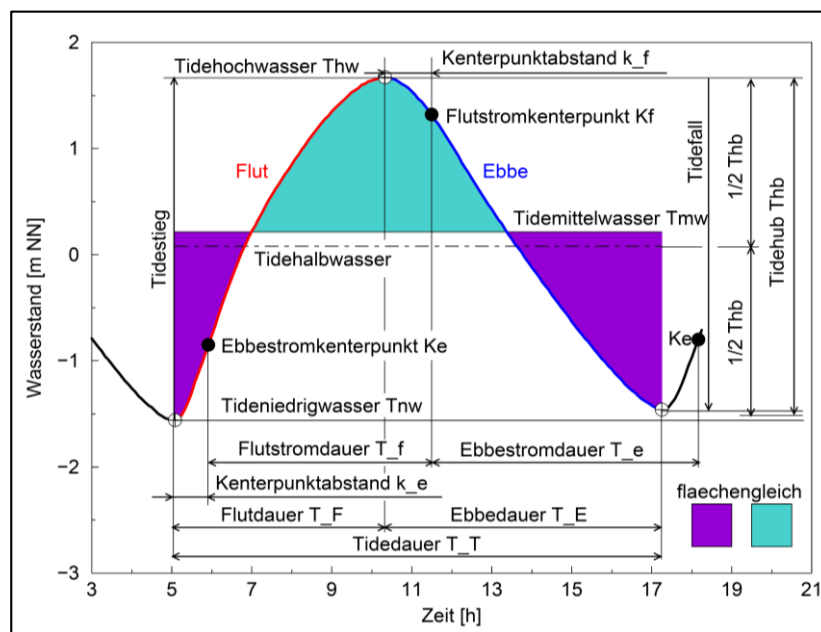


Abbildung 6-2: Tidekennwerte des Wasserstandes (aus BAWiki nach DIN 4049-3, Bild 10: Schematische Darstellung einer Tidekurve (BAW 2002)).

Die Tidekennwerte der Strömung werden getrennt nach Flutstrom und Ebbestrom analysiert (siehe Abbildung 6-3):

- Kf Flutstromkenterpunkt
- Ke Ebbestromkenterpunkt
- vfm mittlere Flutstromgeschwindigkeit
- vem mittlere Ebbestromgeschwindigkeit
- vfx maximale Flutstromgeschwindigkeit
- vfe maximale Ebbestromgeschwindigkeit
- T_f Flutstromdauer
- T_e Ebbestromdauer
- StwKf Stauwasser-Dauer bei Flutstromkenterung
- StwKe Stauwasser-Dauer bei Ebbestromkenterung
- k_f Kenterpunktabstand Flut
- k_e Kenterpunktabstand Ebbe
- T_F : T_E Flutstromdauer : Ebbestromdauer

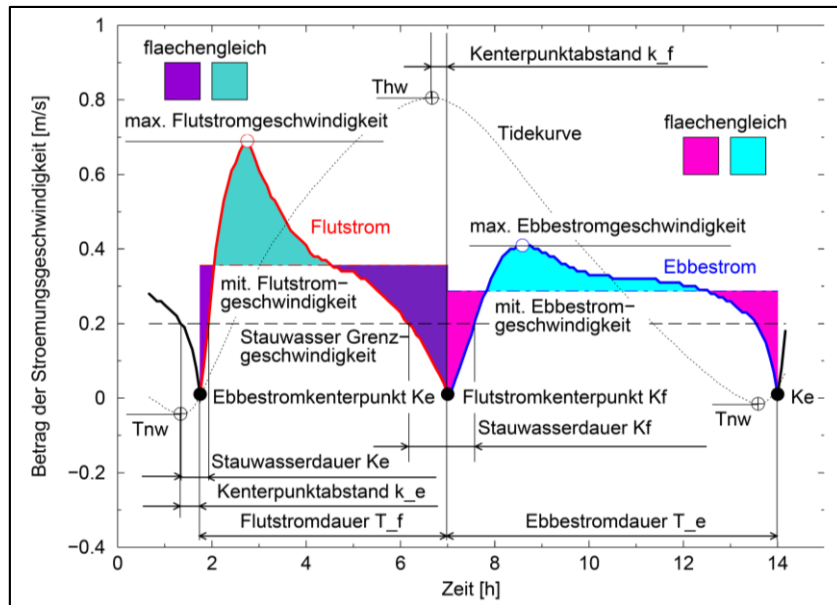


Abbildung 6-3: Tidekennwerte der Strömung (aus BAWiki nach DIN 4049-3, Bild 12: Schematische Darstellung der Fließgeschwindigkeiten).

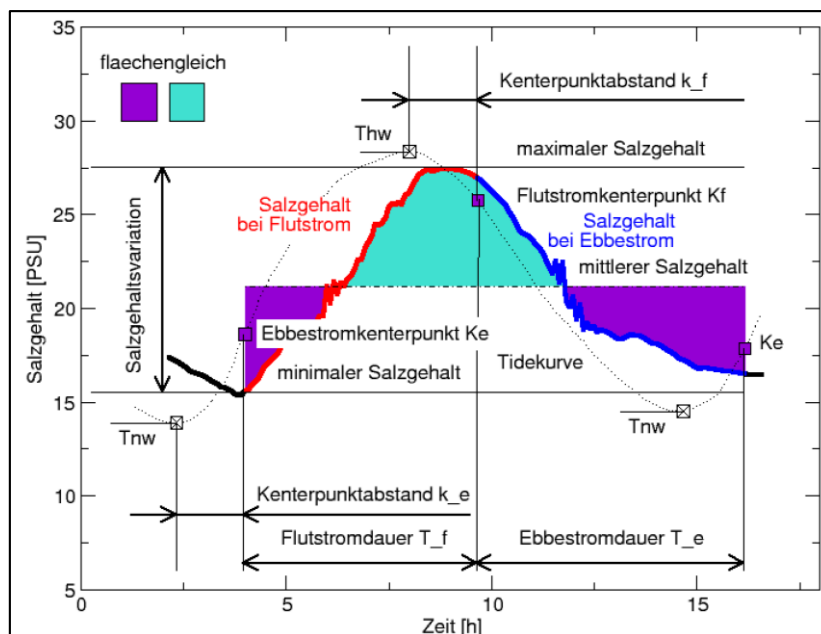


Abbildung 6-4: Tidekennwerte des Salzgehaltes (aus BAWiki).

Die Tidekennwerte des Salzgehaltes werden sowohl innerhalb einer Tide als auch getrennt nach Ebbe- und Flutstrom analysiert (siehe Abbildung 6-4):

- maximaler Tide-Salzgehalt
- minimaler Tide-Salzgehalt
- mittlerer Tide-Salzgehalt
- maximaler Salzgehalt bei Flutstrom / bei Ebbestrom
- minimaler Salzgehalt bei Flutstrom / bei Ebbestrom
- mittlerer Salzgehalt bei Flutstrom / bei Ebbestrom

Die Tidekennwerte des Schwebstoffgehaltes werden analog zu den Tidekennwerten des Salzgehaltes (Abbildung 6-4) definiert. Die Tidekennwerte werden für jede Tide im Untersuchungszeitraum einzeln analysiert und können anschließend über den Untersuchungszeitraum (z. B. einen Spring-Nipp Zeitraum) gemittelt werden.

6.5.2 Tideunabhängige Kennwerte

Für Extremereignisse wie z. B. Sturmfluten in der Deutschen Bucht und den Ästuaren, die durch einen von den mittleren Gezeiten deutlich abweichenden Wasserstandsverlauf gekennzeichnet sind, oder zur Ermittlung von Wasserstandskennwerten für beliebig lange oder kurze Analysezeiträume (z. B. 1 Tag) werden folgende tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes (siehe Abbildung 6-5) ermittelt:

- HW Hochwasserstand, höchster Wasserstand im Analysezeitraum
- NW Niedrigwasserstand, niedrigster Wasserstand im Analysezeitraum
- MW Mittelwasserstand, Mittelwert des Wasserstands im Analysezeitraum
- THW Hochwasserzeit, Eintrittszeit des Hochwassers
- TNW Niedrigwasserzeit, Eintrittszeit des Niedrigwassers
- DHW Hochwasserdauer
- DNW Niedrigwasserdauer

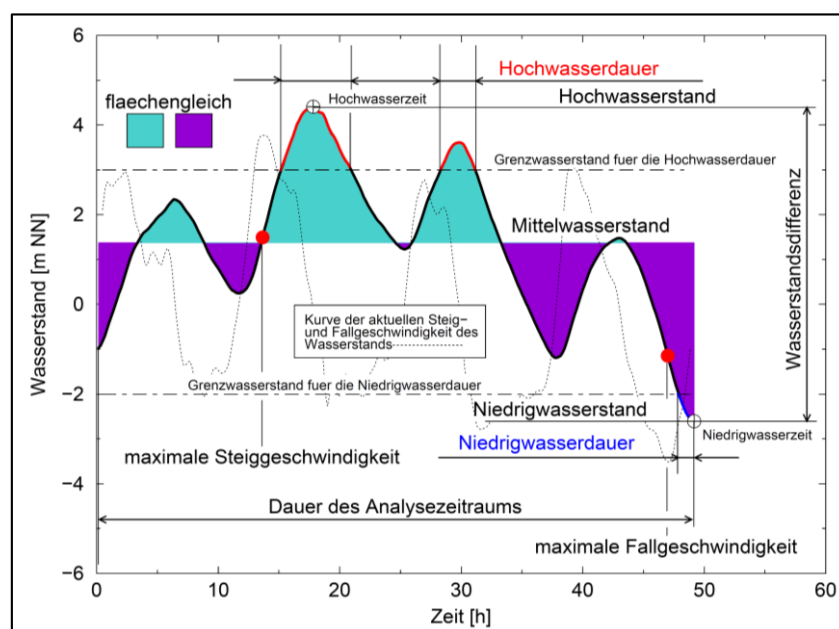


Abbildung 6-5: Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes (aus [BAWiki](#)).

6.6 Weitergabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den möglichen Folgen des Klimawandels auf die Hydrodynamik im Küstenbereich und in den Ästuaren können sowohl als Daten als auch als Graphiken an die Projektpartner weitergegeben werden.

Wie bereits in KLIWAS (siehe BAW (2015a) und BAW (2015b)) werden die Ergebnisse der Sensitivitätsstudien in einem BAWBildatlas veröffentlicht. Hier werden sowohl die Tidekennwerte und die tideunabhängigen Kennwerte als auch Änderungen der Tidekennwerte und tideunabhängigen Kennwerte auf Grund der Veränderung z. B. im Abfluss oder Meeresspiegel dargestellt.

7 Fazit

Die Analyse und Bewertung von derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Klimawirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr nimmt eine Schlüsselrolle bei der sicheren und nachhaltigen Entwicklung der Verkehrssysteme in Deutschland ein. Im BMVI-Expertenetzwerk wird dazu eine Klimawirkungsanalyse umgesetzt, die auf der in diesem Bericht dargelegten, abgestimmten und möglichst einheitlichen Datenbasis von Beobachtungs- und Projektionsdaten aufsetzt. Durch diese einheitliche Herangehensweise und die Abstimmung methodischer Vorgehensweisen und Analysebausteine wird eine solide und kohärente Informationsbasis geschaffen, auf deren Grundlage eine Verkehrsinfrastruktur gestaltet werden kann, die auch unter zukünftig veränderten, möglicherweise extremeren klimatischen Rahmenbedingungen verlässlich ist.

Die Anzeichen und Auswirkungen des Klimawandels treten regional, zeitlich und je nach betrachtetem Kennwert in unterschiedlicher Stärke und Ausprägung in Erscheinung und erfordern eine entsprechend differenzierte Analyse. Bisher erfolgten bereits verschiedene solcher Analysen für einzelne Verkehrsträger unter Nutzung unterschiedlicher Datengrundlagen. So liegen für die Verkehrsträger Wasserstraße mit KLIWAS (BMVI 2015) und für die Straße mit AdSVIS „Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ (Tegethof et al. 2011) bereits klimawandelbezogene Informationen vor, die von den operativen Einheiten (insb. WSV) für die Bewertung von Klimawirkungen und die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt wurden. Im Rahmen der Arbeiten des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk erfolgte eine Analyse der zu erwartenden Änderungen des Klimas und von Extremereignissen in Deutschland. Der Fokus lag dabei auf den für die Bewertung der Klimaresilienz des Verkehrssystems relevanten Klimaparametern und abgeleiteten Kenngrößen. Die dabei verwendeten bzw. generierten Datensätze bilden die Grundlage für eine verkehrsträgerübergreifend möglichst einheitliche und vergleichbare Bewertung von Klimawirkungen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Die entsprechend abgestimmten Datensätze und Methoden wurden im vorliegenden Dokument zusammengestellt.

Hinsichtlich der Bewertung vergangener und zukünftiger Klimaänderungen werden im BMVI-Expertenetzwerk verschiedene meteorologische Größen (Temperatur, Niederschlag), hydrologische Größen (Abfluss, Wassertemperaturen) sowie ozeanographische Größen (Meeresspiegel, Tidekennwerte) betrachtet. Lange Messreihen erlauben es bereits heute, stattfindende Veränderungen zu identifizieren und zu bewerten. Aussagen über den zukünftigen Klimawandel in Deutschland werden aus Klimamodelldaten unter Annahme verschiedener Klimaszenarien (Projektionsdaten; RCP) abgeleitet. Im Fokus stehen im BMVI-Expertenetzwerk zwei Pfade, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. In der Berichterstattung des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk werden diese Pfade als *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaerwärmung von 2,6 W/m² im Jahr 2100) und *Weiter-nie-bisher-Szenario* (RCP8.5; Klimaerwärmung von 8,5 W/m² im Jahr 2100) bezeichnet. Für einige Auswertungen wird auch noch ein *moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaerwärmung von 4,5 W/m² im Jahr 2100) hinzugezogen. Unsicherheitsbetrachtungen und systematische Vergleiche zwischen den Szenarien werden durch die teilweise unterschiedlichen Realisierungen (Größe und Zusammensetzung des Ensembles) erschwert.

Mit Blick auf relevante *Klimakenngrößen* für die Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden beobachtete Änderungen der jeweils zu erwartenden Entwicklung gegenübergestellt. Die Bewertung der jüngsten Klimaentwicklung basiert dabei auf im BMVI-Expertenetzwerk neu- bzw. weiterentwickelten Referenzdatensätzen. Die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland wird mittels im BMVI-Expertenetzwerk qualitätsoptimierter regionaler Klimaprojektionen¹⁰ bewertet, die durch die internationale und nationale Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt werden (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014b).

¹⁰ Details zur Methodik und den Ergebnissen der Bias-Adjustierung und Regionalisierung der Klimaprojektionsdaten finden sich im *Auswertrahmen* (Hänsel et al., 2020a) und im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung* (Brienen et al., 2020).

Für diese Datensätze wurden vielfältige Indizes berechnet, die für die Bewertung geänderter Klimawirkungen auf das Verkehrssystem herangezogen werden. Zudem gehen die Klimadatenätze direkt in Klimawirkungsmodelle wie hydrologische Modelle und Wassergütemodelle (BfG) sowie hydrodynamische und morphodynamische Modelle (BfG, BAW) ein. Aus den damit generierten gewässerbezogenen und ozeanographischen Daten können dann ebenfalls für die Klimawirkungsbewertung relevante Kennwerte abgeleitet werden. Diese für die Klimawirkungsanalysen in anderen Schwerpunkten des Themenfeldes 1 herangezogenen Kennwerte werden bezüglich ihrer zukünftig zu erwartenden Änderungssignale für die Zeitscheiben *nabe Zukunft* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) bewertet. Dabei werden die Kennwerte der jeweiligen Zukunftszeitscheibe derjenigen des *Bezugszeitraums* (1971–2000) gegenübergestellt.

Bei der Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem zu berücksichtigen sind die Unsicherheiten, die allen verwendeten Datengrundlagen innewohnen und sich im Verlauf der Wirkungsanalysen fortpflanzen. Zu berücksichtigende Faktoren sind dabei die getroffenen Annahmen zur Entwicklung des Klimaantriebs in den RCP-Szenarien, die natürliche (interne) Variabilität des Klimasystems, die notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung sowie die räumlich und zeitlich begrenzte Erfassung und Verarbeitung von Beobachtungsdaten. Um den Unsicherheiten – insbesondere der Zukunftssimulationen – Ausdruck zu verleihen, werden – soweit möglich – Ergebnisbandbreiten für die berechneten Indizes angegeben. Die dargestellte Bandbreite entspricht in der Regel dem Bereich zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil des Simulationsensembles und beinhaltet somit 70 % aller vorliegenden Modellergebnisse. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten ist es nicht möglich, einen einzigen verlässlichen „Zukunftswert“ im Sinne eines klimawandelmodifizierten Bemessungswertes zu liefern. Stattdessen wird den Entscheidern in der Praxis eine Wertespanne zugänglich gemacht, die den aktuellen Kenntnisstand der Klima(folgen)modellierung abbildet.

Die Analyse und Bewertung von Klimawirkungen im BMVI-Expertenetzwerk erfolgt basierend auf im Schwerpunkt *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) erstellten Datengrundlagen zur vergangenen und zukünftigen klimatologischen, hydrologischen und ozeanischen Entwicklung. Den methodischen Rahmen für die Aus- und Bewertung klimawandelbezogener Einflüsse setzt der hier vorliegende im Themenfeld 1 abgestimmte *Auswerterahmen*. In der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks wurde die potentielle Gefährdung des Verkehrssystems durch *Hochwasser* (Rauthe et al. 2020), *Stürme* (Bott et al. 2020) und *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) untersucht sowie wasserstraßenspezifische Aspekte der *Schiffbarkeit* (z. B. Niedrigwasser) und *Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) in den Fokus genommen. Die gefahren- und verkehrsträgerspezifischen Ergebnisse dieser *Klimawirkungsanalysen* wurden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengestellt und in vergleichbarer Weise visualisiert. Zusätzlich zu den in den Gefahrenschwerpunkten erfolgten Analysen zur Exposition und Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur erfolgte im Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* die Bewertung der verkehrlichen (und ökologischen) Bedeutung der Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente (Hänsel et al. 2020).

Die hier beschriebenen Datengrundlagen und Methoden finden auch über das BMVI-Expertenetzwerk hinaus Anwendung. In deren Entwicklung wurden verschiedene Nutzergruppen innerhalb und außerhalb des BMVI-Expertenetzwerks einbezogen. Demensprechend enthält das Dokument auch einige Produkte, die (noch) nicht im BMVI-Expertenetzwerk angewendet wurden, sondern von den beteiligten Oberbehörden für Adressaten im erweiterten Netzwerk (Behörden des Bundes und der Länder z. B. im Rahmen der DAS, operative Einheiten im Verkehrsbereich, Forschungscommunity) konzipiert wurden. Die Bereitstellung der Daten für die Praxis erfolgt teilweise über Klimaberatungsdienste (DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“), die sich gegenwärtig im Aufbau befinden.

8 Literatur

- BAW (2002) Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes. Technischer Bericht. BAWiki
[http://wiki.baw.de/de/index.php5/Tideunabh%
c3%a4ngige_Kennwerte_des_Wasserstands](http://wiki.baw.de/de/index.php5/Tideunabh%c3%a4ngige_Kennwerte_des_Wasserstands)
- BAW (2004) Validation document – Mathematical – Model UnTRIM., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau.
http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf
- BAW (2015a) BAW-Bildatlas: Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD Band 1: Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg in den Ästuaren Elbe, Jade-Weser und Ems. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 202 pp., <https://izw.baw.de/e-medien/bawbildatlas-band1-2015/index.html>
- BAW (2015b) BAW-Bildatlas Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD Band 2: Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg bei Sturmflut im Elbe-Ästuar. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 216 pp., <https://izw.baw.de/e-medien/bawbildatlas-band2-2015/index.html>
- BAW (2017) Grundlegende Aspekte einer Berechnung von Kennwerten. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
http://wiki.baw.de/de/index.php/Grundlegende_Aspekte_einer_Berechnung_von_Kennwerten
- Berens P (2009) CirStat: A MATLAB Toolbox for Circular Statistics. *Journal of Statistical Software* 31(10).
- Berrisford P, Dee D, Poli P, Brugge R, Fielding K, Fuentes M, Kallberg P, Kobayashi S, Uppala S und Simmons A (2009) The ERA-Interim Archive, Version 1.0. <https://www.ecmwf.int/node/8174>
- BfG (2012) Erstellung von Szenarien extremer Schnee- und Eishochwasser in Deutschland unter Verwendung eines einfachen Wettergenerators und eines mitteleuropaweiten Wasserhaushaltsmodells (bearbeitet durch Wolf-Schumann, U. Sintić, A., Richter, K.-G.), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BfG (2013) FLYS – Flusshydrologischer Webdienst.
https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/03_Fliessgewmod/01_FLYS/flys_node.html
- BMVI (2015) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S und Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(686), 1-15. DOI:10.1002/qj.2486
- Born K, Ludwig P und Pinto JG (2012) Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 64(1), 17471. DOI:10.3402/tellusa.v64i0.17471
- Borsche M, Kaiser-Weiss AK und Kaspar F (2016) Wind speed variability between 10 and 116 m height from the regional reanalysis COSMO-REA6 compared to wind mast measurements over Northern Germany and the Netherlands. *Advances in Science and Research* 13, 151-161. DOI:10.5194/asr-13-151-2016
- Bott F, Lohrengel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- Bremicker M (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie* 11. <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>
- Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Krähenmann S, Möller J, Nilson E, Rauhe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Brockmann J, Heeling A, Pohl M und Uliczka K (2008) The Kiel Canal. *Die Küste* 74, 317-332.
<http://vzb.baw.de/die-kueste/0/k074125.pdf>
- BSH (2016) Nordseezustand 2008-2011, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-54.pdf>

- Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung
https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf
- Cannon AJ (2018) Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics* 50(1), 31–49.
DOI:10.1007/s00382-017-3580-6
- Carson M, Köhl A, Stammer D, A. Slangen AB, Katsman CA, W. van de Wal RS, Church J und White N (2016) Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change* 134(1), 269–281. DOI:10.1007/s10584-015-1520-1
- Casulli V und Walters R (2000) An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations, 32. DOI:10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3<331::AID-FLD941>3.0.CO;2-C
- Casulli V (2009) A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 60(4), 391–408. DOI:10.1002/flid.1896
- Casulli V und Stelling GS (2011) Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 67(4), 441–449. DOI:10.1002/flid.2361
- Dalelane C, Früh B, Steger C und Walter A (2018) A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57(3), 477–491. DOI:10.1175/JAMC-D-17-0141.1
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N und Vitart F (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656), 553–597. DOI:10.1002/qj.828
- Deltares (2017) SOBEK Suite. In: Center DS (Ed.). Deltares Software Center.
<https://www.deltares.nl/en/software/sobek/>
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (2015) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Freie und Hansestadt Hamburg – Hamburg Port Authority (HPA), Hamburg.
https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/DGJ_ElbeIII_2013.pdf
- Dieterich C, Schimanke S, Wang S, Väli G, Liu Y, Hordoir R, Höglund A und Meier M (2013) Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4-NEMO. SMHI.
https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.28917!/RO_47.pdf
- DIN 4049-3 (1994) Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.
DOI:<https://dx.doi.org/10.31030/2644617>
- Ebner von Eschenbach A-D (2017) Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze, BfG-Veranstaltung "Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen". Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Elizalde A, Groeger M, Mathis M, Mikolajewicz U, Bülow K, Hüttl-Kabus S, Klein B und Ganske A (2014) MPIOM-REMO A Coupled Regional Model for the North Sea, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
DOI:10.5675/Kliwas_58/2014_MPIOM-REM
- Fery N, Tinz B, Ganske A, Andersson A und Gates L (2017) High resolution regional reanalysis: a tool for the identification of extreme wind surges in the German Bight, 5th International Conference on Reanalysis, Rome, Italy.
https://www.researchgate.net/publication/320629147_High_resolution_regional_reanalysis_a_tool_for_the_identification_of_extreme_wind_surges_in_the_German_Bight#read
- Frick C, Riediger U, Mazurkiewicz A, Steiner H, Rauthe M und Gratzki A (2014) Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.01: Erstellung von flussgebietsbezogenen Referenzdaten, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Koblenz.
DOI:10.5675/Kliwas_28/2014_1.01
- Ganske A, Tinz B, Rosenhagen G und Heinrich H (2016) Interannual and Multidecadal Changes of Wind Speed and Directions over the North Sea from Climate Model Results. *Meteorologische Zeitschrift* 25(4), 463–478.
DOI:10.1127/metz/2016/0673
- Ganske A, Schade NH, Hüttl-Kabus S, Möller J, Heinrich H, Tinz B und Gates L (2017) Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979–2015, Bericht zum Meilenstein M108b-1 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.

- Ganske A, Fery N, Gaslikova I, Grabemann I, Weisse R und Tinz B (2018) Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. *Ocean Dynamics* 68(10), 1371-1382. DOI:10.1007/s10236-018-1190-4
- Gregory JM, White NJ, Church JA, Bierkens MFP, Box JE, Broeke MRvd, Cogley JG, Fettweis X, Hanna E, Huybrechts P, Konikow LF, Ledercq PW, Marzeion B, Oerlemans J, Tamisiea ME, Wada Y, Wake LM und Wal RSWvd (2013) Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? *Journal of Climate* 26(13), 4476-4499. DOI:10.1175/jcli-d-12-00319.1
- Grinsted A, Jevrejeva S, Riva REM und Dahl-Jensen D (2015) Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Climate Research* 64(1), 15-23. DOI:10.3354/cr01309
- Hänsel S, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohregel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.03
- Hardenbicker P, Viergutz C, Becker A, Kirchesch V, Nilson E und Fischer H (2017) Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change* 17(1), 299-308. DOI:10.1007/s10113-016-1006-3
- Hasager CB, Mouche A, Badger M, Bingöl F, Karagali I, Driessenaar T, Stoffelen A, Peña A und Longépé N (2015) Offshore wind climatology based on synergistic use of Envisat ASAR, ASCAT and QuikSCAT. *Remote Sensing of Environment* 156, 247-263. DOI:10.1016/j.rse.2014.09.030
- Hinrichs I und Jahnke-Bornemann A (2017) Erweiterung der KLIWAS Nordsee-Klimatologie auf die Ostsee (BNSC) im Rahmen einer Kooperation des ICDC mit dem BMVI-Expertenetzwerk, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Horton BP, Rahmstorf S, Engelhart SE und Kemp AC (2014) Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews* 84, 1-6. DOI:10.1016/j.quasirev.2013.11.002
- Hübener H, Bülow K, Fooker C, Früh B, Hoffmann P, Höpp S, Keuler K, Menz C, Mohr V, Radtke K, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Toussaint F, Warrach-Sagi K und Woldt M (2017) ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Ergebnisbericht. DOI:10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- IPCC (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.,
- Jacob D und Podzun R (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics* 63(1), 119-129. DOI:10.1007/BF01025368
- Jacob D (2006) REMO climate of the 20th century run and A1B scenario run, UBA project, 0.088 degree resolution. World Data Center for Climate. CERA-Database.
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preussmann S, Radermacher C, Radtke K, Reddi D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana J-F, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014a) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2), 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Deque M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kroner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preussmann S, Radermacher C, Radtke K, Reddi D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014b) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2), 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2
- Jacob D, Nilson E, Tomassini L & Bülow K. (2009) REMO-BfG climate of the 20th century run and A1B scenario run, 0.088 degree resolution. World Data Center for Climate. CERA-Database.

- Jensen J, Frank T, Wahl T und Dangendorf S (2011) Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSEL). *Die Küste* (78), 59-163.
<https://hdl.handle.net/20.500.11970/101660>
- Jensen J, Dangendorf S, Wahl T und Steffen H (2014) Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung* 58(6), 304-323. DOI:10.5675/HyWa_2014,6_1
- Jerez S, Lopez-Romero JM, Turco M, Jimenez-Guerrero P, Vautard R und Montavez JP (2018) Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. *Nature Communications* 9(1), 1304. DOI:10.1038/s41467-018-03527-y
- Johansson MM, Pellikka H, Kahma KK und Ruosteenoja K (2014) Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems* 129, 35-46. DOI:10.1016/j.jmarsys.2012.08.007
- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B und Boehm U (2009) Climate Simulation with CLM, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. CERA-Database.
- Klemes V (1993) Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts, *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. IAHS, Yokohama, pp. 167-176.
http://hydrologie.org/redbooks/a213/iahs_213_0000.pdf
- Köhler MA und Linsley RKJ (1951) Predicting runoff from storm rainfall, US Weather Bureau, Washington DC.
<https://www.nrc.gov/docs/ML0819/ML081900279.pdf>
- Kohonen T (1995) Self-Organizing Maps. In: Sciences SSI (ed), *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences. Springer, pp. 175-189. DOI:10.1007/978-3-642-97610-0_6
- Kopp RE, Horton RM, Little CM, Mitrovica JX, Oppenheimer M, Rasmussen DJ, Strauss BH und Tebaldi C (2014) Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future* 2(8), 383-406. DOI:10.1002/2014ef000239
- Kosow H und Gaßner R (2008) Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Werkstatt Berichte. IZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Koziar C und Renner V (2005) MUSE modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten – Teilprojekt 1: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach.
- Krähenmann S, Walter A, Brienen S, Imbery F und Matzarakis A (2018) High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 131(3), 899-926. DOI:10.1007/s00704-016-2003-7
- Kreienkamp F, Paxian A, Früh B, Lorenz P und Matulla C (2019) Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. *Climate Dynamics* 52(1), 991-1026. DOI:10.1007/s00382-018-4276-2
- Lang G (2003) Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pre_postpr/pdf/analyse_von_hn_modellergebnissen_im_tidegebiet.pdf
- Le Bars D, Drijfhout S und de Vries H (2017) A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters* 12(4), 044013. DOI:10.1088/1748-9326/aa6512
- Lenderink G, Buishand A und van Deursen W (2007) Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(3), 1145-1159. DOI:10.5194/hess-11-1145-2007
- LKN-SH und LLUR-SH (2016) Bericht zum Weihnachtshochwasser 2014, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) und Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR-SH). https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/hochwasserbericht2014.html
- Lloyd S (1982) Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory* 28(2), 129-137. DOI:10.1109/TIT.1982.1056489
- Lohreggel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNLAf2020.2020.06

- Mathis M, Elizalde A und Mikolajewicz U (2019) The future regime of Atlantic nutrient supply to the Northwest European Shelf. *Journal of Marine Systems* 189, 98-115. DOI:10.1016/j.jmarsys.2018.10.002
- Meehl G, Covey C, Delworth T, Latif M, McAvaney B, Mitchell J, Stouffer R und Taylor K (2007) The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88(9), 1383-1394. DOI:<https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>
- Mosner E, Weber A, Carambia M, Nilson E, Schmitz U, Zelle B, Donath T und Horchler P (2015) Climate change and floodplain vegetation—future prospects for riparian habitat availability along the Rhine River. *Ecological Engineering* 82, 493-511. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.013>
- Müller-Navarra SH und Giese H (1999) Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift* 51(4), 385-405. DOI:10.1007/bf02764162
- Müller M, Kašpar M, Valeriánová A, Crhová L, Holtanová E und Gvoždíková B (2015) Novel indices for the comparison of precipitation extremes and floods: an example from the Czech territory. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(11), 4641-4652. DOI:10.5194/hess-19-4641-2015
- Nakicenovic N, Alcamo J, Grubler A, Riahi K, Roehrl R, Rogner H-H und Victor N (2000) Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 0521804930, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/emissions_scenarios-1.pdf
- Nilson E, Krahe P, Klein B, Lingemann I, Horsten T, Carambia M, Larina M und Maurer T (2014) Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, Germany. DOI:10.5675/Kliwas_43/2014_4.01
- Nilson E (2019) Pilotprojekt Klima und Wasser – Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS)
- Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Hauer G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbringer M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschitz E, Lohrengel A-F, Nilson E, Ork J, Schade N, Schulz D, Stachel H und Wachler B (2020) Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrswegesystems an den Klimawandel - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- Olsson J, Berggren K, Olofsson M und Viklander M (2009) Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research* 92(3), 364-375. DOI:10.1016/j.atmosres.2009.01.015
- Panitz HJ (2006) Optimierung langfristiger Simulation der Luftqualität in Baden-Württemberg. https://www.imk-tro.kit.edu/14_3034.php
- Pfeifroth U, Kothe S, Müller R, Trentmann J, Hollmann R, Fuchs P und Werscheck M (2017) Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2, Satellite Application Facility on Climate Monitoring. DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002
- Prein AF, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E, Kollet S, Schmidli J, van Lipzig NPM und Leung R (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics* 53(2), 323-361. DOI:10.1002/2014rg000475
- Quante M und Colijn F (2016) North Sea region climate change assessment. *SpringerOpen*. DOI:10.1007/978-3-319-39745-0
- Rauthe M, Steiner H, Riediger U, Mazurkiewicz A und Gratzki A (2013) A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22(3), 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436
- Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deutschländer T, Fleischer C, Forbringer M, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J und Seiffert R (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser - Schlussbericht des

- Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- Razafimaharo CS, Rauhe M, Höpp S, Krähenmann S, Stanley K und Deutschänder T (2019) Erweiterung & Überarbeitung der HYRAS-Daten: Niederschlag, Lufttemperatur, Feuchte und Globalstrahlung (Fachbericht Arbeitspaket 101b), Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach.
- Richter D (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Richter K-G, Hunger M, Elpers C, Vollmer S, Krauter G, Wolf-Schumann U, Buchholz O, Dorp M, Hellbach C und Bürvenich T (2013) Aufbau eines WHMLARSIM-Mitteuropamodells. BfG, interner Bericht. 150 S. + Anlagen.,
- Roeckner E (2003) Allgemeine Zirkulationsmodelle, Atmosphäre. ProMet 29(1-4), 6-14. https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/29_1_4_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Sadikni R, Schade NH, Andersson A, Jahnke-Bornemann A, Hinrichs I, Gates L, Tinz B und Stammer D (2018) The KLIWAS North Sea climatology. Part I: Processing of the atmospheric data. Journal of Atmospheric Oceanic Technology 35(1), 111-126. DOI:10.1175/JTECH-D-17-0044.1
- Sanderson BM, Knutti R und Caldwell P (2015) Addressing Interdependency in a Multimodel Ensemble by Interpolation of Model Properties. Journal of Climate 28(13), 5150-5170. DOI:10.1175/jcli-d-14-00361.1
- Schaaf B und Feser F (2018) Is there added value of convection-permitting regional climate model simulations for storms over the German Bight and Northern Germany? Meteorology Hydrology Water Management. Research Operational Applications 6. DOI:10.26491/mhwm/85507
- Schade N, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrsnetzsystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusbereich Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- Schade NH, Heinrich H und Rosenhagen G (2013) Regional evaluation of ERA-40 reanalysis data with marine atmospheric observations in the North Sea area. Meteorologische Zeitschrift 22(6), 675-684. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0471
- Schade NH (2017) Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany. Earth Syst. Dynam. 8(2), 405-418. DOI:10.5194/esd-8-405-2017
- Schröder M und Wurms S (2014) Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes am Beispiel des Rheins zwischen Mainz und St. Goar, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas_45/2014_4.03
- Schröter K, Kunz M, Elmer F, Mühr B und Merz B (2015) What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. Hydrology and Earth System Sciences 19(1), 309-327. DOI:10.5194/hess-19-309-2015
- Sehili A, Lang G und Lippert C (2014) High-resolution subgrid models: background, grid generation, and implementation. Ocean Dynamics 64(4), 519-535. DOI:10.1007/s10236-014-0693-x
- Seiffert R, Hesser F, Büscher A, Fricke B, Holzwarth I, Rudolph E, Sehili A, Seiß G und Winkel N (2014) Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02: Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. DOI:10.5675/Kliwas_36/2014_3.02
- Slangen ABA, Meyssignac B, Agosta C, Champollion N, Church JA, Fettweis X, Ligtenberg SRM, Marzeion B, Melet A, Palmer MD, Richter K, Roberts CD und Spada G (2017) Evaluating Model Simulations of Twentieth-Century Sea Level Rise. Part I: Global Mean Sea Level Change. Journal of Climate 30(21), 8539-8563. DOI:10.1175/JCLI-D-17-0110.1
- Stevens B, Giorgetta M, Esch M, Mauritsen T, Crueger T, Rast S, Salzmann M, Schmidt H, Bader J, Block K, Brokopf R, Fast I, Kinne S, Kornbluh I, Lohmann U, Pincus R, Reichler T und Roeckner E (2013) Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. Journal of Advances in Modeling Earth Systems 5(2), 146-172. DOI:10.1002/jame.20015
- Stocker TF, Dahe Q, Plattner G-K und Tignor M (2015) IPCC Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies. Workshop Report, 15. Citeseer, São José dos Campos, Brazil, 18 pp.,

- Tamisiea ME, Hill EM, Ponte RM, Davis JL, Velicogna I und Vinogradova NT (2010) Impact of self-attraction and loading on the annual cycle in sea level. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115(C7), C07004. DOI:10.1029/2009JC005687
- Tegethof U, Bürger M, Hartz B, Ripke O, Schmeltekamp C, Wieland M und Wolf A (2011) Anpassung der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel (AdSVIS), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.
- Treiber B (1975) Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH)*. Institut für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Trzaska S und Schnarr E (2014) A review of downscaling methods for climate change projections, United States Agency for International Development (USAID). http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf
- Tveito OE und Huth R (2016) Circulation-type classifications in Europe: results of the COST 733 Action. *International Journal of Climatology* 36(7), 2671-2672. DOI:10.1002/joc.4768
- UBA (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität, Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/dimate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Bechtold VDC, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, Berg LVD, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf JF, Morcrette JJ, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P und Woollen J (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131(612), 2961-3012. DOI:10.1256/qj.04.176
- Van der Linden P und Mitchell J, editors (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 160 pp.,
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ und Rose SK (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1), 5-31. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z
- Wahl S, Bollmeyer C, Crewell S, Figura C, Friedrichs P, Hense A, Keller JD und Ohlwein C (2017) A novel convective-scale regional reanalysis COSMO-REA2: Improving the representation of precipitation. *Meteorologische Zeitschrift* (26), 345-361. DOI:10.1127/metz/2017/0824
- Ward J (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association* 58(301), 236-244.
- Wilks DS (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, 91. Academic Press, Burlington, USA, 627 pp.,
- Winterfeldt J, Andersson A, Klepp C, Bakan S und Weisse R (2010) Comparison of HOAPS, QuikSCAT, and buoy wind speed in the eastern North Atlantic and the North Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(1), 338-348. DOI:10.1109/TGRS.2009.2023982

9 Abkürzungsverzeichnis

BMVI	B undes m inisterium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BAW	B undes a nstalt für W asserbau
BfG	B undes a nstalt für G ewässerkunde
BNSC	Nord- und Ostsee K limatologie
BSH	B undesamt für S eeschiffahrt und H ydrographie
CCLM	C OSMO- CLM
CLM	C limate L imited-area M odel (von der CLM-Community betriebenes regionales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell COSMO hervorgegangen ist)
CMIP	C oupled M odel I ntercomparison P roject – kollaborativer Rahmen zur Verbesserung des Wissens über den Klimawandel
CM-SAF	S atellite A pplication F acility on C limate M onitoring – Satellitengestützte Klimaüberwachung
COP	C onference of P arties – UN-Klimakonferenz, auch Weltklimagipfel
CORDEX	C oordinated D ownscaling E xperiment (Regionale Initiativen für das Downskaling der globalen Klimamodelle)
COSERO	C ontinuous s emi-distributed r unoff model
COSMO	C onsortium for S mall Scale M odelling
DAS	D eutsche A npassungs s trategie
DWD	D eutscher W etter d ienst
ECMWF	E uropean C entre for M edium-Range W eather F orecasts – Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
EPISODES	E mpirical S tatistical D ownscaling for Seasonal, D ecadal up to C entennial T ime S eries
ESD	E mpirisch-statistisches D ownscaling
ERA-40	Reanalyse des ECMWF
ESM	E arth S ystem M odel – Erdsystemmodell (integriert die Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean, Land, Kryosphäre, und Biosphäre)
ExpN	BMVI- E xpertenn n etzwerk
FLYS	Flusshydrologischer Webdienst der BfG
GCM	G eneral C irculation M odel / Global Circulation Model – Globales Klimamodell
HN	h ydrodynamisch- n umerisch
HQ	h öchster D urch f luss (Gewässer)
HURS	Relative Luftfeuchte in 2 m Höhe
HUSS	Spezifische Feuchte
HYRAS	H ydrologische R asterdatensätze verschiedener hydrometeorologischer Größen für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete
ICDC	I ntegrated C limate D ata C enter
IDW	I nverse D istance W eighted I nterpolation – Verfahren zur räumlichen Interpolation
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange – Zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
KLIWAS	Auswirkungen des K limawandels auf W asserstraßen und S chiffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (Projekt des BMVI)
KWVA	K limawirkungs- und V ulnerabilitäts a nalyse des Bundes

LAI	Leaf Area Index – Blattflächenindex
LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model – Wasserhaushaltsmodell
LARSIM-ME	Wasserhaushaltsmodell LARSIM für Mitteleuropa
MaxD	Maximale ununterbrochene Dauer der Über-/Unterschreitung eines Schwellenwertes
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate (regionales Klimamodell)
MPI-ESM	ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg
MPI-OM	Ozeanmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg
MSA	globaler Meeresspiegelanstieg
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean (Regionales Ozeanmodell)
netCDF	Network Common Data Format (binäres Dateiformat für den Austausch wiss. Daten)
NM7Q	Dieser Niedrigwasserkennwert beschreibt die kleinste Abflussmenge (in m ³ /s) gemittelt über sieben aufeinander-folgende Tage im Betrachtungszeitraum.
NHN	Normalhöhennull – Bezeichnung der Bezugsfläche für das Nullniveau bei Angabe von Höhen über dem Meeresspiegel
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
NOSCCA	North Sea Region Climate Change Assessment
NQ	niedrigster Durchfluss (Gewässer)
OARCM	regionales gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell
P	pressure – Luftdruck
PCA	Principal Component Analysis – Hauptkomponentenanalyse
PLCOV	vegetation area fraction – Anteil an Vegetationsfläche
ppm	parts per million – Millionstel
PR	precipitation – Gesamtniederschlagssumme
PSL	mean sea level pressure – Luftdruck auf Meereshöhe
PS	surface pressure – Bodenluftdruck
Q	Abfluss
QDCM	Quantil-Delta-Change-Mapping – Verfahren zur Bias-Adjustierung von Modelldaten
RCM	Regional Climate Model – regionales Klimamodell
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenarien des 5. IPCC Sachstandsberichts)
REGNIE	Regionalisierte Niederschlagshöhen – Verfahren zur Niederschlagsinterpolation des DWD
ReKlies	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (Erweiterung des regionalen Klimaprojektionsensembles aus EURO-CORDEX)
REMO	Regional Modell (in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell)
ROOTD	root depth – Wurzeltiefe
RSDS	Globalstrahlungswerte
SFCWIND	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
SFCWINDMAX	maximale Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
SLR	Sea Level Rise – Meeresspiegelanstieg
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Wetterdienst Schwedens)
SP	Schwerpunktthema im BMVI-Expertenetzwerk
SRES	Special Report on Emission Scenarios (Emissionsszenarien des 4. IPCC Sachstandsberichts)

STARS	S tatistical A nalogue R esampling S cheme – Statistisches Klimamodell des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung
T_SO	s oil t emperature – Bodentemperatur
TAS	Lufttemperatur in 2 m Höhe
TMAX	Maximum der Lufttemperatur in 2 m Höhe
TMIN	Minimum der Lufttemperatur in 2 m Höhe
TDEW	Taupunkttemperatur in 2 m Höhe
TF	T hemenfeld im BMVI-Expertennetzwerk
TRY	T est R eference Y ears – Testreferenzjahre
UAS, VAS	Windrichtungskomponenten in 10 m Höhe
UNFCCC	U nited N ations F ramework C onvention on C limate C hange – Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
WETTREG	W etterlagen-basierte R egionalisierungsmethode (in Deutschland entwickeltes statistisches Verfahren zur Errechnung von Klimavariablen)
WSGSMAX	Windböen in 10 m Höhe
W_SNOW	surface snow amount – Schneemenge auf dem Boden
W_SO	soil moisture content – Bodenfeuchtegehalt
WSV	W asserstraßen- und S chifffahrtsverwaltung des Bundes

10 Anhang

Anlage 1: Übersicht über Datum und Grund des Ausschlusses regionaler Klimaprojektionen aus dem DWD-Referenzensemble.....	77
Anlage 2: Vorgehen bei der multivariaten Bias-Adjustierung.....	78
Anlage 3: Vorgehen beim multivariaten Bias-Adjustierungs-Algorithmus MBC.....	80
Anlage 4: Für das statistische Downscaling zur Erstellung eines Ensembles hochaufgelöster Klimaprojektionen grundsätzlich zur Verfügung stehende Verfahren.....	81
Anlage 5: Liste der in Themenfeld 1 bearbeiteten Klimaindizes mit ihrer Abkürzung, der Einheit und einer Beschreibung bzw. Berechnungsvorschrift. Die Indizes können auf der Basis von Monaten (M), Jahreszeiten (S), Hydrologischen Halbjahren (HY) oder Jahren (Y) berechnet werden (siehe Spalte „Auswertzeitraum“).....	83
Anlage 6: Klimaprojektionen – Produktliste für die hochaufgelösten Klimasimulationen.....	88

Anlage 1: Übersicht über Datum und Grund des Ausschlusses regionaler Klimaprojektionen aus dem DWD-Referenzensemble.

- **14.02.2018 Rückzug der statistischen Regionalmodellsimulationen des Modells PIK-STARS3 für das RCP8.5-Szenario.**
- In der Methode des Modells PIK-STARS3 können die erzeugten statistischen Zusammenhänge der Vergangenheit für die stark veränderten Klimazustände der Zukunft, wie sie unter dem RCP8.5 Szenario ab etwa 2060 auftreten, nicht mehr als gültig angesehen werden (persönliche Kommunikation Christoph Menz, PIK).
- **02.03.2018 Rückzug der dynamischen Regionalmodellsimulationen, die auf dem Lauf CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1) beruhen.**
- Vom globalen Klimamodell CNRM-CM5 wurden über das ESGF-Portal Eingangsdaten für die Regionalisierung durch regionale Klimamodelle zur Verfügung gestellt. Anfang 2018 wurde bekannt, dass einige der bereitgestellten Daten der historischen Simulationen nicht Teil der vorgegebenen Simulation sind, sondern von einem anderen Modelllauf des CNRM-CM5 stammen. Dieses gilt nur für einen sehr eingeschränkten Teil der bereitgestellten Daten (Variablen). Der Unterschied zwischen diesen beiden Modellläufen ist klimatologisch gesehen nicht groß, aber die Tag-zu-Tag-Zuordnung einiger Variablen (Randwerte der Atmosphäre und die Meeresoberflächeninformation Temperatur und Eisdeckung) ist nicht korrekt. Diese Problematik betrifft nur die nicht bodennahen Eingangsdaten, die in dynamische Regionalmodelle eingehen. Die empirisch-statistischen Methoden EPISODES, STARS und WETTREG sind von der Problematik nicht betroffen.
- **19.06.2018 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen IPSL-INNERIS-WRF331F, die auf dem Lauf IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1) beruhen.**
- Die IPSL-INNERIS-WRF331F-Simulationen enthalten keine zeitlichen Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen.
- **09.08.2018 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen "DMI-HIRHAM5"**
- Die DMI-HIRHAM5-Simulationen enthalten keine zeitliche Änderung der Treibhausgaskonzentrationen (Jerez et al. 2018)
- **14.02.2019 Ausschluss der Regionalmodellsimulationen "CEC-WETTREG2013" und "PIK-STARS3"**
- Die Empirisch-Statistischen Downscaling-Methoden WETTREG und STARS erstellen standardmäßig Ergebnisdatensätze für Stationen. Auf Grund von Nutzeranforderungen werden für die DWD-Referenz-Ensembles nur Daten auf gerasterten Gittern (vorzugsweise EURO-CORDEX-Gitter) genutzt. Im Rahmen des BMBF-Projektes [ReKliEs-De](#) wurden die WETTREG2013 und STARS3 Simulationen auf das EURO-CORDEX-Gitter übertragen. Bei der Übertragung auf das Gitter sind für die Variablen Sonnenscheindauer (sund, nur WETTREG2013) und Luftdruck (ps, psl) Probleme aufgetreten. Diese Probleme sind mit Stand 14. Februar 2019 noch nicht gelöst worden. Beide Gruppen arbeiten daran. In der Folge werden die Datensätze von WETTREG2013 und STARS3 nicht für die DWD-Referenz-Ensembles v2018 genutzt. Es ist angedacht, die Regionalmodellsimulationen der beiden statistischen Modelle nach Bereitstellung korrigierter Daten zu den oben angegebenen Variablen in die DWD-Referenz-Ensembles v2019 mit aufzunehmen.

Anlage 2: Vorgehen bei der multivariaten Bias-Adjustierung.

Bei univariatem Quantil-Mapping wird der Bias über eine Transferfunktion korrigiert, welche die kumulativen Verteilungsformen der Modelldaten (m) und jene der Beobachtungen (o) im Referenzzeitraum (r) miteinander in Beziehung setzt. Dies führt zu folgender Transferfunktion:

$$\hat{X}_{m,p}(t) = F_{o,r}^{-1}\{F_{m,r}[X_{m,p}(t)]\}$$

Mit einem modellierten Wert zum Zeitpunkt t und einem Projektionszeitraum p. Wird die Funktion auf modellierte Werte im Referenzzeitraum angewendet (m,p = m,r), haben die bias korrigierten Werte methodisch Bedingt dieselbe Verteilung wie die Beobachtungen.

Der von Bürger et al. (2011) publizierte Bias-Korrektur Algorithmus stellt eine multivariate Verallgemeinerung der univariaten Skalierung von Mittelwert/Standardabweichung dar, welche die Standardabweichung durch eine Cholesky-Zerlegung der Kovarianz-Matrix ersetzt. Im univariaten Fall werden modellierte Werte $x_{m,r}$ im Referenzzeitraum zunächst als Anomalien zum Mittelwert $\bar{x}_{m,r}$ ausgedrückt:

$$x'_{m,r} = x_{m,r} - \bar{x}_{m,r}$$

Die Skalierung mit dem Verhältnis der beobachteten $\sigma_{o,r}$ zur modellierten Standardabweichungen $\sigma_{m,r}$ ergibt:

$$\hat{x}'_{m,r} = \frac{x'_{m,r} \sigma_{o,r}}{\sigma_{m,r}}$$

Schließlich erhält man durch Addition des beobachteten Mittelwertes $\bar{x}_{o,r}$:

$$\hat{x}_{m,r} = \hat{x}'_{m,r} + \bar{x}_{o,r}$$

Nach Anwendung der Korrektur stimmen modellierter Mittelwert und Standardabweichung in der Referenzperiode mit den beobachteten Werten überein. Die Projektionsdaten werden, unter Verwendung derselben Faktoren, linear skaliert.

Im Falle der multivariaten Skalierungsmethode wird gleichermaßen vorgegangen, allerdings mit der multivariaten Generalisierung von Mittelwert und Standardabweichung.

Sei eine Matrix von Beobachtungswerten $X_{o,r}$ gegeben (mit den Variablen in den Spalten) und eine korrespondierende Matrix modellierter Werte $X_{m,r}$, so werden zunächst die Anomalien $X'_{o,r}$ und $X'_{m,r}$ relativ zum multivariaten Mittelwert bestimmt (Werte in Spalten werden durch Subtraktion der Mittelwerte zentriert). Unter der Annahme, dass die Kovarianz-Matrix der beobachteten Anomalien positiv definit ist,

kann diese via Cholesky-Zerlegung in das Produkt aus unterer Dreiecksmatrix $L_{o,r}$ und ihrer Transponierten zerlegt werden:

$$\text{cov}(X'_{o,r}) = L_{o,r}^T L_{o,r}$$

Die Kovarianz-Matrix der Modellanomalien kann in gleicher Weise zerlegt werden:

$$\text{cov}(X'_{m,r}) = L_{m,r}^T L_{m,r}$$

Die modellierten Anomalien werden derart korrigiert, dass deren Kovarianz-Struktur (Varianz und Pearson-Korrelationen) mit jener der Beobachtungen übereinstimmt:

$$\hat{X}'_{m,r} = X'_{m,r} L_{m,r}^{-1} L_{o,r}$$

Da die Daten als Anomalien wiedergegeben werden, können sie so bias korrigiert werden, dass sie denselben Mittelwert aufweisen wie die Beobachtungen:

$$\hat{X}_{m,r} = \hat{X}'_{m,r} + \bar{X}_{o,h}$$

Die Klimaprojektionsdaten $X_{m,p}$ werden wie folgt bias korrigiert:

$$\begin{aligned} \hat{X}'_{m,p} &= X'_{m,p} L_{m,p}^{-1} L_{o,r} && \text{und} \\ \hat{X}_{m,p} &= \hat{X}'_{m,p} + (\bar{X}_{m,p} + \bar{X}_{m,h}) + \bar{X}_{o,h} \end{aligned}$$

mit $X'_{m,p}$ den modellierten Anomalien relativ zum multivariaten Mittelwert der Projektionsdaten; der zweite Term entspricht dem mittleren Klimasignal $\bar{X}_{m,p}$. Die Anomalien werden nicht mit historischen Werten in Bezug gesetzt, um eine Vermengung zwischen Klimasignal und Korrekturwert zu vermeiden. Da die Methodik auf einer linearen Transformation unter Verwendung von Mittelwert und Standardabweichung beruht, ist eine vollständige Korrektur von Daten, die einer multivariat-Gauß'schen Verteilung folgen, garantiert.

Anlage 3: Vorgehen beim multivariaten Bias-Adjustierungs-Algorithmus MBC.

- 1) Ersetze die Elemente jeder Spalte der Matrizen $X_{m,r}$, $X_{o,r}$, $X_{m,p}$ durch deren ordinale Ränge. Dies liefert die Matrizen $R_{m,p}$, $R_{m,r}$, $R_{o,r}$.
- 2) Anwendung der multivariaten Bias-Korrektur auf $R_{m,p}$, $R_{m,r}$ unter Verwendung von $R_{o,r}$ als Beobachtungsdaten und Speicherung der korrigierten Werte in $\hat{R}_{m,p}$, $\hat{R}_{m,r}$.
- 3) Neusortierung der Elemente jeder Spalte in $\hat{R}_{m,r}$ und $\hat{R}_{m,p}$ um neue Matrizen ordinaler Ränge $R_{m,r}$ und $R_{m,p}$ zu erhalten. Falls sich die Elemente der Spearman-Rangkorrelationsmatrix $\text{cor}(R_{m,r})$ innerhalb einer spezifischen absoluten Toleranzgrenze derjenigen von $\text{cor}(R_{o,r})$ befindet oder die Konvergenzrate unter einen kritischen Wert fällt, fahre mit Schritt 4 fort, andernfalls wiederhole Schritt 2.
- 4) Anwendung von univariatem Quantil-Mapping auf jede Spalte von $X_{m,r}$ und $X_{m,p}$ mit den Beobachtungsdaten $X_{o,r}$, wobei $\hat{X}_{m,r}$ und $\hat{X}_{m,p}$ resultieren.
- 5) Sortiere die Elemente jeder Spalte in $\hat{X}_{m,r}$ und $\hat{X}_{m,p}$ entsprechend den ordinalen Rängen $R_{m,r}$ und $R_{m,p}$ der letzten Iteration der Schritte (2) und (3) und gebe das Resultat aus.

Konvergenz und Konvergenzrate werden als mittlerer absoluter Fehler zwischen den Elementen, die sich nicht auf der Diagonalen der korrigierten und der beobachteten Korrelationsmatrizen befinden, angegeben:

$$MAE_{cor} = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \left| \text{cor}(R_{m,r})_{i,j} - \text{cor}(R_{o,r})_{i,j} \right|$$

Mit k der Anzahl an Variablen. Konvergenz tritt auf, wenn MAE_{cor} oder seine Änderungsrate zwischen aufeinanderfolgenden Iterationen kleiner ist als 0,0001.

Anlage 4: Für das statistische Downscaling zur Erstellung eines Ensembles hochaufgelöster Klimaprojektionen grundsätzlich zur Verfügung stehende Verfahren.

Für das statistische Downscaling lassen sich insgesamt drei Klassen von Verfahren unterscheiden (Trzaska und Schnarr 2014):

- Lineare Methoden,
- Wetterlagen-Klassifizierungen und
- Wettergeneratoren.

Hier wird ein Verfahren der Wetterlagen-Klassifizierungen favorisiert. An dieser Stelle sei auch auf die COST-733 Action verwiesen (Tveito und Huth 2016), wo eine Fülle von verschiedenen Wetterlagenklassifikationen systematisch katalogisiert und evaluiert wurde. Wetterlagen-Klassifizierungen beinhalten in der Regel ein Cluster-Verfahren. Bei einer Cluster-Analyse ist es das Ziel, große Datenmengen in verschiedene Gruppen (bzw. Klassen oder Cluster) aufzuteilen und dadurch eine Datenreduktion zu erreichen. Die gruppierten Elemente werden durch bestimmte Eigenschaften charakterisiert. In diesem Fall hier z. B. durch meteorologische Eigenschaften wie Zirkulationsmuster oder Temperaturverteilungen. Die Daten können als Vektoren in einem N-dimensionalen Raum aufgefasst werden (Panitz 2006). Dabei gilt das Prinzip, dass innerhalb einer Gruppe größtmögliche Homogenität und außerhalb einer Gruppe größtmögliche Heterogenität herrschen soll. Ein Maß dafür kann z. B. eine Distanz im Raum sein.

Beim Clustering unterscheidet man grundlegend drei verschiedene Methoden:

- Hierarchische Clusterverfahren,
- partitionierende Clusterverfahren und
- self-organizing maps (SOM).

Hierarchische Clustermethoden gehen zu Beginn ihres Algorithmus davon aus, dass jeder einzelne Datenvektor eine eigene Klasse bildet. Im nächsten Schritt werden die zwei ähnlichsten Vektoren zu einer Klasse zusammengefügt. In einem iterativen Verfahren werden schließlich die Klassen gefunden, die einem Optimum (von definierten Maßzahlen und Kriterien) entsprechen, das am Anfang des Verfahrens festgelegt werden muss. Dabei werden die einzelnen Datenvektoren in einer Gruppe festgehalten, sobald sie dorthin verteilt worden sind. Ein Vertreter dieser Methode ist die sogenannte Ward-Methode (Ward 1963).

Bei **partitionierenden Verfahren** wird die Anzahl der Klassen zu Beginn festgelegt. Die Anfangsverteilung der Klassen wird zufällig gewählt. In einem iterativen Austauschprozess werden die einzelnen Vektoren zwischen den Klassen umgeordnet, bis eine gegebene Zielfunktion optimiert ist. Das sogenannte k-means Verfahren nutzt dabei die Streuungsquadratsumme innerhalb der Gruppe (Lloyd 1982).

Das **SOM-Verfahren** ist ein unüberwachtes neuronales Netz, ähnelt aber in der Vorgehensweise den anderen Verfahren (Kohonen 1995). Im N-dimensionalen Raum der Datenvektoren werden (in der Anzahl vorher festgelegte) Mustervektoren (= Knoten oder Klassen) platziert und in einem iterativen Verfahren unter Ähnlichkeitsgesichtspunkten optimiert. Innerhalb eines Iterationsschrittes wird für jeden Datenvektor der nächstgelegene Knoten gesucht und korrigiert. Zusätzlich werden die innerhalb einer definierten Nachbarschaftsfunktion liegenden Nachbarknoten ebenfalls korrigiert. Der Radius der Nachbarschaftsfunktion nimmt im Laufe der Iteration monoton ab, sodass mit der Zeit immer weniger Nachbarknoten mitkorrigiert werden.

Als Ergebnis aller drei Verfahren werden die Anzahl der Fälle pro Klasse (Häufigkeit in Tagen pro Zeitraum) und der repräsentative Tag ausgegeben. Am repräsentativen Tag ist die Wetterlage dem Clustermittel am ähnlichsten. Für die betrachtete Variable können dann für jedes Cluster der Tagesgang am repräsentativen Tag für jeden Gitterpunkt des hochaufgelösten dynamischen Klimaprojektionslaufs bestimmt werden. Zu jedem Cluster wird auch angegeben, an wie vielen und welchen Tagen des Zeitraums die jeweilige Wetterlage

geherrscht hat. Mit diesen Informationen kann dann eine Zeitreihe über den gesamten betrachteten Zeitraum generiert werden und die relevanten Indices (siehe Anhang) abgeleitet werden.

Nach der Vorauswahl der Wetterlagenklassifikationen als genereller Methode ist eine weitere Auswahl der konkreten Methode notwendig. Dazu werden die zwei Methoden „k-means“ und „self-organizing maps“ in Betracht gezogen. In einem Bericht von Panitz (2006) hat sich das k-means Verfahren als beste Methode für Variablen der Luftqualität herausgestellt. Es ist zunächst zu prüfen, ob das Verfahren auch für die hier relevanten Variablen Temperatur, Wind und Niederschlag am besten geeignet ist. Dafür wird ein Zeitraum von mehreren Jahren ausgewählt und die zwei Methoden in diesem Zeitraum miteinander verglichen, unter Einbeziehung von Beobachtungen und der dynamisch angetriebenen, hochaufgelösten Klimaprojektion.

Anlage 5: Liste der in Themenfeld 1 bearbeiteten Klimaindizes mit ihrer Abkürzung, der Einheit und einer Beschreibung bzw. Berechnungsvorschrift. Die Indizes können auf der Basis von Monaten (M), Jahreszeiten (S), Hydrologischen Halbjahren (HY) oder Jahren (Y) berechnet werden (siehe Spalte „Auswertzeitraum“).

Abkürzung	Kenngröße/ Klimaindex	Einheit	Auswertzeitraum	Beschreibung
Lufttemperatur in 2 m Höhe				
tasMean	Mittlere Lufttemperatur	°C	M/S/HY/Y	Tagesmitteltemperatur (Tas) in 2m Höhe
tasStd	interannuelle Variabilität Lufttemperatur	°C	Y	Standardabweichung von Tas (interannuelle Variabilität)
tas5p	5. Perzentil Tagesmitteltemperatur	°C	M/S	5. Perzentil von Tas (monatlich und saisonal)
tas95p	95. Perzentil Tagesmitteltemperatur	°C	M/S	95. Perzentil von Tas (monatlich und saisonal)
tasmaxMean	Mittleres Maximum Lufttemperatur	°C	M/S/HY/Y	Mittlere Maximumtemperatur (Tmax) über die Zeitscheiben
tasmaxMax	Maximum der Maximumtemperatur	°C	M/S/HY/Y	Maximum der Maximumtemperatur Tmax über die Zeitscheiben
tasminMean	Mittleres Minimum Lufttemperatur	°C	M/S/HY/Y	Mittlere Minimumtemperatur (Tmin) über die Zeitscheiben
tasminMin	Minimum der Minimumtemperatur	°C	M/S/HY/Y	Minimum der Minimumtemperatur Tmin über die Zeitscheiben
tas10	Tage über 10°C	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Anzahl der Tage mit einer Tagesmitteltemperatur von $\geq 10^{\circ}\text{C}$
tas10p	kühle Tage	Anz. Tage	M	Anzahl der Tage mit Mitteltemperatur Tas < 10. Perzentil (Tas zentriert auf einem 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tas90p	warme Tage	Anz. Tage	M	Anzahl der Tage mit Mitteltemperatur Tas > 90. Perzentil (Tas zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tasmin10p	kühle Nächte	Anz. Tage	M	Anzahl der Tage mit Minimumtemperatur Tmin < 10. Perzentil (Tmin zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tasmin90p	warme Nächte	Anz. Tage	M	Anzahl der Tage mit Minimumtemperatur Tmin > 90. Perzentil (Tmin zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tasmax10p	Tage mit kühlem Maximum	Anz. Tage	M/Y	Mittlere Anzahl Tage mit Maximumtemperatur Tmax < 10. Perzentil (Tmax zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tasmax10pct	Anteil Tage mit kühlem Maximum	%	Y	Mittlerer Prozentanteil der kalten Tage (Def. s. tasmax10p)
tasmax90p	Tage mit warmem Maximum	Anz. Tage	M/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Maximumtemperatur Tmax > 90. Perzentil (Tmax zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
tasmax90pct	Anteil Tage mit warmem Maximum	%	Y	Mittlerer Prozentanteil der warmen Tage (Def. s. tasmax90p)
tasmax90ptasmin90pD	Wärmep perioden mit warmen Nächten (Anzahl)	Anz. Ereignisse	S/Y	Mittlere Anzahl von mind. 6 Tage andauernden Episoden warmer Tage (Def. s. tasmax90p) und warmer Nächte (Def. s. tasmin90p)
dtr	Spanne der Tagestemperatur	°C	M/S/HY/Y	Mittlere Differenz maximaler und minimaler Tagestemperatur (Tmax - Tmin)

Abkürzung	Kenngröße/ Klimaindex	Einheit	Auswertezeitraum	Beschreibung
dtrMax	Maximale Spanne der Tagestemperatur	°C	S/Y	Absolutes Maximum der Differenz maximaler und minimaler Tagestemperatur ($T_{\max} - T_{\min}$)
id	Eistage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Maximumtemperatur $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$
fd	Frosttage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Minimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$
ft	Frostwechseltage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit $T_{\max} \geq 0^{\circ}\text{C}$ und $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$
su	Sommertage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Maximumtemperatur $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$
hd	Heiße Tage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Maximumtemperatur $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$
tn	Tropennächte	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Minimumtemperatur $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$
idDMax	Maximale Eisperiode (Dauer)	Dauer Tage	Y	Mittlere maximale Periode von ununterbrochenen aufeinanderfolgenden Eistagen mit $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$.
fsdi0	Maximale Frostperiode (Dauer)	Dauer Tage	Y	Maximale Periode von ununterbrochenen aufeinanderfolgenden Frosttagen
fsdi5	schwere Frostperioden (Dauer)	Dauer Tage	Y	Mittlere maximale Andauer von ununterbrochenen aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Minimumtemperatur $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$
csdi	Kälteperioden (Dauer)	Dauer Tage	S/HY/Y	Mittlere Summe der zusammenhängenden Tage (mind. 6), an denen das Tagesminimum $T_{\min} < 10$. Perzentil der Tagesminimumtemperatur zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000 ist.
wydi	Wärmepperioden (Dauer)	Dauer Tage	S/HY/Y	Mittlere Summe der zusammenhängenden Tage (mind. 6), an denen das Tagesmaximum $T_{\max} > 90$. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur zentriert auf ein 5-Tage-Fenster im <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000 ist.
hd30fr	Hitzeperioden mindestens 6 Tage (Anzahl)	Anzahl	S/Y	Mittlere Häufigkeit von Hitzeperioden als Abfolge von mind. 6 aufeinanderfolgenden heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^{\circ}$, s. hd). Es wird das 30-jährige Mittel gebildet (Bsp.: Tritt ein solches Ereignis einmal in 30 Jahren auf, erhält der Index den Wert $1/30 = 0,033$)
3hd30fr	Hitzeperioden mindestens 3 Tage (Anzahl)	Anzahl	S/Y	Mittlere Häufigkeit von Hitzeperioden als Abfolge von mind. 3 aufeinanderfolgenden hd (s. a. Beschreibung von hd30fr)
3tas95p	Hitzewellen mindestens 3 Tage (Anzahl)	Anz. Ereignisse	Y	Mittlere Anzahl von mind. 3 Tage andauernden Hitzewellen mit $T_{\text{as}} > 95$ Perzentil. Perzentile werden für den <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000 zentriert auf ein 61-Tage Fenster berechnet. Betrachtung nur des Sommerhalbjahrs (April - Oktober).
3tas95pD	Hitzewellen mindestens 3 Tage (Dauer)	Dauer Tage	Y	Mittlere Dauer von Hitzewellen-Tagen für mind. 3 Tage andauernde Hitzewellen mit $t_{\text{as}} > 95$ Perzentil (s. 3tas95p).

Abkürzung	Kenngröße/ Klimaindex	Einheit	Auswertezeitraum	Beschreibung
hdtn	Hitzeperioden mit tropischen Nächten mindestens 6 Tage (Anzahl)	Anz. Ereignisse	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Hitzeperioden mit mind. 6 aufeinanderfolgenden Heißen Tagen ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$, s. hd) und Tropennächten ($T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$, s. tn). Es wird über 30 Jahre gemittelt. (Bsp.: Tritt ein solches Ereignis einmal in 30 Jahren auf, erhält der Indikator den Wert $1/30=0.033$)
hdtnD	Hitzeperioden mit tropischen Nächten mindestens 6 Tage (Dauer)	Dauer Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl aufeinanderfolgender heißer Tage (s. hd) und Tropennächte (s. tn). Für Perioden, in denen heiße Tage und Tropennächte an 6 aufeinanderfolgenden Tagen auftreten, wird die Anzahl der einzelnen Tage gezählt und das 30-jährige Mittel gebildet (Bsp.: Tritt eine sechstägige Hitzeperiode in 30 Jahren auf, erhält der Indikator den Wert $6/30=0.2$)
3hdtn	Hitzeperioden mit tropischen Nächten mindestens 3 Tage (Anzahl)	Anz. Ereignisse	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Hitzeperioden mit mind. 3 aufeinanderfolgenden Heißen Tagen ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$, s. hd) und Tropennächten ($T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$, s. tn). Es wird über 30 Jahre gemittelt. (Bsp.: Tritt ein solches Ereignis einmal in 30 Jahren auf, erhält der Indikator den Wert $1/30=0.033$)
3hdtnMax	Maximale Hitzeperiode mit tropischen Nächten mindestens 3 Tage	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Maximale Zahl der Tage aufeinanderfolgender Heißer Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) und tropischer Nächte ($T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$). Die Anzahl wird nur gezählt, wenn dieses Kriterium an mindestens aufeinanderfolgenden 3 Tagen erfüllt ist.
3hdtnD	Hitzeperioden mit tropischen Nächten mindestens 3 Tage (Dauer)	Dauer Tage	S/Y	Mittlere Anzahl aufeinanderfolgender heißer Tage (s. hd) und Tropennächte (s. tn). Für Perioden, in denen heiße Tage und Tropennächte an 3 aufeinanderfolgenden Tagen auftreten, wird die Anzahl der einzelnen Tage gezählt und das 30-jährige Mittel gebildet (Bsp.: Tritt eine dreitägige Hitzeperiode in 30 Jahren auf, erhält der Indikator den Wert $3/30=0.1$)
Niederschlag				
rMean	Mittlere Niederschlagshöhe	mm	M/S/HY/Y	Mittlere Summen des Tagesniederschlag über Auswerteziträume
rStd	Interannuelle Variabilität der Niederschlags	mm	Y	Standardabweichung von r (interannuelle Variabilität)
r01mm	Niederschlagstage $\geq 0,1$ mm	Anz. Tage	M/S/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 0,1$ mm
r1mm	Niederschlagstage ≥ 1 mm	Anz. Tage	M/S/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm
r10mm	Niederschlagstage ≥ 10 mm	Anz. Tage	M/S/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm
r20mm	Niederschlagstage ≥ 20 mm	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm
r30mm	Niederschlagstage ≥ 30 mm	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 30 mm
r1mm10Dec31Jan	Niederschlagstage zwischen 10. Dez. und 31. Jan.	Anz. Tage	Y	Mittlere Anzahl der Niederschlagstage in der Periode zwischen dem 10.12. und 31.01.
rcpTot	Gesamt niederschlag an nassen Tagen	mm	M/S/HY/Y	Mittlerer Gesamtniederschlag an Tagen mit einer Niederschlagshöhe ≥ 1 mm

Abkürzung	Kenngröße/ Klimaindex	Einheit	Auswertezeitraum	Beschreibung
rMean1mm	Mittlerer Niederschlag an Tagen mit Niederschlag > 1mm	mm/d	M	Quotient aus Niederschlagshöhe und Anzahl der Tage mit Niederschlag > 1 mm
rMean20mm	Mittlerer Niederschlag an Tagen mit Niederschlag > 20mm	mm/d	M/S/HY/Y	Quotient aus Niederschlagshöhe und Anzahl der Tage mit Niederschlag > 20 mm
wdp	Regenperioden (Anzahl)	Anz. Ereignisse	S/Y	Mittlere Häufigkeit von Perioden mit ununterbrochen aufeinanderfolgenden Niederschlagstagen ($pr > 1$ mm) für die Klassen: 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12-13, ≥ 14 Tage
cwd	Maximale Niederschlagsperiode (Dauer)	Dauer Tage	M/S/HY/Y	Maximale Periode von ununterbrochen aufeinanderfolgenden Niederschlagstagen mit Niederschlag ≥ 1 mm)
dd	Trockentage (Anzahl)	Anz. Tage	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag < 1 mm
ddp	Trockenperioden (Anzahl)	Anz. Ereignisse	S/Y	Mittlere Häufigkeit von Perioden mit ununterbrochen aufeinanderfolgenden Trockentagen ($pr < 1$ mm) für die Klassen: 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12-13, ≥ 14 Tage
cdd	Maximale Trockenperiode (Dauer)	Dauer Tage	M/S/HY/Y	Maximale Periode von ununterbrochen aufeinanderfolgenden Trockentagen mit Niederschlag < 1mm)
cddr20mm	Starkniederschlag nach meteorologischer Trockenperiode	Anz. Ereignisse	Y	Mittlere Anzahl der Ereignisse in denen eine Trockenperiode ≥ 11 Tage von einem Starkniederschlagsereignis mit $p \geq 20$ mm/d beendet wird
r95p	Sehr feuchte Tage	Anz. Tage	S/HY/Y	Mittlere Zahl an Tagen mit $pr > 95$. Perzentil täglicher Niederschlagsmengen (<i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000; berechnet für jede Gitterzelle innerhalb des gleichen Auswertzeitraums, z. B. 95. Perzentil für die Jahreszeit).
r95pct	Anteil der Niederschlagssumme an sehr feuchten Tagen	%	S/HY/Y	Mittlerer prozentualer Anteil des Niederschlags an sehr feuchten Tagen ($pr > 95$. Perzentil, <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000; berechnet für jede Gitterzelle innerhalb des gleichen Auswertzeitraums, z. B. 95. Perzentil für die Jahreszeit).
r95ptot	Niederschlagsmenge sehr feuchter Tage	mm	S/HY/Y	Mittlere akkumulierte Niederschlagsmenge aller Tage mit Tagesniederschlag oberhalb des 95%-Schwellwertes, also der 5 % der niederschlagsreichsten Tage
r99p	Extrem feuchte Tage	Anz. Tage	S/HY/Y	Mittlere Zahl an Tagen mit $pr > 99$. Perzentil täglicher Niederschlagsmengen (<i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000; berechnet für jede Gitterzelle innerhalb des gleichen Auswertzeitraums, z. B. 99. Perzentil für die Jahreszeit).
r99pct	Anteil der Niederschlagssumme an extrem feuchten Tagen	%	S/HY/Y	Mittlerer prozentualer Anteil des Niederschlags an extrem feuchten Tagen ($pr > 99$. Perzentil, <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000; berechnet für jede Gitterzelle innerhalb des gleichen Auswertzeitraums, z. B. 99. Perzentil für die Jahreszeit).
r99ptot	Niederschlagsmenge extrem feuchter Tage	mm	S/HY/Y	Mittlere akkumulierte Niederschlagsmenge aller Tage mit Tagesniederschlag oberhalb des 99%-Schwellwertes, also der 1 % der niederschlagsreichsten Tage
rx1day	Maximale 1-Tagesniederschlagssumme	mm	M/S/HY/Y	Maximum der über 1 Tag aufsummierten Niederschlagshöhen
rx5day	Maximale 5-Tagesniederschlagssumme	mm	M/S/HY/Y	Maximum der über 5 Tage aufsummierten Niederschlagshöhe

Abkürzung	Kenngröße/ Klimaindex	Einheit	Auswertezeitraum	Beschreibung
r30mm48h	Dauerregen	Anz. Ereignisse	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Ereignisse mit $pr \geq 30$ mm in 48 h. (Bsp.: Wenn es an 4 Tagen hintereinander jeweils mehr als 20 mm regnet, dies gilt als drei Ereignisse.)
r37mm72h	Dauerregen	Anz. Ereignisse	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Ereignisse mit $pr \geq 37$ mm in 72 h. Mindestens ein Tag muss auch mindestens 25,6 mm haben. Wenn es an 4 Tagen hintereinander jeweils mehr als 25 mm regnet, gilt dies als vier Ereignisse
r40mm72h	Dauerregen	Anz. Ereignisse	M/S/HY/Y	Mittlere Anzahl der Ereignisse mit $pr \geq 40$ mm in 72 h. (Bsp.: Wenn es an 4 Tagen hintereinander jeweils mehr als 30 mm regnet, dies gilt als vier Ereignisse.)
API	Vorfeuchteindex für die letzten 30 Tage	mm	S/Y	Niederschlagsbasierter Proxy für die Bodenfeuchtigkeit. Der letzte Regentag wird dabei stärker gewichtet als die Regenmengen der vorangegangenen Tage nach Schröter et al. (2015) bzw. Köhler und Linsley (1951)
API99p	Anzahl der Tage mit extrem hoher Vorfeuchte	Anz. Tage	S/Y	Mittlere Anzahl von Tagen, an denen der API-Index > 99. Perzentil des API für den <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000
R3d	3-Tages-Niederschlagssumme	mm	S/Y	3-Tages-Niederschlagssumme
R3d99p	Anzahl der Tage mit extrem hoher 3-Tages-Niederschlagssumme	Anz. Tage	S/Y	Mittlere Anzahl extrem nasser Tage, an denen die 3-tägige Niederschlagssumme > 99. Perzentil R3d für den <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000
APIR3d99p	Anzahl der Tage mit extrem hohem Starkniederschlag bei extrem hohen Vorfeuchtebedingungen	Anz. Tage/30 Jahre	S/Y	Gesamtzahl der Tage, an denen sowohl der API > 99. Perzentil als auch die R3d > 99. Perzentil (Perzentilberechnung jeweils für den <i>Bezugszeitraum</i> 1971–2000)
verdunstungsrelevante Größen				
rsds	Mittlere Globalstrahlung	W/m ²	M/S/HY/Y	Mittlere Globalstrahlung am Boden
hurs	Relative Luftfeuchte	%	M/S/HY/Y	Mittelwert der Relativen Luftfeuchte
huss	Spezifische Luftfeuchte	g/kg	M/S/Y	Mittelwert der Spezifischen Luftfeuchte
sfwind	Windgeschwindigkeit	m/s	M/S/HY/Y	Mittelwert (Erl.: berechnet für 10m Höhe über Grund) der Windgeschwindigkeit
sfwind98p	Starkwindereignis bzgl. des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit	m/s	M/S/HY/Y	98. Perzentil der mittleren Tageswindgeschwindigkeit in 10m über Grund
p10	(Tief-)druck auf Meereshöhe NN	hPa	M/S/HY/Y	10. Perzentil des Luftdrucks auf NN
kombinierte Indizes				
psd	Potentielle Schneetage	Anz. Tage	Y	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag ($PR \geq 1$ mm) und einer Tagesmitteltemperatur von ≤ 2 °C
et	Evapotranspiration	mm	M/S/Y	Mittlere potenzielle Evapotranspiration nach der Hargreaves-Samani-Formel
cwb	Klimatische Wasserbilanz	mm	M/S/Y	Mittlere Differenz zwischen der Niederschlagssumme und der Summe der potenziellen Evapotranspiration, berechnet nach der Hargreaves-Samani-Formel für jeden Auswertzeitraum

Anlage 6: Klimaprojektionen – Produktliste für die hochaufgelösten Klimasimulationen.

Klimamodell	COSMO-CLM Version 4.8 (INT2LM Version 1.19)		
Räumliche Auflösung	Horizontale Gitterweite: 2,8 km	vertikale Auflösung: 50 Schichten	
Modellgebiet	COSMO-DE plus östlich angrenzende Flusseinzugsgebiete (Abbildung 3-5)		
Klimaszenario	RCP 8.5		
Zeitscheiben	1971–2000	Historischer Lauf	Antrieb: MIROC5 / CCLM
	1971–2000	Evaluierungslauf	Antrieb: ERA-40/ERA-Interim
	2031–2060	<i>Nabe Zukunft</i>	Antrieb: MIROC5 / CCLM
	2071–2100	<i>Ferne Zukunft</i>	Antrieb: MIROC5 / CCLM
Ausgabeformat	NetCDF		
Ausgabeintervall	1h	6h	Tageswerte
Ausgabedaten	TAS, TDEW, HURS, UAS, VAS, WSGSMAX, PSL, PR, HUSS	TA, U, V, HUSS, P	PS, W_SNOW, T_SO, W_SO, PLCOV, LAI, ROOTD, TASMIN, TASMAX, SFCWINDMAX

Überblick über die Schlussberichte zur 1. Forschungsphase (2016–2019) des Themenfelds 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertennetzwerk

- **TF1-Endbericht:** BMVI-Expertennetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.
- **Auswerterahmen:** Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, Stanley S, Wachler B, Deutschländer T, Tinz B, Walter A, Winkel N, Krahe P und Höpp S (2020) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.01)
- **SP-101:** Brienen S., Walter A., Brendel C., Fleischer C., Ganske A., Haller M., Helms M., Höpp S., Jensen C., Jochumsen K., Möller J., Krähenmann S., Nilson E., Rauthe M., Razafimaharo C., Rudolph E., Rybka H., Schade N., Stanley K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- **SP-102:** Hänsel S, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.03
- **SP-103:** Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deutschländer T, Fleischer C, Forbriger M, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J und Seiffert R (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- **SP-104:** Bott F, Lohrengel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- **SP-105:** Lohrengel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNLA2020.2020.06
- **SP-106:** Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Hauer G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- **SP-107:** Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschiz E, Lohrengel A-F, Nilson E, Ork J, Schade N, Schulz D, Stachel H und Wachler B (2020) Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrswegesystems an den Klimawandel - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- **SP-108:** Schade N, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- **SP-109:** Hänsel S, Nilson E, Patzwahl R, Forbriger M und Klose M (2020) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- **Glossar:** BMVI-Expertennetzwerk (2020): Glossar des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk., DOI: 10.5675/ExpNBMVI2020.2020.11