



Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen

Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die
Forschungsphase 2016 – 2019



Inhalt

Kurzfassung	13
Executive summary	15
1 Hintergrund und Zielstellung	17
1.1 Klimawandel als Herausforderung für das deutsche Verkehrssystem.....	17
1.2 Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland	17
1.3 Das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"	18
1.4 Das Themenfeld 1.....	20
2 Klimawandel und Extreme – Was haben wir zu erwarten?	22
2.1 Einleitung.....	22
2.2 Temperatur – mittlere Lufttemperatur und Extreme.....	24
2.3 Niederschlag – mittlere Niederschlagssummen und Extreme	26
2.4 Abfluss – mittlerer Abfluss, Niedrig- und Hochwasser in Gewässern.....	30
2.5 Änderungen der mittleren Wassertemperatur der großen Fließgewässer	32
2.6 Änderungen im mittleren Meeresspiegel und hohe Wasserstände in der Nordsee	33
2.7 Tidedynamik und Wattentwicklung.....	35
2.8 Wind, Stürme und Sturmfluten	37
2.9 Änderungen der Wetterlagen	40
3 Klimawirkungen – Wie stark und wo ist das deutsche Verkehrssystem durch Klimawandel und Extremereignisse betroffen?	42
3.1 Einleitung.....	43
3.2 Klimawirkungsanalyse	44
3.3 Schiene und Straße.....	47
3.3.1 Hochwasser	47
3.3.2 Sturm	52
3.3.3 Hangrutschungen	55
3.4 Wasserstraße.....	58
3.4.1 Niedrigwasser	59
3.4.2 Hochwasser (höchster Schifffahrtswasserstand)	63
3.4.3 Wassergüte.....	65
3.4.4 Klimawirkungen auf Seeschifffahrtsstraßen	67
3.5 Bewertung der Kritikalität	68
3.5.1 Straße.....	69
3.5.2 Schiene	71
3.5.3 Wasserstraße.....	73

3.6	Regionale Fallstudien.....	75
3.6.1	Stresstests Mittelrhein.....	75
3.6.2	Entwässerungskapazität des Nord-Ostsee-Kanals.....	79
4	Klimaanpassung – Welche Maßnahmen machen das Verkehrssystem resilienter?	82
4.1	Einleitung.....	82
4.2	Klassifizierung von Anpassungsmaßnahmen.....	83
4.3	Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen.....	84
4.4	Untersuchte Anpassungsmaßnahmen.....	85
4.4.1	Informatorischer Ansatz – Dienste.....	85
4.4.2	Regulatorischer Ansatz – Regelwerke und Bemessungsgrundlagen.....	86
4.4.3	Ingenieurstechnischer Ansatz – bauliche Anpassungsmaßnahmen.....	88
4.4.4	Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – angepasstes Management	92
4.4.5	Operativer Ansatz Verkehrsbetrieb – Anpassungsmaßnahmen seitens des Infrastrukturnutzers.....	95
4.5	Unsicherheiten und Herausforderungen bei der Klimaanpassung.....	96
5	Fazit und Ausblick	100
5.1	Übergeordneter Erkenntnisgewinn	101
5.2	Verwertung der Ergebnisse	104
5.3	Zweite Forschungsphase des Expertennetzwerks (2020–2025).....	106
6	Literatur	110
	Mitarbeiter/-innen des BMVI-Expertennetzwerks.....	116
	Danksagung.....	119
	Anhang.....	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.....	18
Abbildung 1-2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.....	19
Abbildung 1-3: Projektstruktur von Themenfeld 1 <i>Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen</i> (Förderphase 2016–2019) mit seinen neun Forschungsschwerpunkten (SP: Schwerpunktthema). In Klammern ist jeweils die den SP koordinierende Behörde angegeben.....	20
Abbildung 2-1: Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur über Deutschland als Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel; links) und als Änderungssignale (rechts) für die <i>nahe</i> (dunkler Farbton) und die <i>ferne Zukunft</i> (heller Farbton) im Vergleich zum <i>Bezugszeitraum</i> . Die Zeitreihendarstellung erfolgt für Beobachtungsdaten (HYRAS) und drei Klimamodellensembles (für die Szenarien <i>Klimaschutzszenario</i> RCP2.6, <i>moderates Szenario</i> RCP4.5 und <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> RCP8.5). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den <i>Bezugszeitraum</i> . Die Änderungssignale (Ensemblemedian als schwarzer Punkt sowie die Bandbreite als dicke Linie) werden für die Jahreszeiten (Winter [(DJF), Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON]]) und das Jahr für das <i>Klimaschutzszenario</i> (blau) und das <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> (rot) dargestellt.....	25
Abbildung 2-2: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel; in Tagen) für sieben temperaturbasierte Klimaindizes (s. Definition im Text bzw. in den Fußnoten) für die <i>nahe</i> (dunkler Farbton) und die <i>ferne Zukunft</i> (heller Farbton) im Vergleich zum <i>Bezugszeitraum</i> unter Verwendung des <i>Klimaschutzszenarios</i> (blau) und des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale.....	25
Abbildung 2-3: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel; in Prozent) für neun Klimakenngrößen (siehe jeweilige Abbildungsüberschrift) für die <i>nahe</i> (dunkler Farbton) und die <i>ferne Zukunft</i> (heller Farbton) im Vergleich zum <i>Bezugszeitraum</i> unter Verwendung des <i>Klimaschutzszenarios</i> (blau) und des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter [(DJF), Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON]]) und das Jahr.....	27
Abbildung 2-4: Änderungen des 50. Perzentils für die mittlere Niederschlagssumme im Winter (a) und Sommer (b), der Anzahl von Starkniederschlagstagen (> 20 mm) im Winter (c) und der Anzahl der Trockentage (< 1 mm) im Sommer (d) für das <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> in der <i>fernen Zukunft</i> gegenüber dem <i>Bezugszeitraum</i>	29
Abbildung 2-5: Vergleich der Veränderungen des mittleren Abflusses am Pegel Köln/Rhein für den hydrologischen Winter (links) und Sommer (rechts) unter Annahme des <i>Klimaschutzszenarios</i> (RCP2.6, grün) und des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> (RCP8.5, rot). Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel der Beobachtungen bzw. des Medians des Ensembles. Die Schattierungen entsprechen einer hohen bzw. einer niedrigen Schätzung (85. bzw. 15. Perzentil). Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des <i>Bezugszeitraums</i> . Weitere Einzelheiten s. Text bzw. Bericht des Schwerpunktes <i>Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit</i>	31

Abbildung 2-6: Vergleich der Veränderungen des Niedrigwasserabflusses NM7Q am Pegel Dresden/Elbe basierend auf den Ergebnissen des BMVI-Expertenetzwerks (links) und des BMVI-Forschungsprogrammes KLIWAS (rechts). Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel des Medians der Ensembles. Die Schattierungen entsprechen unterschiedlichen Perzentilen (85., 75., 60., 40., 25., 15.). Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des <i>Bezugszeitraums</i>	31
Abbildung 2-7: Entwicklung der Wassertemperatur (Jahresminimum, -mittel, -maximum) des Rheins zwischen Karlsruhe und deutsch-niederländischer Grenze. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der <i>nahen</i> und <i>fernen Zukunft</i>	32
Abbildung 2-8: Veränderung der Wassertemperatur im Jahresverlauf bei Rhein-km 547 bei Kaub. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der <i>nahen</i> und <i>fernen Zukunft</i> mit dem <i>Bezugszeitraum</i>	33
Abbildung 2-9: Änderungen des beobachteten mittleren Tidehoch- (blau) und Tideniedrigwassers (grün) am Pegel Cuxhaven (30-jähriges gleitendes Mittel) sowie Änderungen des 100-jährlichen Hochwassers (blau gestrichelt) und 100-jährlichen Niedrigwassers (grün gestrichelt). Für eine bessere Vergleichbarkeit wird das Mittel der Jahre 1843-1872 für alle Kurven auf null gesetzt. Die Darstellung beginnt im Jahr 1858.....	34
Abbildung 2-10: Wie Abbildung 2-9: , aber für Wasserstände von 1950–2100 des MPI-OM-Modells im <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> (RCP8.5).....	35
Abbildung 2-11: Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei Weser-km 82 (Leitdamm Robbenplate) im Referenzzustand (Stand 2010) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m.....	36
Abbildung 2-12: Räumliche Verteilung (Median des regionalen Klimaprojektionsensemble im <i>Bezugszeitraum</i> , links) und zeitliche Entwicklung (30-jähriges gleitendes Mittel für 1951–2100, rechts) des 98. Perzentils täglicher Windgeschwindigkeiten (m/s). Die Zeitreihendarstellung erfolgt für drei Klimaszenarien (<i>Klimaschutzszenario</i> RCP2.6, <i>moderates Szenario</i> RCP4.5 und <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> RCP8.5). Der Mittelwert für den <i>Bezugszeitraum</i> ist durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.....	38
Abbildung 2-13: Karte des 98. Perzentils der Windböen (in m/s) im <i>Bezugszeitraum</i> aus Simulationen des COSMO-CLM mit 2,8 km Gitterweite.....	38
Abbildung 2-14: Relative Häufigkeiten von Extremwindgeschwindigkeiten für die nordwestliche (NW), nordöstliche (NO), südwestliche (SW) und südöstliche Nordsee (SO), die nördliche (MB, Meerbusen) und zentrale Ostsee (ZO) sowie das Übergangsgebiet (UEG) in der <i>nahen</i> (jeweils links) und <i>fernen Zukunft</i> (rechts). Die Ergebnisse beruhen auf 8 Realisierungen des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> mit 2 gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen. Die relative Häufigkeit von Extremwindgeschwindigkeiten im <i>Bezugszeitraum</i> wurde für alle Seegebiete zu 2 % festgelegt. Projizierte Zunahmen sind rot dargestellt, Abnahmen blau.....	39

Abbildung 2-15: Mittlere Häufigkeiten von sechs Wetterlagen-Klassen über der Nordsee, hier beispielhaft für einen Lauf der Modellkopplung MPI-OM/REMO (links), und von fünf Wetterlagen-Klassen für den Binnenbereich Deutschlands, hier beispielhaft für das Globalmodell MPI-ESM-LR (Mittelwert aus drei Realisierungen, rechts), für die jeweiligen Zeitscheiben des <i>Bezugszeitraums</i> , der <i>nahen</i> und <i>fernen Zukunft</i> , angetrieben im <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	41
Abbildung 3-1: Temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen können helfen hochwasserbedingte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur zu reduzieren (Foto: Gina Sanders/ Fotolia).....	48
Abbildung 3-2: Abschnitte des Bundesfernstraßen- (links) und des Schienennetzes (rechts), die im Bereich der potenziellen Überflutungsflächen eines "mittleren" Hochwasser- und Sturmflutszenarios liegen (rot hervorgehoben).....	48
Abbildung 3-3: Relative Änderung des den Hochwassergefahrenkarten des mittleren Szenarios zugrundeliegenden Hochwasserkennwerts HQ_{100} für die Zukunftsprojektionen im Vergleich zum <i>Bezugszeitraum</i> . Links für die <i>nahe Zukunft</i> , rechts für die <i>ferne Zukunft</i>	49
Abbildung 3-4: Neu berechnete Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels HQ_{100} (mittleres Szenario der HWGK) der Referenzperiode für die Projektionen der <i>nahen</i> und der <i>fernen Zukunft</i> an Pegeln des Rheins und wichtiger Rhein Nebenflüsse. Die Säulenabschnitte stellen Unsicherheitsbereiche dar, die sich aus der extremwertstatistischen Analyse ergeben.....	50
Abbildung 3-5: Zusammenstellung der im Bereich der Flächen der heute gültigen HWGK des mittleren Szenarios (HQ_{100}) gelegenen Straßen- und Schienenabschnitte am Rhein und an wichtigen Nebenflüssen, denen nach den Zukunftsprojektionen für das <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> die in der Legende genannten geänderten Wiederkehrintervalle zugeordnet werden können.....	51
Abbildung 3-6: Lage bewaldeter Gebiete innerhalb eines 100 m Betrachtungsraumes um das Bundesfernstraßennetz (a) und daraus abgeleitete Exposition im Abstand von 20 m gegenüber Sturmwurf an einem Fallbeispiel (b) sowie deutschlandweite Exposition und Sensitivität des Bundesschienennetzes gegenüber Sturmwurf vor dem Hintergrund des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeit (Böen) von CCLM-Simulationen für den <i>Bezugszeitraum</i> 1971-2000 (c).....	53
Abbildung 3-7: Fließschema zur Berechnung der Modifikation (Spezifizierung) der Hauptgefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen.....	57
Abbildung 3-8: Pufferbereiche um die potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bereiche (Gefährdungsklassen ≥ 10) (a) sowie die gefährdeten Streckenabschnitte des Bundesschienennetzes (b). Die Farbgebung der mittels des expertenwissen-basierten Ansatzes identifizierten Gefährdungsklassen (mit Ausnahme der Pufferbereiche) entspricht derjenigen in Tabelle 3-3.....	57
Abbildung 3-9: Die Aufnahme zeigt die extreme Niedrigwassersituation des Jahres 2018 im Mittelrheintal. Die Schifffahrt war über viele Wochen erheblich eingeschränkt. Foto: BAW.....	58

Abbildung 3-10: Mittlere Anzahl von Tagen mit Niedrigwasser unter dem Schwellenwert $GLQ_{1971-2000}$ für den Pegel Duisburg/Ruhrort (Rhein) und $RNQ_{1971-2000}$ für den Pegel Achleiten (Donau). Beides unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> , 30-jährig gleitende Mittelwerte.	60
Abbildung 3-11: Mittlere Anzahl von Tagen mit Niedrigwasser unter dem Schwellenwert GLQ (bzw. Donau: RNQ) an den Binnenschiffahrtsstraßen in der <i>nahen</i> (links) und <i>fernen Zukunft</i> (rechts) basierend jeweils auf einer hohen Schätzung (85. Perzentil) für das <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i> . Kanalstrecken und Küstenwasserstraßen sind aufgrund geringer Sensitivität gegenüber Niedrigwasser ausgespart (blau).....	61
Abbildung 3-12: Berechnete Wassertiefen in der Nähe von Köln für einen Abfluss, der dem GLQ_{2012} (links) entspricht, sowie einen in drei Schritten um jeweils 10 % reduzierten GLQ_{2012} bis zum Erreichen des Extremszenarios von -30 % (vgl. Abbildung 3-13, RCP8.5). Die Strichelung zeigt die Fahrrinne (längs) und die Hektometereinteilung (quer). Hintergrund: Luftbild, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.	62
Abbildung 3-13: Änderung des für das Wasserstraßenmanagement wichtigen gleichwertigen Abflusses (GLQ) am Pegel Köln unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> (links) und des <i>Klimaschutzszenarios</i> (rechts). In der WSV-Praxis wird dieser Kennwert ca. alle 10 Jahre auf Basis vieljähriger Daten (hier: 30 Jahre) neu ermittelt. Dieses Vorgehen wurde hierbei nachempfunden. Die Schattierungen umreißen Unsicherheitsbereiche, in die 70 % (hell), 50 % bzw. 20 % (dunkel) der Simulationen fallen. Die zentrale Schätzung (Median) des Ensembles ist als Linie durchgezeichnet.....	62
Abbildung 3-14: Längsschnitt des Rheins für die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit HSW-Überschreitung im <i>Bezugszeitraum</i> (beobachtet und Modellensemble) sowie in den Zeitscheiben der <i>nahen</i> und <i>fernen Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i>	63
Abbildung 3-15: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 °C in der Binnenelbe für den <i>Bezugszeitraum</i> sowie die <i>nahe</i> und die <i>ferne Zukunft</i> . Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Spannweite (Minimum und Maximum) der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i>	65
Abbildung 3-16: Mittlere Anzahl von Tagen mit Wassertemperatur über 25 °C von Elbe und Rhein, simuliert auf Basis von fünf Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> für den <i>Bezugszeitraum</i> (links) sowie die <i>nahe</i> (Mitte) und die <i>ferne Zukunft</i> (rechts).....	66
Abbildung 3-17: Schematische Darstellung der Klimawirkungen auf Seeschiffahrtsstraßen im Ästuar. Die Eingangsgrößen für die Simulationen im Ästuarbereich sind als grauer Text gesetzt.....	67
Abbildung 3-18: Ermittlung der Klassengrenzen für den Indikator durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTVw) differenziert nach Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).	69
Abbildung 3-19: Erste Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse am Beispiel des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen (Quelle: Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).	70

Abbildung 3-20: Bewertung der Kritikalität der Streckenabschnitte des Schienennetzes mittels der Anzahl der Züge für den Güterverkehr (links) sowie den Gesamtverkehr (rechts) für das Referenzjahr 2010 (oben) und das Prognosejahr 2030 (unten; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015a)).....	72
Abbildung 3-21: Bewertung der Kritikalität unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte in verkehrlicher Sicht (Güteraufkommen in Mio. t pro Jahr) für das Referenzjahr 2010, das Prognosejahr 2030 sowie Änderung zwischen beiden Jahren. Datengrundlage: PlanGIS/BVWP (BMVI 2015a).....	74
Abbildung 3-22: "Kritikalität" unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte in ökologischer Sicht. Bezug auf die Bewertung nach ökologischem Zustand bzw. ökologischem Potenzial. Datengrundlage: Berichtsportal WasserBLICK/ BfG, 2. WRRL-Bewirtschaftungsplan, Stand: 30.04.2017.....	75
Abbildung 3-23: Lage des Fallstudiengebietes "Mittelrhein".....	76
Abbildung 3-24: Lage des Fallstudiengebietes "Nord-Ostsee-Kanal".....	79
Abbildung 3-25: Auftrittshäufigkeit von simulierten kritischen Bewirtschaftungssituationen - mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird. Ergebnis der Szenarienrechnungen (nZ = <i>nahe Zukunft</i> , fZ = <i>ferne Zukunft</i>) mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen. (Ebner von Eschenbach und Hohenrainer in Vorbereitung).....	80
Abbildung 3-26: 30-jähriges gleitendes Mittel des jährlichen Entwässerungspotenzials des NOK in Brunsbüttel in Mrd. m ³ /Jahr unter Annahme des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> RCP8.5 ohne/mit Einbezug der Effekte durch Landsenkung (blaue, gelbe und orange Linie) und einer Abschätzung der zusätzlichen Gletscherschmelze der Polargebiete (lila und grüne Linie). Die schwarze Linie zeigt den aktuellen jährlichen Betrag, der entwässert werden muss (600 Mio. m ³ /Jahr).	81
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Prozesses der Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme.....	83
Abbildung 4-2: Fehlstelle Deutzer Platte (innerhalb des gelben Polygons) im Ist-Zustand mit heutigem Niedrigwasserabfluss (a), mit 20 %-Abflussreduktion, simulierter Sohlevolution in der <i>fernen Zukunft</i> inkl. Unterhaltungsbaggerungen (b) und nach Umsetzung einer Ausbauvariante (Bauwerke in cyan) (c). Mindestwassertiefe in der Fahrrinne im Bereich Köln: 2,50 m unter dem Bezugswasserstand GIW ₂₀	90
Abbildung 4-3: Topografie der Elbmündung mit Wateinzugsgebieten (braune Polygone), die mitwachsen sollen (a). Mittlerer residualer Schwebstofftransport (Dreiecke) und schematische Transportwege im gegenwärtigen Zustand (rote Pfeile) mit in Grautönen hinterlegter Topografie (b).	95
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung von Entwicklungs- und Planungszeiten unter Berücksichtigung der Unsicherheit (aus Lowe et al. (2009), verändert; © Crown Copyright 2009).....	97
Abbildung 5-1: Organisationsstruktur, Kernthemen und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase (2020-2025).	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Betrachtete klimatische Einflüsse und Wirkungen inklusive ihrer Operationalisierung anhand von Indikatoren. Berücksichtigt sind dabei nur jene klimatischen Einflüsse und Wirkungen, zu denen in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks Analysen durchgeführt wurden.....	46
Tabelle 3-2: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundes-schienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m (Exposition) und erhöhter Schadwir-kung an elektrifizierten Bahnstrecken (Sensitivität).	53
Tabelle 3-3: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteins- und der Hangneigungsklasse.....	56
Tabelle 3-4: Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und schienen-abschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im <i>Bezugszeitraum</i> und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (<i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>) in der <i>nahen</i> und <i>fernen Zukunft</i>	58
Tabelle 3-5: Einteilung des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen in verkehrliche Relevanzklassen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).....	71
Tabelle 3-6: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse der Stresstests "Mittelrhein".....	77
Tabelle 3-7: Mittlere Anzahl entwässerungsrelevanter Niedrigwasserereignisse (NW) am Pegel Brunsbüttel pro Jahr, die höher sind als der Wasserstand von 4,80 m im NOK, dargestellt für 1 bis 6 aufeinander-folgende Niedrigwasser für verschiedene Zeiträume bis Ende des Jahrhunderts aus dem MPI-OM/ REMO RCP8.5 Lauf (Meeresspiegelanstieg 55 cm bis 2100).	81

Abkürzungsverzeichnis

AdSVIS	A daptation der S traßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel – Forschungsprogramm zur Anpassung der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel
BAB	B undesautobahn
BAFU	Schweizer B undesamt für U mwelt
Basis-DLM	D igitales Basis- L andschaftsmodell
BASt	B undesanstalt für S traßenwesen
BauGB	B augesetzbuch
BAW	B undesanstalt für W asserbau
BfG	Bundesanstalt für G ewässerkunde
BMVI	B undesministerium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BSH	B undesamt für S eeschifffahrt und H ydrographie
BVWP	B undesverkehrswegeplan
BWaStr	B undeswasserstraße
BWK	B und der Ingenieure für W asserwirtschaft, Abfallwirtschaft und K ulturbau e. V.
CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Earth System Model</i> – vom kanadischen Zentrum für Klimamodellierung und Analyse entwickeltes ESM
CCLM	C OSMO- CLM
CHMI	C zech H ydrometeorological I nstitute – Tschechisches Hydrometeorologisches Institut
CLM	<i>Climate Limited-area Model</i> – von der CLM-Community betriebenes regionales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell COSMO hervorgegangen ist
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i> - internationaler Klimamodell-Vergleich
CNRM-CM5	<i>Centre National de Recherches Météorologiques Circulation Model</i> – Klimamodell des beim französischen Wetterdienst basierten Klimaforschungsinstituts
CORDEX	<i>Coordinated Downscaling Experiment</i> – regionale Initiativen für das Herunterskalieren der globalen Klimamodelle
COSMO	<i>Consortium for Small Scale Modelling</i> – Konsortium für kleinskalige Modellierung
DAS	D eutsche A npassungsstrategie an den Klimawandel
DB	D eutsche B ahn
DB Ril	D eutsche B ahn R ichtlinie
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
DJF	D ezember, J anuar, F ebruar – meteorologischer Winter
DTVw	d urchschnittlicher w erktäglicher V erkehr
DTVw SV	d urchschnittlicher w erktäglicher S chwerverkehr
DWD	D eutscher W etterdienst

DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EC-EARTH	European Community Earth-System Model – von einem europäischen Konsortium entwickeltes ESM
EN	Europäische Normen
ESM	Earth System Model – Erdsystemmodell (integriert die Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean, Land, Kryosphäre, und Biosphäre)
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
GCM	General Circulation Model/Global Circulation Model – globales Klimamodell
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model – ESM des geophysikalischen Strömungsdynamiklabors bei der Nationalen Ozean- und Atmosphärenbehörde der USA
GIS	Geoinformationssystem
GLQ	gleichwertiger Abfluss
GIW	gleichwertiger Wasserstand
GO-ESSP	Global Organisation for Earth System Science Portals – Zusammenarbeit zur Entwicklung von Software für den Zugang zu Klimamodelldaten
GÜK200	Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 200.000
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model - Earth System – vom Hadley-Zentrum entwickeltes ESM
HQ	höchster Durchfluss (Gewässer)
HSW	höchster Schiffahrtswasserstand
HSQ	HSW zugehöriger Abflusswert
HWGK	Hochwassergefahrenkarte
HYDRAX	hydrodynamisches Modell
HYRAS	Hydrologische Rasterdatensätze verschiedener hydrometeorologischer Größen für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace Model CMIP5 Medium Resolution – Klimamodell des in Frankreich basierten Modellierungszentrums mittlerer Auflösung
JJA	Juni, Juli, August – meteorologischer Sommer
Kfz	Kraftfahrzeug
KLIWA	Kooperation Klimaveränderung und Wasserwirtschaft der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz

KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungs- optionen (Projekt des BMVI)
KLiVO	Klimavorsorgeportal des Bundes
KNMI	<i>Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut</i> – niederländischer Wetterdienst
KWVA 2021	Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Bundes, deren Veröffentlichung für 2021 vorgesehen ist
LARSIM-ME	<i>Large Area Runoff Simulation Model</i> - Mitteleuropa – Wasserhaushaltsmodell für Mitteleuropa
Lkw	Lastkraftwagen
MAM	März, April, Mai – meteorologischer Frühling
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i> – von in japanischen Forschungsinstituten entwickeltes regionales Klimamodell
MPI-ESM	ESM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MPI-ESM_LR	MPI-ESM low resolution – grob aufgelöstes ESM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MPI-OM	Ozeanmodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
NEMO	<i>Nucleus for European Modelling of the Ocean</i> – von einem europäischen Konsortium von Forschungsinstituten entwickeltes regionales Ozeanmodell
NHWSP	nationales Hochwasserschutzprogramm
NM7Q	niedrigster Mittelwert von sieben aufeinanderfolgenden Tages abfluss werten innerhalb einer Niedrigwasserperiode
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
NorESM1-M	<i>Norwegian Earth System Model medium resolution</i> – vom norwegischen Klimazentrum entwickeltes ESM in mittlerer Auflösung
OARCM	regionales gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
PNP	Pegelnulldpunkt
ProWaS	Pilotprojekt zum DAS-Basisdienst Klima und Wasser
QSim	Gewässergütemodell
RACE	<i>Regional Atlantic Circulation and Global Change</i> –Verbundprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über die regionale Atlantikzirkulation im globalen Wandel
RACMO	<i>Regional Atmospheric Climate Model</i> – vom KNMI und dem dänischen Wetterdienst entwickeltes regionales Klimamodell
RAS-Ew	Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil: Entwässerung
RCA4	<i>Rosby Centre regional atmospheric model</i> – beim SMHI entwickeltes regionales Klimamodell
RCM	<i>Regional Climate Model</i> – regionales Klimamodell

RCP	Representative Concentration Pathway – Emissionsszenarien (Repräsentative Konzentrationspfade) des 5. IPCC Sachstandsberichts
ReKliEs	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland – Erweiterung des regionalen Klimaprojektionsensembles aus EURO-CORDEX
REMO	Regional Modell – in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell
RiStWag	Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten
RIVA	Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels – Forschungsprojekt im Rahmen des AdSVIS Forschungsprogramms
RNQ	Abfluss beim Regulierungsniederwasserstand
ROG	Raumordnungsgesetz
SMHI	<i>Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut</i> – schwedisches meteorologisches und hydrologisches Institut
SON	September, Oktober, November – meteorologischer Herbst
SP	Schwerpunktthema im BMVI-Expertennetzwerk in der 1. Forschungsphase (2016-2019)
SPT	Schwerpunktthema im BMVI-Expertennetzwerk in der 2. Forschungsphase (2020-2025)
SRES	Special Report on Emission Scenarios – Emissionsszenarien des 4. IPCC Sachstandsberichts
TEN-V	transeuropäische Verkehrsnetze
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe – Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change – Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution – ozeanografisches Forschungsinstitut
WRF	Weather Research and Forecasting Model – mesoskaliges numerisches Modell
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Kurzfassung

Ein gut ausgebautes und funktionsfähiges Verkehrssystem ist von herausragender sozioökonomischer Bedeutung für Deutschland als Exportnation. Sich ändernde klimatische Randbedingungen sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf extreme Ereignisse können die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems durch Schäden an Infrastrukturelementen und Behinderungen des Verkehrsflusses beeinträchtigen. Das **Ziel des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk** besteht darin, zur Erhöhung der Resilienz des Verkehrssystems gegenüber Klimaänderungen und Extremwetterereignissen einen fachlich übergreifend und umfassend vernetzten Beitrag zu leisten. Basierend auf der Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden exemplarisch Anpassungsmaßnahmen entwickelt bzw. bewertet. Dazu bündelt das BMVI-Expertennetzwerk das in den Behörden und Ressortforschungseinrichtungen vorhandene Wissen und Können und fördert somit den Austausch von Know-how sowie die Entwicklung übergreifender Methoden, Lösungsansätze und Handlungsoptionen innerhalb der Bundesverwaltung und darüber hinaus.

Hinsichtlich der **zukünftigen Klimaentwicklung** in Deutschland ist auf Basis der vorliegenden Klimaprojektionen ein weiterer Anstieg der mittleren Lufttemperatur ebenso zu erwarten wie ein Anstieg der Wassertemperatur großer Fließgewässer. Dabei nehmen extrem hohe Lufttemperaturen und die Häufigkeit von Hitzewellen besonders stark zu, während umgekehrt Frostereignisse zukünftig seltener zu erwarten sind. Die Niederschlagssummen nehmen im Mittel voraussichtlich leicht zu – insbesondere im Winter und Frühjahr. Dagegen sind im Sommer zukünftig auch Niederschlagsabnahmen und somit verstärkt Trockenperioden möglich. Generell ist mit häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen zu rechnen. Windgeschwindigkeiten unterliegen auch zukünftig einer hohen zeitlichen Variabilität bei nur geringen Änderungssignalen. Der Gewässerabfluss verändert sich im Jahresmittel kaum, da die winterliche Abflusszunahme von der sommerlichen Abnahme kompensiert wird. Bestehende Tendenzen hin zu mehr Winterniederschlägen setzen sich fort. Flussabschnitte, die schon heute durch winterliche Hochwasserereignisse geprägt sind, erwarten höhere Hochwasserabflüsse. Das Ausmaß der Niedrigwasserereignisse nimmt dort zu, wo heute bereits im Sommer und im Herbst Niedrigwasser auftreten.

Entsprechend den Erkenntnissen des in 2019 veröffentlichten IPCC-Sonderberichtes zu Ozean und Kryosphäre ist bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einem Anstieg des globalen **Meeresspiegels** um etwa einen Meter gegenüber der Periode 1986–2005 zu rechnen. Diese projizierte Entwicklung des Meeresspiegels ist aufgrund der unklaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Küstenbereich sind Watten grundsätzlich in der Lage, mit einem Meeresspiegelanstieg mitzuwachsen. Diese Kapazität ist jedoch begrenzt und es wird ein Verlust an Wattfläche erwartet. Die Veränderungen der Tidekennwerte sind räumlich heterogen. Das erwartete häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee geht potenziell mit erhöhten Wasserständen an den deutschen Küsten einher.

Die Analyse der aus den beschriebenen Klimaänderungen resultierenden **Klimawirkungen auf das Verkehrssystem** wird im BMVI-Expertennetzwerk basierend auf abgestimmten Datensätzen und Methoden vorgenommen. Damit wird eine über die drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße hinweg einheitlichere Bewertung ermöglicht als durch die bisherigen rein verkehrsträger-spezifischen Vorgehensweisen. Ein wesentlicher Baustein dieser verkehrsträgerübergreifenden Integrationsarbeit ist das Konzept einer gemeinsamen Klimawirkungsanalyse mit drei Analyseschritten zur Bewertung von Exposition, Sensitivität und Kritikalität des Verkehrssystems. Auf dieser Grundlage wurden in der aktuellen Projektphase die heutige und die zukünftig potenziell veränderte Exposition von Schiene, Straße und Wasserstraße gegenüber ausgewählten klimatischen Einflüssen und daraus resultierenden Naturgefahren im Kontext des Klimawandels untersucht. Die Ergebnisse der Analysen verdeutlichen die bereits heute wahrnehmbaren Betroffenheiten und Gefährdungen der Verkehrsinfrastruktur im Binnenland und an der Küste. Die Zukunftsprojektionen zeigen für ein ungebremstes weiteres Ansteigen der klimaschädlichen Emissionen (*Weiterwie-bisher-Szenario*) eine Zunahme von Gefährdungen z. B. durch Hochwasser, Hangrutschungen und Niedrigwasser. Dadurch wird beispielsweise der Betrieb des Nord-Ostsee-Kanals negativ beeinflusst. Generell nimmt also die Exposition des Verkehrssystems gegenüber den betrachteten Gefährdungen zum Ende des 21. Jahrhunderts zu. Szenarien, die einen mehr oder weniger umfassenden global umzuset-

zenden Klimaschutz annehmen (*Klimaschutzszenario*), führen jedoch zu deutlich geringeren Anstiegen der Exposition bis hin zur Bewahrung der Status-quo-Bedingungen.

Die **wirtschaftliche Bedeutung** (Aspekt der Kritikalität in der Klimawirkungsanalyse) einer möglicherweise klimawandelbedingt eingeschränkten Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur hängt u. a. vom Verkehrsaufkommen ab. Die TEN-V-Korridore sind für den Güterverkehr auf Schiene, Straße und Wasserstraße prioritär, die Ballungsräume zusätzlich für den Personenverkehr auf Schiene und Straße. Stresstest-Fallstudien für das wirtschaftlich und verkehrlich bedeutsame Mittelrheingebiet zeigen, dass wetterbedingte Extremereignisse, die potenziell mehrere Verkehrsträger gleichzeitig beeinträchtigen, z. B. extreme Hochwasser im Binnenbereich, im Schadensfall i. d. R. mit besonders hohen zusätzlichen Transportkosten pro Tag verbunden sind. Besonders lang andauernde Ereignisse, z. B. niedrigwasserbedingte Verkehrseinschränkungen, führen im Schadensfall potenziell zu besonders hohen zusätzlichen Gesamtkosten. Aus den Extremereignissen resultierende Folgekosten für die Wirtschaft und die Gesellschaft sind dabei noch nicht eingerechnet und erhöhen somit die gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen bzw. Kosten witterungsbedingter Verkehrseinschränkungen und -ausfälle.

Die in der ersten Projektphase des BMVI-Expertenetzwerks vorgenommenen Klimawirkungsanalysen zeigen, dass zur Sicherung der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur und somit der Verlässlichkeit des Verkehrs die **Anpassung an veränderte zukünftige Klimabedingungen** für alle Verkehrsträger vorangetrieben werden muss. Als besondere Herausforderung hat sich dabei die Berücksichtigung der Unsicherheit der möglichen zukünftigen Klimaentwicklung herausgestellt. Insbesondere bezüglich der Geschwindigkeit und Intensität der erwarteten Veränderungsprozesse empfehlen sich ein enges Monitoring der tatsächlichen Klimaentwicklung zur Identifizierung passender Eingriffszeitpunkte, die Nutzung flexibler Elemente in der Maßnahmenplanung und die Bewertung der Effektivität umgesetzter Maßnahmen. Zudem werden in der Maßnahmenplanung häufig konkrete Vorgaben zu zukünftigen Klimakennwerten und keine Bandbreiten erwartet.

In planungsrelevanten Regelwerken müssen demzufolge nicht nur die entsprechend der zu erwartenden Klimaentwicklung aktualisierten Werte bzw. Bandbreiten hinterlegt werden, sondern auch Vorgehensweisen, welche die Planer bei der Auswahl von Kennwerten für die spezifischen Planungsrandbedingungen unterstützen.

In den **Planungsprozessen** ist der Klimawandel nur eine der zu berücksichtigenden Komponenten. Zur Beurteilung der Umsetzbarkeit und Umsetzungswürdigkeit von Anpassungsmaßnahmen muss der mögliche Nutzen in einen größeren Kontext gestellt werden. Dabei sind Synergien zu anderen gesellschaftlichen Zielen sowie potenzielle negative Wirkungen und Kosten zu berücksichtigen. Das bedeutet in der Praxis einen umfangreichen Bewertungs-, Beteiligungs- und teilweise Ausgleichsprozess, der oft mehrjährige Vorbereitungs- und Planungsphasen mit sich bringt. Aufgrund dieser langwierigen Prozesse und der Tatsache, dass viele Infrastrukturelemente für eine lange Lebensdauer geplant und angelegt werden, ist es wichtig, bereits heute aktiv zu werden und gewonnene Erkenntnisse strategisch anzuwenden. Erfolgreiche Anpassungsmaßnahmen benötigen eine dauerhafte Bereitstellung aktueller Datenprodukte, die zukünftig über den sich im Aufbau befindlichen DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" bereitgestellt werden können. Dabei sind die Herausforderungen vielfältig (z. B. Umgang mit Sturzfluten oder dem beschleunigten Meeresspiegelanstieg). Um die Grundlagen (Daten und Methoden) für einen dauerhaft zeitgemäßen Klimadienst immer auf dem aktuellen Wissensstand zu halten, besteht somit weiterhin ein hoher Forschungsbedarf, dem sich das BMVI-Expertenetzwerk in seiner zweiten Forschungsphase ab 2020 annehmen wird.

Die enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Akteuren im BMVI-Expertenetzwerk und darüber hinaus setzt einen Rahmen, der für die erfolgreiche Anpassung des Verkehrssektors an den Klimawandel essenziell ist. Damit leistet das Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks einen wertvollen Beitrag zur Gestaltung eines resilienten Bundesverkehrssystems.

Executive summary

A well developed and functional transport system is of exceptional socio-economic importance for Germany as an exporting nation. Changing climate conditions and the associated effects on the magnitude and frequency of extreme weather events can have severe adverse impacts on the functionality of the transport system due to damage of infrastructure elements and traffic flow disruptions. **The objective in Topic 1 of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) Network of Experts** is to contribute to the efforts being undertaken to enhance the resiliency of the transport system with respect to climate change and extreme weather events. To achieve this goal, the impacts of climate change on the transport system are assessed and examples of potential adaptation measures are subsequently developed and evaluated. To this end, the BMVI Network of Experts follows an interdisciplinary and highly interlinked approach by pooling the knowledge and skills from the authorities and departmental research institutions. Thereby, the exchange of know-how and the development of cross-cutting methods are encouraged. Problem-solving approaches and decision-making support within the federal administration and beyond are subsequently provided.

With regard to **future climate trends** in Germany, which can be identified on the basis of climate projections, it can for example be stated that there will be a further rise in the mean air temperature as well as a rise in the water temperature of large waterways. This trend is associated with a steep increase in extremely high air temperatures and in the frequency of heatwaves, whereas conversely there are likely to be fewer frost events in the future. A slight increase in the mean precipitation totals – especially in winter and spring – can be expected. In contrast, a drop in precipitation totals in summer, and thus more dry spells, are projected. In general, more frequent and more intensive extreme precipitation events are likely to occur. Wind speeds, however, will continue to show a high level of temporal variability, posing an ongoing challenge to identify clear imprints of climate change. There will be hardly any change in the annual mean water runoff, since increasing runoff in winter will be offset by a decrease in summer. Existing trends towards more frequent winter precipitation will continue. River sections that are already characterized by flood events in the winter season will likely continue to experience higher extreme freshwater

runoff levels. An increase in low water events in summer and autumn especially emphasizes the challenges in the river sections where there are already low water periods now.

According to the findings of the 2019 IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere, global mean **sea level** is likely to rise by around 61–110 cm relative to the period 1986–2005 by the end of the 21st century under the RCP 8.5 scenario. Further, the projected regional sea level trends are subject to great uncertainty due to the lack of clarity about how the Arctic and Antarctic land ice masses will develop. Tidal flats in coastal areas are normally able to grow as the sea level rises. However, their growth capacity is limited and there is likely to be a loss of area covered by flats in the case of accelerated sea level rise. The changes in tidal characteristics are spatially heterogeneous, which illustrate the complexity of tidal processes. This might require comprehensive monitoring and maintenance strategies for navigability and coastal protection in future. The expected increase in the frequency of north-western atmospheric circulation patterns over the North Sea will potentially result in higher water levels at the German coasts.

The climate **impacts on the transport system** resulting from the aforementioned changes in climate are analysed in the BMVI Network of Experts on the basis of coordinated datasets and methods. This enables a consistent assessment across the three modes of transport – road, rail and waterway – compared to the traditional single-mode approaches. A central component of this cross-modal integration approach is the concept of a climate change impact analysis that encompasses three steps for the assessment of exposure, sensitivity and criticality of the transport system. Based on this concept, the present and future transport infrastructures were studied with respect to the potentially changing exposure of the railways, roads and waterways in order to identify climate influences and respective natural hazards. The outcome of these analyses illustrates that impacts and threats to inland and coastal transport infrastructures can already be observed today. If greenhouse gas emissions continue to rise unabatedly (*business as usual scenario*), projections show that there will be an increase in hazards such as flooding, landslides and higher sea levels. The latter would have negative impacts, e.g. on the operation of the

Kiel Canal. In general it can be stated that the exposure of the transport system to the addressed hazards will increase by the end of the 21st century. However, the scenarios that assume more or less comprehensive global climate change mitigation measures (*climate change mitigation scenario*) lead to a significantly lower exposure, even going as far as preservation of the status quo.

The **economic significance** (aspect of criticality in the climate change impact assessment) of a potentially reduced transport infrastructure functionality depends, among other things, on the volume of traffic or unique route features. The Trans-European Transport Network corridors are the top priority for the transport of freight by rail, road and waterway. Urban agglomerations are of additional importance for the transport of passengers by rail and road. "Stress test" case studies were carried out for the Middle Rhine region, which is important with regards to the economy and transport. They show that weather-related extreme events which potentially affect several modes of transport at once – such as extreme inland flooding – usually entail very high additional transport costs per day if they reduce or disrupt transport capacities. Similarly, long-lasting events such as traffic constraints caused by low water levels may result in larger additional total costs. Follow-up costs for the economy and society will increase the overall losses triggered by such an event.

The climate change impact analyses developed and undertaken in the first project phase show that it is necessary to promote the **adaptation to changed future climatic conditions** for all modes of transport in order to safeguard the availability of the transport infrastructure, and thus, the reliability of the transport system. One particular challenge that has emerged is the need to account for the uncertainty of possible future climate trends. With special regard to the likely dynamics of climate change, three recommendations are given: (a) close monitoring of actual climate trends to identify suitable times at which to intervene; (b) the use of flexible elements

in action planning; (c) assessment of the effectiveness of planned measures before their implementation. Consequently, future planning regulations have to include not only updated values, ranges and trends from different climate indices; they also have to constantly monitor and assess approaches that assist in selecting indicators to specify planning boundary conditions.

In **planning processes**, climate change is only one of many components that have to be taken into consideration. To assess whether adaptation measures are also efficient under future climate conditions, the possible benefit has to be placed in a larger context including societal objectives, potential adverse impacts as well as accruing costs. In practice, this means extensive assessment, consultation and, in some cases, balancing processes, which often entail preparatory and planning phases lasting several years. Given these protracted processes and the fact that many infrastructure elements are planned and designed for a long service life, it is important that action is taken today and that lessons learned are strategically applied. Successful adaptation measures require the permanent provision of up-to-date data products. In the future, it will be possible to provide these via the "Climate and Water" service (under construction) of the German Strategy for Adaptation to Climate Change. This involves challenges which are plentiful and varied (for instance how to deal with flash floods or an accelerated sea level rise). In order to ensure that the bases (data and methods) for a climate service are permanently up-to-date and always reflect the latest state of knowledge, there must continue to be a high level of research, which the BMVI Network of Experts will address in its 2nd research phase starting in 2020.

The close cooperation between the players involved in the BMVI Network of Experts and beyond establishes a framework that is essential for the successful adaptation of the transport sector to climate change. Topic 1 of the BMVI Network of Experts thus makes a valuable contribution to the resilience of the federal transport system.

1 Hintergrund und Zielstellung

- Die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems kann durch sich ändernde klimatische Randbedingungen sowie das gehäufte Auftreten von extremen Wetterereignissen beeinträchtigt werden, wenn Infrastrukturelemente dadurch beschädigt werden und der Verkehrsfluss eingeschränkt wird.
- Das Ziel des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk besteht in der Entwicklung von Grundlagen zur Erhöhung der Resilienz des Verkehrssystems gegenüber Klimaänderungen und Extremereignissen. Durch die Entwicklung und Bewertung gezielter Anpassungsmaßnahmen können negative Klimawandelfolgen minimiert werden.
- Dazu bündelt das BMVI-Expertennetzwerk das in den Behörden und Ressortforschungseinrichtungen vorhandene Wissen und Können. Es fördert zudem den Transfer von Know-how und die gemeinsame Methodenentwicklung nicht nur innerhalb der Bundesverwaltung, sondern auch darüber hinaus.

1.1 Klimawandel als Herausforderung für das deutsche Verkehrssystem

Globale und regionale Veränderungen des Klimas stellen in zunehmendem Maß eine Herausforderung für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft dar. Dieser Herausforderung wird international (UNFCCC: Paris-Abkommen zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C; United Nations (2015)) und national (Klimaschutzplan 2050 (BMU 2016), Klimaschutzprogramm 2030 (BMU 2019)) mit Klimaschutzmaßnahmen zur Minderung der anthropogenen Treibhausgasemissionen begegnet (Klimaschutz). Auch bei einem sofortigen und vollständigen weltweiten Emissionsstopp wird sich das Klimasystem über viele Jahrzehnte bis sogar Jahrtausende (insb. Ozean und Kryosphäre) noch ändern, da Änderungen in Teilkomponenten durch komplexe Wechselspiele träge reagieren, bis sie wieder im Gleichgewicht sind. Daher wurde die Klimaanpassung als gleichberechtigtes Ziel zum Klimaschutz etabliert. Den erwarteten und auch durch intensivste internationale Klimaschutzbemühungen nicht mehr vermeidbaren Klimafolgen wird mit entsprechenden Klimaanpassungsmaßnahmen begegnet, um deren Auswirkungen auf die Gesellschaft abzumildern (Klimaanpassung). Klimaschutz und Klimaanpassung sind somit synergistische Strategien zum Umgang mit dem globalen und dem regionalen Klimawandel. Der Fokus des vorliegenden Berichtes liegt auf der Klimaanpassung.

Verschiedene Extremereignisse wie Hitzeperioden, Überschwemmungen, Niedrigwassersituationen, Stürme und Hangrutschungen haben in den letzten Jahren gehäuft zu

Unterbrechungen der Verkehrsströme, Verzögerungen im Verkehrsablauf und Schäden an den Verkehrsinfrastrukturen geführt. Diese Störungen des Verkehrssystems gehen zum Teil mit hohen sozioökonomischen Verlusten einher, vor allem, wenn durch die Extremereignisse mehrere Verkehrsträger gleichzeitig betroffen sind oder angespannte Situationen extrem lang andauern (vgl. Abschnitt 3.6.1). Mit der fortgesetzten globalen Erwärmung wird in der Zukunft verstärkt mit negativen Auswirkungen auf den Verkehr gerechnet. Daher sind eine vertiefte Analyse der erwarteten Klimaänderungen und ggf. eine Anpassung des Verkehrssystems notwendig, insbesondere dann, wenn es sich um langlebige Verkehrsinfrastrukturen handelt. Ein besonderer Fokus liegt dabei neben den Veränderungen in den mittleren Klimaparametern auf den Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen.

1.2 Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland

Die zentrale klimapolitische Zielsetzung Deutschlands besteht in einer Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche auf unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau. Damit sollen die mit stärkeren Klimaveränderungen einhergehenden weitreichenden Klimafolgen vermieden werden. Auch bei erfolgreicher Umsetzung dieses Klimaschutzzieles wird mit zunehmenden Auswirkungen der bereits emittierten Treibhausgase gerechnet, weshalb eine Anpassung an diese nicht mehr vermeidbaren Klimaänderungen als notwendig erachtet

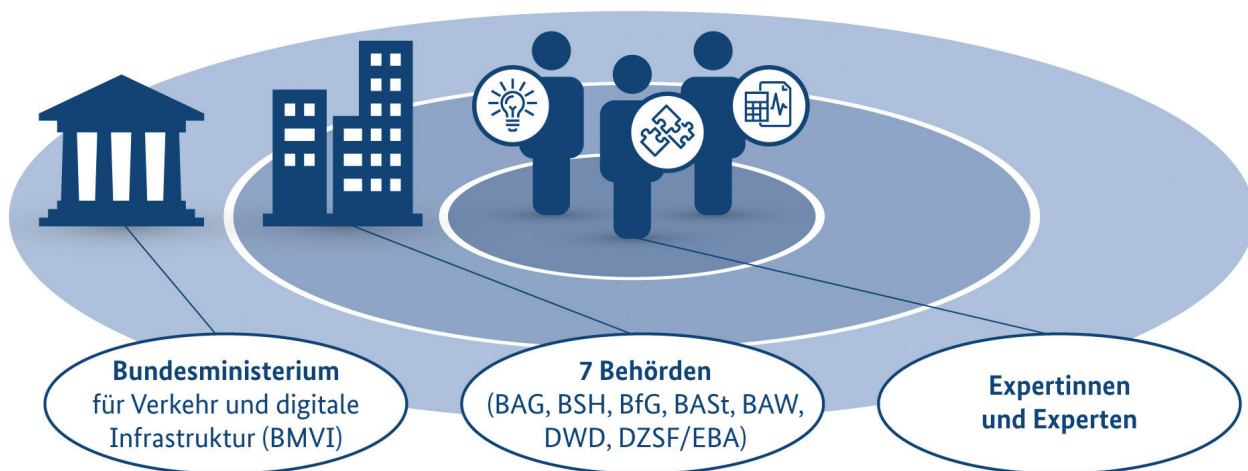


Abbildung 1-1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.

wird. Den politischen Rahmen für die Klimaanpassung in Deutschland setzt die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – kurz DAS (Bundesregierung 2008). Die DAS zielt auf eine Reduzierung der Vulnerabilität gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels sowie auf den Erhalt oder die Verbesserung der Anpassungsfähigkeit natürlicher, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Systeme. Dabei werden sowohl die graduellen Veränderungen im mittleren Klimazustand als auch die Konsequenzen von zunehmenden Extremereignissen berücksichtigt. Eine wichtige Komponente dabei ist die Bewertung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels, wie sie im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse Deutschlands 2015 (Buth et al. 2015) erfolgt ist und derzeit im Rahmen der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 aktualisiert wird. Zusammen mit der Ausarbeitung von potenziellen politischen Handlungen sowie Anpassungsmaßnahmen (Aktionsplan Anpassung, APA) dient sie dem Ziel, Deutschland resilienter gegenüber dem Klimawandel zu machen. Für das DAS-Handlungsfeld "Verkehr und Verkehrsinfrastruktur" erfolgen die Klimawirkungsanalysen für ausgewählte klimatische Einflüsse und Naturgefahren im Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" des BMVI-Expertennetzwerks. Zudem stehen im BMVI-Expertennetzwerk generierte Da-

tensätze auch für andere Akteure aus den DAS-Handlungsfeldern zur Verfügung¹.

1.3 Das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat im Jahr 2016 die Gründung des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln veranlasst, um das Zusammenwirken seiner Ressortforschungseinrichtungen und Behörden hinsichtlich verkehrsträgerübergreifender Forschung zu fördern. Erstmals wurde damit in der Ressortforschung ein verkehrsträgerübergreifendes Forschungsnetzwerk entwickelt, erprobt und etabliert.

Im BMVI-Expertennetzwerk forschen das Bundesamt für Güterverkehr (BAG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Deutsche Wetterdienst (DWD) und das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zusammen. Mehr als 70 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit unterschiedlichen Kompetenzen for-

¹ Für die Wasserstraße erfolgt die Bereitstellung über ProWaS, ein Pilotprojekt zum DAS-Basisdienst "Klima und Wasser".

schen vernetzt und transdisziplinär, um Lösungsansätze zu zukunftsorientierten Fragestellungen rund um das Verkehrssystem zu erarbeiten. Dabei sind die Forscherinnen und Forscher in die Behörden eingebettet und werden dort fachlich und organisatorisch unterstützt. Die Abstimmung zu den Forschungsinhalten und den organisatorischen Abläufen erfolgt zwischen BMVI, Bundesoberbehörden sowie Expertinnen und Experten (Abbildung 1-1). Dadurch wird eine praxisorientierte fachwissenschaftliche Beratung des BMVI sichergestellt.

Der Forschungsprozess wird darüber hinaus von kontinuierlicher Interaktion mit Anwenderinnen und Anwendern begleitet, z. B. mit den Landesstraßenbaubehörden, der Deutschen Bahn (DB) und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Dieser Praxisbezug ermöglicht die zielgerichtete Entwicklung von anwendungsorientierten Innovationen.

Die Vision des BMVI-Expertennetzwerks ist es, das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht zu gestalten. Das BMVI-Expertennetzwerk stellt hierfür wissenschaftlich

fundierte Grundlagen bereit. In diesem neuen Forschungsformat in der Ressortforschung wurden verkehrsträgerübergreifende Ziele definiert und in der Forschungsstrategie 2030 festgehalten (BMVI-Expertennetzwerk 2018). Dieser strategische Forschungsrahmen beschreibt den Umgang des BMVI-Expertennetzwerks mit Herausforderungen wie Klimawandel, Umweltschutz, Alterung der Infrastruktur sowie Digitalisierung und zeigt einen Weg auf, wie die Vision schrittweise erreicht werden kann (Abbildung 1-2).

Zur Gewährleistung einer effizienten Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen wurde die Forschung in Themenfelder gegliedert (Abbildung 1-2). Die Arbeiten in den Themenfeldern 1 bis 3 wurden bereits 2016 aufgenommen. Die Themenfelder 4 und 5 wurden in Form von Pilotprojekten ab 2017 bearbeitet. 2019 wurde Themenfeld 6 etabliert. Die sechs Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks ergänzen einander inhaltlich und schaffen Grundlagen, um die Forschungsstrategie 2030 im Dialog mit Anwenderinnen und Anwendern erfolgreich umsetzen zu können.

FORSCHUNGSSTRATEGIE 2030

Das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht gestalten



Abbildung 1-2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des Themenfeldes 1 aus der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019) dar. Die Forschungsergebnisse wurden unter Koordination des DWD von BSH, BfG, BAST, BAW, DWD und DZSF/EBA gemeinschaftlich erarbeitet.

1.4 Das Themenfeld 1

Im Themenfeld "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" (Themenfeld 1) steht die Resilienz des Verkehrssystems gegenüber den erwarteten Auswirkungen durch den Klimawandel und häufigeren bzw. intensiveren Extremereignissen im Fokus. Die Klimawirkungen werden nach einer abgestimmten Analysemethodik erfasst, bewertet und soweit möglich für Entscheider sowie Praktiker aufbereitet. Diese Analysen geben Impulse für die Bewertung des Anpassungsbedarfs

sowie die Entwicklung modaler und intermodaler Anpassungsstrategien mit Bezug auf das Verkehrssystem. Das vorhandene Wissen zu den beobachteten und für die Zukunft projizierten Änderungen meteorologischer, ozeanographischer und hydrologischer Einflüsse auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße wird durch DWD, BSH und BfG aufbereitet und mit den bei BAST, DZSF/EBA, BfG und BAW vorliegenden verkehrsträgerspezifischen Kenntnissen zur Sensitivität und Kritikalität der Verkehrsinfrastruktur verknüpft. Die wissenschaftliche Arbeit im Forschungsverbund wurde in der ersten Förderphase (2016–2019) in neun eng verknüpften Schwerpunktthemen (SP) durchgeführt (Abbildung 1-3).

Im Schwerpunktthema *Szenarienbildung* wurde ein gemeinsamer Rahmen für die Aus- und Bewertung klimawandelbezogener Änderungen abgestimmt (Hänsel et al. 2020a). Zudem wurden die für die nachfolgenden Analysen

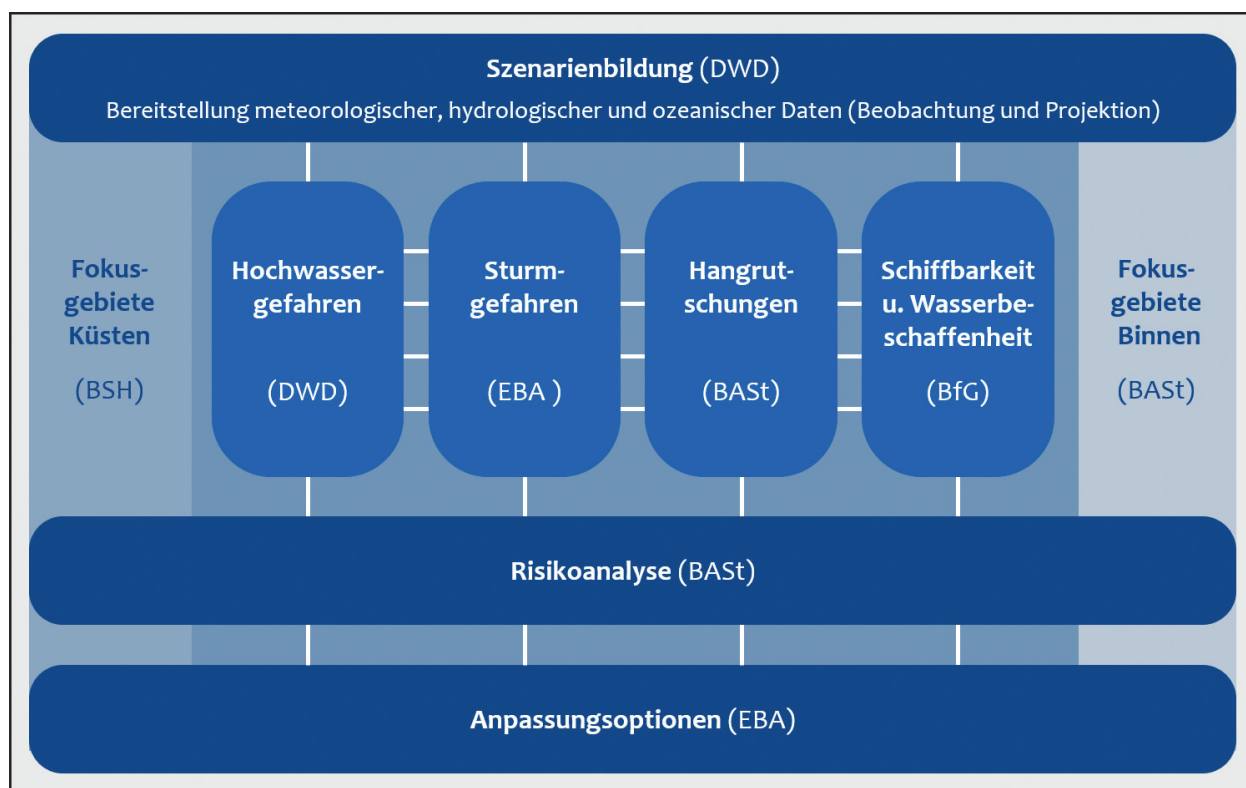


Abbildung 1-3: Projektstruktur von Themenfeld 1 *Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen* (Förderphase 2016–2019) mit seinen neun Forschungsschwerpunkten (SP: Schwerpunktthema). In Klammern ist jeweils die den SP koordinierende Behörde angegeben.

notwendigen Datengrundlagen basierend auf Beobachtungs- und Projektionsdaten in konsistenter Weise zur Verfügung gestellt und die Änderungssignale bewertet (Brienen et al. 2020). Bei der Analyse der Klimawirkungen auf das Verkehrssystem erfolgte in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks eine Konzentration auf die Bereiche *Hochwasser* (Rauthe et al. 2020), *Stürme* (Bott et al. 2020) und *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) und die damit verbundenen Wirkungen sowie auf wasserstraßenspezifische Aspekte der *Schiffbarkeit* (z. B. Niedrigwasser) und *Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020). Die verkehrsträgerspezifischen Ergebnisse dieser *Klimawirkungsanalysen* wurden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengestellt und in vergleichbarer Weise visualisiert (Hänsel et al. 2020b). Dabei wurden die räumliche Betroffenheit des Verkehrssystems (Exposition), die Anfälligkeit des Verkehrssystems aufgrund seiner Eigenschaften (Sensitivität; soweit Datengrundlagen für Bewertung vorliegend) sowie die verkehrliche (und ökologische) Bedeutung der Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente (Kritikalität) bewertet. Ergänzt wurde die auf Netzebene durchgeführte Klimawirkungsanalyse durch regionale Fallstudien in *Fokusgebieten an der Küste* – insbesondere für den Nord-Ostsee-Kanal und das Elbe-Ästuar (Schade et al. 2020) – und im *Binnenland* – hierbei insbesondere Stressteststudien für das Mittelrheingebiet (Hänsel et al. 2020c).

Mit den im Themenfeld 1 bewerteten Klimawirkungen auf das Verkehrssystem wurden Methoden zur Generierung von Informationen und Entscheidungsgrundlagen bereitgestellt, die für die Ableitung eines spezifischen Anpassungsbedarfs notwendig sind und Entscheidungen zum Management und zur Planung von Verkehrsinfrastrukturen unterstützen. Exemplarisch wurden *Anpassungsoptionen* für die Bereiche "Information", "Richtlinien und Regelwerke", "Ingenieurtechnik" und "Verkehrsmanagement" bzw. "Verkehrsbetrieb" identifiziert und bewertet (Norpoth et al. 2020).

Mit seiner Arbeit liefert das Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks wichtige Impulse für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Die Erkenntnisse sind sowohl für die Aufgaben anderer Ressorts als auch für die Bundesländer relevant. Das BMVI-Expertennetzwerk liefert als Forschungsnetzwerk mit seinem Themenfeld 1 prototypische Datensätze zur Unterstützung der Klimaanpassung der Verkehrsträger. Die für die Planungsprozesse der Verkehrsbetreiber notwendigen Datenprodukte werden durch den sich im Aufbau befindlichen DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" in dauerhafter, aktueller und allgemein zugänglicher Form verfügbar gemacht.

2 Klimawandel und Extreme – Was haben wir zu erwarten?

- Basierend auf den vorliegenden Klimaprojektionen ist zukünftig in Deutschland mit einer weiter ansteigenden mittleren Lufttemperatur zu rechnen. Die vorliegenden Klimaprojektionen zeigen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* einen Anstieg von 3,1 bis 4,7 °C für die *ferne Zukunft*. Die konsequente Umsetzung von globalen Klimaschutzmaßnahmen kann den Anstieg auf 0,9 bis 1,6 °C begrenzen.
- Besonders deutliche Zunahmen sind im Auftreten extrem hoher Temperaturen und Hitzewellen zu erwarten, während Frostereignisse voraussichtlich seltener auftreten.
- Die Niederschlagssummen nehmen im Mittel voraussichtlich leicht zu – insbesondere im Winter und Frühjahr, während im Sommer zukünftig auch Niederschlagsabnahmen möglich sind. Es ist zukünftig mit häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen zu rechnen, von denen besonders seltene Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zunehmen als weniger extremer Ereignisse
- Mit der ansteigenden mittleren Lufttemperatur nimmt auch die Wassertemperatur der großen Fließgewässer zu.
- Der Abfluss der großen Flüsse ändert sich im Jahresmittel vielerorts kaum, da eine winterliche Abflusszunahme durch eine sommerliche Abnahme kompensiert wird.
- Bestehende Tendenzen zu starken Winterregen verstärken sich in einigen Flussregionen. Flussabschnitte, die schon heute durch winterliche Hochwasserereignisse geprägt sind, erwarten daher eine zunehmende Gefährdung durch Hochwasserereignisse. Niedrigwasserereignisse werden dort intensiver, wo schon heute Sommer und Herbst die typische Niedrigwassersaison bilden.
- Projektionen zur Entwicklung des globalen Meeresspiegels erreichen Ende des 21. Jahrhunderts für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* oftmals einen Anstieg von über einem Meter. Die Entwicklung des Meeresspiegels ist aufgrund der derzeit kaum abschätzbaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Im Küstenbereich sind Watten grundsätzlich in der Lage, bei einem Meeresspiegelanstieg aufzuwachsen. Jedoch wird bei einem stark beschleunigten Meeresspiegelanstieg ein Verlust an Wattfläche erwartet, da die natürliche morphologische Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers durch das Sedimentangebot begrenzt wird. Veränderungen von Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie Tidehub sind innerhalb der Deutschen Bucht räumlich und zeitlich heterogen.
- Windgeschwindigkeiten unterliegen auch zukünftig einer hohen zeitlichen Variabilität bei nur geringen langfristigen Änderungssignalen.
- Das erwartete häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee geht potenziell mit einem häufigeren Auftreten angespannter Entwässerungssituationen an der Nordseeküste einher.

2.1 Einleitung

Die Anzeichen und Auswirkungen des Klimawandels treten regional, zeitlich und je nach betrachtetem Kennwert in unterschiedlicher Stärke und Ausprägung in Erscheinung. Im BMVI-Expertennetzwerk werden verschiedene

meteorologische Größen (Temperatur, Niederschlag), hydrologische Größen (Abfluss, Wassertemperaturen) sowie ozeanografische Größen (Meeresspiegel, Tidekennwerte) betrachtet. Ausgewertet werden sowohl gemessene als auch simulierte Zeitreihen. Lange Messreihen erlauben es bereits heute, stattfindende Veränderungen zu identifizieren und

zu bewerteten. Um Aussagen über den zukünftigen Klimawandel in Deutschland zu erhalten, werden außerdem Projektionen aus Modellen betrachtet. Das BMVI-Expertenetzwerk orientiert sich hierbei an den vom Weltklimarat (IPCC) gesetzten Standards und verwendet eine Methodik, die konsistent mit den aktuellen Berichten des IPCC ist.

Den Projektionen liegen verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zugrunde. Diese beinhalten nicht nur die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen, sondern auch weitere Faktoren wie die Entwicklung der Aerosolkonzentration und die anthropogen verursachte Änderung der Landnutzung (Moss et al. 2008). Die hierbei verwendete Szenariengeneration der *Repräsentativen Konzentrationspfade* (RCP) stellt mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaertrieb² im Jahr 2100 dar. Im BMVI-Expertenetzwerk stehen drei Pfade im Fokus, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. Nachfolgend werden diese Pfade als "*Klimaschutzszenario*" (RCP2.6; Klimaertrieb von 2,6 W/m² im Jahr 2100), "*Moderates Szenario*" (RCP4.5; Klimaertrieb von 4,5 W/m² in 2100) und "*Weiter-wie-bisher-Szenario*" (RCP8.5.; Klimaertrieb von 8,5 W/m² im Jahr 2100) bezeichnet. Im Rahmen der DAS wird aus Gründen der Vorsorge bei Klimawirkungsanalysen ein besonderer Fokus auf das *Weiter wie bisher-Szenario* gelegt. Dies steht aber nicht im Gegensatz zu den Klimaschutzbeiträgen Deutschlands im Rahmen der internationalen Klimaschutzabkommen. Das Klimaschutzszenario setzt internationale Klimaschutzbemühungen voraus und kann nicht durch vereinzelte nationale Beiträge erreicht werden. Vergleicht man die unterschiedlichen Szenarien stellt man fest, dass die Klimaänderungssignale zumeist im *Klimaschutzszenario* deutlich weniger ausgeprägt sind als im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dies ist durch den global gesehen geringeren Klimaertrieb zu erklären. Systematische Vergleiche zwischen den Szenarien und den mit ihnen verbundenen Bandbreiten an Klimaänderungssignalen werden durch die unterschiedliche Anzahl der pro Szenario vorhandenen Klimamodellsimulationen erschwert.

² Der Klimaertrieb – oder wissenschaftlich Strahlungsantrieb – beschreibt den Einfluss externer Faktoren (z. B. Konzentration von Treibhausgasen und Aerosol, veränderte Erdoberflächen-Albedo, Sonneneinstrahlung) auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde.

Mit Blick auf für die Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem relevante Klimakenngrößen werden beobachtete Änderungen der jeweils zu erwartenden Entwicklung gegenübergestellt. Die Bewertung der jüngsten Klimaentwicklung basiert dabei auf im BMVI-Expertenetzwerk neu- bzw. weiterentwickelten Referenzdatensätzen (s. Auswerterrahmen, Hänsel et al. (2020a)) für den Beobachtungszeitraum (1951–2015, sofern kein anderer Zeitraum genannt wird). Die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland wird mittels regionaler Klimaprojektionen (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014) bewertet. Diese werden durch die internationale und nationale Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt und verfeinern die aktuellen globalen Klimasimulationen (Taylor et al. 2012) räumlich. Die regionalen Klimaprojektionen wurden im BMVI-Expertenetzwerk bezüglich systematischer Modellfehler adjustiert und für die nachfolgende Verwendung in Klimawirkungsmodellen optimiert (s. Auswerterrahmen (Hänsel et al. 2020a) und Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020)). Zu diesen Klimawirkungsmodellen gehören hydrologische Modelle und Wassergütemodelle (BfG) sowie hydro- und morphodynamische Modelle (BfG, BAW), welche die erforderlichen gewässerbezogenen und ozeanografischen Daten generieren und sequenziell als "Modellkaskade" hintereinandergeschaltet sind (Details siehe Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, Nilson et al. (2020)).

Alle Daten und damit auch die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse unterliegen gewissen Unsicherheiten. Diese ergeben sich aus den oben genannten Annahmen zur Entwicklung des Klimaertriebs in den RCP-Szenarien, der natürlichen (internen) Variabilität des Klimasystems, den notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung sowie der Erfassung und Verarbeitung von Beobachtungsdaten. Um den Unsicherheiten – insbesondere den mit den Zukunftssimulationen verbundenen – Ausdruck zu verleihen, werden – soweit möglich – Ergebnisbandbreiten angegeben, die jeweils dem 15. und dem 85. Perzentil des Simulationsensembles entsprechen und somit 70 % aller vorliegenden Modellergebnisse beinhalten.

Im Folgenden werden ausgewählte, für die Bewertung der Resilienz des Verkehrssystems besonders wichtige Kennwerte in ihren vergangenen und zukünftigen Entwicklun-

gen dargestellt. Zumeist werden das Klimaschutzszenario und das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die Zeitscheiben *Bezugszeitraum* (1971–2000), *nahe Zukunft* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) verglichen. Details und weitere Hintergründe sind den jeweiligen Schwerpunktberichten bzw. den darin zitierten Fachberichten zu entnehmen. Dies gilt ebenso für weitere Kenngrößen wie "Globalstrahlung", "relative Feuchte" und "Luftdruck".

Mit KLIWAS (BMVI 2015b) und AdSVIS (Auerbach et al. 2014) liegen für die Verkehrsträger Wasserstraße bzw. Straße bereits klimawandelbezogene Informationen auf Basis einer früheren Szenariengeneration vor, die in verschiedenen Projekten der operativen Einheiten (insb. WSV) berücksichtigt wurden. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den aktuellen Ergebnissen des BMVI-Expertennetzwerks ist durch die neuen Generationen der Szenarien, Klimamodelle, Betrachtungszeitscheiben und Impaktmodelle nicht direkt möglich. Nachfolgend wird mit Bezug auf ausgewählte Kennwerte exemplarisch und teilweise qualitativ beschreibend ein Vergleich der generellen Aussagen von Vorgängerprojekten und BMVI-Expertennetzwerk vorgenommen. Im Wesentlichen werden die früheren Aussagen bestätigt. Auf deutliche Unterschiede in der Richtung oder Ausprägung von Änderungssignalen wird in den folgenden Abschnitten jeweils hingewiesen.

2.2 Temperatur – mittlere Lufttemperatur und Extreme

Die im BMVI-Expertennetzwerk ausgewerteten Klimaprojektionen zeigen, dass zukünftig die mittlere Lufttemperatur deutlich zunehmen wird, wodurch auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen steigt. Gleichzeitig ist immer seltener mit Frostereignissen zu rechnen. Detailliertere Informationen und spezifischere Auswertungen zur beobachteten und zukünftigen Temperaturentwicklung in Deutschland finden sich im Bericht des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020).

Das Verkehrssystem reagiert in einigen Teilen sehr sensitiv auf Veränderungen der Temperatur, insbesondere auf das zu erwartende häufigere Auftreten von zunehmend heißeren Hitzewellen. Diese wirken sich zum einen sehr stark auf verwendete Baumaterialien aus, z. B. Gleiskörper und Straßen, und belasten zum anderen die Menschen, welche die Verkehrsinfrastruktur nutzen. Die Binnenschifffahrt ist indirekt durch höhere Temperaturen gefährdet, da diese meist mit trocken-heißen Sommern einhergehen und die Erhaltung der erforderlichen Wassertiefe erschweren.

Das **Jahresmittel der Lufttemperatur** hat im *Beobachtungszeitraum* (1951–2015) im Flächenmittel über Deutschland um 1,6 °C zugenommen. Am deutlichsten ist der Anstieg im Frühjahr, während er im Herbst etwas geringer ausfällt. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist in allen Jahreszeiten ein weiterer deutlicher Anstieg der Lufttemperatur zu erwarten, mit der stärksten Zunahme im Herbst (s. Abbildung 2-1). Für die **Tagestiefst-** sowie die **Tageshöchsttemperatur** werden Zunahmen in ähnlicher Größenordnung, wie für die Mitteltemperatur projiziert.

Entsprechend den Anstiegen bei der Tageshöchst- und Tagestiefsttemperatur hat auch die Häufigkeit von Ereignistagen für warme und heiße Bedingungen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen. Lag die jährliche Anzahl an **Sommertagen** und **heißen Tagen**³ im Zeitraum 1952–1981 im Mittel noch bei 25 bzw. 3,4 Tagen pro Jahr, so stieg ihre Zahl im Zeitraum 1986–2015 auf etwa 35 bzw. 6,8 Tage pro Jahr. Zukünftig ist voraussichtlich mit einer Verstärkung dieser Trends zu rechnen (Abbildung 2-2). Das bedeutet, die Zahl heißer Tage kann in der fernen Zukunft um 14 bis 28 Tage ansteigen und die der Sommertage um 27 bis 53 Tage (Abbildung 2-2; *Weiter-wie-bisher-Szenario*). Zukünftig sind auch im Frühjahr bzw. im Herbst deutlich mehr Sommertage sowie einzelne heiße Tage zu erwarten.

Während gegenwärtig im Mittel in Deutschland nur sehr wenige **Tropennächte**⁴ auftreten, wird sich dies in Zukunft voraussichtlich deutlich ändern. In der *fernen Zukunft* sind

³ Sommertage sind Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C. An heißen Tagen erreicht die Tageshöchsttemperatur mindestens 30 °C.

⁴ In sogenannten Tropennächten bleibt die Tagestiefsttemperatur über 20 °C.

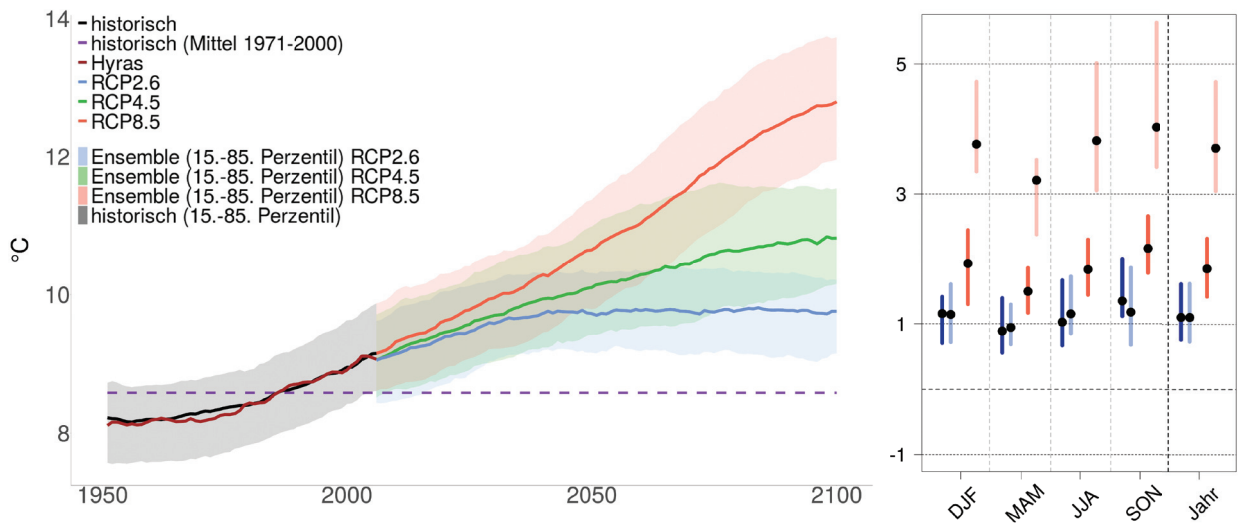


Abbildung 2-1: Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur über Deutschland als Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel; links) und als Änderungssignale (rechts) für die *nahe* (dunkler Farbton) und die *ferne Zukunft* (heller Farbton) im Vergleich zum *Bezugszeitraum*. Die Zeitreihendarstellung erfolgt für Beobachtungsdaten (HYRAS) und drei Klimamodellensembles (für die Szenarien *Klimaschutzszenario* RCP2.6, *moderates Szenario* RCP4.5 und *Weiter-wie-bisher-Szenario* RCP8.5). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den *Bezugszeitraum*. Die Änderungssignale (Ensemblemedian als schwarzer Punkt sowie die Bandbreite als dicke Linie) werden für die Jahreszeiten (Winter [(DJF), Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON]]) und das Jahr für das *Klimaschutzszenario* (blau) und das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (rot) dargestellt.

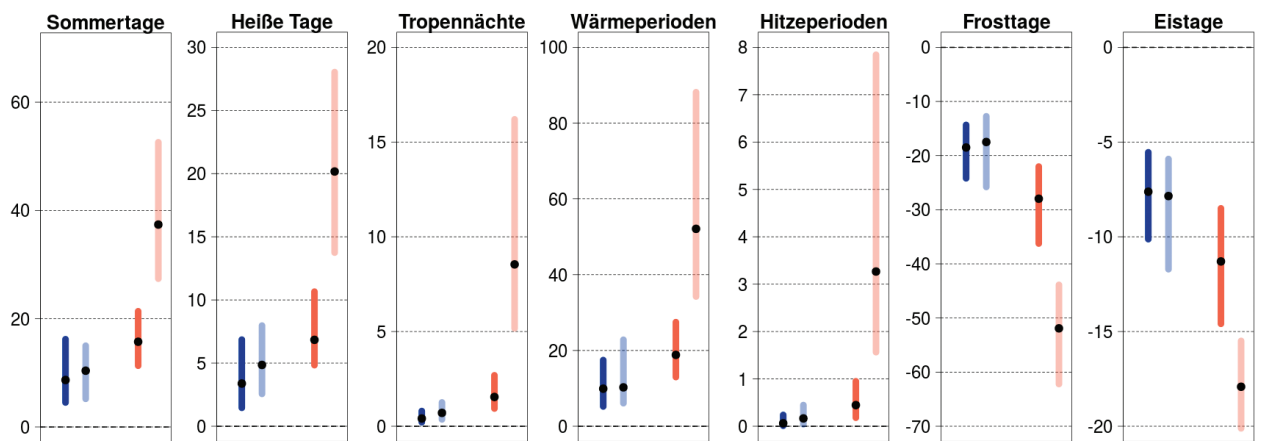


Abbildung 2-2: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel; in Tagen) für sieben temperaturbasierte Klimaindizes (s. Definition im Text bzw. in den Fußnoten) für die *nahe* (dunkler Farbton) und die *ferne Zukunft* (heller Farbton) im Vergleich zum *Bezugszeitraum* unter Verwendung des *Klimaschutzszenarios* (blau) und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale.

für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* 5 bis 16 Tropennächte mehr möglich (Abbildung 2-2). Durch den starken Anstieg der Zahl von heißen Tagen und Tropennächten steigt auch die Häufigkeit von mindestens drei Tage andauernden **Hitzeperioden**⁵ deutlich an. Während solche Phasen im *Beobachtungszeitraum* bis 2015 kaum auftraten, ist unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der *nahen Zukunft* im Deutschlandmittel bereits alle 5 bis 21 Jahre mit Hitzeperioden zu rechnen; in der *fernen Zukunft* müssen wir im Mittel fast jedes Jahr mit einem solchen Ereignis rechnen. Diese Erhöhung trifft auch auf die Summe der Tage zu, die pro Jahr zu solchen Hitzeperioden ebenso wie zu **Wärmeperioden**⁶ beitragen (Abbildung 2-2). In Bezug auf die Wärmeperioden ist zu beachten, dass sich diese im Gegensatz zu den Hitzeperioden nicht nur auf die warmen Monate beziehen, sondern – aufgrund ihrer Definition relativ zum Normalwert – in allen Jahreszeiten auftreten können.

Mit den ansteigenden Temperaturen hat die Häufigkeit von **Frost und Eis**⁷ in den vergangenen Jahrzehnten bereits deutlich abgenommen. Sowohl die Anzahl der Frosttage (bis -21 Tage) als auch jene der **Frost-Tau-Wechseltage**⁸ (bis -12 Tage) nahm im *Beobachtungszeitraum* signifikant ab. Dieser Trend wird sich in Zukunft verstärkt fortsetzen (Abbildung 2-2).

Die projizierte Temperaturentwicklung ähnelt den bereits in KLIWAS getroffenen Aussagen. Die basierend auf den KLIWAS-Szenarien (SRES A1B) abgeleiteten Änderungssignale liegen entsprechend ihrem Klimaantrieb zwischen dem *moderaten Szenario* (RCP4.5) und dem *Weiter-wie-bisher-Szenario*.

⁵ Hitzeperioden sind definiert als Aufeinanderfolge von mindestens drei Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur > 30 °C und einer Tagestiefsttemperatur > 20 °C. In Abbildung 2-2 ist nicht die Änderung in der Anzahl von Hitzeperioden, sondern jene der Jahressumme der Hitzeperioden zugeordneten Tage dargestellt.

⁶ Wärmeperioden bestehen aus mind. sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit Tageshöchsttemperaturen über dem 90. Perzentil; gezählt wird die Jahressumme der Wärmeperioden zugeordneten Tage.

⁷ Frosttage sind Tage mit einer Tagestiefsttemperatur und Eistage solche mit einer Tageshöchsttemperatur unter 0 °C.

⁸ Frost-Tau-Wechseltage sind Tage, an denen die Tagestiefsttemperatur unter 0 °C und die Tageshöchsttemperatur über 0 °C liegt.

2.3 Niederschlag – mittlere Niederschlagssummen und Extreme

Insgesamt ist bei leicht steigenden Jahresniederschlagssummen mit einer gleichzeitigen Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sowie einem gehäuftem Auftreten trockener Tage zu rechnen – sprich: Die Niederschlagsbedingungen werden insgesamt extremer. Regional und zeitlich differenziertere Informationen und Auswertungen zur Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse in Deutschland sind im Endbericht des Schwerpunktes *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) nachzulesen.

Veränderungen des Niederschlags wirken sich auf verschiedenen Wegen auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur aus. Starkniederschläge können zu lokalen Überflutungen und Schäden an der Straßen- und Schieneninfrastruktur führen, während ausgedehnte niederschlagsfreie Perioden Niedrigwassersituationen und damit Abladebeschränkungen auf den Wasserstraßen nach sich ziehen können. Lang andauernde feuchte Phasen können in Verbindung mit großflächigen Niederschlägen in Hochwassersituationen an den Flüssen resultieren, die Sperrungen von Straße, Schiene und Wasserstraße zur Folge haben.

Während die Auswertungen zu Temperaturkenngrößen im *Beobachtungszeitraum* häufig signifikant ansteigende Trends im Deutschlandmittel zeigen, ist die entsprechende Entwicklung für den Niederschlag weniger eindeutig. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Änderungssignale statistisch nicht signifikant. Der **mittlere Jahresniederschlag** hat im *Beobachtungszeitraum* im Flächenmittel für Deutschland leicht zugenommen (ca. +4,5 %). Am deutlichsten ist der Trend hierbei im Winter (+16 %) und Herbst (+14 %), während im Sommer eine Abnahme des Niederschlags von knapp -7 % verzeichnet wurde. Für die Zukunft ist im gesamten Jahresverlauf – abhängig von Klimaprojektion und Klimaszenario – generell von einer weiteren Zunahme des durchschnittlichen Niederschlags auszugehen (Abbildung 2-3). Die deutlichste Zunahme des Niederschlags wird für den Winter (Abbildung 2-4a) und den Frühling projiziert. Vor allem für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* kann es in der *fernen Zukunft* im Sommer zu einer Abnahme des mittleren Niederschlags von bis zu -16 % kommen, doch

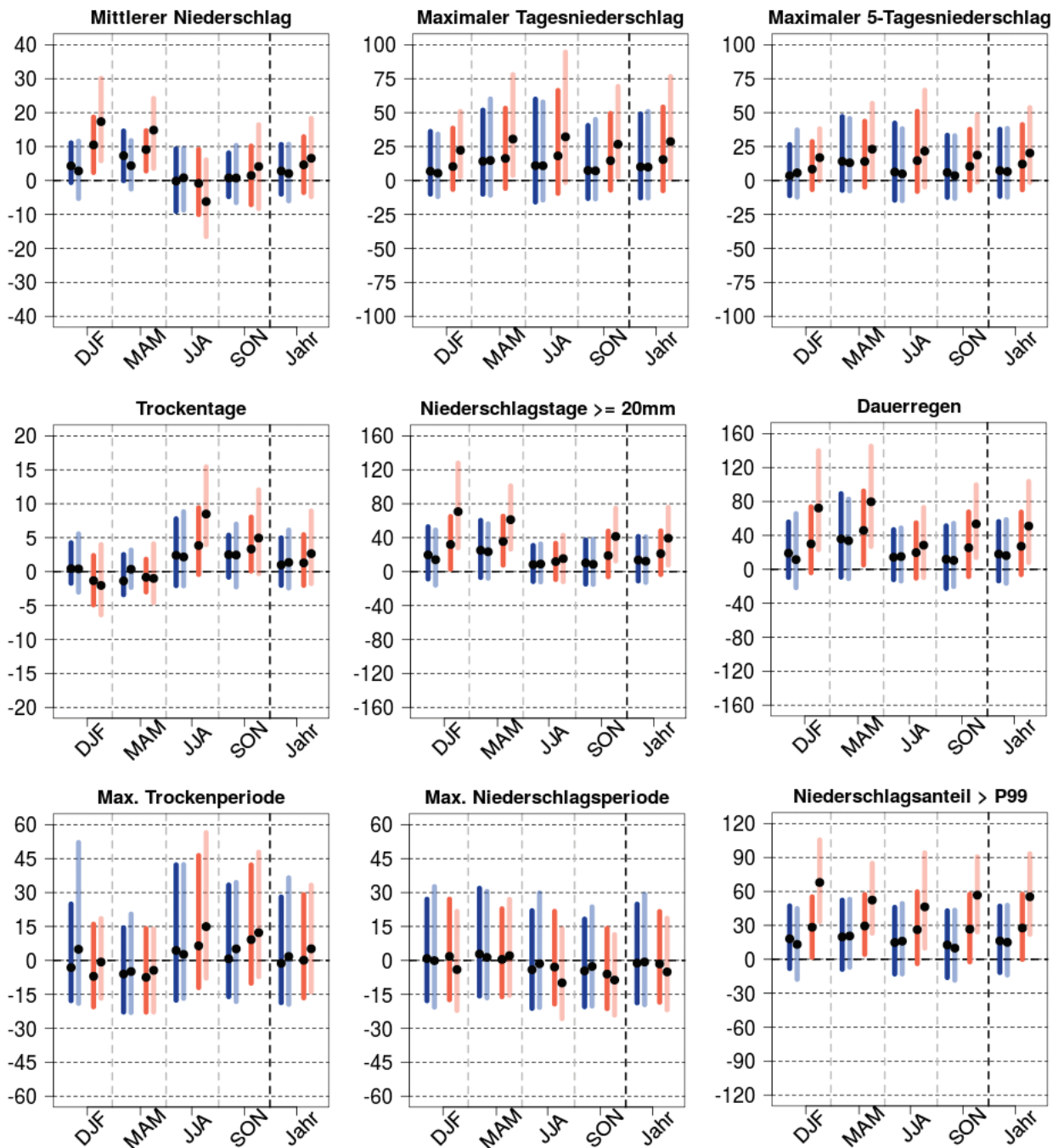


Abbildung 2-3: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel; in Prozent) für neun Klimakenngrößen (siehe jeweilige Abbildungsüberschrift) für die *nahe* (dunkler Farbton) und die *ferne Zukunft* (heller Farbton) im Vergleich zum *Bezugszeitraum* unter Verwendung des *Klimaschutzszenarios* (blau) und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter [(DJF), Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON]]) und das Jahr.

auch Zunahmen im Deutschlandmittel in Höhe von +6 % sind möglich (Abbildung 2-4b).

Die positiven Trends der **Starkniederschlagsindizes** sind bereits für den *Beobachtungszeitraum* größer als jene des mittleren Niederschlags – mit signifikanten Zunahmen insbesondere im Herbst. Die Zahl der **Starkniederschlagstage**⁹ hat beispielsweise im Herbst über die 65 Jahre des *Beobachtungszeitraums* um +38 % zugenommen. Auf relativen Schwellenwerten basierende Starkniederschlagsindizes¹⁰ zeigen eine ähnliche Größenordnung des Herbsttrends mit +28 % für sehr feuchte Tage und +45 % für extrem feuchte Tage. Für die Zukunft ist in allen Jahreszeiten von einem weiteren verstärkten Anstieg der Häufigkeit von Starkniederschlägen auszugehen (Abbildung 2-3). Hierbei wird die stärkste Zunahme im Winter (Abbildung 2-4c) und im Frühling erwartet. Die Bandbreite an möglichen Entwicklungen ist dabei jedoch relativ groß und die möglichen Zunahmen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* deutlich größer als im *Klimaschutzszenario*. Dabei zeigen seltenere und damit extremere Starkniederschlagsereignisse größere Zunahmen der Häufigkeit als etwas moderatere Starkniederschlagsereignisse, wie auch spezielle extremwertstatistische Auswertungen zeigen. Beispielsweise verdoppelt sich die Auftretshäufigkeit sehr seltener Starkniederschläge¹¹ im Winter (von etwa einmal alle 11 Jahre im *Bezugszeitraum* auf ca. jeden fünften Winter in der *fernen Zukunft* unter dem *Weiter-wie-bisher-Szenario*), während diejenige vergleichsweise regelmäßig auftretender Starkniederschläge nur um etwa 25 % zunimmt¹². So kann die Auftretshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen, die bisher an neun

Tagen pro Winter auftraten, zukünftig auf etwa 12 Tage steigen.

Neben dem beschriebenen Anstieg der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen gibt es Anzeichen für einen Anstieg ihrer Intensität. Für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* wird eine Zunahme der **maximalen Tagesniederschlagshöhe** von ca. 70 mm (*Bezugszeitraum*) auf 66 bis 115 mm in der *nahen Zukunft* und 73 bis 134 mm in der *fernen Zukunft* projiziert (relative Änderungssignale siehe Abbildung 2-3). Im *Beobachtungszeitraum* zeigen sich für die **Niederschlagsmenge an Starkniederschlagstagen**¹³ insgesamt geringe Änderungen; nur im Winter und Frühling ist eine leichte Zunahme von ca. 2 bis 3 % zu verzeichnen. Für die Zukunft ist hingegen von einem deutlichen Anstieg auszugehen. Die größten positiven Trends werden dabei für den Sommer projiziert, wobei für die Starkniederschlagshäufigkeit nur eine geringe Zunahme projiziert wurde. Auch der Anteil der Niederschlagssumme von sehr feuchten und extrem feuchten Tagen am Gesamtniederschlag¹⁴ nimmt bis zum Jahrhundertende bei allen Klimaszenarien zu (Abbildung 2-3).

Länger andauernde **Niederschlagsperioden**¹⁵ zeigen weder im *Beobachtungszeitraum* noch im Projektionszeitraum (Abbildung 2-3) ausgeprägte Änderungen in ihrer Andauer. Beispielsweise liegt die maximale Länge von Niederschlagsperioden bei knapp 16 Tagen im *Beobachtungszeitraum* und bei etwa 13 bis 19 Tagen in den beiden Zukunftszeitscheiben. Die Anzahl der Ereignisse mit **Dauerregen**¹⁶ hingegen ist im *Beobachtungszeitraum* merklich angestiegen – im Winter um +30 %, im Frühling um +61 % und im Herbst um +35 % – merklich angestiegen, während im Sommer eine geringe Abnahme um -14 % beobachtet wurde. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist für alle Jahreszeiten und

⁹ Als Starkniederschlagstage sind Tage mit einer Niederschlagssumme von mindestens 20 mm definiert.

¹⁰ Niederschlagsindizes können basierend auf relativen Schwellenwerten definiert werden. Dabei werden Perzentile der Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschlagssummen zugrunde gelegt. Sehr feuchte Tage beziehen sich auf eine Überschreitungshäufigkeit des 95. Perzentils, extrem feuchte Tage auf eine Überschreitungshäufigkeit des 99. Perzentils.

¹¹ Sehr seltene Starkniederschlagsereignisse (basierend auf Tagesniederschlagssummen) beziehen sich auf Ereignisse ab dem 99,9. Perzentil und treten ca. jeden elften Winter/Sommer auf.

¹² Regelmäßig auftretende Starkniederschlagsereignisse (basierend auf Tagesniederschlagssummen) beziehen sich auf Ereignisse ab dem 90. Perzentil und treten ca. an 9 Tagen pro Winter/Sommer auf.

¹³ Es wird die mittlere Niederschlagssumme der Tage mit mindestens 20 mm Tagesniederschlagshöhe ausgewertet.

¹⁴ Bestimmt wird der Anteil der Niederschlagssumme an Tagen mit Niederschlägen oberhalb des 95. Perzentils (feuchte Tage) bzw. des 99. Perzentils (sehr feuchte Tage) an der Gesamtsumme des Niederschlags.

¹⁵ Untersucht wird die maximale Andauer von Niederschlagsperioden, sprich einer ununterbrochenen Folge von Tagen mit einer Niederschlagssumme von mehr als 1 mm.

¹⁶ Unter Dauerregen werden Ereignisse mit mindestens 40 mm innerhalb von 72 h verstanden.

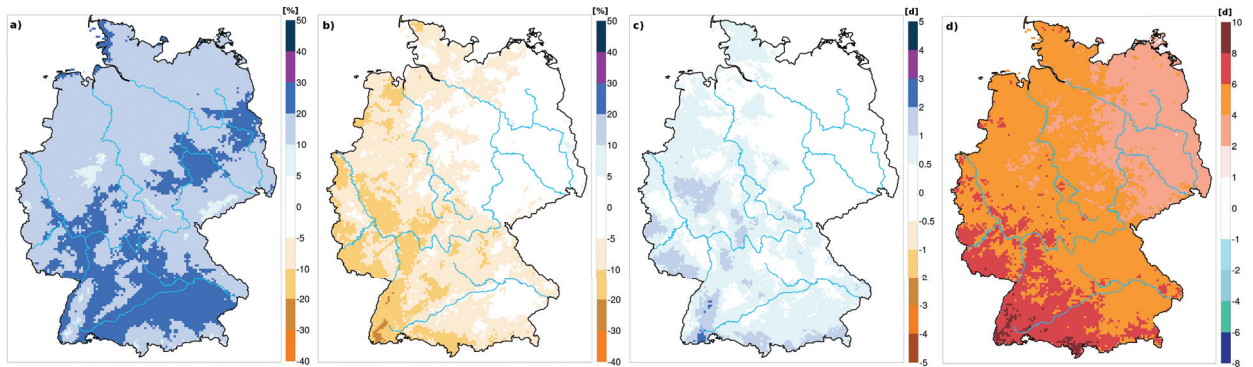


Abbildung 2-4: Änderungen des 50. Perzentils für die mittlere Niederschlagssumme im Winter (a) und Sommer (b), der Anzahl von Starkniederschlagstagen (> 20 mm) im Winter (c) und der Anzahl der Trockentage (< 1 mm) im Sommer (d) für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in der *fernen Zukunft* gegenüber dem *Bezugszeitraum*.

Szenarien von einer Zunahme der Zahl dieser Ereignisse – mit den stärksten Trends im Winter und Frühling – auszugehen (Abbildung 2-3). Auch die **maximale 5-Tagesniederschlagssumme** steigt zukünftig von im Mittel 113 mm auf Werte zwischen 100 und 167 mm (*nahe Zukunft*) sowie 101 und 183 mm (*ferne Zukunft*) an (relative Änderungssignale siehe Abbildung 2-3).

Neben Starkniederschlagsereignissen ist auch die Entwicklung von Trockenperioden für den Verkehrssektor wichtig – insbesondere für die Wasserstraße. Im *Beobachtungszeitraum* zeigen über das gesamte Jahr betrachtet weder die **Zahl der Trockentage**¹⁷ noch die **maximale Trockenperiodenlänge**¹⁸ große Änderungen. Dabei ist im Frühjahr und auch im Sommer eine leichte Zunahme sichtbar, während insbesondere für den Herbst Rückgänge beobachtet wurden. Die Klimaprojektionen zeigen für die Zukunft eine Zunahme der Trockenheitsindizes (Abbildung 2-3) vor allem im Sommer (Abbildung 2-4d) und Herbst. Diese gestiegene Anzahl an Trockentagen kann sich insbesondere im Sommer und Herbst zu längeren Trockenperioden zusammenfügen, wobei die Bandbreite der Klimaprojektionen recht groß ist (Abbildung 2-3).

Die Ergebnisse des BMVI-Expertennetzwerks bestätigen in weiten Teilen die basierend auf dem SRES-Szenario A1B abgeleiteten Ergebnisse des Ressortforschungsprogramms KLIWAS. Die in KLIWAS¹⁹ beschriebene moderate Zunahme des mittleren Niederschlags im Winter (*nahe Zukunft* [2021–2050]: +10 %; *ferne Zukunft* [2071–2100]: +15 % gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1961–1990) befindet sich in der Bandbreite des im BMVI-Expertennetzwerk betrachteten *moderaten Szenarios* (*nahe Zukunft* [2031–2060]: +2–14 % und *ferne Zukunft* [2071–2100]: +3–18 % gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000). Im Sommer hingegen zeigen die Projektionen des BMVI-Expertennetzwerks für das *moderate Szenario* keine wesentlichen Niederschlagsänderungen (*ferne Zukunft*: -11 % bis +12 %), während die Auswertungen in KLIWAS eine Abnahme bis zu -20 % zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigten. Auch für das – mit einem größeren Klimaerwärmungsantrieb als das in KLIWAS verwendete A1B-Szenario verbundene – *Weiter-wie-bisher-Szenario* zeigen sich für das Expertennetzwerk-Ensemble mit maximal -16 % geringere Abnahmen. Dies betrifft insbesondere den Osten Deutschlands.

¹⁷ Trockentage sind Tage mit einer Niederschlagssumme von weniger als 1 mm definiert.

¹⁸ Bei der maximalen Trockenperiodenlänge wird die längste ununterbrochene Andauer von Trockentagen pro Jahr bzw. Jahreszeit analysiert.

¹⁹ Die Änderungssignale für das KLIWAS-Gebiet stammen aus Imbery et al. (2013)

2.4 Abfluss – mittlerer Abfluss, Niedrig- und Hochwasser in Gewässern

Die Wasserhaushaltsprojektionen bestätigen für die neue Daten- und Modellgeneration die aus Vorgängerprojekten bekannten Grundtendenzen hydrologischer Veränderungen in Deutschland. Die bereits beobachteten und die projizierten Veränderungen beim Niederschlag setzen sich fort mit der Konsequenz extremerer Hoch- und Niedrigwassersituationen vor allem außerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches der Alpen gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Neu ist die – nach ersten Analysen den regionalen Klimamodellen zuzuschreibende – Dämpfung der sommerlichen Niederschlagsabnahme im Osten Deutschlands, die eine relativ moderate Niedrigwasserabnahme und eine Zunahme von Hochwassersituationen nach sich zieht. Entsprechende Auswertungen inklusive weiterer Hintergrundinformationen finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) sowie in den dort zitierten Fachberichten.

Mit dem Klimawandel verändern sich die hydrometeorologischen Bedingungen und damit der Wasserhaushalt in den deutschen Flusseinzugsgebieten. Verursacht durch in Raum und Zeit veränderte Niederschlagsmuster und Windfelder sowie höhere Lufttemperaturen ergeben sich veränderte Abflussverhältnisse an den Pegeln der Flüsse, die für den Verkehr in Form von Hoch- und Niedrigwassersituationen relevant werden können (s. hierzu Abschnitte 3.3.1, 3.4.1 und 3.4.2).

Im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks wurde intensiv an Simulations- und Auswertungswerkzeugen gearbeitet, um den Kenntnisstand bezüglich dieser Zusammenhänge für die Zukunft bis in das Jahr 2100 besser begründen und damit belastbarer quantifizieren zu können. Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem BMVI-Forschungsprogramm KLIWAS (Nilson et al. 2014) wurden Methoden gezielt weiterentwickelt und aktualisierte Datengrundlagen verwendet. So fußen die Abflussprojektionen des BMVI-Expertennetzwerks auf der aktuell verfügbaren Generation von globalen und regionalen Kli-

amodellen und einem neuen, nun für alle Flusseinzugsgebiete einheitlichen Wasserhaushaltsmodell (LARSIM-ME). Insgesamt wurden rund 4.000 Jahre täglicher Abflüsse und weiterer Wasserhaushaltsgrößen simuliert. Diese Daten sind die Grundlage für die nachfolgend und in den Abschnitten 3.3.1, 3.4.1 und 3.4.2 dargestellten Auswertungen. Einzelheiten hierzu sowie weitere Erkenntnisse finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

Als Ergebnis der Arbeiten liegen Änderungsinformationen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Form ausgewählter hydrologischer Kennwerte vor, die das Abflussspektrum von Niedrigwasser über Mittelwasser bis hin zu Hochwasser abdecken. Es zeigt sich, dass die projizierten Änderungen der mittleren Jahresabflüsse durchweg moderat sind und an mehreren Pegeln ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist. Hierbei gleichen sich gegenläufige Entwicklungen der Jahreszeiten teilweise aus: winterliche Abflusszunahmen (bis +30 %) stehen sommerlichen Abflussabnahmen (bis -20 %) gegenüber. Diese Änderungen wirken sich auch auf die jährlichen Hoch- und Niedrigwasserabflüsse aus. Insbesondere für Regionen bzw. Flussabschnitte, die heute primär durch winterliche Hochwasserereignisse geprägt sind, werden höhere Hochwasserabflüsse simuliert (bis ca. +30 %). Intensivere Niedrigwasserereignisse (bis ca. -20 %) werden insbesondere dort simuliert, wo heute der Sommer und der Herbst die typische Niedrigwassersaison bilden. Dies trifft für Regionen und Flussabschnitte zu, deren Abflussgeschehen heute nicht oder kaum durch Schnee und Gletscher geprägt sind (insb. Einflussbereich der Mittelgebirge). Umgekehrt sind Regionen und Flussabschnitte, in denen der Einfluss von Schnee und Gletschern heute deutlich ist (insb. im Einflussbereich der Alpen), bzgl. der Hoch- und Niedrigwasseränderungen relativ wenig betroffen.

Grundsätzlich gilt, dass viele Änderungssignale in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (*ferne Zukunft*) deutlicher hervortreten. Für die *nahe Zukunft* zeigt das Ensemble der Zukunftsprojektionen oft keine klare Änderungsrichtung. Ebenso gilt, dass die Änderungen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* grundsätzlich ausgeprägter sind als im *Klimaschutzszenario*. Im Fall des *Klimaschutzszenarios* sind auch die Unterschiede zwischen *naher* und *ferner Zukunft* deutlich weniger betont bzw. kaum sichtbar. Abbildung 2-5 verdeutlicht einige der genannten Aspekte exemplarisch für

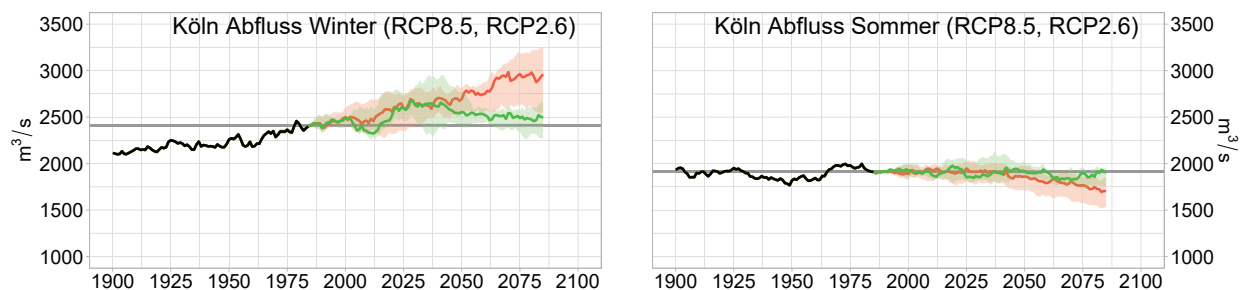


Abbildung 2-5: Vergleich der Veränderungen des mittleren Abflusses am Pegel Köln/Rhein für den hydrologischen Winter (links) und Sommer (rechts) unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* (RCP2.6, grün) und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (RCP8.5, rot). Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel der Beobachtungen bzw. des Medians des Ensembles. Die Schattierungen entsprechen einer hohen bzw. einer niedrigen Schätzung (85. bzw. 15. Perzentil). Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des *Bezugszeitraums*. Weitere Einzelheiten s. Text bzw. Bericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*.

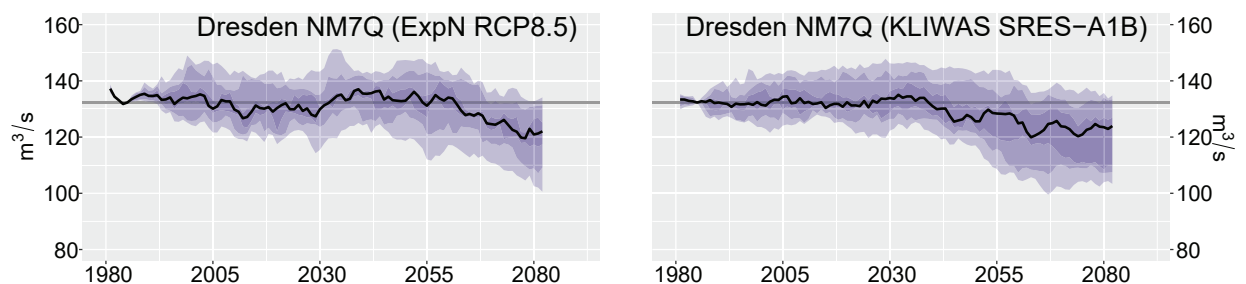


Abbildung 2-6: Vergleich der Veränderungen des Niedrigwasserabflusses NM7Q am Pegel Dresden/Elbe basierend auf den Ergebnissen des BMVI-Expertenetzwerks (links) und des BMVI-Forschungsprogrammes KLIWAS (rechts). Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel des Medians der Ensembles. Die Schattierungen entsprechen unterschiedlichen Perzentilen (85., 75., 60., 40., 25., 15.). Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des *Bezugszeitraums*.

den Pegel Köln (Rhein). Insbesondere im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (rote Linie) zeigen sich die unterschiedlichen Entwicklungen des Winters (links, Zunahme) und des Sommers (rechts, Abnahme). Die Bandbreite der Ergebnisse aus unterschiedlichen Klimamodellen nimmt gegen Ende des Jahrhunderts für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* deutlich zu.

Die aus KLIWAS bekannten Kernaussagen und Änderungssignale werden bzgl. vieler Kennwerte und Pegel weit-

gehend bestätigt. Exemplarisch dargestellt sind hier die "alten" und "neuen" Änderungsinformationen für die Niedrigwasserabflüsse am Pegel Dresden (Abbildung 2-6). Die teilweise geringen Unterschiede überraschen, da z. B. das angenommene *Weiter-wie-bisher-Szenario* stärkere Veränderungen des Energiehaushaltes annimmt, als das in KLIWAS angesetzte SRES-Szenario A1B. Ein Erklärungsansatz ist eine geringere sommerliche Niederschlagsabnahme, die durch die neue Generation von Klimamodellen simuliert wird.

2.5 Änderungen der mittleren Wassertemperatur der großen Fließgewässer

Bedingt durch die ansteigenden Lufttemperaturen nimmt auch die Wassertemperatur der großen Flüsse (Rhein und Elbe) zu. Für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* steigen im Jahresmittel die Gewässertemperaturen in der *nahen Zukunft* um mindestens +1 °C. In der *fernen Zukunft* kann der Anstieg +3 °C deutlich überschreiten. Saisonal sind die größten Anstiege in den Herbstmonaten zu erwarten, diese können in der *fernen Zukunft* sogar über +5 °C betragen. Spezifischere Auswertungen zur Wassertemperatur finden sich im Endbericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

Veränderungen der Wassertemperaturen, insbesondere eine zunehmende Erwärmung, können die Biozönose des Gewässers beeinflussen, aber auch wirtschaftliche Belan-

ge betreffen. Beispielsweise hängt die Nutzung des Wassers als Kühl- oder Prozesswasser stark von der Wassertemperatur ab, höhere Temperaturen können die Nutzung stark einschränken. Außerdem sind Mitgliedstaaten der Europäischen Union verpflichtet, die Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen und einen guten ökologischen Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potenzial eines Gewässers herzustellen oder zu erhalten. Dies wird durch erhöhte Wassertemperaturen erschwert.

Basierend auf einem Ensemble von fünf regionalen Klimamodellen erfolgten Simulationen mit einem hydraulischen Modell und einem Gewässergütemodell (HYDRAX, Oppermann et al. (2015); QSim, Kirchesch et al. (2018)) für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dabei flossen neben verschiedenen meteorologischen Einflussgrößen (Globalstrahlung, minimale und maximale Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Bewölkungsdichte) auch die Ergebnisse der Abflussprojektionen (s. Abschnitt 2.4) ein.

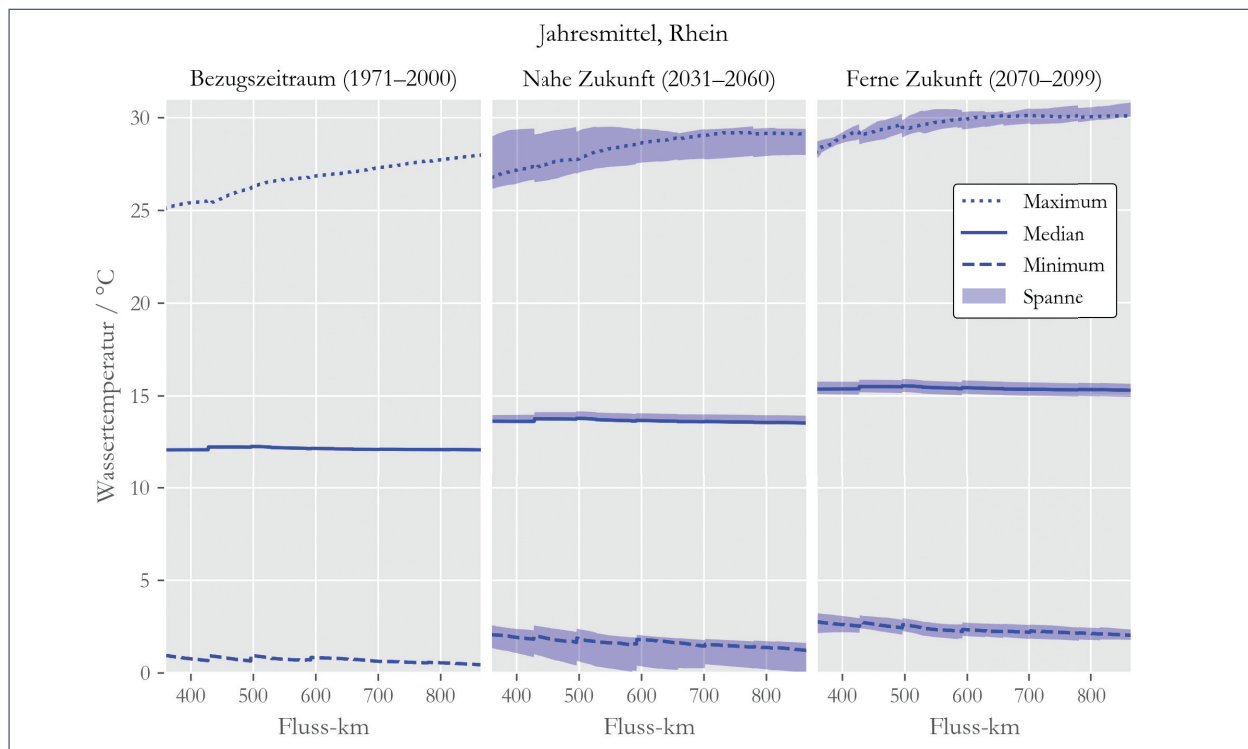


Abbildung 2-7: Entwicklung der Wassertemperatur (Jahresminimum, -mittel, -maximum) des Rheins zwischen Karlsruhe und deutsch-niederländischer Grenze. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen Zukunft*.

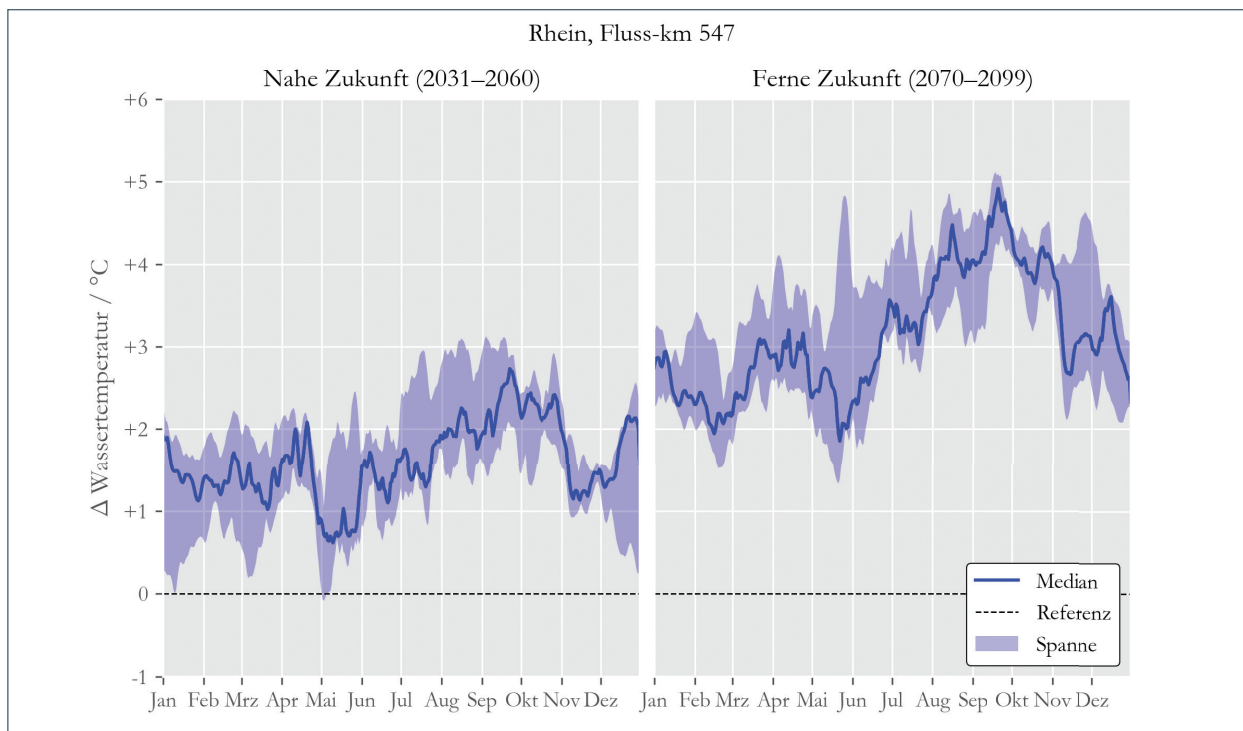


Abbildung 2-8: Veränderung der Wassertemperatur im Jahresverlauf bei Rhein-km 547 bei Kaub. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen Zukunft* mit dem *Bezugszeitraum*.

Die Modellergebnisse zeigen einen deutlichen Anstieg der Wassertemperaturen (s. Abbildung 2-7 für den Rhein). Beispielsweise steigen die Jahresmitteltemperaturen in der *nahen Zukunft* im Rhein um +1,1–2,2 °C und in der Elbe um +1,0–2,2 °C. In der *fernen Zukunft* muss sogar mit einem Anstieg in Höhe von +2,7–3,8 °C im Rhein und von +2,5–3,8 °C in der Elbe gerechnet werden. Temperaturerhöhungen sind über den gesamten Jahresverlauf zu erwarten und wahrscheinlich in den Herbstmonaten am größten (s. Abbildung 2-8 für den Rhein bei Kaub). Im Rhein ist dabei in der *fernen Zukunft* eine Erhöhung der Wassertemperatur um bis zu +4,9 °C und in der Elbe um bis zu +5,4 °C möglich.

2.6 Änderungen im mittleren Meeresspiegel und hohe Wasserstände in der Nordsee

Die im letzten Bericht des Weltklimarats dargestellten globalen Meeresspiegelanstiegsszenarien decken eine Bandbreite von 29 bis 110 cm ab. Änderungen zu vorherigen Berichten und Forschungsprogrammen (z. B. KLIWAS) betreffen die Projektionen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*, in denen oftmals ein globaler Meeresspiegelanstieg von über einem Meter zum Ende des Jahrhunderts erreicht wird. Die Projektionen sind aber weiterhin mit großen Unsicherheiten, unter anderem aufgrund der unklaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen, behaftet. Weitere Untersuchungen zur Entwicklung mittlerer und extremer Wasserstände an der deutschen Nordseeküste werden ausführlicher im Schlussbericht des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* dargestellt (Schade et al. 2020).

Der Meeresspiegelanstieg hat weltweit nicht nur große Auswirkungen auf den Küstenschutz, sondern beeinflusst beispielsweise auch die Entwässerung tiefliegender Gebiete. Seit dem Ende der letzten Eiszeit vor ca. 19.000 Jahren steigt der globale Meeresspiegel mehr oder weniger kontinuierlich an. Die Rate dieses Anstiegs betrug im 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts etwa +1,4–2,1 mm/Jahr. Zusätzlich zu diesem natürlichen Anstieg kommt seit einigen Jahrzehnten ein Anteil aufgrund der anthropogenen Erwärmung hinzu. Seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1993 beträgt der Anstieg im globalen Mittel damit etwa +3,4 mm/Jahr.

Für die Zukunft wird eine weitere Beschleunigung des global gemittelten Meeresspiegelanstiegs erwartet. Die bis zum Jahr 2100 projizierte Erhöhung des Meeresspiegels im Vergleich zum Zeitraum 1986–2005 erreicht Werte von +43 cm (wahrscheinliche Bandbreite²⁰: +29–59 cm) im *Klimaschutzszenario* und +84 cm (wahrscheinliche Bandbreite: +61–110 cm) im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (IPCC 2019) und zeigt damit große Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien. Der Beitrag der wichtigsten einzelnen Komponenten zum Meeresspiegelanstieg wird für den Zeitraum 1993–2015 aus Beobachtungen folgendermaßen quantifiziert (IPCC 2019): thermische Ausdehnung des Ozeanwassers: 43 %, Schmelzen der Landgletscher: 18 %, Abschmelzen der Eismassen auf Grönland: 15 % und das Abschmelzen der Eismassen in der Antarktis: 9 %. Vor allem für die Gletscherschmelze auf Grönland und in der Antarktis wird für die Zukunft eine starke Beschleunigung erwartet, hierbei sind aber – vor allem für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* – auch die größten Unsicherheiten zu erwarten. Beispielsweise gibt es für dieses Szenario Einzelstudien, die einen möglichen Meeresspiegelanstieg von etwa 40 cm bis über 2 m bis zum Jahr 2100 aufzeigen und damit eine große Unsicherheit abbilden.

Für die deutschen Küsten ist nicht nur der global gemittelte Meeresspiegelanstieg entscheidend, sondern auch das regionalspezifische Anstiegsverhalten. Die im BMVI-Expertenetzwerk durchgeführten Analysen zum Meeresspiegelanstieg beruhen sowohl auf Pegelmessungen als auch auf Ergebnissen global gekoppelter Klimamodelle. Untersuchungen zu den Wasserständen werden hierbei exemp-

larisch für Cuxhaven gezeigt. Am Pegel Cuxhaven liegt die längste ununterbrochene Messzeitreihe von Wasserständen vor. Analysiert wurden nicht nur die Trends von hohen, mittleren und niedrigen Wasserständen, sondern auch die Extremwerte.

Abbildung 2-9 zeigt den Anstieg am Pegel Cuxhaven seit 1843 (im 30-jährigen Mittel) für das mittlere Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie die jeweilige Änderung der 100-jährlichen erwarteten Ereignisse hoher Tidehochwasser bzw. hoher Tideniedrigwasser. Das mittlere Tidehochwasser ist im Beobachtungszeitraum stärker angestiegen als das mittlere Tideniedrigwasser, was zum Anstieg des Tidenhubs, v. a. seit dem Ende der 1950er-Jahre, führte. Für die Extremereignisse zeigt sich eine umgekehrte Entwicklung. Hierbei stieg das 100-jährliche Tidehochwasser weniger stark an als das mittlere, während das hohe Tideniedrigwasser stärker als das mittlere anstieg. Der zwischenzeitlich starke Anstieg der 100-jährlichen Ereignisse sowohl beim Tidehoch- als auch beim Tideniedrigwasser zum Ende der Zeitreihe lässt sich nicht mit dem mittleren Anstieg des Meeresspiegels oder anderen Auswirkungen des Klimawandels in Zusammenhang bringen, eventuell sind hierbei anthropogene Veränderungen an den Küsten oder auch die natürliche Variabilität des Klimasystems die Ursache.

Für die Frage nach einer Anpassung des Küstenschutzes ist vor allem die zukünftige Entwicklung der Extremereignisse

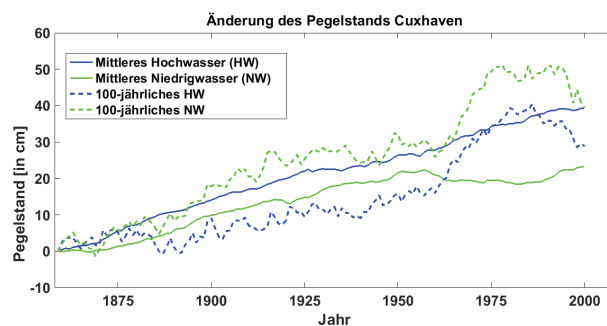


Abbildung 2-9: Änderungen des beobachteten mittleren Tidehoch- (blau) und Tideniedrigwassers (grün) am Pegel Cuxhaven (30-jähriges gleitendes Mittel) sowie Änderungen des 100-jährlichen Hochwassers (blau gestrichelt) und 100-jährlichen Niedrigwassers (grün gestrichelt). Für eine bessere Vergleichbarkeit wird das Mittel der Jahre 1843–1872 für alle Kurven auf null gesetzt. Die Darstellung beginnt im Jahr 1858.

²⁰ Zwei Drittel aller Modelle liegen innerhalb dieses Bereichs.

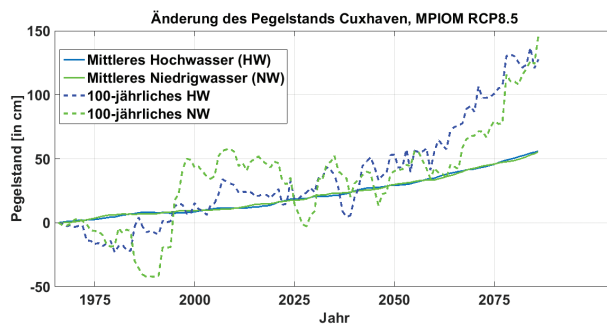


Abbildung 2-10: Wie Abbildung 2-9, aber für Wasserstände von 1950–2100 des MPI-OM-Modells im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5).

bedeutsam. Diese wurden mit der gleichen Methode wie für Beobachtungen in einem global gekoppelten Modell (MPI-OM) im *Weiter-wie-bisher-Szenario* untersucht (Abbildung 2-10). Das Modell zeigt für die Deutsche Bucht einen Anstieg der mittleren Tidehoch- und Tide-niedrigwasser um je etwa +55 cm bis zum Ende des Jahr-hunderts. Sehr viel stärker ist im Modell die Entwicklung der extremen (100-jährlichen) Ereignisse hoher Wasserstände. Hierbei entkoppelt sich ab der Mitte des 21. Jahr-hunderts deren Entwicklung von derjenigen des mittleren Wasserstands und erreicht Anstiege von fast +1,5 m bis zum Ende des Jahrhunderts. Dieser stärkere Anstieg der extremen Wasserstände im Vergleich zum mittleren Was-serstand (> +4,4 mm/Jahr von 1950–2100) zeigt sich auch bereits bei weniger extremen Ereignissen (1- bis 50-jährli-che Ereignisse).

Die Ursache für den signifikant stärkeren Anstieg der sehr hohen Wasserstände (im Vergleich zu mittleren Wasserständen) ist noch ungeklärt und bedarf weiterer Untersu-chungen. Beispielsweise stammen die hierbei gezeigten Ergebnisse aus nur einer Realisierung eines Modells (MPI-OM) für einen Klimaantrieb (*Weiter-wie-bisher-Sze-nario*). Projektionsensembles wie für den Binnenbereich liegen derzeit für den maritimen Bereich nicht in entspre- chendem Umfang vor. Interne Modellvariabilität oder spe- zifische Eigenschaften des verwendeten Modells können einen Einfluss haben. Ferner ist zu beachten, dass in der Simulation neuere Entwicklungen der Modellierung der Gletscherschmelze auf Grönland und in der Antarktis noch nicht berücksichtigt sind. Aussagen zur zukünftigen Ent-

wicklung des Meeresspiegels an der deutschen Küste sind weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet.

Der Vorteil des hierbei verwendeten globalen Klimamodells MPI-OM besteht nicht nur in der verhältnismäßig hohen Auflösung in Küstennähe, sondern auch darin, dass dieses Modell die Gezeiten mitberechnet und somit überhaupt di- rekte Aussagen zu veränderten Gezeitenwerten infolge des Meeresspiegelanstiegs liefert. Aus diesen Werten können jedoch keine Rückschlüsse für einzelne Küstenabschnitte abgeleitet werden, da wichtige regionalspezifische Gege- benheiten nicht abgebildet werden. Um lokale, u. a. für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevante Aussagen zur Tidedynamik im Küsten- und Wattbereich zu ermöglichen, wurden diese Daten in hochdetaillierten Regionalmodellen weiterverarbeitet (s. Abschnitt 2.7).

2.7 Tidedynamik und Wattentwicklung

Um die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Deutsche Bucht und die angrenzenden Ästua- re mithilfe von numerischen Modellen abschätzen zu können, ist eine möglichst genaue Darstellung der Wattgebiete sowie der flachen Bereiche wichtig. Infolge des Meeresspiegelanstiegs nimmt insbeson- dere die Flutstromgeschwindigkeit in den Tiderin- nen des Wattenmeers und der Ästuaire zu. Änderun- gen der Tidewasserstände sind regional verschieden. Im Küstenbereich sind Watten grundsätzlich in der Lage, bei einem Meeresspiegelanstieg aufzuwachsen. Jedoch wird bei einem stark beschleunigten Mee- resspiegelanstieg ein Verlust an Wattfläche erwartet, da die natürliche morphologische Anpassungsfähig- keit des Wattenmeers durch das Sedimentdargebot begrenzt wird. Eine ausführlichere Beschreibung der durchgeführten Studien und weitere Ergebnisanaly- sen sind in den Endberichten der Schwerpunktthe- men *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) sowie *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) zu finden.

Ein Meeresspiegelanstieg erhöht nicht nur die Wasserstände in der Deutschen Bucht und den angrenzenden Ästuaren, sondern verändert u. a. auch die Tidedynamik, die Lage der Brackwasserzone und den Sedimenttransport. Diese Veränderungen können sich auf den Betrieb und die Unterhaltung von Seehäfen und Seehafenzufahrten auswirken (s. Abschnitt 3.4.4), wirken aber auch auf Aspekte des Küstenschutzes und die Wasserbewirtschaftung des Binnenlandes (z. B. Kanalentwässerung). Mithilfe hydrodynamisch-numerischer Modelle lassen sich die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs in der Deutschen Bucht und den Ästuaren (s. Abschnitt 2.6) in ihrer lokalen, für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevanten Wirkung bestimmen. Ergebnisse einer im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführten Systemstudie (Nilson et al. 2020, Schade et al. 2020) zeigen, wie wichtig eine möglichst genaue Darstellung der Wattgebiete sowie der flachen Bereiche (bis zur 20 m-Tiefenlinie) ist. Im BMVI-Expertenetzwerk wird daher ein hochaufgelöstes kleinräumigeres Modell verwendet, um die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Deutsche Bucht und die angrenzenden Ästuare abzuschätzen.

Im Allgemeinen verstärkt ein Meeresspiegelanstieg die Gezeitenströme in den Rinnen, die als Transportweg für den Sedimentaustausch zwischen Wattenmeer und offener Nordsee fungieren. Die Ergebnisse von Modelluntersuchungen im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks weisen darauf hin, dass in den Tiderinnen der Deutschen Bucht insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit zunimmt (Abbildung 2-11). Dadurch vergrößert sich das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit, sodass bestehende Flutstromdominanzen verstärkt und bestehende Ebbstromdominanzen abgeschwächt oder in Flutstromdominanzen umgewandelt werden. Ähnliches zeigen auch die Ergebnisse des Ressortforschungsprogrammes KLIWAS für die Ästuare (BMVI 2015b). Durch das vergrößerte Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit wird der Sedimenttransport ins Wattenmeer verstärkt, sodass die Watten grundsätzlich in der Lage sind, mit einem Meeresspiegelanstieg mitzuwachsen. Dies zeigt sich auch in der bisherigen Entwicklung des Wattenmeers.

Potenzielle externe Sedimentquellen für das Wachstum der Watten sind das Küstenvorfeld (sowohl in direkter Umgebung als auch über den Küstenlängstransport aus dem

niederländischen Küstenvorfeld) und die Inseln an der seeseitigen Grenze des Wattenmeers sowie Einträge aus dem Oberwasser der Flüsse. Mit zunehmender Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs werden auch innerhalb des Wattenmeers Sedimente umgelagert (z. B. von Rinne oder Ebbdelta auf das Watt). Die natürliche Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers ist jedoch begrenzt, sodass es trotz eines Wattwachstums zur Zunahme der mittleren Wassertiefe auf den heutigen Watten kommen kann und sich die Gesamtfläche der Watten verkleinert. Die Fähigkeit zur Anpassung variiert innerhalb des Wattenmeeres. Aus diesem Grund wird es regional zu unterschiedlichen Wattwachstumsraten kommen.

In einer Sensitivitätsstudie wurde neben verschiedenen Szenarien zum Meeresspiegelanstieg auch die Wirkung veränderter Topografien des Wattenmeers auf die Tidedynamik untersucht. Diese Topografieänderungen repräsentieren Szenarien zur morphologischen Reaktion des Wattenmeers auf jeweils spezifische Szenarien des Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert. Sie beruhen auf Erkenntnissen der bisherigen Forschung zum Thema (z. B. Becherer et al. (2018), Van Goor et al. (2003)). Die Topografieszenarien beinhalten ein Aufwachsen der Watten und eine Vertiefung der Rinnen im Bereich des Wattenmeers, wobei die Erhöhung der Watten stets geringer als der Meeresspiegelanstieg ist.

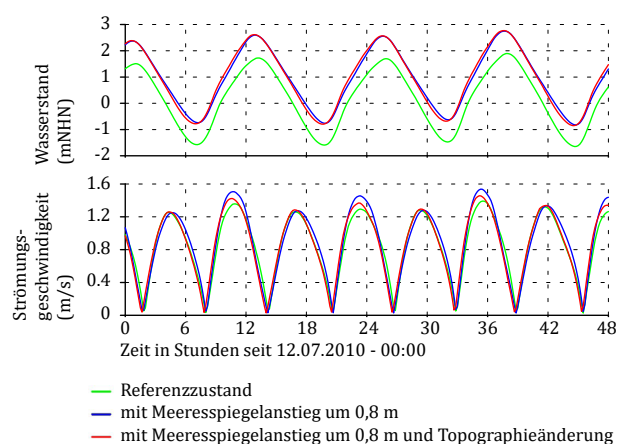


Abbildung 2-11: Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei Weser-km 82 (Leitdamm Robbenplate) im Referenzzustand (Stand 2010) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m.

In den Tiderinnen führen die Topografieänderungen im Bereich des Wattenmeers überwiegend zu einer Kompensation der Effekte des Meeresspiegelanstiegs. So wird eine infolge des Meeresspiegelanstiegs verstärkte Flutstromdominanz wieder abgeschwächt bzw. eine infolge des Meeresspiegelanstiegs abgeschwächte Ebbstromdominanz wieder verstärkt (Abbildung 2-11). Auf den Watten ist sowohl der Effekt des Meeresspiegelanstiegs als auch der Effekt der Topografieänderungen deutlich heterogener als in den Rinnen. Dennoch werden auch hier die Effekte des Meeresspiegelanstiegs überwiegend kompensiert. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die Morphologie des Wattenmeers bei Meeresspiegelanstieg im Falle der angenommenen Topografieänderungen näher an einem hydro-morphologischen Gleichgewicht befindet als im Fall einer unveränderten Morphologie. Da die Morphologie des Wattenmeers stets ein Gleichgewicht anstrebt, unterstreicht dieses Ergebnis die Plausibilität des angenommenen Topografieszenarios in qualitativer Hinsicht (Erhöhung der Watten). Aufgrund der vielen Unsicherheiten bezüglich der Frage, wie sich die Topografie des Wattenmeers im zukünftigen Klima entwickeln wird, besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Im Gegensatz zu den Tidekennwerten der Strömungsgeschwindigkeit sind die Änderungen der Tidekennwerte des Wasserstands (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub) infolge des Meeresspiegelanstiegs nicht nur regional unterschiedlich, sondern generell weniger systematisch. Diese Änderungen werden infolge der Topografieänderungen im Wattenmeer teilweise gedämpft, teilweise aber auch verstärkt.

Die Änderungen in der Strömungsgeschwindigkeit sind insbesondere für das Sedimentmanagement der Seehafenzufahrten von Relevanz, während die Änderungen der Wasserstände für den Küstenschutz sowie die Entwässerung des Hinterlands (zum Beispiel des Nord-Ostsee-Kanals) relevant sind. Generell liegen die Änderungen infolge der Topografieänderung im Wattenmeer in der gleichen Größenordnung wie die Änderungen infolge des Meeresspiegelanstiegs selbst, wobei die Effekte lokal stark variieren. Dadurch wird deutlich, dass mögliche Topografieänderungen im Wattenmeer berücksichtigt werden sollten, um den Nettoeffekt eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik genauer abzuschätzen.

2.8 Wind, Stürme und Sturmfluten

Änderungssignale beim Wind sind im Vergleich zur natürlichen Variabilität generell recht klein – sowohl im Binnenland als auch an den deutschen Küsten. In der südlichen Nordsee sowie in der Ostsee weisen die regionalen gekoppelten Klimamodellsimulationen auf zukünftig häufigere Sturmereignisse hin. Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität des Windes ergeben sich aus diesen Auswertungen keine Rückschlüsse auf Änderungen für Sturmflutereignisse. Ausführlichere Beschreibungen zu den durchgeführten Analysen und Ergebnissen sind in den Endberichten der Schwerpunktthemen *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020), *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020) und *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) nachzulesen.

Sehr hohe Windgeschwindigkeiten können über verschiedene Wirkungspfade den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland beeinflussen. Sturmfluten können Überschwemmungen und Beschädigungen der Infrastruktur mit sich bringen, starke Seitenwinde den Schienen und Straßenverkehr in exponierten Lagen gefährden und entwurzelte Bäume temporäre Sperrungen von Schienen- und Straßenabschnitten nach sich ziehen.

Hohe Windgeschwindigkeiten können sowohl großräumig auf synoptischer Skala auftreten, zum Beispiel bei Stürmen und ausgeprägten Kaltfronten, aber auch auf lokaler Ebene im Zusammenhang mit Gewittern oder hochsommerlichen Konvergenzzonen. Während großräumige, an Wetterfronten gebundene Stürme auch von weniger fein aufgelösten Modellen gut simuliert werden können, ist das lokale Auftreten von Starkwinden bei Gewittern immer noch sehr begrenzt simulierbar und wird oftmals unterschätzt.

Für den Binnen- und Küstenbereich Deutschlands werden daten- und methodenbedingt unterschiedliche Datensätze zur Bewertung der Änderungssignale windgebundener Kennwerte verwendet. Für den Binnenbereich werden zur Analyse von Starkwindereignissen zusätzlich zu den Daten des Klimaprojektionsensembles mit 5 km Gitterweite auch Daten eines hochaufgelösten, konvektionserlaubenden Klimamodelllaufs mit COSMO-CLM mit 2,8 km Gitterwei-

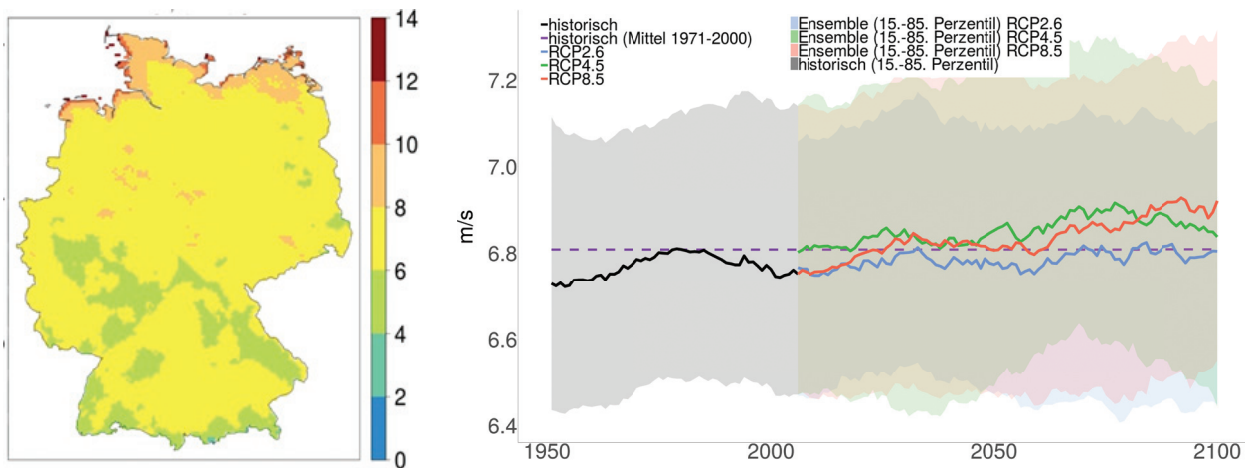


Abbildung 2-12: Räumliche Verteilung (Median des regionalen Klimaprojektionsensembles im Bezugszeitraum, links) und zeitliche Entwicklung (30-jähriges gleitendes Mittel für 1951–2100, rechts) des 98. Perzentils täglicher Windgeschwindigkeiten (m/s). Die Zeitreihendarstellung erfolgt für drei Klimaszenarien (Klimaschutzszenario RCP2.6, moderates Szenario RCP4.5 und Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5). Der Mittelwert für den Bezugszeitraum ist durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.

te verwendet. Dieses Modell ermöglicht neben der Analyse der mittleren stündlichen Windgeschwindigkeit auch die Analyse von Windböen, die über eine zusätzliche Parametrisierung berechnet werden.

Die verfügbaren Klimaprojektionen des Ensembles zeigen über Deutschland nur geringe Änderungen der hohen Windgeschwindigkeiten im 21. Jahrhundert (Abbildung 2-12). Die Bandbreite des Ensembles zeigt eine hohe dekadische Variabilität.

Für keines der analysierten Klimaszenarien wird ein Trend für hohe Windgeschwindigkeiten in der Zukunft sichtbar. Im Gegensatz zu vielen anderen bereits beschriebenen Klimakenngrößen ist also keine deutliche Differenzierung der Entwicklung unter den unterschiedlichen Szenarienannahmen zu erkennen. In der zusätzlichen Klimasimulation mit 2,8 km Gitterweite mit COSMO-CLM kommt erwartungsgemäß die räumliche Differenzierung (Abbildung 2-13) viel deutlicher zum Vorschein als im größeren Klimaprojektionsensemble (Abbildung 2-12). Eine Trendaussage ist hier allerdings schwierig, da bisher nur ein einzelner Modelllauf vorliegt.

Auch für den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur an den deutschen Küsten sowie den Meeresgebieten von Nord-

und Ostsee kann der Wind eine wichtige Rolle spielen. Die durch starken auflandigen Wind hervorgerufenen Sturmfluten können zu Überflutungen führen und die Erosion der Küsten fördern. Zudem sind die mittleren Windgeschwindigkeiten an den Küsten im Vergleich zum Binnen-

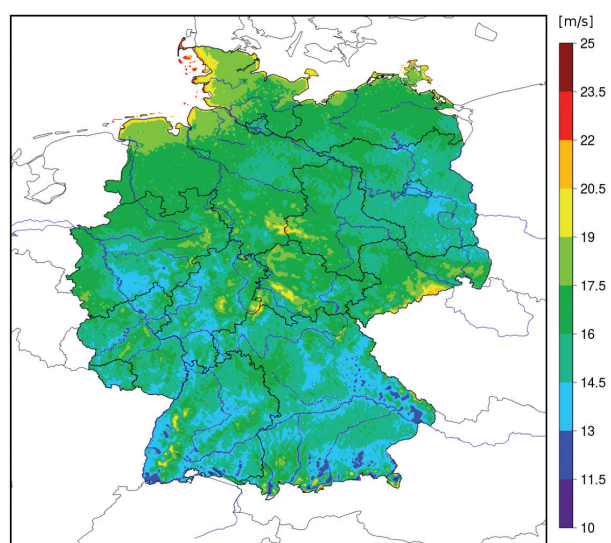


Abbildung 2-13: Karte des 98. Perzentils der Windböen (in m/s) im Bezugszeitraum aus Simulationen des COSMO-CLM mit 2,8 km Gitterweite.

land (mit Ausnahme der Berge) relativ hoch, sodass auch die Windgeschwindigkeiten bei Sturm an der Küste höher sind als im Binnenland.

Über der Nord- und Ostsee wurden Extremwindgeschwindigkeiten als Sturmproxy für sieben Seegebiete anhand von Projektionen zweier gekoppelter Atmosphäre-Ozean-Modelle untersucht (Ganske 2019, Hänsel et al. 2020a). Da beide Modelle Sturmwindgeschwindigkeiten unterschätzen, ist die Beaufortskala zur Bestimmung von Sturmklimatologien nicht geeignet. Stattdessen wurde die 2 %-Fraktion der höchsten Windgeschwindigkeiten der regionalen Geschwindigkeitsverteilungen im *Bezugszeitraum* als Extremwind definiert, so dass sich die Schwellwertgeschwindigkeiten (98. Perzentil) regional unterscheiden.

Liegt die zum 98. Perzentil gehörige Geschwindigkeit einer künftigen Geschwindigkeitsverteilung oberhalb/unterhalb des Schwellwerts für Extremwinde, nimmt deren Intensität zu/ab. Gleichzeitig und gleichsinnig nimmt auch die relative Häufigkeit von Extremwinden zu/ab, denn der zur Definition von Extremwinden verwendete Schwellwert ist dann einem geringeren/höheren als dem 98. Perzentil zugeordnet. Mithin stellen Intensität und Häufigkeit äquivalente

Aspekte künftiger Extremwindfraktionen dar, so dass nur Änderungen der relativen Häufigkeit mitgeteilt werden.

Die relative Häufigkeit von Extremwinden weist im untersuchten Zeitraum 1961–2100 eine hohe Variabilität von Jahr zu Jahr auf, so dass Langzeittrends nur für die südöstliche Nordsee (SO) sowie die zentrale (ZO) und nördliche Ostsee (MB) festgestellt wurden. Auf Basis von acht Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* mit den beiden gekoppelten Klimamodellen steigen die klimatologischen relativen Häufigkeiten von Extremwinden in der *nahen* und *fernen Zukunft* in allen sieben Seegebieten mehrheitlich an (Abbildung 2-14). Signifikante Anstiege ergaben sich für die *ferne Zukunft* in der südöstlichen Nordsee (SO) und der Ostsee (ZO & MB); die relative Häufigkeit von Extremwinden erhöht sich hierbei im Median auf 2,4 % (SO), 2,5 % (ZO) bzw. 2,7 % (MB). Für die nördliche Nordsee (NW & NO) lieferten die Projektionen nur uneinheitliche Änderungen. Geringe Änderungssignale ergaben sich auch für alle Simulationen unter den Annahmen des *moderaten Szenarios* und des *Klimaschutzszenarios*.

Explizite Untersuchungen zu Sturmfluthäufigkeiten wurden punktuell für Cuxhaven durchgeführt. Signifikante Änderungen waren aufgrund der hohen natürlichen Vari-

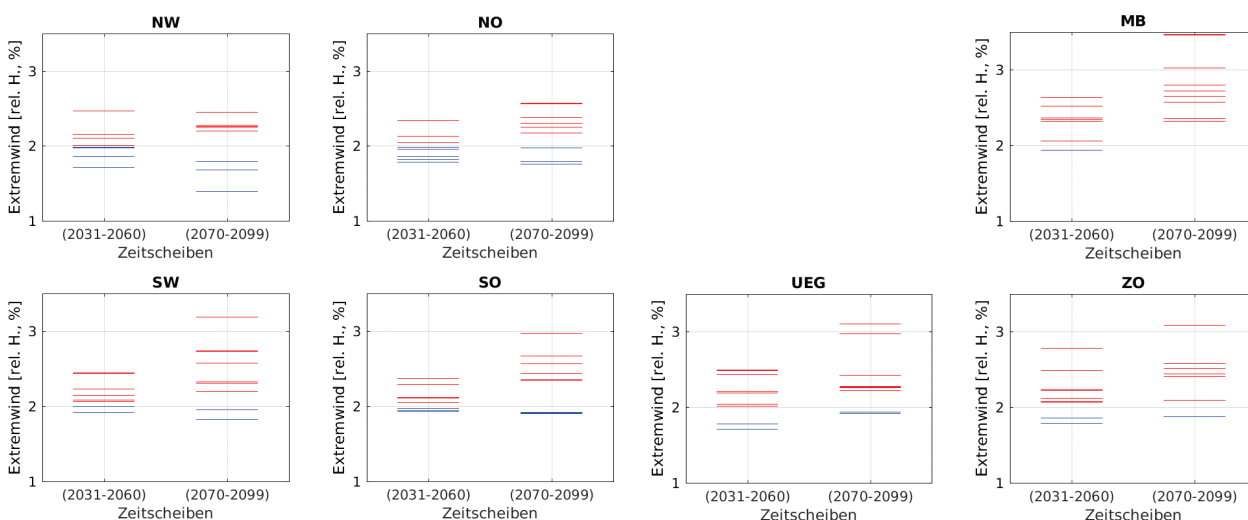


Abbildung 2-14: Relative Häufigkeiten von Extremwindgeschwindigkeiten für die nordwestliche (NW), nordöstliche (NO), südwestliche (SW) und südöstliche Nordsee (SO), die nördliche (MB, Meerbusen) und zentrale Ostsee (ZO) sowie das Übergangsbereich (UEG) in der *nahen* (jeweils links) und *fernen Zukunft* (rechts). Die Ergebnisse beruhen auf 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* mit 2 gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen. Die relative Häufigkeit von Extremwindgeschwindigkeiten im *Bezugszeitraum* wurde für alle Seegebiete zu 2 % festgelegt. Projizierte Zunahmen sind rot dargestellt, Abnahmen blau.

abilität nicht feststellbar. Ähnliche Ergebnisse lieferten die Analysen der A1B-Szenarioläufe im Rahmen von KLIWAS (Bülow et al. (2014), Kapitel 10.2.4). Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass heutige Sturmflutwasserstände im Zuge des Meeresspiegelanstiegs künftig bei geringeren Windgeschwindigkeiten und folglich häufiger eintreten werden.

2.9 Änderungen der Wetterlagen

Im *Weiter-wie-bisher-Szenario* nehmen Wetterlagen mit westlichen Anströmungsrichtungen zu, wodurch an den Küsten Probleme bei der Entwässerung verursacht werden können. Östliche Wetterlagen zeigen hingegen abnehmende Trends. Zusätzliche Informationen und Analysen zu Wetterlagenveränderungen über der Nordsee sind im Endbericht des Schwerpunktthemas *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) verfügbar.

Wetterlagen werden aus dem großräumigen Luftdruckfeld ermittelt und beschreiben somit die großräumige Zirkulation. Sie geben damit einen ersten Überblick über Wind und mögliche Niederschläge. Im BMVI-Expertenetzwerk wurde zwei verschiedene Methoden zur Klassifizierung von Wetterlagen verwendet: (1) die objektive Wetterlagenklassifikation mit Schwerpunkt des Klassifikationsgebietes über Zentraldeutschland des DWD (Bissolli und Dittmann 2001) und (2) die Lamb-Wetterlagenklassifikation (Lamb 1972) für die Auswertungen im Küstenbereich mit dem Schwerpunkt Nordsee.

Die aus der Analyse resultierenden Wetterlagen wurden für Methode 1 in fünf Klassen für die Anströmrichtung (XX = undefiniert, NE = Nordost, NW = Nordwest, SE = Südost, SW = Südwest) aggregiert und für Methode 2 in sechs

verschiedene Wetterlagenklassen (A = Antizyklonal, C = Zyklonal, NE = Nordost, NW = Nordwest, SE = Südost, SW = Südwest). Ausgewertet wurden für den Binnenbereich vier verschiedene globale Klimamodelle²¹ für den Zeitraum 1951–2100 und für den Küstenbereich zwei regionale gekoppelte Modelle²² für den Zeitraum 1961–2100 jeweils für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*.

Trendanalysen zeigen in beiden Auswerteverfahren für einige Modelle signifikante Änderungen für westliche Wetterlagenklassen. Beispielsweise nimmt die Wetterlage Nordwest im Küstenbereich zu (s. Abbildung 2-15, links), während im Binnenbereich vermehrt signifikant positive Trends für die Anströmrichtungen Nordwest und Südwest projiziert werden (s. Abbildung 2-15, rechts). Eine Abnahme findet sich für die Wetterlage Südost im Küstenbereich, auch zeigen die östlichen (Nordost und Südost) und undefinierten Anströmrichtungen im Binnenbereich häufig statistisch signifikante abnehmende Trends. Insgesamt kann, trotz unterschiedlicher Wetterlagen-Klassifikationssysteme und Datengrundlagen für Küsten und Binnenland, die Zunahme westlicher und die Abnahme östlicher Anströmungsrichtungen für die Zukunft durch beide Methoden weitgehend bestätigt werden.

Zukünftig häufigere Wetterlagen über der Nordsee aus Nord-West könnten angespannte Entwässerungssituationen an der Nordseeküste zur Folge haben, da sie u. a. die Außenwasserstände erhöhen und vermehrt niederschlags-trächtige Tiefdruckgebiete über den Atlantik heranbringen. Dementsprechend fallen ein hoher Vorfeuchte-Index im Bereich des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) und eine NW-Wetterlage häufig zusammen, was dazu führt, dass mehr Wasser vom Umland in den Kanal abfließt und dort die Wasserstände erhöht, da das überschüssige Wasser nicht mehr in die Elbe abgeleitet werden kann (siehe Abschnitte 3.6.2 und 4.4.4).

²¹Für den Binnenbereich werden die Globalmodelle CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR und NorESM1-M ausgewertet (z. T. mit mehreren Realisierungen).

²²Für den Küstenbereich werden die regionalen gekoppelten Modelle NEMO/RCA4 und MPI-OM/REMO verwendet.

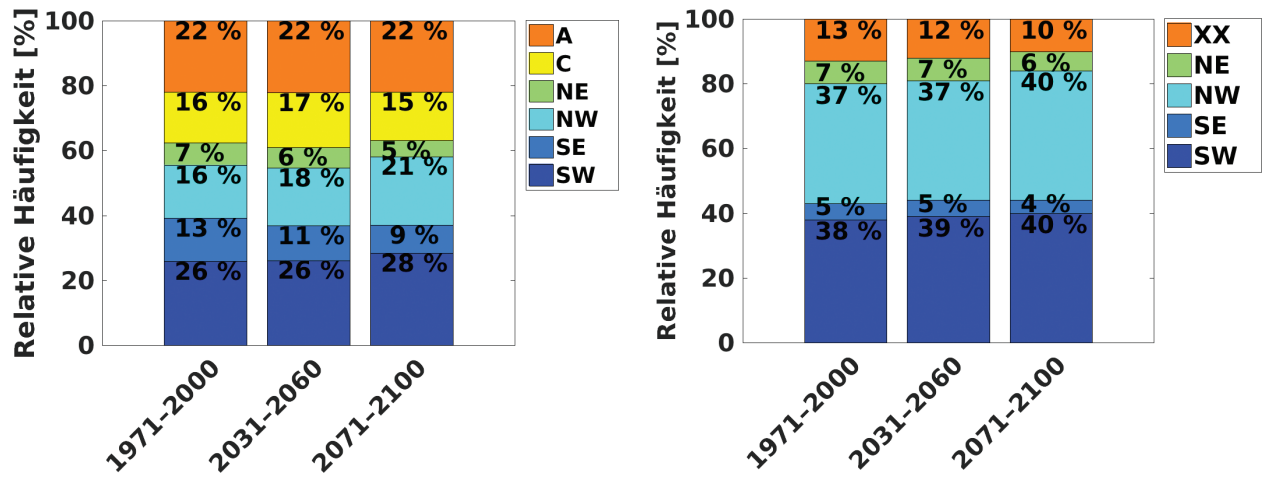


Abbildung 2-15: Mittlere Häufigkeiten von sechs Wetterlagen-Klassen über der Nordsee, hier beispielhaft für einen Lauf der Modellkoppelung MPI-OM/REMO (links), und von fünf Wetterlagen-Klassen für den Binnenbereich Deutschlands, hier beispielhaft für das Globalmodell MPI-ESM-LR (Mittelwert aus drei Realisierungen, rechts), für die jeweiligen Zeitscheiben des Bezugszeitraums, der nahen und fernen Zukunft, angetrieben im Weiter-wie-bisher-Szenario.

3 Klimawirkungen - Wie stark und wo ist das deutsche Verkehrssystem durch Klimawandel und Extremereignisse betroffen?

- Die Analyse und die Einschätzung der Betroffenheit des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur durch den Klimawandel und ggf. häufiger auftretende Witterungsextreme werden durch das BMVI-Experimentennetzwerk basierend auf abgestimmten Datensätzen und Methoden vorgenommen. Dies ermöglicht eine über die drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße hinweg einheitlichere Bewertung als die bisherigen verkehrsträgerspezifischen Vorgehensweisen.
- Ein Baustein dieser verkehrsträgerübergreifenden Integrationsarbeit ist das Konzept einer gemeinsamen Klimawirkungsanalyse. Auf dieser Grundlage wurde in der aktuellen Phase die heutige und zukünftig potenziell veränderte Exposition von Schiene, Straße und Wasserstraße gegenüber ausgewählten klimatischen Einflüssen und Naturgefahren untersucht.
- Die Verkehrsinfrastruktur ist bereits heute von meteorologischen und hydrologischen/hydraulischen Einflüssen betroffen. Die Zukunftsprojektionen zeigen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine Zunahme von Gefährdungen durch Hochwasser, Hangrutschungen und Niedrigwasser. Auch der Betrieb des Nord-Ostsee-Kanals und wichtige Wassergüteparameter werden negativ beeinflusst. Für die Exposition gegenüber Stürmen liegen keine robusten Änderungssignale vor.
- Die Exposition des Verkehrssystems gegenüber den betrachteten klimatischen Einflüssen nimmt – mit gewissen Schwankungen aufgrund der natürlichen (multi-dekadischen) Variabilität – generell zum Ende des 21. Jahrhunderts zu. Die Annahme des *Klimaschutzszenarios* oder des *moderateren Szenarios* führt – soweit in den einzelnen Betrachtungen umgesetzt – zu deutlich geringeren Anstiegen der Exposition bis hin zur Bewahrung der Status-quo-Bedingungen.
- Meteorologische bzw. hydrologische Ereignisse, die potenziell mehrere Verkehrsträger gleichzeitig beeinträchtigen, z. B. Flusshochwasserereignisse, sind i. d. R. mit besonders hohen Kosten pro Tag verbunden. Besonders lang andauernde Ereignisse, z. B. niedrigwasserbedingte Verkehrseinschränkungen, führen potenziell zu besonders hohen Transportkosteneffekten. Hinzu kommen ggf. Folgekosten, z. B. aufgrund der veränderten Wettbewerbssituation der betroffenen Unternehmen (hier nicht eingerechnet).
- Die wirtschaftliche Bedeutung einer möglicherweise klimawandelbedingt eingeschränkten Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur hängt u. a. vom Verkehrsaufkommen ab. Bei der Wasserstraße sind der Rhein, der Nord-Ostsee-Kanal und die Zufahrt zum Hamburger Hafen prioritär. Bei der Straße treten die Verdichtungsräume im Rhein-Main-Neckar-Gebiet, in der Region Köln/Bonn bis zur Metropolregion Rhein-Ruhr und in den großen Ballungsräumen (z. B. München, Nürnberg, Hannover und Hamburg) als zu priorisierende Gebiete hervor. Für die Schiene weisen Strecken in den TEN-V-Korridoren besonders große Zugzahlen auf.
- Das erhobene Datenmaterial erlaubt vielfältige Analysen und Bewertungen; es ist jedoch nicht vollumfänglich für alle Klimawirkungen mit Relevanz für das Verkehrssystem vorhanden. Insbesondere bei den häufig auf der lokalen Skala auftretenden Extremen (Starkniederschlag/Sturzfluten sowie Stürme) bestehen erhebliche Modellunsicherheiten. Zudem fehlt es an strukturierten Informationen zur Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur auf Objekt- und Streckenebene.
- Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalysen zeigen, dass zukünftig die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur – und somit die Verlässlichkeit des Verkehrs – voraussichtlich häufiger beeinträchtigt sein wird als in der Vergangenheit. Daher ist eine Anpassung an veränderte zukünftige Klimabedingungen zu erwägen.

3.1 Einleitung

Die derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen geben Anlass, mögliche Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr zu analysieren und zu bewerten. Dieser Schritt nimmt eine wichtige Rolle bei der sicheren und nachhaltigen Entwicklung leistungsfähiger Verkehrssysteme in Deutschland ein. Dies wird im BMVI-Expertennetzwerk mit der entwickelten Klimawirkungsanalyse (Abschnitt 3.2) umgesetzt. Die in Vorgängerprojekten wie KLIWAS und AdSVIS entwickelten Konzepte und Methoden zur Bewertung von Klimawirkungen werden im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks weiterentwickelt und in konsistenter Weise auf die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße angewendet. Durch diese einheitliche Herangehensweise 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.

Wesentliche Bausteine bei der Bewertung von Klimawirkungen im BMVI-Expertennetzwerk sind dementsprechend

- (a) verkehrsträgerübergreifend kohärente Szenarien zu den zukünftigen meteorologischen, ozeanografischen und hydrologischen Rahmenbedingungen und
- (b) eine einheitliche Vorgehensweise, diese in ihrer spezifischen Wirkung auf unterschiedliche Verkehrsträger zu bewerten.

Basierend auf den in Kapitel 2 vorgestellten wesentlichen Erkenntnissen zum Klimawandel und zur Entwicklung von Extremen werden nachfolgend ausgewählte Erkenntnisse zur Betroffenheit der verschiedenen Verkehrsträger durch

Hochwasser (3.3.1 und 3.4.2), Sturm (3.3.2), Hangrutschung (3.3.3), Niedrigwasser (3.4.1) sowie ausgewählte Aspekte mit Bezug auf managementrelevante ökologische Aspekte der Wasserstraßen (3.4.2) und spezifische seeschiffahrtsbezogene Aspekte (3.4.4 und 3.6.2) dargestellt. Dabei werden die Auswirkungen des Klimawandels in Größen gefasst, die für Planungsvorgänge relevant sind.

Nicht alle Änderungen, die aus dem Klimawandel erwachsen, wirken gleichermaßen auf alle Verkehrsträger und an allen Orten. Beispielsweise betreffen Niedrigwassersituationen in erster Linie die Binnenschiffahrtsstraßen, während andere Verkehrsträger im Niedrigwasserfall ggf. sekundär durch mögliche Verkehrsverlagerungen betroffen sind. Umgekehrt sind Hangrutschungen oder auch Starkregenereignisse vor allem für die Verkehre auf Straße und Schiene relevant. Die Einschränkungen der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur sind vor allem an Streckenabschnitten relevant, deren Verkehrsbelastung und Bedeutung besonders hoch sind. Entsprechende Bewertungen erfolgen im Rahmen der Kritikalitätsanalyse (Abschnitt 3.5).

Da die zukünftige Entwicklung der klimatischen Rahmenbedingungen gewissen Unsicherheiten unterliegt (s. Abschnitt 2.1), ist auch die Bewertung der Wirkung dieser Klimaänderungen auf die Verkehrsinfrastruktur mit Unsicherheiten verbunden. Es ist daher 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 unter Verwendung der aktuellen Szenarien des Weltklimarates und qualitätsgeprüften Daten abbildet. Dieser Weg muss in den nächsten Jahren weiter beschritten werden.

3.2 Klimawirkungsanalyse

Der im BMVI-Expertenetzwerk entwickelte methodische Ansatz der Klimawirkungsanalyse bietet einen geeigneten Rahmen, um die Folgen des Klimawandels verkehrsträgerübergreifend nach einem einheitlichen Vorgehen zu analysieren. Dabei werden Veränderungen der *Exposition* der Verkehrsinfrastruktur und des Verkehrs unter Berücksichtigung der spezifischen *Sensitivität* gegenüber unterschiedlichen klimatischen Einflüssen (bzw. dadurch ausgelöster Wirkungsketten) und der *Kritikalität* (Bedeutung) der betrachteten Strecken bewertet. Somit können Prioritäten bzgl. der Befassung mit den Folgen des Klimawandels und bzgl. der Anpassungsmaßnahmen im Bundesverkehrswegenetz gesetzt werden. Die entsprechenden Ergebnisse der Analysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße sind in den nachfolgenden Abschnitten 3.3 bis 3.5 sowie im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) zusammengestellt.

Netzbezogene Analysen sowie strecken- und objektspezifische Fallstudien zu den Wirkungspotenzialen klimatischer Einflüsse sind für Betreiber und Eigentümer von Verkehrsinfrastrukturen eine wichtige Informations- und Planungsgrundlage im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel. Diese unter dem Begriff der Klimawirkungsanalyse zu fassenden wissenschaftlichen Untersuchungen besitzen für verschiedene Fragestellungen klimaangepasster Verkehrs- und Infrastrukturplanung eine hohe praktische Relevanz. Klimawirkungsanalysen bieten zum einen die Möglichkeit, relevante klimatische Einflüsse auf den Verkehrssektor zu identifizieren und ursächlich nachzuvollziehen. Zum anderen dienen sie als methodisches Werkzeug, um die Betroffenheit der Verkehrsträger gegenüber veränderten Klimabedingungen abzuschätzen. Dabei lassen sie Rückschlüsse auf die zukünftige Verfügbarkeit der Infrastruktur zu und beziehen die Bedeutung von Verkehrswegen in die Betrachtung ein. Klimawirkungsanalysen leisten damit einen Beitrag zur Ermittlung und Priorisierung des Anpassungsbedarfs an den Klimawandel.

Im Rahmen von Themenfeld 1 wurden Klimawirkungsanalysen für die Bundesverkehrswege entwickelt und durchgeführt. Es wurden Erkenntnisse darüber gewonnen, wo und wie stark die Bundesverkehrswege zukünftig von Änderungen meteorologischer, hydrologischer bzw. ozeanografischer Rahmenbedingungen betroffen sein können. Mit den Bundesfernstraßen, den Bundesschienenwegen und den Bundeswasserstraßen sind drei verschiedene Verkehrsträger in den Analysen zu berücksichtigen. Für diese Verkehrsträger werden sieben relevante Wirkungszusammenhänge analysiert und bewertet (Tabelle 3-1). Die Relevanz besteht darin, dass diese Wirkungszusammenhänge klimatisch beeinflusst werden und somit von Klimaänderungen potenziell betroffen sind. Die Klimawirkungsanalysen lassen sich differenzieren in Analysen auf Basis eines methodischen Rahmens (s. Abschnitte 3.3.1 bis 3.4.2) und einer speziellen Form der Wirkungsanalyse, die als Stresstest bezeichnet werden kann und in einer Fallstudie Anwendung findet (s. Abschnitt 3.6.1).

Der den Klimawirkungsanalysen zugrundeliegende methodische Rahmen wurde in Anlehnung an die sektorenübergreifenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) entwickelt. Um an die sektorenübergreifenden Analysen anschlussfähig zu sein, wurden die Begriffe und Konzepte der Vulnerabilitätsanalyse 2015 (Buth et al. 2015), des Leitfadens für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (Buth et al. 2017) und der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 (in Vorbereitung) berücksichtigt und soweit wie möglich übernommen. Darüber hinaus basiert der methodische Rahmen auf Begriffen, Konzepten und Erkenntnissen aus vorangegangenen Forschungsprojekten, wobei vor allem das Forschungsprojekt "RIVA Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels" (Korn et al. 2017) zu nennen ist.

Die Klimawirkungsanalysen erfolgen im ersten Schritt zu meist differenziert nach den Verkehrsträgern (verkehrsträgerspezifisch) für bestimmte klimatische Einflüsse sowie durch diese Einflüsse potenziell ausgelöste Wirkungsketten. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Verkehrsträgern herzustellen, basieren die Klimawirkungsanalysen auf einem methodischen Rahmen, der verkehrsträgerüber-

greifend Anwendung findet und die Struktur sowie den Ablauf der Analysen vereinheitlichen soll. Die Funktion des methodischen Rahmens besteht darin, die einzelnen Teilschritte aufzuzeigen, deren Zielsetzung inhaltlich zu definieren und die Verknüpfung zwischen ihnen herzustellen. Zugleich schafft der methodische Rahmen ein einheitliches Begriffsverständnis, was für die Vergleichbarkeit der Analysen von zentraler Bedeutung ist. Die methodische Vergleichbarkeit der Analysen für die einzelnen Verkehrsträger erlaubt eine Zusammenführung der Analysen für die Bundesverkehrswege und entsprechende verkehrsträgerübergreifende Betrachtungen.

Ziel der Klimawirkungsanalysen ist es, Streckenabschnitte in den Netzen der Verkehrsträger zu identifizieren, die heute oder in Zukunft potenziell vom Klimawandel und seinen Folgen betroffen sein könnten (Exposition). Im nächsten Schritt sollen Streckenabschnitte identifiziert werden, die aufgrund ihrer Eigenschaften anfällig gegenüber potenziellen Einwirkungen sind (Sensitivität). Schließlich verfolgen die Analysen das Ziel, die Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten zu bewerten. Die Kritikalitätsbewertung erfolgte dabei vor allem in Bezug auf die Verkehrsbelastung. Alternative Bezüge (z. B. Güterwert, Verbindungsfunktion oder auch ökologische Kriterien) sind denkbar (vgl. hierbei Schlussbericht des Schwerpunktes *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) und Abschnitt 3.5.3).

Für die Ermittlung von Exposition, Sensitivität und Kritikalität als den drei Zielgrößen von Klimawirkungsanalysen auf Basis des methodischen Rahmens werden folgende Teilanalysen durchgeführt: 1) Expositionsanalyse, 2) Sensitivitätsanalyse und 3) Kritikalitätsanalyse. Jede dieser drei Teilanalysen kann als eigenständige Analyse behandelt und ausgewertet werden. Eine vollständige Analyse und Bewertung von Klimawirkungen setzt jedoch die Durchführung und inhaltliche Verknüpfung aller Teilanalysen voraus. Da sich hierfür Geoinformationssysteme (GIS) besonders eignen, bezieht sich das beschriebene Vorgehen auf Klimawirkungsanalysen, die zumeist GIS-basiert durchgeführt werden.

Der hier vorgestellte Anwendungsbereich des methodischen Rahmens liegt vor allem auf der Netz- bzw. Teilnetzebene sowie der Ebene von Streckenabschnitten. Potenziell umfasst sein Anwendungsbereich jedoch auch die

Objektebene. In den Klimawirkungsanalysen werden somit verschiedene Betrachtungsebenen angesprochen und teilweise miteinander verknüpft. Das ist einerseits dann der Fall, wenn Klimawirkungen streckenabschnittsbezogen für Netze bzw. Teilnetze analysiert und bewertet werden. Andererseits trifft es auf den "Stresstest Mittelrhein" (s. Abschnitt 3.6.1) zu, der verkehrliche Wirkungspotenziale aus der Nichtverfügbarkeit einzelner Streckenabschnitte nicht nur netzbezogen, sondern auch verkehrsträgerübergreifend betrachtet. Wie diese Fallstudie verdeutlicht, besitzt zudem die Korridorebene, die Verkehrsachsen eines oder mehrerer Verkehrsträger umfasst, eine zentrale Bedeutung für die Wirkungsbetrachtungen im Rahmen von Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.

Die Klimawirkungsanalysen erfolgen im Wesentlichen für die im Abschnitt 2.1 definierten Zeiträume der *nahen Zukunft* (2031–2060) und der *fernen Zukunft* (2071–2100). Zum Vergleich wird der Zeitraum 1971–2000 als *Bezugszeitraum* für die Berechnung von Änderungssignalen herangezogen. Demgegenüber basiert der Stresstest Mittelrhein (s. Abschnitt 3.6.1) auf konstruierten Extremszenarien, die sich diesen Zeiträumen nicht explizit zuordnen lassen. Vielmehr ergibt sich deren Zeitbezug aus der verkehrlichen Wirkungsbetrachtung, die auf den Datengrundlagen und Methoden sowie den Betrachtungsjahren 2010 und 2030 der Bundesverkehrswegeplanung (BMVI 2016) basiert. Ähnliches gilt für die Kritikalitätsanalyse, die sich ebenfalls auf die Datengrundlagen und die Betrachtungsjahre der Bundesverkehrswegeplanung stützt, wenngleich für den Verkehrsträger Straße 2015 anstatt 2010 als Bezugsjahr gewählt wurde.

Den Klimawirkungsanalysen liegt ein indikatorenbasierter Ansatz zugrunde. Das bedeutet, dass Indikatoren dazu verwendet werden, die Exposition, Sensitivität und Kritikalität von Streckenabschnitten zu ermitteln. Tabelle 3-1 fasst die in der Expositionsanalyse verwendeten Indikatoren für die betrachteten klimatischen Einflüsse und damit in Zusammenhang stehenden Folgewirkungen zusammen. Die Sensitivitätsanalyse bezieht sich auf Eigenschaften der Infrastruktur und erfordert Indikatoren, anhand derer sich die Anfälligkeit von Streckenabschnitten wirkungsspezifisch operationalisieren lässt. Bislang beschränken sich die Sensitivitätsanalysen auf die Aspekte Sturmwurf/Schiene (s. Abschnitt 3.3.2) sowie das Niedrigwasser/Wasserstraße

Tabelle 3-1: Betrachtete klimatische Einflüsse und Wirkungen inklusive ihrer Operationalisierung anhand von Indikatoren. Berücksichtigt sind dabei nur jene klimatischen Einflüsse und Wirkungen, zu denen in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks Analysen durchgeführt wurden.

Klimatischer Einfluss bzw. dadurch veränderte Rahmenbedingung	betroffener Verkehrsträger	Unterkategorie	aktuelle Gefährdung (z. T. unter Berücksichtigung von Aspekten der Sensitivität)	Bewertung von Änderungen in der zukünftigen Gefährdung	
				klimatischer Einfluss	genutzte Kenngröße (basierend auf Projektionsdaten)
(Fluss-) Hochwasser	Straße, Schiene	Hochwasserabfluss	Überflutungsfläche HQ ₁₀₀ gemäß Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer	Niederschlag, verdunstungssteuernde Größen (Temperatur, Strahlung, Wind)	Änderung der Jährlichkeit eines HQ ₁₀₀
	Wasserstraße	Hochwasserabfluss	Anzahl Tage über HSQ (basierend auf Beobachtungsdaten)		Anzahl der Tage über HSW
	Wasserstraße, NOK	angespannte Entwässerungssituationen	Anzahl der Tage über kritischem Wasserstand NOK	Meeresspiegelanstieg, lokale Landsenkung, Hydrologie des Einzugsgebietes (Zufluss)	Außenwasserstände, Kanalwasserstand, Zufluss bzw. Niederschlagsindizes
Sturm	Straße, Schiene	Sturmwurf	Vegetation (Laubwald, Nadelwald, Mischwald, Baumreihen)	Windböen	Windgeschwindigkeit des 98. Perzentils
Gravitative Massenbewegung	Straße, Schiene	gravitative Massenbewegungen (allgemein)	ingenieurgeologische Gefährdung	Starkregen	Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe von > 20 mm
Niedrigwasser	Wasserstraße	Niedrigwasserabfluss	Anzahl Tage unterhalb des GIQ (basierend auf Beobachtungsdaten)	Frost-Tau-Wechsel	Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel
Wassergüte	Wasserstraße	Wassertemperatur	Anzahl Tage oberhalb 25 °C und 28 °C (basierend auf Gegenwärtssimulationen)	Niederschlag	Jahresniederschlag sowie mittlerer Winter- und Sommerniederschlag
Sturmflut	Schiene, Straße, Wasserstraße	Überflutung	Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer	Niederschlag, verdunstungssteuernde Größen (Temperatur, Strahlung, Wind)	Anzahl Tage unterhalb des GIQ
Tidedynamik	Wasserstraße	Sedimentdynamik, Wassertiefe	Baggermengen	Niedrigwasser, Lufttemperatur	Anzahl Tage oberhalb 25 °C und 28 °C
				Meeresspiegelanstieg, lokale Landsenkung	Wasserstände (Scheitelwasserstand), Dauer hoher Wasserstände
				Meeresspiegelanstieg, Niederschlag, verdunstungssteuernde Größen (Temperatur, Strahlung, Wind)	Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten

(s. Abschnitt 3.4.1). Für die Operationalisierung der Kritikalität von Streckenabschnitten werden auf Verkehrs- bzw. Gütermengen bezogene Indikatoren sowie ein weiterer Indikator zum ökologischen Zustand bzw. ökologischen Potenzial von Wasserstraßenabschnitten verwendet (s. Abschnitt 3.5).

Der indikatorenbasierte Ansatz ist ein wesentlicher Bestandteil des methodischen Rahmens der Klimawirkungsanalyse. Um den in Grundzügen konzipierten Ansatz dahingehend weiterzuentwickeln, dass sich die Teilanalysen in ein einheitliches Bewertungssystem integrieren lassen, sind in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks (2020–2025) weitere Forschungsarbeiten notwendig. Die für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durchgeführten Teilanalysen zeigen erste Möglichkeiten auf, wie klimatische Einflüsse sowie damit zusammenhängende Auswirkungen netzbezogen analysiert und bewertet werden können. Zugleich machen sie aber auch deutlich, dass derzeit vor allem die Datenverfügbarkeit ein Hindernis darstellt, um Klimawirkungsanalysen auf der Netzebene für alle drei Teilanalysen vollständig durchzuführen. Schließlich ist zwingend zu beachten, dass netzbezogene Klimawirkungsanalysen lokale Detailuntersuchungen nicht ersetzen können.

3.3 Schiene und Straße

Hochwasser, Sturm und Hangrutschungen können den Verkehr auf Schiene und Straße beeinträchtigen. Die Beeinträchtigung beschränkt sich dabei nicht nur auf das meteorologische bzw. (boden-)hydrologische Ereignis selbst. Auch die Beseitigung von Schäden kann erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Die Schadensbilder sind vielfältig und hängen vom spezifischen Zusammenwirken klimatischer (oder hydrologischer) Einflüsse und Objekteigenschaften (Sensitivität aufgrund von Bemessung und Zustand) ab. Die Zeiten, die zu ihrer Beseitigung erforderlich sind, schwanken zwischen wenigen Stunden, z. B. bei der Beseitigung von umgestürzten Bäumen auf Fahrbahnen oder Gleisanlagen, bis Monaten im Fall von Unterspülungen oder anderen gravierenden Schäden am Unterbau einer Trasse.

Spezifische, flächendeckende und strukturierte Informationen lagen den Bearbeitern des BMVI-Expertenetzwerks

weder zu Schäden noch zu den genannten Objekteigenschaften vor. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich daher fast ausschließlich auf das veränderte Auftreten möglicher Gefährdungen durch den zukünftigen Klimawandel und damit einhergehende Verkehrsbeeinträchtigungen sowie mögliche Schäden – das heißt es werden Änderungen in der Exposition beschrieben.

3.3.1 Hochwasser

Bundesweit liegen aktuell rund 2 % des Bundesfernstraßen- und etwa 1 % des Schienennetzes im Überschwemmungsbereich eines "mittleren Hochwasserszenarios"²³, das sich statistisch ca. alle 100 Jahre ereignet. Der potenzielle Überschwemmungsbereich des "extremen" Hochwasserszenarios umfasst knapp 8 % des Bundesfernstraßennetzes und ca. 8 % des Schienennetzes. Exemplarische Untersuchungen am Rhein und an seinen Nebenflüssen deuten darauf hin, dass sich das Wiederkehrintervall extremer Hochwasserereignisse in Zukunft verkürzt. Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* könnte demnach am Rhein ein heute ca. alle 100 Jahre auftretendes Ereignis in Zukunft alle 20 bis 50 Jahre auftreten. Die potenzielle Betroffenheit der Bundesfernstraßen- und Schieneninfrastruktur durch Flusshochwasser nimmt somit zu. Zum Umfang möglicher Verfügbarkeitseinschränkungen einzelner Schienen- und Straßenstrecken kann derzeit noch keine Aussage getroffen werden, da hierzu detailliertere Analysen unter Einbeziehung genauer Streckendaten erforderlich sind. Hintergründe und Einzelheiten zu diesem Thema finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020).

Der Klimawandel wirkt sich über Veränderungen des Wasserhaushaltes (Binnenbereich), des Meeresspiegels (Küstenbereich) und veränderte atmosphärische Zirkulations-

²³ Flusshochwasser oder Sturmflut. Flächen gemäß der Hochwassergefahrenkarten nach EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, soweit im Jahr 2017 verfügbar.



Abbildung 3-1: Temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen können helfen hochwasserbedingte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur zu reduzieren (Foto: Gina Sanders/Fotolia).

muster (Binnen- und Küstenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen – Flusshochwasser und Tidehochwasser/Sturmfluten – aus. Werden gewisse Schwellenwerte überschritten, können Verkehre auf Straße und Schiene beeinträchtigt werden. Schäden an der Infrastruktur und damit verbundene weitreichende Folgen für die Verkehrsströme sind möglich.

Um Hinweise auf die derzeitige Exposition zu erhalten, wurde auf die Hochwassergefahrenkarten (im Folgenden "HWGK") der Bundesländer zurückgegriffen. Abgesehen von dem Vorteil, dass diese Karten bundesweit vorliegen, setzt das BMVI-Expertennetzwerk bewusst auf diese Grundlage, um eine mit anderen wichtigen Akteuren (u. a. den Bundesländern) kohärente Perspektive auf die The-

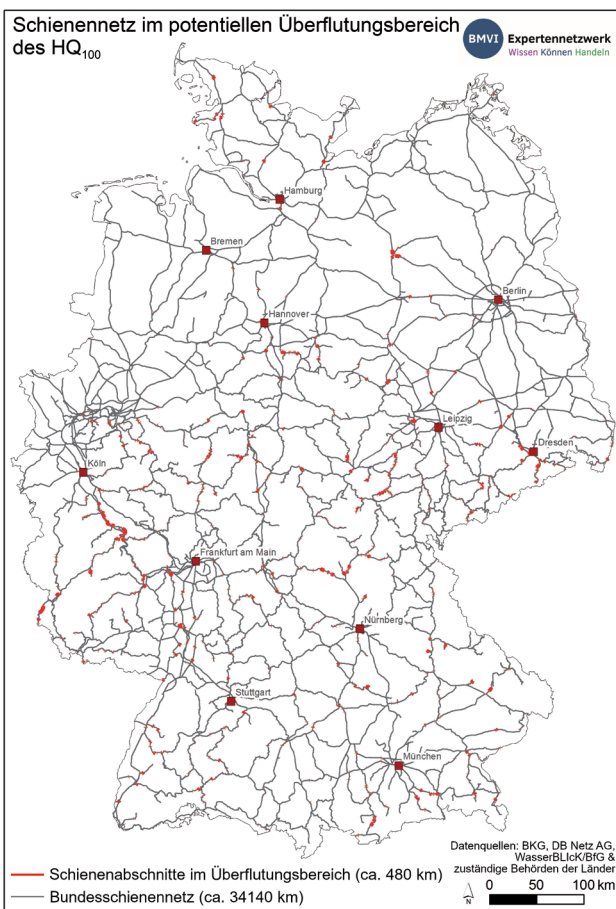
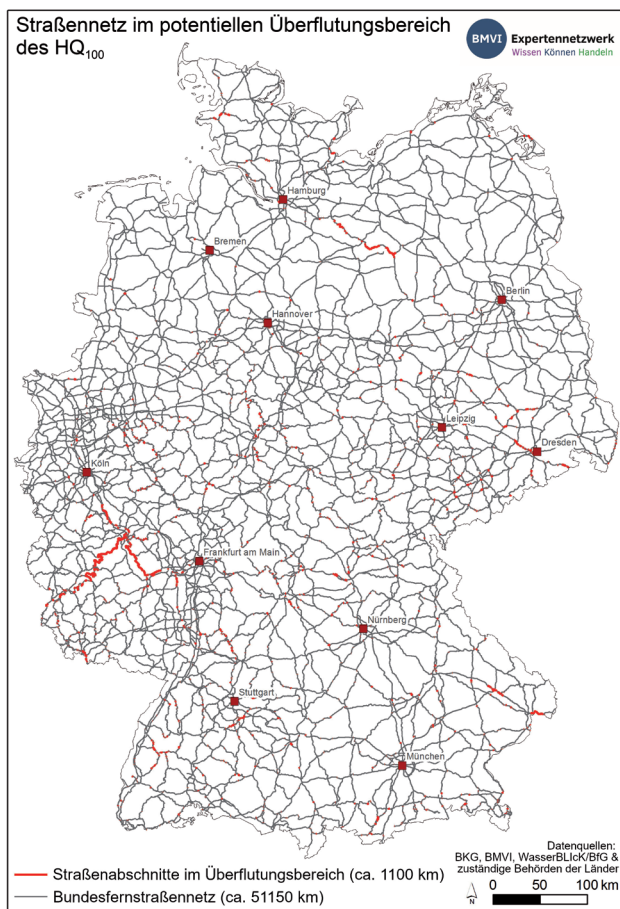


Abbildung 3-2: Abschnitte des Bundesfernstraßen- (links) und des Schienennetzes (rechts), die im Bereich der potenziellen Überflutungsflächen eines "mittleren" Hochwasser- und Sturmflutszenarios liegen (rot hervorgehoben).

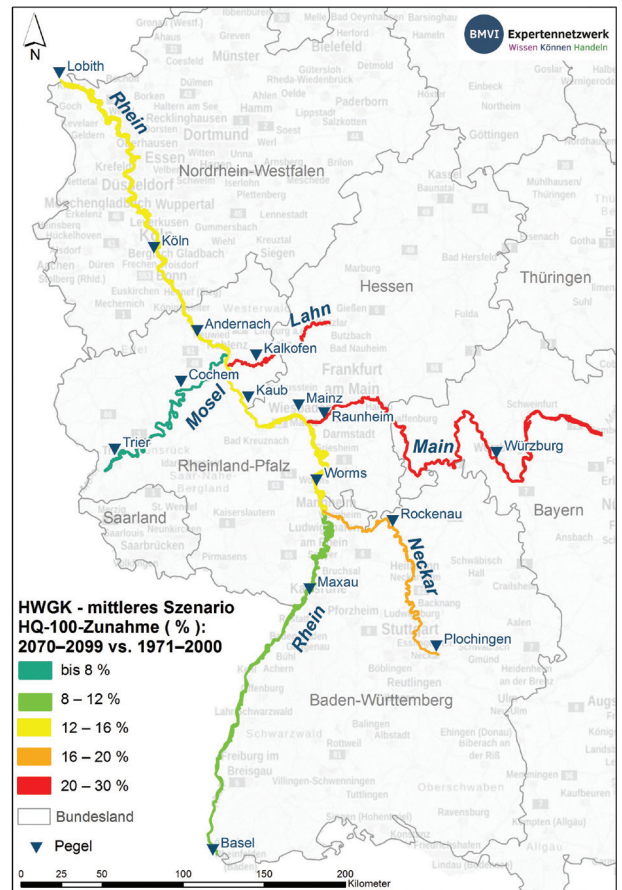
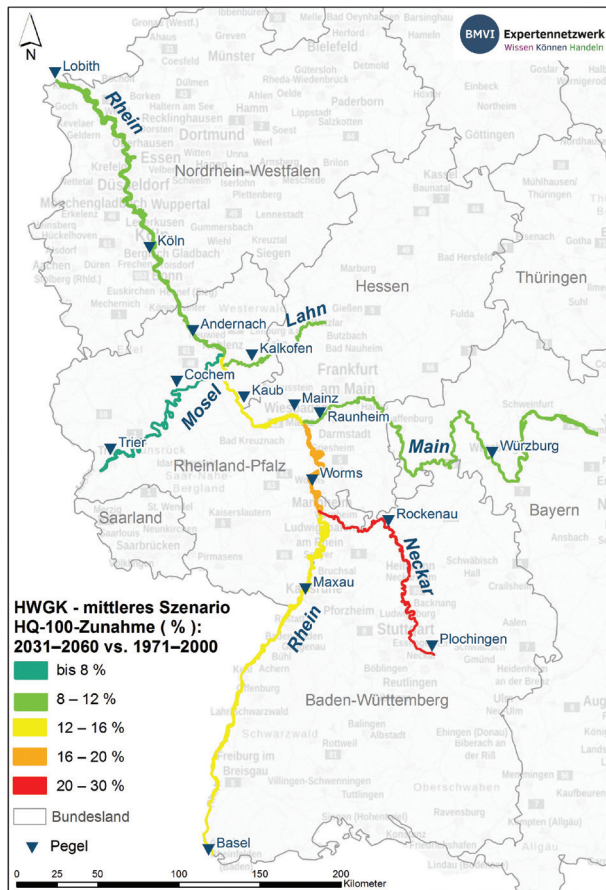


Abbildung 3-3: Relative Änderung des den Hochwassergefahrenkarten des mittleren Szenarios zugrundeliegenden Hochwasserkennwerts HQ₁₀₀ für die Zukunftsprojektionen im Vergleich zum Bezugszeitraum. Links für die *nahe Zukunft*, rechts für die *ferne Zukunft*.

matik "Hochwasser" einzunehmen. Auf dieser Grundlage können Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes, die im Einflussbereich unterschiedlicher Flusshochwasser- und Sturmflutszenarien liegen ("häufig", "mittel", "selten/extrem"), identifiziert werden. Abbildung 3-2 zeigt exemplarisch Ausschnitte der auf diese Weise entstandenen Hinweiskarte Hochwasser für das mittlere Hochwasser- und Sturmflutszenarios mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ₁₀₀/HW₁₀₀). Dieses Szenario ist in allen Bundesländern mit gleichem Wiederkehrintervall definiert und eignet sich somit besonders gut für eine bundesweite Analyse. Das "extreme" Szenario hingegen wurde in verschiedenen Bundesländern unterschiedlich hergeleitet, sodass hierfür keine bundesweit einheitliche Datengrundlage besteht.

Die Analyse zeigt, dass etwa 2 % des Bundesfernstraßennetzes (rd. 1.100 km) und etwa 1 % des Schienennetzes (rd. 480 km) innerhalb der Überflutungsflächen eines mittleren Hochwasser- und Sturmflutszenarios liegen. Die entsprechende Fläche des Hochwasserszenarios "selten/extrem" mit einem Wiederkehrintervall von deutlich über 100 Jahren (hier nicht dargestellt) ist weitaus größer, sodass hier rund 8 % des Bundesfernstraßennetzes (rd. 3.900 km) und 8 % des Schienennetzes (rd. 2.900 km) betroffen wären. Die genannten Werte liefern einen ersten Hinweis auf eine Exposition gegenüber Hochwasserereignissen und eine ggf. damit einhergehende Belastung der Verkehrsinfrastruktur. Für eine Bewertung der tatsächlichen Sperrung der hierbei hervorgehobenen Streckenabschnitte wären vertiefende Untersuchungen anhand detaillierter Streckendaten erforderlich (exakte Höhen- und Wasserspiegellagen etc.), die

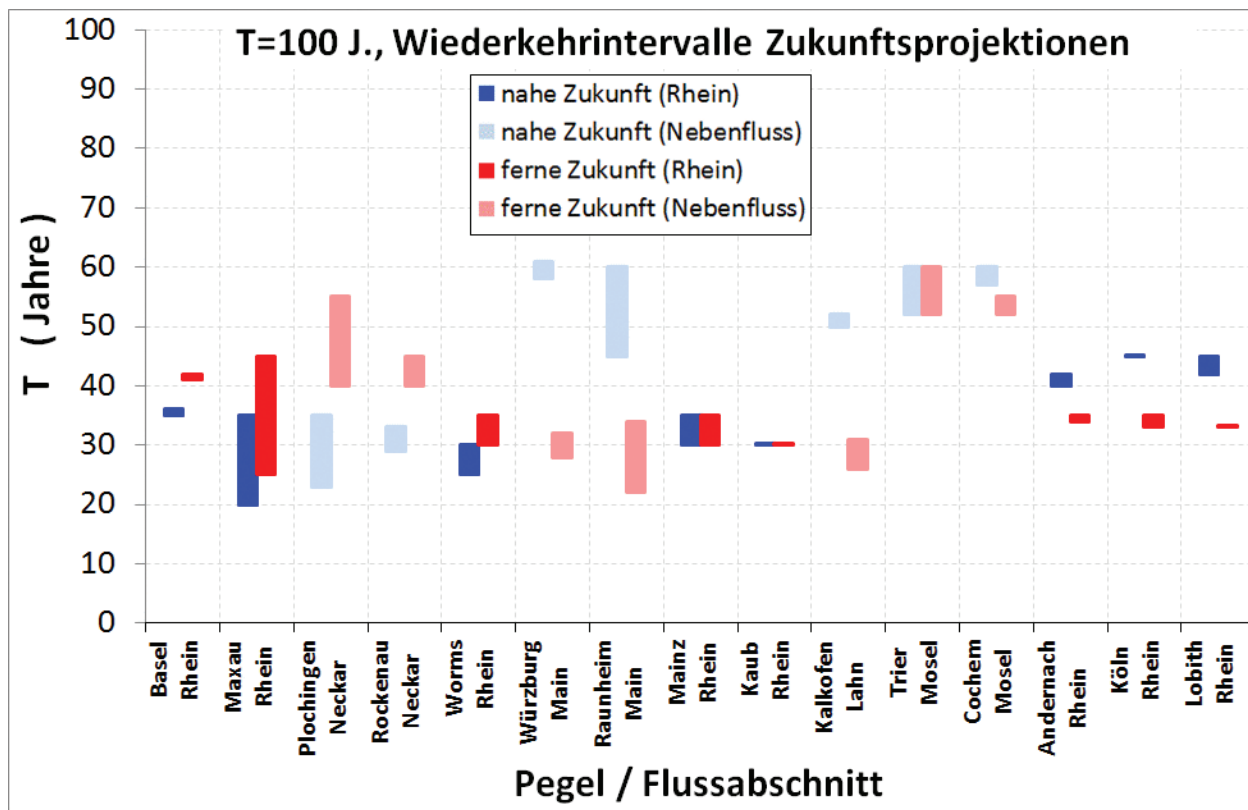


Abbildung 3-4: Neu berechnete Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels HQ_{100} (mittleres Szenario der HWGK) der Referenzperiode für die Projektionen der *nahen* und der *fernen Zukunft* an Pegeln des Rheins und wichtiger Rheinnebenflüsse. Die Säulenabschnitte stellen Unsicherheitsbereiche dar, die sich aus der extremwertstatistischen Analyse ergeben.

in der aktuellen Phase des BMVI-Expertennetzwerks nicht zugänglich waren. Zudem ist die Einbeziehung von Katastropheneinsatzplänen o. ä. zu prüfen. Die Folgen von Verkehrseinschränkungen der in Abbildung 3-2 dargestellten Bereiche wären weitreichend, da wichtige europäische Verkehrskorridore in den Flusstälern des Ober- und Niederrheins, der mittleren und unteren Elbe sowie im Küstenbereich betroffen wären.

Eine Neuberechnung der Überflutungsflächen unter Annahme klimawandelbedingt veränderter Hochwasserabflüsse ist im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks nicht möglich²⁴. Um einen Eindruck der zukünftigen Exposition

zu erhalten, wurden auf Basis projizierter Hochwasserabflüsse Änderungen der mit den genannten Hochwasser Szenarien verknüpften Abflüsse HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} (stellvertretend für die Hochwasser szenarien "häufig", "mittel" und "selten/extrem") und Änderungen der Jährlichkeiten (Wiederkehrintervalle) der heutigen Abflüsse eines HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} berechnet. Die im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse beziehen sich exemplarisch auf Flusshochwasser des Rheins und wichtiger Nebenflüsse (Neckar, Main, Lahn und Mosel). Sie gehen im Wesentlichen von den im Zusammenhang mit den HWGK von der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins publizierten Abflusswerten für HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} aus (Brahmer et al. 2015, IKSR 2014). Um die Kohärenz zwischen den publizierten Abflusswerten der Hochwasser szenarien und den Simulationsdaten bestmöglich zu gewährleisten und die aus den eigenen Simulationen abgeleiteten Hochwasserstatistiken abzusichern, wurden eigene beobachtungsba-

²⁴ Die Erstellung der Hochwassergefahrenkarten liegt im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer und erfordert flächendeckende hochdetaillierte Daten und Modelle sowie einen deutlich erweiterten Finanz- und Zeitrahmen.

sierte extremwertstatistische und hydrologische Analysen, verschiedene hochwasserbezogene Verbesserungen des hydrologischen Modells, eine speziell auf Hochwasser bezogene Plausibilitätsprüfung der Klimamodelldaten sowie eine Bias-Adjustierung der hydrologischen Daten durchgeführt.

Im Ergebnis liegen Aussagen zu veränderten Hochwasserabflüssen und Wiederkehrintervallen eines heutigen HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* vor. Die prozentualen Änderungen der Abflüsse sind in Abbildung 3-3 für den Rhein und größere Nebengewässer am Beispiel des mittleren Hochwasserszenarios kartographisch umgesetzt. Es wird deutlich, dass der Abfluss eines mittleren Hochwassers (HQ_{100}) in beiden Zukunftszeiträumen gegenüber dem Bezugszeitraum allerorts zunimmt. Die Zunahmen liegen meist im Bereich von +10–15 % und sind in der *fernen Zukunft* oft etwas ausgeprägter. Größere HQ_{100} -Zunahmen von über +20 % werden für die *ferne Zukunft* an Main und Lahn projiziert. Für den Neckar und damit auch für den unterhalb der Neckarmündung gelegenen

Rheinpegel Worms sind die Zunahmen bereits in der *nahen Zukunft* stark ausgeprägt (> +20 % bzw. +16–20 %). Das scheinbar mit dem fortschreitenden Klimawandel im Widerspruch stehende Ergebnis von zum Ende des 21. Jahrhunderts wieder leicht abnehmenden Hochwasserabflüssen am Neckar ist ein Ausdruck der hohen (multidekadischen) Variabilität im Bereich der Abflussextreme. Die Mosel zeigt in beiden Zukunftszeiträumen nur moderate Änderungen von unter +8 %. Für HQ_{10} und für HQ_{1000} ergaben sich insgesamt relative Zunahmen in ähnlicher Größenordnung, wobei auch hierbei sowohl regional (Teileinzugsgebiete) als auch zeitlich (dekadische Variabilität) z. T. deutliche Unterschiede bestehen.

Eine andere, aber hinsichtlich der Änderungen kongruente Perspektive auf die Hochwasserabflüsse liefert die Betrachtung der Wiederkehrintervalle eines heutigen HQ_{100} . Die Abflüsse, die heute statistisch alle 100 Jahre auftreten, könnten demnach in Zukunft häufiger auftreten (Abbildung 3-4). Die moderatesten Änderungen sind wieder an

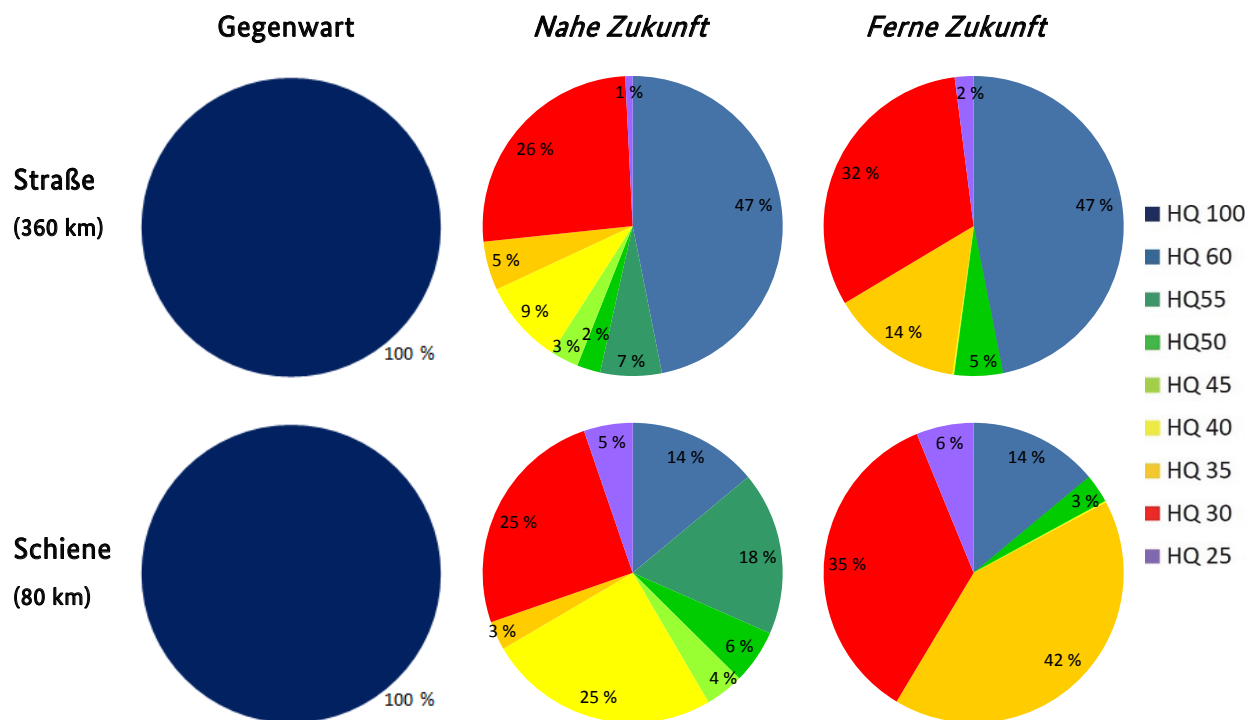


Abbildung 3-5: Zusammenstellung der im Bereich der Flächen der heute gültigen HWGK des mittleren Szenarios (HQ_{100}) gelegenen Straßen- und Schienenabschnitte am Rhein und an wichtigen Nebenflüssen, denen nach den Zukunftsprojektionen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* die in der Legende genannten geänderten Wiederkehrintervalle zugeordnet werden können.

der Mosel zu verzeichnen (von 100 auf 50 bis 60 Jahre), während anderenorts (z. B. am Mittelrhein, vgl. Abschnitt 3.6.1) entsprechende Hochwasserereignisse statistisch zukünftig etwa dreimal so oft auftreten könnten wie heute. Bei diesen Aussagen sind Unsicherheiten zu berücksichtigen, die sich aus der Simulation und Beobachtung von Extremen sowie der angewandten extremwertstatistischen Methoden ergeben.

Die räumlich differenzierte Analyse der projizierten Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels erlaubt es, die zukünftige hochwasserbedingte Betroffenheit des Verkehrs auf die Straßen- und Schieneninfrastruktur im Bereich der heutigen Überschwemmungsflächen eines HQ_{100} überschlägig und vorläufig einzuschätzen²⁵. Dies geschieht hierbei erneut exemplarisch für den Rhein und seine großen Nebengewässer. Insgesamt liegen heute rund 360 Straßenkilometer und rund 80 Schienenkilometer in diesem Überschwemmungsbereich (Abbildung 3-5). Hochwasser in der Größenordnung eines heutigen HQ_{100} treten zukünftig an allen Strecken häufiger auf. An etwa der Hälfte der Straßenabschnitte wird eine entsprechende Situation doppelt so häufig oder häufiger auftreten als heute ($HQ_{100} \rightarrow HQ_{50}$ bis HQ_{30} ; *nahe* und *ferne Zukunft* ähnlich). Bei der Schiene sind den Auswertungen zufolge über 80 % der heute in der Gefährdungszone eines HQ_{100} liegenden Streckenabschnitte zukünftig alle 55 Jahre (*nahe Zukunft*) bzw. 35 Jahre (*ferne Zukunft*) oder häufiger exponiert.

²⁵ Es handelt sich hierbei um eine potenzielle Belastung der Infrastruktur durch das ausufernde Gewässer. Aussagen zu einer Überschwemmung oder Beschädigung der Infrastruktur bzw. zu Streckensperrungen und damit der Einschränkung des Verkehrs können mangels ausreichend detaillierter und ausreichend strukturierter Daten nicht auf der Netzebene getroffen werden.

3.3.2 Sturm

Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundesschiennetzes durch bewaldetes Gebiet und sind somit potenziell durch Sturmwurf gefährdet. Die Sensitivität ist entlang elektrifizierter Bahnstrecken (12 % durch bewaldete Gebiete) besonders ausgeprägt. Aus den Klimaprojektionsdaten ergibt sich für die Zukunft keine klare Veränderung von Windgeschwindigkeiten und Windböen. Veränderungen in Klimaparametern, die die Vitalität und die Vegetationsperiode der Bäume beeinflussen, können jedoch zukünftig die Wirkung von Sturmereignissen modifizieren. Die Bewertung des Anpassungsbedarfs sollte auf der aktuellen räumlichen Differenzierung der Exposition gegenüber Sturmwurf in Deutschland basieren. Hintergrundinformationen zur Vorgehensweise und spezifischere Auswertungen sind im Schwerpunktbericht *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020) nachzulesen.

Stürme gehören ebenfalls zu den Extremwetterereignissen, die Infrastrukturbetreiber und Verkehr bereits jetzt – auch ohne Berücksichtigung des Klimawandels – vor Herausforderungen stellen. Die Stürme der vergangenen Jahre haben den Verkehr auf Schiene und Straße in ganzen Regionen unterbrochen (Haeseler et al. 2019, Lefebvre et al. 2018). Häufig stellen abgeknickte oder entwurzelte Bäume, die auf den Fahrweg stürzen, Unfallgefahren für Verkehrsteilnehmer dar oder führen zu zeitweisen Verkehrsunterbrechungen. Das elektrifizierte Bundesschiennetz ist besonders sensitiv gegenüber Sturmwurf und -bruch. Neben Bäumen auf den Gleisen oder den Oberleitungen führen auch umgeknickte Signal- und Oberleitungsmasten zu erheblichen Beeinträchtigungen, da Aufräum- und Instandsetzungsarbeiten längere Zeit in Anspruch nehmen können. Auch die oftmals schwierige Zugänglichkeit der Strecke erhöht den Aufwand zur Wiederaufnahme des Betriebes. Neben den geschilderten mittelbaren Windwirkungen durch Sturmwurf gefährden starke Seitenwinde und Windböen Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer auch direkt – insbesondere auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. Die nachfolgend dargestellten

Ergebnisse der Expositionsanalyse fokussieren vorwiegend auf die mit "Sturmwurf" zusammenhängenden Aspekte.

Die Exposition gegenüber Sturmwurf ergibt sich hierbei maßgeblich aus dem Vorkommen von Vegetation entlang der Bundesverkehrswege. Grundlage für die erstellte Karte ist das bundesweite Digitale Basis-Landschaftsmodell (*Basis-DLM*). Hierbei wird zwischen Laub-, Nadel- und Mischwäldern differenziert (Abbildung 3-6a und b). Für die Straßenwege wird zusätzlich die Exposition gegenüber Baumreihen (Alleen) untersucht. Nadelbäume sind grundsätzlich anfälliger gegenüber Starkwind als Laubbäume, da sie im Gegensatz zu den winterkahlen Laubbäumen bei Winterstürmen eine größere Angriffsfläche bieten (Segel-

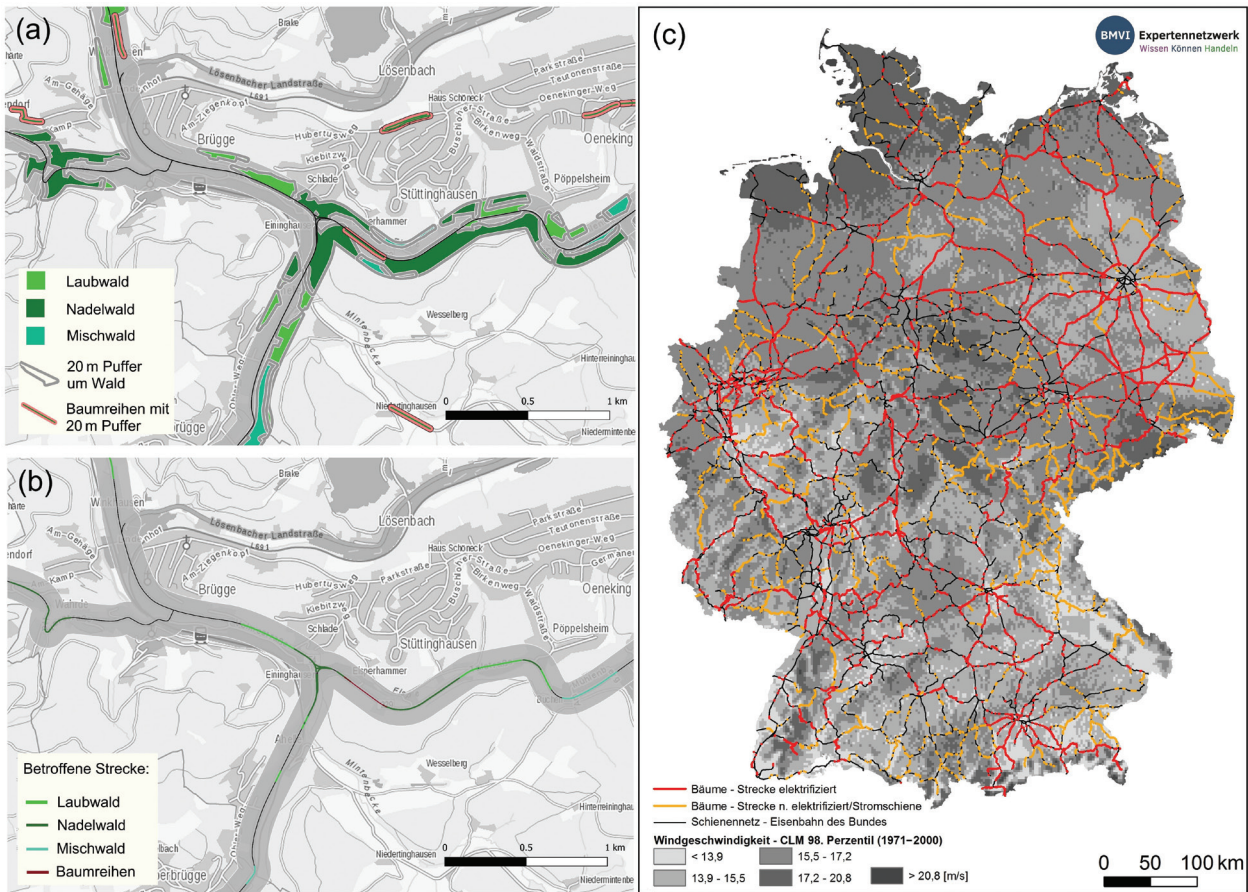
wirkung; Albrecht (2009)). Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über die aufgrund der Vegetation gegenüber Sturmwurf exponierten Bundesfernstraßen- und Schienenabschnitte.

Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundesschiennetzes durch bewaldetes Gebiet mit einem Abstand von ≤ 20 Metern. Außerdem sind etwa 13 % des Bundesfernstraßennetzes gegenüber Baumreihen exponiert. Beim Schienennetz sind elektrifizierte Strecken (in der Nähe von Bäumen) besonders gefährdet durch Sturmwurf und -bruch. Diese machen insgesamt rund 12 % des Gesamtnetzes aus (Tabelle 3-2). Bei diesen Werten kann es sich aufgrund der verwendeten bundesweit einheitlichen Datenbasis nur um eine erste Annäherung handeln.

Tabelle 3-2: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m (Exposition) und erhöhter Schädigung an elektrifizierten Bahnstrecken (Sensitivität).

Potenzielle Gefährdung durch Sturmwurf Gegenwart (Exposition)				
Verkehrsträger	Straße		Schiene	
Gesamtlänge	51.150 km		34.140 km	
Strecke in der Nähe zu	[km]	[%]	[km]	[%]
■ Laubbäumen	5.870	12	4.450	13
■ Nadelbäumen	8.220	16	4.130	12
■ Mischwald	5.820	11	3.430	10
■ Bäumen (insgesamt) ²⁶	12.660	25	7.690	23
■ Baumreihen	6.710	13	nicht zutreffend	
Potenzielle Gefährdung an elektrifizierten Bahnstrecken durch Sturmwurf (Sensitivität)				
Gesamtlänge der elektrifizierten Bahnstrecken	20.450 km		60%	
Strecke in der Nähe zu	[km]		[%] des gesamten Schienennetzes	
■ Laubbäumen	2.490		7	
■ Nadelbäumen	2.000		6	
■ Mischwald	1.870		6	
■ Bäumen (insgesamt) ²⁶	4.130		12	

²⁶ Teilweise befinden sich unterschiedliche Waldtypen (Laub-, Nadel- und Mischwald) entlang beider Seiten der Strecke. Um diese nicht doppelt zu zählen, wurden Überlappungen der Waldtypen in der Kategorie "Bäume (insgesamt)" entfernt, sodass die insgesamt betroffene Strecke nicht der Summe von Laub-, Nadel- und Mischwald entspricht.



Datenquellen: ATKIS Basis-DLM (BKG), WebAtlasDE.light (BKG), Bundesfernstraßennetz (BMVI), Bundesschiennetz (DB Netz AG), Klimaprojektionsdaten (DWD)

Abbildung 3-6: Lage bewaldeter Gebiete innerhalb eines 100 m Betrachtungsraumes um das Bundesfernstraßennetz (a) und daraus abgeleitete Exposition im Abstand von 20 m gegenüber Sturmwind an einem Fallbeispiel (b) sowie deutschlandweite Exposition und Sensitivität des Bundeschiennetzes gegenüber Sturmwind vor dem Hintergrund des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeit (Böen) von CCLM-Simulationen für den Bezugszeitraum 1971-2000 (c).

Die generierte Karte zur Expositionsanalyse bezüglich der Sturmwindgefährdung wurde im Anschluss mit den Daten für das 98. Perzentil der Windböen für den Bezugszeitraum zusammengeführt (Abbildung 3-6c). Im Vergleich zum gegenwärtigen Zustand zeigen sich in den Klimaprojektionen nur geringfügige Änderungen im Bereich von $\pm 5\%$ (s. Abschnitt 2.8). Eine räumliche Differenzierung bezüglich der Änderungssignale ist nicht erkennbar, sodass zukünftig im Jahresmittel keine Änderung der Gefährdung durch Stürme und Windböen gegenüber heute zu erwarten ist.

Während die Exposition gegenüber Sturmwind vor allem für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevant ist, betrifft der Themenkomplex "Seitenwind" vor allem die Verkehrsteilnehmer. Besonders exponiert ist der Verkehr in diesem Zusammenhang auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. Sowohl Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (z. B. Lkws) als auch Motorradfahrer sind auf solchen Brücken gefährdet. Um Personen- und/oder Sachschäden bei resultierenden Unfällen zu vermeiden, sind viele Brücken bereits mit Windschutz- und Windwarneinrichtungen ausgestattet.

3.3.3 Hangrutschungen

Es ist davon auszugehen, dass gravitative Massenbewegungen hauptsächlich durch ingenieurgeologische Einflussgrößen geprägt sind. Klimatische Parameter können jedoch zusätzlich modifizierend und ggf. auslösend wirken. Basierend auf einem ingenieurgeologischen Modellansatz wurde unter Einbeziehung von Klimamodifikatoren eine Expositionsanalyse für das Bundesfernstraßen- und -schienennetz durchgeführt. Demnach waren im Bezugszeitraum rund 2.590 km (ca. 5 %) des Bundesfernstraßen- und 1.900 km (ca. 6 %) des Bundesschienennetzes gegenüber gravitativen Massenbewegungen exponiert. Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* wird sich der Anteil der potenziell betroffenen Strecken laut Modellansatz ausweiten. In der *nahen Zukunft* können weitere ca. 390 km des Bundesfernstraßennetzes bzw. zusätzliche 370 km des Bundesschienennetzes potenziell exponiert sein (also jeweils ca. 1 Prozentpunkt mehr). In der *fernen Zukunft* beträgt die Zunahme gegenüber dem *Bezugszeitraum* jeweils rund 1.000 km (also ca. 2 Prozentpunkte beim Straßennetz und etwa 3 Prozentpunkte beim Schienennetz). Weitere Informationen zum methodischen Vorgehen sowie zu spezifischen Ergebnissen finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020).

Gravitative Massenbewegungen können den Verkehr auf Straße und Schiene in verschiedener Hinsicht beeinträchtigen. Durch Hindernisse auf Straßen- und Schienenwegen kann es zu Unfällen kommen, woraus wiederum Behinderungen und Verzögerungen im Verkehrsablauf resultieren. Auch sind Schäden an der Verkehrsinfrastruktur möglich, die weitere, durch die Instandsetzung verursachte Beeinträchtigungen zur Folge haben.

Unter gravitativen Massenbewegungen werden hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fest- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft verstanden. Dabei wird grundsätzlich zwischen Rutschungen/Gleit-, Sturz- und Fließprozessen unterschieden. Die Hangstabilität hängt maßgeblich von der Zusammensetzung bzw.

Beschaffenheit des Untergrundes und der Hangneigung ab. Unterschiedliche Witterungen und extreme Wetterereignisse wie Dauerniederschlag, Starkniederschlag oder Frost-Tau-Wechsel können auslösende Faktoren für gravitative Massenbewegungen darstellen. Aus diesem Grund ist es wichtig zu untersuchen, wie sich solche klimatischen Parameter durch den Klimawandel verändern und zukünftig auf die Hangstabilität auswirken können.

Mit Bezug auf gravitative Massenbewegungen wurde eine Expositionsanalyse für das Bundesstraßen- und -schienennetz in zwei Teilschritten durchgeführt. Im Rahmen externer Forschungsprojekte wurden zunächst für das Bundesfernstraßen- (Schipek und Kallmeier 2019) und das Bundesschienennetz (EBA 2018b) Hinweiskarten erstellt. Der erste Analyseschritt beinhaltet die Ermittlung der ingenieurgeologischen Grunddisposition für allgemeine gravitative Massenbewegungen. Hierunter werden zunächst alle Typen von gravitativen Massenbewegungen gefasst, ohne eine Prozessdifferenzierung nach Rutschungen/Gleit-, Sturz- und Fließprozessen vorzunehmen. Im Anschluss wurde eine Methode zur Integration von Klimaprojektionsdaten entwickelt. Dabei werden die Ergebnisse des ingenieurgeologischen Ansatzes entsprechend den klimatischen Gegebenheiten der Gegenwart sowie der projizierten Zukunft modifiziert. Neben den nachfolgend ausgeführten Untersuchungen zu allgemeinen gravitativen Massenbewegungen wurden zuletzt prozessspezifische Modellansätze für Sturz- und Fließprozesse entwickelt. Somit liegen prototypische Hinweiskarten auch für diese Prozesstypen vor.

Die ingenieurgeologische Hinweiskarte wurde in einem Geoinformationssystem (GIS) entwickelt, das neben dem Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetz die Informationsschichten zu verschiedenen Geländeeigenschaften wie Hangneigung, Fließrichtung, Fließakkumulation und Oberflächenwölbung sowie geologische Parameter wie Gesteinsklasse, Verformungsempfindlichkeit, Korngrößenverteilung, Klüftung und Trennflächengefüge sowie Informationen zur Landnutzung (Versiegelungsgrad, Bewuchs) wiedergibt. Zudem wurde ein Ereignisdatenkatalog bezüglich gravitativer Massenbewegungen einbezogen, das auf Grundlage von Daten der geologischen Dienste der Bundesländer erstellt wurde. Dieses beinhaltet insgesamt 11.658 Ereignisse. Auf dieser Datengrundlage wurden durch Verknüpfung der Gesteinsklasse (Fest- und Lockergestein,

Tabelle 3-3: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteins- und der Hangneigungsklasse.

Bezeichnung	Hauptgefähr- dungsklasse	Gefährdungs- klasse (untergliedert)	Lockergestein			Festgestein
			GÜK200 Gesteinsklassifikation			
			gemischt- körnig	rollig	bindig	
			zugeordnete Hangneigung			
sehr stark gefährdet	5	15				
		14	> 36°		> 30°	> 60°
		13				
stark gefährdet	4	12				
		11	> 30 - 36°	> 36°	> 25 - 30°	> 50 - 60°
		10				
mäßig gefährdet	3	9				
		8	> 25 - 30°	> 30 - 36°	> 10 - 25°	> 30 - 50°
		7				
gering gefährdet	2	6				
		5	> 10 - 25°	> 25 - 30°	0 - 10°	0 - 30°
		4				
nicht bis sehr gering gefährdet	1	3				
		2	0 - 10°	0 - 25°		
		1				

gemischtkörnig, rollig und bindig) mit der Hangneigung zunächst fünf Hauptgefährdungs- und insgesamt 15 Gefährdungsklassen abgeleitet (Tabelle 3-3). Die Klassifizierung erfolgte auf Basis von Expertenwissen. Zur anschließenden Spezifizierung der fünf Hauptgefährdungsklassen wurden die Parameter der Landnutzung sowie zusätzliche Substrat- und Reliefeigenschaften herangezogen (Abbildung 3-7). Anschließend wurde für die potenziellen Gefährdungsbereiche ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz hergestellt. Um einen Überblick über diejenigen Streckenabschnitte zu erhalten, die direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m oder 200 m um potenziell stark bis sehr stark gefährdete Bereiche (Gefährdungsklasse ≥ 10) liegen, wurden entsprechende Pufferbereiche gebildet (Abbildung 3-8a). Anschließend wurde das Straßen- bzw. Schiennetz mit diesen Zonen verschnitten, um die potenziell gefährdeten Streckenabschnitte zu identifizieren (Abbildung 3-8b).

Zur Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf gravitative Massenbewegungen wurden Klimakenngrößen wie mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer Sommerniederschlag, mittlerer Winterniederschlag, Anzahl der Starkregentage und Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel aus Klimaprojektionsdaten abgeleitet und Änderungssignale für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in der *nahen* und *fernen Zukunft* gegenüber dem *Bezugszeitraum* berechnet. Diese Änderungssignale bilden die Basis für die weitere Modifikation der Klassifizierungsergebnisse des ingenieurgeologischen Ansatzes. Dabei wurde z. B. davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Anzahl an Tagen mit Starkregen oder mit Frost-Tau-Wechseln verstärkend auf die Hangrutschungsdisposition wirkt. Die ingenieurgeologischen Rahmenbedingungen bleiben jedoch der dominierende Faktor für die Exposition von Bundesfernstraßen- und Bundesschiennestrecken gegenüber gravitativen Massenbewegungen.

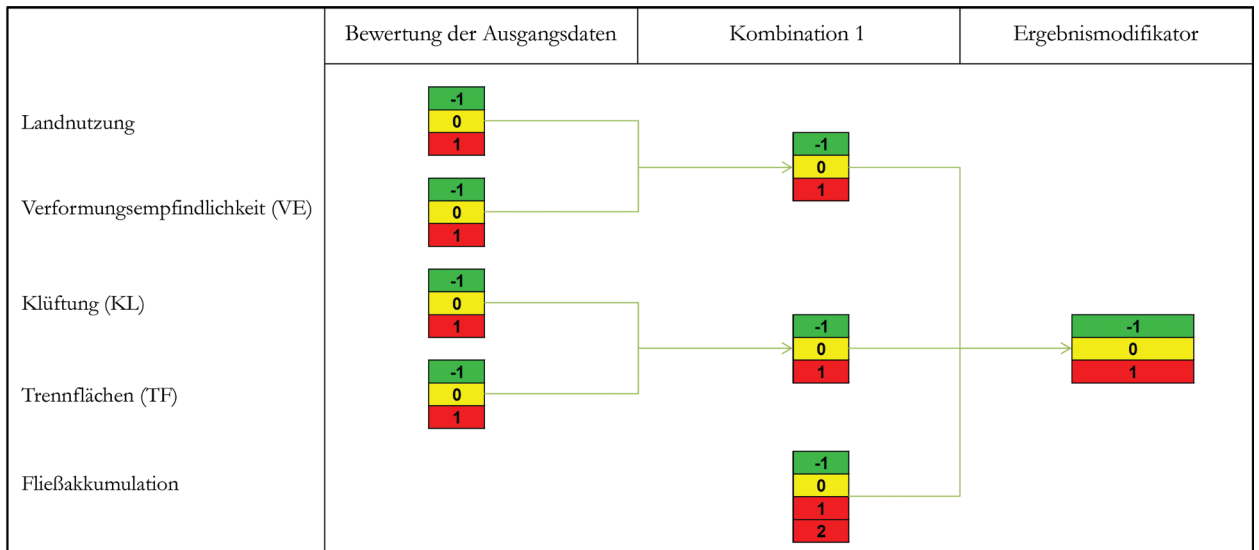
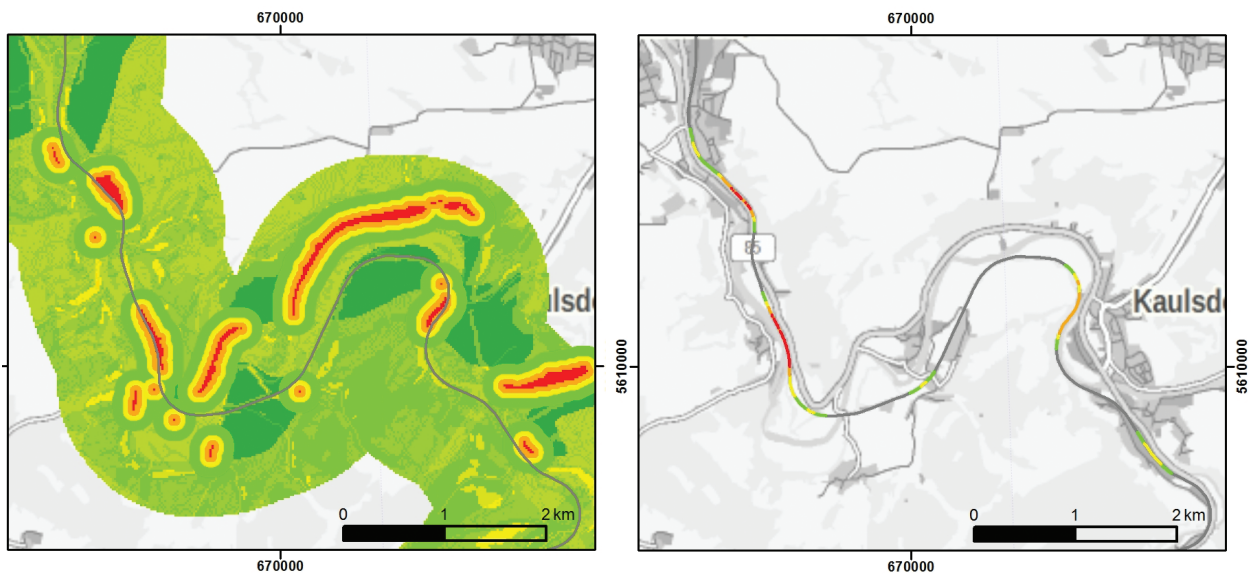


Abbildung 3-7: Fließschema zur Berechnung der Modifikation (Spezifizierung) der Hauptgefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den klimatischen Bedingungen des Bezugszeitraums rund 5 % bzw. 6 % des Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes grundsätzlich gegenüber gravitativen Massenbewegungen exponiert sind.

Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* werden für die Zukunft weitere Strecken als potenziell gefährdet klassifiziert. In der *nahen Zukunft* erhöht sich der Anteil des potenziell gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschie-



Datenquellen: Bundesschienennetz (DB Netz AG), GÜK200 (BKG), ATKIS Basis-DLM (BKG), DGM10 (BKG)

Abbildung 3-8: Pufferbereiche um die potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bereiche (Gefährdungsklassen ≥ 10) (a) sowie die gefährdeten Streckenabschnitte des Bundesschienennetzes (b). Die Farbgebung der mittels des expertenwissen-basierten Ansatzes identifizierten Gefährdungsklassen (mit Ausnahme der Pufferbereiche) entspricht derjenigen in Tabelle 3-3.

Tabelle 3-4: Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im *Bezugszeitraum* und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (*Weiter-wie-bisher-Szenario*) in der *nahen* und *fernen* Zukunft.

Verkehrsträger	Straße				Schiene			
Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen Gegenwart								
Gesamtlänge	51.150 km				34.140 km			
Gefährdete Streckenabschnitte (ingenieurgeolog. Disposition)	1.640 km	3 %		1.340 km	4 %			
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikator)	2.590 km	5 %		1.900 km	6 %			
Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen Zukunft								
	2031–2060		2071–2100		2031–2060		2071–2100	
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikation nach dem Weiter-wie-bisher-Szenario)	[km]	[%]	[km]	[%]	[km]	[%]	[km]	[%]
	2.980	6	3.650	7	2.270	7	2.800	8
Zunahme	390	1	1.060	2	370	1	900	3

nennetzes laut Modell um jeweils etwa 1 Prozentpunkt, das heißt um 390 km bzw. 370 km. In der *fernen Zukunft* erhöht sich der Anteil potenziell gefährdeter Straßenstrecken um rund 2 Prozentpunkte (+1.060 km) und jener der Schienenstrecken um ca. 3 Prozentpunkte (+900 km) im Vergleich zum heutigen Streckennetz (Tabelle 3-4).

Aufbauend auf dem vorgenannten, über verschiedene Prozesse gravitativer Massenbewegungen generalisierenden Ansatz wurden zusätzlich Methoden entwickelt, um spezifische Hinweiskarten für Sturz- und Fließprozesse zu generieren. Für Sturzprozesse wurde die Berechnung der Hauptgefährdungsklassen nach dem Ansatz für allgemeine Massenbewegungen stark vereinfacht und somit auf vier Klassen reduziert. Für Fließprozesse wurden zunächst fünf Hauptgefährdungsklassen generiert. Zur Spezifizierung dieser Gefährdungsklassen wurden die Parameter Landnutzung, Verformungsempfindlichkeit und Fließakkumulation verwendet, wobei letzterer doppelt gewichtet wurde, um in einer Kartendarstellung Erosionsrinnen besonders hervorzuheben. Prototypische Hinweiskarten liegen für Sturz- und Fließprozesse vor. Erosionsprozesse sind primär für den Sedimenteintrag in Wasserstraßen und somit für das Wasserstraßenmanagement von Bedeutung (s. Schwer-

punktbericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, Nilson et al. (2020)).

3.4 Wasserstraße

Der Klimawandel wirkt sich über veränderte Niederschlagsmuster und -mengen, steigende Lufttemperaturen und veränderte Strahlungswerte und Windfelder sowie den Meeresspiegelanstieg auf den Wasser- und Stoffhaushalt



Abbildung 3-9: Die Aufnahme zeigt die extreme Niedrigwassersituation des Jahres 2018 im Mittelrheintal. Die Schifffahrt war über viele Wochen erheblich eingeschränkt. Foto: BAW

des Binnenlandes und der Küstengewässer und somit auf das System der Wasserstraßen in Deutschland aus. Hohe Wasserstände, niedrige Wasserstände sowie Änderungen der Sedimentflüsse und auch der Wassergüte sind die Folge und können zu Beeinträchtigungen des Wasserstraßenverkehrs und des -managements führen.

Wasserstraßen sind nicht nur Verkehrsträger, sondern auch Natur- und Lebensraum. Außerdem wird das Wasser von Wasserstraßen in vielfältiger Weise genutzt (z. B. als Kühlwasser). Die Folgen des Klimawandels werden in den folgenden Abschnitten daher sowohl in Form verkehrlich relevanter Größen (Tage mit Einschränkungen) als auch in Größen der Wasserbeschaffenheit (Sauerstoffkonzentration, Wassertemperatur, Algendichte) dargestellt. Zusammenfassende Aussagen zu den Änderungen der Abfluss- und Temperaturregime der Bundeswasserstraßen finden sich in Kapitel 2.

3.4.1 Niedrigwasser

Die Erkenntnisse aus dem BMVI-Forschungsprogramm KLIWAS werden in wesentlichen Aspekten bestätigt. Eine nennenswerte Abnahme der Niedrigwasserabflüsse wird erst für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts projiziert, wobei sich regionale Unterschiede zeigen. Betroffen ist unter anderem der verkehrlich sehr bedeutsame Niederrhein. Die zentrale Schätzung aller Projektionen weist für den Pegel Duisburg-Ruhrort unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* für das Ende des 21. Jahrhunderts eine Verdopplung der Tage unter dem Niedrigwasserswellenwert GIQ aus. Für den Fall einer extremen Schätzung (85. Perzentil des *Weiterwie-bisher-Szenarios*) muss über neue Managementkonzepte nachgedacht werden, um die Leistungsfähigkeit des Rheins in diesem Bereich zu erhalten. Unter Annahme des Klimaschutzszenarios ergeben sich sehr moderate bzw. keine Änderungen. Hintergründe und Einzelheiten zu diesem Thema finden sich im Schlussbericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

Für schiffahrtsbetreibende und -nutzende Unternehmen sind Tiefenengpässe und damit verbundene Abladebeschränkungen oft relevanter als hochwasserbedingte Einschränkungen. Grund ist insbesondere, dass Niedrigwassersituationen in der Regel zeitlich (aber auch räumlich) ausgedehnter sind als Hochwassersituationen. Im Unterschied zum Hochwasserfall werden im Niedrigwasserfall keine offiziellen Sperrungen der Wasserstraßen ausgesprochen. Ob und mit welcher Abladung im Niedrigwasserfall der Schiffsverkehr aufrechterhalten wird, liegt im Ermessen der Schifffahrtstreibenden.

Klar ist, dass die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt unmittelbar mit der verfügbaren Wassertiefe korreliert. Grundsätzlich gibt es das Bestreben, die "economies of scale" bestmöglich auszunutzen, das heißt mit großen Schiffs-körpern möglichst viel Ladung auf einmal zu transportieren. Die Verringerung der Transportkapazität der Schiffe und eine Erhöhung der Transportzeiten hat bei gleichbleibenden "Fixkosten", z. B. für Personal negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die Flottenkonstellationen im Binnenbereich sind derzeit so gelagert, dass bereits knapp unterhalb des Mittelwassers Tiefenengstellen und/oder Breitenengstellen auftreten und bei größeren Schiffen Abladebeschränkungen hinzunehmen sind.

Die Grenze der Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt ist nicht ohne Weiteres zu bestimmen. Sie hängt unter anderem von der Dringlichkeit des Transportes, der Art und Laufzeit des geschlossenen Vertrages sowie von möglichen alternativen Transportwegen ab (vgl. Abschnitt 4.4.5 Verkehrsverlagerung). Aus technischer Sicht wird erst bei Erreichen einer Wassertiefe, die dem minimalen Tiefgang eines Schiffstyps (zzgl. Sicherheitszuschlag) entspricht, die Fahrt eingestellt und somit aus einer Transporteinschränkung ein Transportausfall. Relevant ist dabei die Stelle mit der geringsten in der Fahrrinne zur Verfügung stehenden Wassertiefe entlang der Transportrelation.

Der sogenannte gleichwertige Wasserstand (GIW), bzw. der zu diesem Wasserstand führende gleichwertige Abfluss

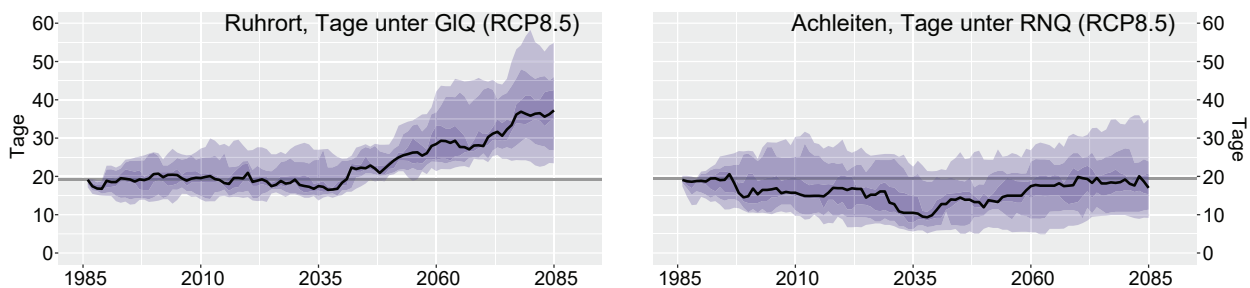


Abbildung 3-10: Mittlere Anzahl von Tagen mit Niedrigwasser unter dem Schwellenwert $GIQ_{1971-2000}$ für den Pegel Duisburg/Ruhrort (Rhein) und $RNQ_{1971-2000}$ für den Pegel Achleiten (Donau). Beides unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*, 30-jährig gleitende Mittelwerte.

GIQ^{27} und die mit diesem Wasserstand verbundene verfügbare Wassertiefe, sind in diesem Zusammenhang wichtige Niedrigwasserschwellenwerte. Der gleichwertige Abfluss wird heute definitionsgemäß im Mittel an maximal 20 Tagen pro Jahr unterschritten. Abbildung 3-10 zeigt, an wie vielen Tagen dieser Schwellenwert in Zukunft am Niederrhein (Duisburg-Ruhrort²⁸) und an der oberen Donau (Achleiten) unterschritten wird. Während für den Rhein ab der Mitte des 21. Jahrhunderts von einer deutlichen Zunahme auszugehen ist, zeigen sich an der Donau keine wesentlichen Änderungen. Grund für diese räumliche Differenzierung ist der erhebliche alpine Einfluss, der am Pegel Achleiten insbesondere durch den etwas oberhalb mündenden Inn zu verzeichnen ist. Alle Angaben beziehen sich auf das hohe Szenario *Weiter-wie-bisher*. Unter Annahme des Szenarios *Klimaschutz* sind die Änderungen deutlich moderater. Einen Eindruck von den Unterschieden zwischen den Szenarien gibt Abbildung 2-5 mit Bezug auf den mittleren Abfluss am Pegel Köln.

In Abbildung 3-11 sind die vorgenannten Informationen auf das Netz der Bundeswasserstraßen bezogen kartografisch umgesetzt. Dieser Baustein der Klimawirkungsanalyse (Expositionsanalyse nach Abschnitt 3.2) erlaubt die Identifikation räumlicher Schwerpunkte des Wandels. In der

²⁷ Gleichwertiger Abfluss: Niedriger Abfluss, der im statistischen Mittel an maximal 20 (eisfreien) Tagen pro Jahr unterschritten wird; somit ein Indikator für die Verfügbarkeit/Zuverlässigkeit der Wasserstraße. Hier rechnerisch das 94,5. Perzentil der Abflusssdauercurve.

²⁸ Der für die Mittelrheinverkehre relevante Pegel Kaub zeigt annähernd dasselbe Änderungssignal wie Duisburg-Ruhrort (Zunahme der Tage unter GIQ auf rd. 35 Tage (zentrale Schätzung)).

Karte für den Zeitraum 2071–2100 (rechts) tritt unter anderem der Rhein hervor, der nicht nur verkehrlich besonders bedeutend ist (Kritikalitätsanalyse nach Abschnitt 3.2; vgl. 3.5.3), sondern für den gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich intensivere Niedrigwassersituationen projiziert werden.

Der Niederrhein ist mit einer jährlich transportierten Gütermenge von über 100 Mio. t die wichtigste Binnenschiffahrtsstraße Europas (vgl. Abbildung 3-21 im Abschnitt 3.5.3). Es wurde eine erweiterte wasserbauliche Expositionsanalyse durchgeführt, die neben den genannten hydrologischen Veränderungen auch die sich daraus abgeleiteten hydraulischen Veränderungen und damit die Auswirkungen auf die Wassertiefe in der Fahrrinne und die Verfügbarkeit der Wasserstraße im Detail umfasst.

Abbildung 3-12 zeigt die berechneten Wassertiefen und Fehlstellen im Abschnitt "Köln" an einer heute bereits abladerelevanten Schwelle für um bis zu 30 % reduzierte Niedrigwasserabflüsse (GIQ). Dies entspricht einem extremen Szenario, nämlich einer besonders trockenen Variante des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (vgl. Abbildung 3-13, RCP8.5). Der Schwellenwert der Flächengrafik ist auf die im Bereich Köln vorgehaltene Fahrrinntiefe von 2,50 m (Tiefe unter GIW) festgelegt. Die Auswertung zeigt deutlich, dass im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse die Tiefeneinschränkungen in der Fahrrinne zunehmen und bereits bei einer Reduktion um -10 % die gesamte Fahrrinnenbreite einnehmen. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch für andere Abschnitte des Niederrheins. Bei einer Reduktion des Niedrigwasserabflusses GIQ um -5 % werden heute bestehende Einschränkungen vergrößert. Bei einer Reduktion

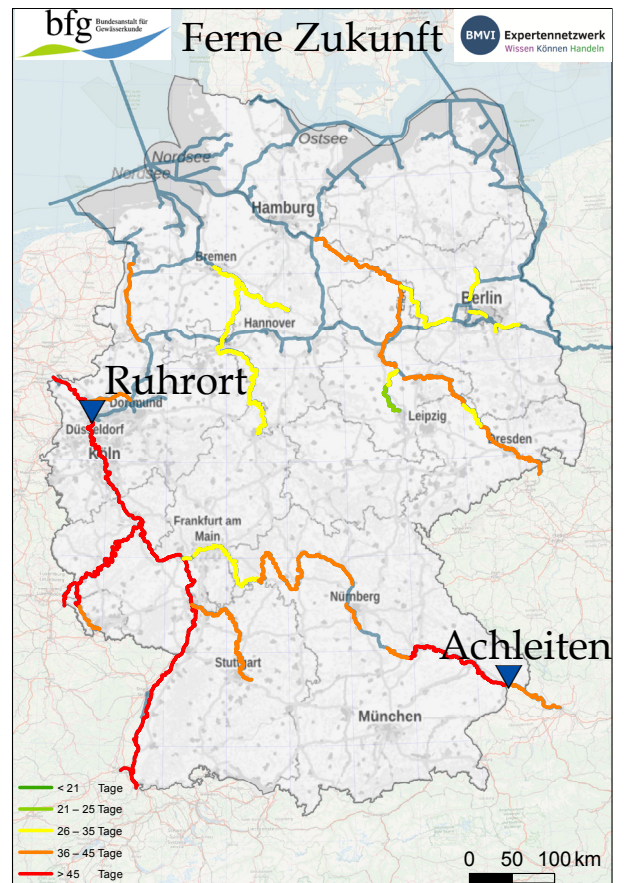


Abbildung 3-11: Mittlere Anzahl von Tagen mit Niedrigwasser unter dem Schwellenwert GIQ (bzw. Donau: RNQ) an den Binnenschiffahrtsstraßen in der *nahen* (links) und *fernen Zukunft* (rechts) basierend jeweils auf einer hohen Schätzung (85. Perzentil) für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Kanalstrecken und Küstenwasserstraßen sind aufgrund geringer Sensitivität gegenüber Niedrigwasser ausgespart (blau).

um -10 % entstehen neue Einschränkungen. Berechnungen unter Berücksichtigung der Sohlentwicklung (hier nicht dargestellt) zeigen, dass den Fehlstellen nur mittels Baggerung langfristig nicht entgegengewirkt werden kann, da diese sich unter anderem negativ auf die Wasserspiegellagen auswirken. Einen Lösungsansatz bieten bauliche Regulierungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 4.4.3).

Entwickeln sich die Abflüsse in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entsprechend Abbildung 3-13 noch stärker nach unten, ist die Wasserstraße "Niederrhein" mit den heutigen Konzepten auf dem heutigen Niveau nicht mehr unterhaltbar. Dann muss über neue Managementkonzepte nachgedacht werden.

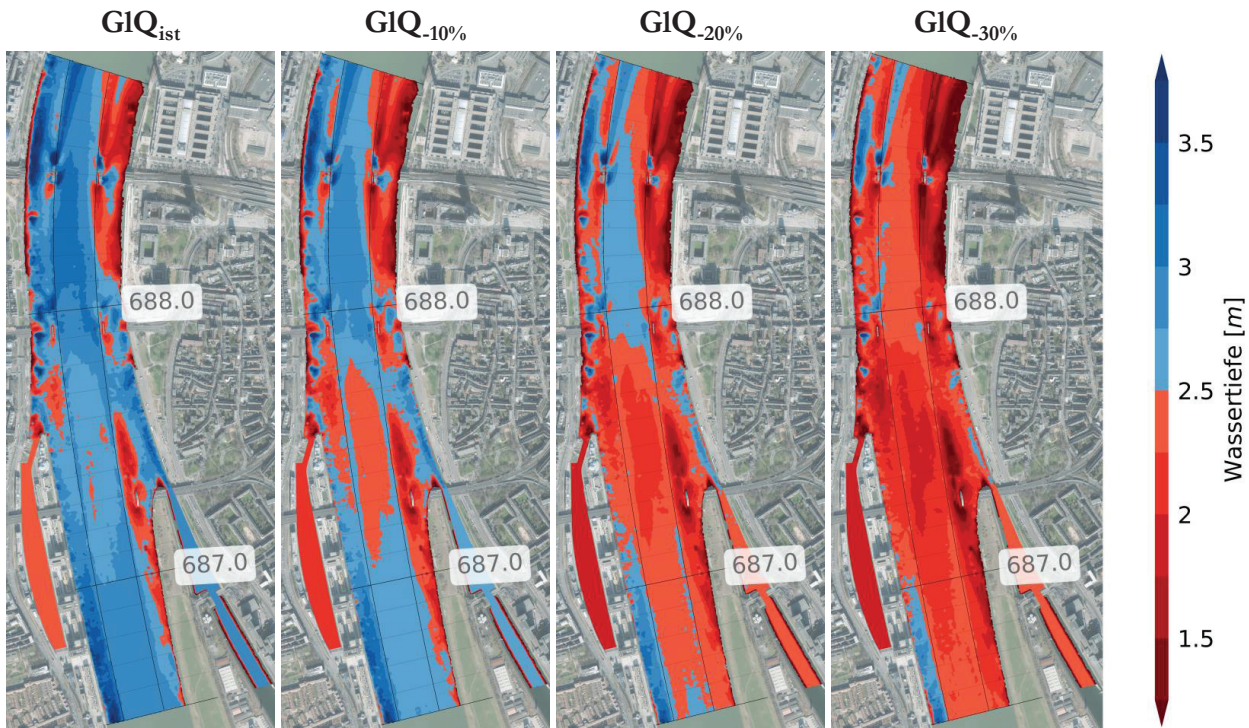


Abbildung 3-12: Berechnete Wassertiefen in der Nähe von Köln für einen Abfluss, der dem GIQ_{2012} (links) entspricht, sowie einen in drei Schritten um jeweils 10 % reduzierten GIQ_{2012} bis zum Erreichen des Extremszenarios von -30 % (vgl. Abbildung 3-13, RCP8.5). Die Strichelung zeigt die Fahrrinne (längs) und die Hektometereinteilung (quer). Hintergrund: Luftbild, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

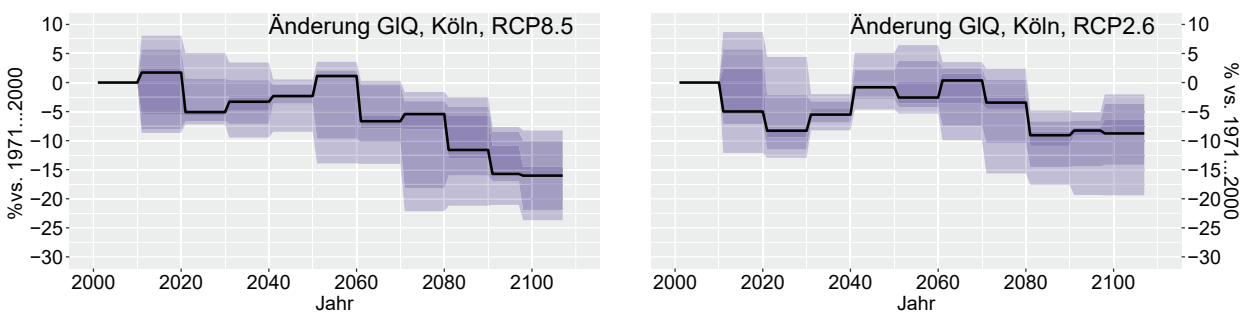


Abbildung 3-13: Änderung des für das Wasserstraßenmanagement wichtigen gleichwertigen Abflusses (GIQ) am Pegel Köln unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (links) und des *Klimaschutzszenarios* (rechts). In der WSV-Praxis wird dieser Kennwert ca. alle 10 Jahre auf Basis vieljähriger Daten (hier: 30 Jahre) neu ermittelt. Dieses Vorgehen wurde hierbei nachempfunden. Die Schattierungen umreißen Unsicherheitsbereiche, in die 70 % (hell), 50 % bzw. 20 % (dunkel) der Simulationen fallen. Die zentrale Schätzung (Median) des Ensembles ist als Linie durchgezichnet.

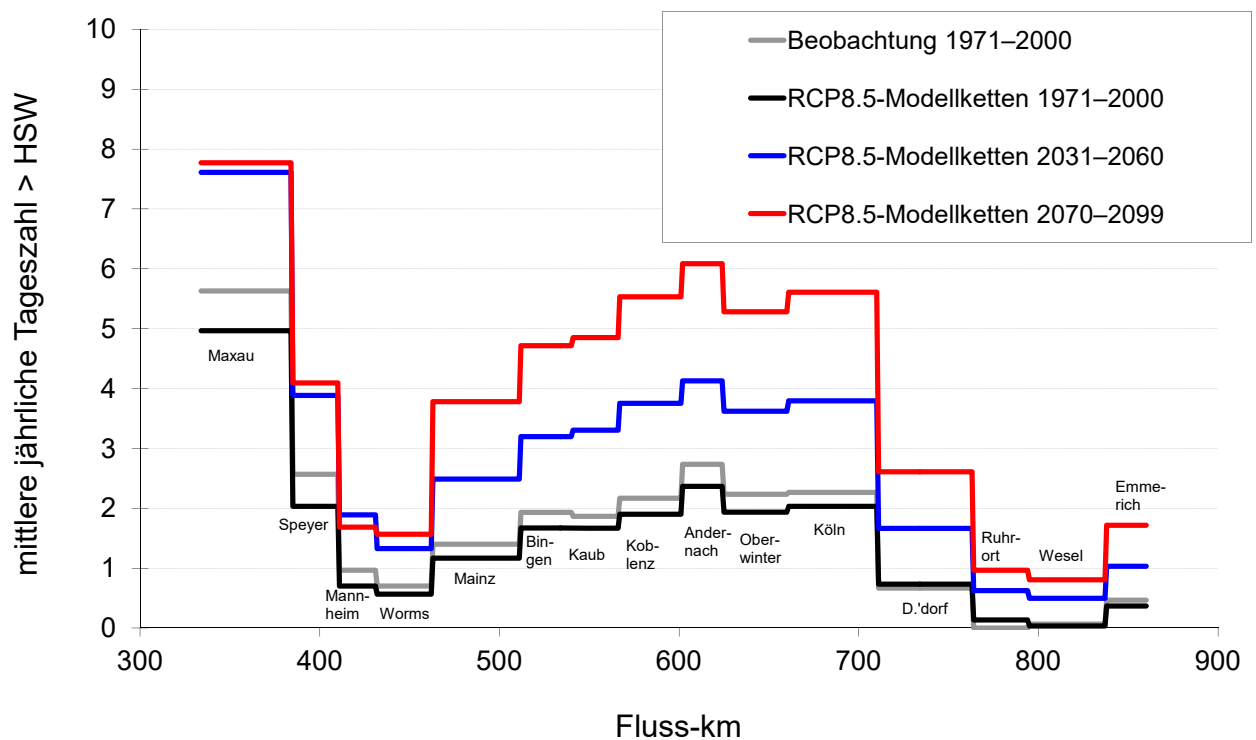


Abbildung 3-14: Längsschnitt des Rheins für die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit HSW-Überschreitung im *Bezugszeitraum* (beobachtet und Modellensemble) sowie in den Zeitscheiben der *nahen* und *fernen Zukunft* unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*.

3.4.2 Hochwasser (höchster Schifffahrtswasserstand)

Für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* ist eine Zunahme der mittleren jährlichen Überschreitungsdauern des höchsten Schifffahrtswasserstands zu erwarten. Am Rhein bleiben die mittleren jährlichen Überschreitungsdauern bei unter einer Woche, an dessen Nebenflusspegeln (meist deutlich) unter zwei Wochen. Im Vergleich mit den wesentlich länger andauernden Niedrigwasserphasen führen Hochwasserereignisse damit in den betrachteten Projektionen nur zu untergeordnet relevanten Unterbrechungsdauern für die Schifffahrt. Weitere Hintergründe und Einzelheiten zu diesem Thema finden sich in den Berichten der Schwerpunkte *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020) sowie *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

Hochwasserereignisse sind für die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehrsbetrieb generell relevant, wenn sie gewisse Schwellenwerte überschreiten. Dies trifft auf die Schienen- und Straßenverkehre zu (vgl. Abschnitt 3.3.1), aber auch auf die Binnenschifffahrt. Bei Überschreitung des höchsten Schifffahrtswasserstands (HSW bzw. HSW-II) wird die Schifffahrt eingestellt. An einigen Wasserstraßen gibt es zudem tiefere Schwellenwerte (HSW-I), die Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote oder sonstige Einschränkungen mit sich bringen. Entsprechende Regeln sind in den Regelwerken (Polizeiverordnungen) der einzelnen Wasserstraßen hinterlegt. Meist sind Aspekte der Verkehrssicherheit, des Schutzes der ufernahen Bebauung und/oder Brückendurchfahrtshöhen (Aspekt der Sensitivität i. S. d. Klimawirkungsanalyse, vgl. Abschnitt 3.2) ausschlaggebend für die Ausweisung eines HSW. Ferner verlieren verschiedene Wasserbauwerke jenseits gewisser Wasserstände ihre Funktion bzw. können beschädigt werden.

Die grundlegenden, in Abschnitt 3.3.1 getroffenen, Richtungsaussagen bzgl. einer zukünftigen Zunahme hochwasserbedingter Verkehrseinschränkungen gelten auch für die Binnenschiffahrtsstraße. Allerdings sind die zu berücksichtigenden Schwellenwerte in der Regel niedriger, sodass die Schifffahrt häufiger von Hochwasser betroffen ist als der landseitige Verkehr²⁹.

Im Zuge der Expositionsanalyse wurde die mittlere jährliche Häufigkeit bzw. Gesamtdauer der Überschreitung des HSW (bzw. der zugehörigen Abflusswerte HSQ) an den in den Polizeiverordnungen ersichtlichen Richtpegeln und Bundeswasserstraßenabschnitten analysiert. Damit wurde zunächst ein synoptisches Bild für die Gegenwart (*Bezugszeitraum* 1971–2000) erzeugt, dem anschließend Häufigkeiten aus Zukunftsprojektionen gegenübergestellt werden, um ggf. zu erwartende Änderungen zu erkennen. Methodische Schritte sind unter anderem bei Nilson und Helms (2017) hinterlegt.

Abbildung 3-14 zeigt exemplarisch Ergebnisse für den Rhein im Längsschnitt von Flusskilometer 340 (Oberrhein) bis zur deutsch-niederländischen Grenze bei Flusskilometer 860. In der Gegenwart ist die Häufigkeit der HSW-Überschreitung für den Pegel Maxau mit fünf bis sechs Tagen pro Jahr am höchsten. Bis zum Pegel Worms sinkt sie auf unter einen Tag pro Jahr und steigt bis zum Pegel Andernach wieder auf zwei bis drei Tage pro Jahr an. Unterhalb des Pegels Köln lagen die Unterschreitungshäufigkeiten wiederum unterhalb von einem Tag pro Jahr. Beobachtung (schwarz) und Simulation (grau) decken sich. Am Main liegen die Häufigkeiten bei zwei bis drei Tagen im Unterlauf (ab Hafen Aschaffenburg) und bei drei bis sechs Tagen stromaufwärts (ohne Abbildung). An der Mosel und am

Neckar wurden bisher nur einzelne Abschnitte analysiert. Hierbei ergaben sich neun Tage pro Jahr (Neckarabschnitt mit Richtpegel Rockenau) und ca. sechs Tage (Moselabschnitte der Richtpegel Trier und Cochem).

Aus den für die Zukunftsperioden simulierten Abflussreihen und daraus gebildeten Ensembleserien wurden erhöhte Überschreitungshäufigkeiten ermittelt, wobei die Charakteristik in Längsrichtung weitgehend erhalten bleibt mit den höchsten Überschreitungen am Oberrhein und den niedrigsten am Niederrhein. Aufgrund der streckenweise geringen Häufigkeiten im *Bezugszeitraum* ergeben sich teilweise hoch anmutende relative Änderungen schon in der *nahen Zukunft*, die in solchen Fällen jedoch absolut betrachtet auf niedrigem Niveau bleiben (Zunahme meist unter 2 Tage pro Jahr). Für die *ferne Zukunft* erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten stromabwärts vom Pegel Worms an deutlich, wobei die Zunahme gegenüber dem *Bezugszeitraum* 3 Tage (Mainz) bis 4 Tage (nördlicher Mittelrhein) beträgt. Insgesamt ergab sich am Rhein maximal eine zukünftige mittlere HSW-Überschreitung an knapp acht Tagen pro Jahr im Abschnitt des Pegels Maxau.

An den Nebenflüssen (hier nicht dargestellt) ergaben sich in den meisten Gewässerabschnitten geringere Zunahmen gegenüber dem *Bezugszeitraum* um 1 bis 2 Tage für die *nahe Zukunft* und 3 bis 4 Tage für die *ferne Zukunft*. Stärkere relative Zunahmen (auf bis zu 5 Tage in der *fernen Zukunft*) wurden am Unterlauf des Mains gefunden. Insgesamt zeigen sich im Mittel pro Jahr an den untersuchten Nebenflussabschnitten auch in der *fernen Zukunft* nicht mehr als 12 Überschreitungstage. Die genannten Änderungen bestätigen sich in der Tendenz (Richtung, Umfang) mit den früheren Ergebnissen aus KLIWAS.

²⁹Die Häufigkeit ist hierbei nicht mit der Dauer einer Beeinträchtigung gleichzusetzen. Dabei wäre weiterhin zu berücksichtigen, dass die Infrastrukturen des Straßen- und Schienenverkehrs im Hochwasserfall Schaden nehmen können. Somit wären den reinen Ereignisdauern auch Wiederherstellungszeiten hinzuzurechnen. Hierzu sind jedoch keine begründeten Szenarienaussagen möglich.

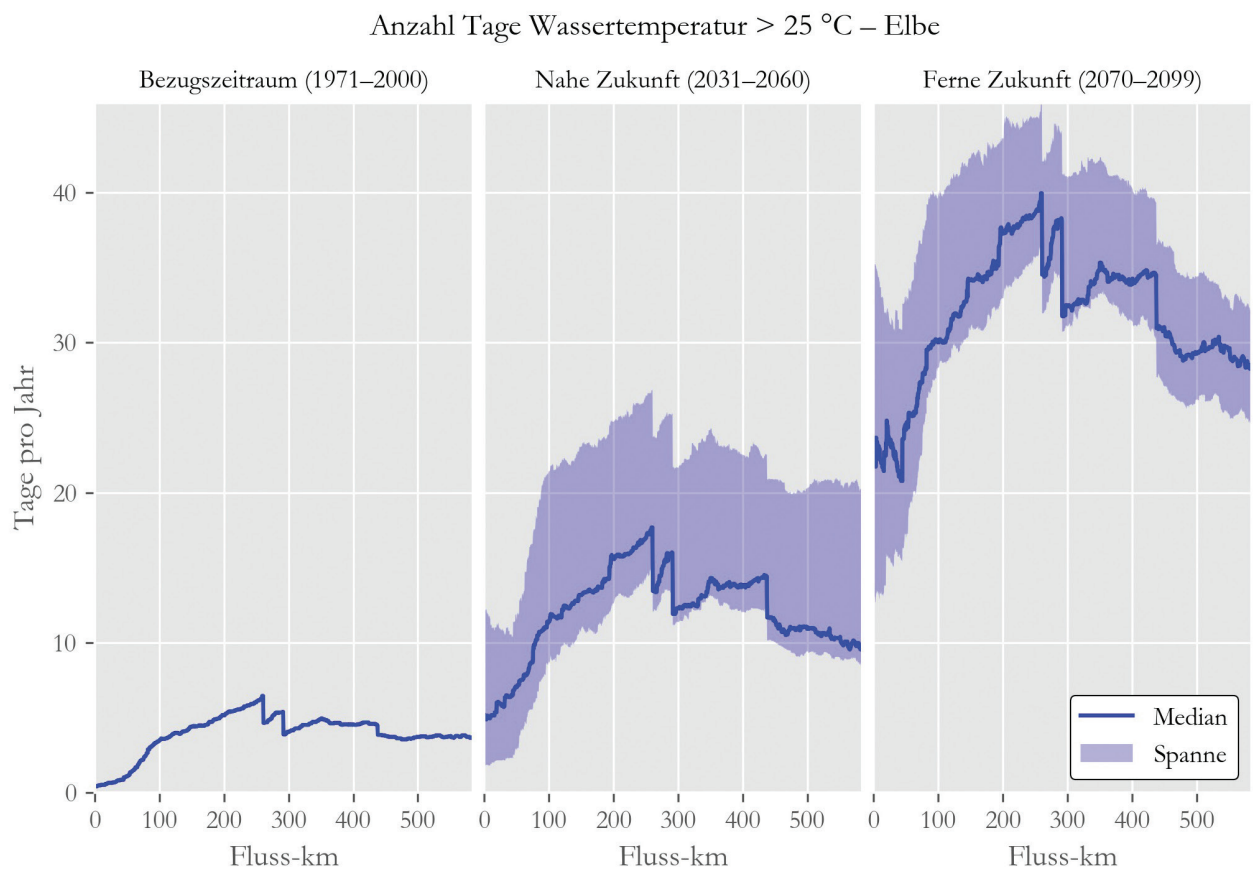


Abbildung 3-15: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 °C in der Binnenelbe für den *Bezugszeitraum* sowie die *nahe* und die *ferne Zukunft*. Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Spannweite (Minimum und Maximum) der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*.

3.4.3 Wassergüte

Die projizierten Veränderungen der Lufttemperaturen und des Abflusses führen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* zu einer deutlichen Erhöhung der Wassertemperaturen. Kritische Wassertemperaturschwellenwerte (> 25 °C bzw. > 28 °C) werden in der *fernen Zukunft* in Rhein und Elbe um ein Vielfaches häufiger überschritten (z. B. 30 Tage über 25 °C an der Elbe). Geringere Phytoplanktondichten im Spätsommer und Herbst sind möglich, eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration ist zu erwarten. In Kombination könnten sich insbesondere die erhöhten Wassertemperaturen erheblich auf den Stress und die Fitness von Wassertieren auswirken

und die Mortalität erhöhen. Weitergehende Informationen zu diesem Thema sind im Schwerpunktbericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) nachzulesen.

Wasserstraßen sind nicht nur Verkehrsträger, sondern auch Natur- und Lebensraum. Das Wasser von Wasserstraßen wird in vielfältiger Weise genutzt (z. B. als Kühlwasser). Für das Wasserstraßenmanagement und somit für die WSV sind daher neben der Wassermenge auch Parameter und Prozesse der Gewässergüte relevant. Dies betrifft z. B. Überschreitungshäufigkeiten von prozesstechnisch oder gesetzlich verlangten Grenzwerten – auch im Hinblick auf die Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Nach dieser Richtlinie – umgesetzt in deutsches Recht durch die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) – müssen alle

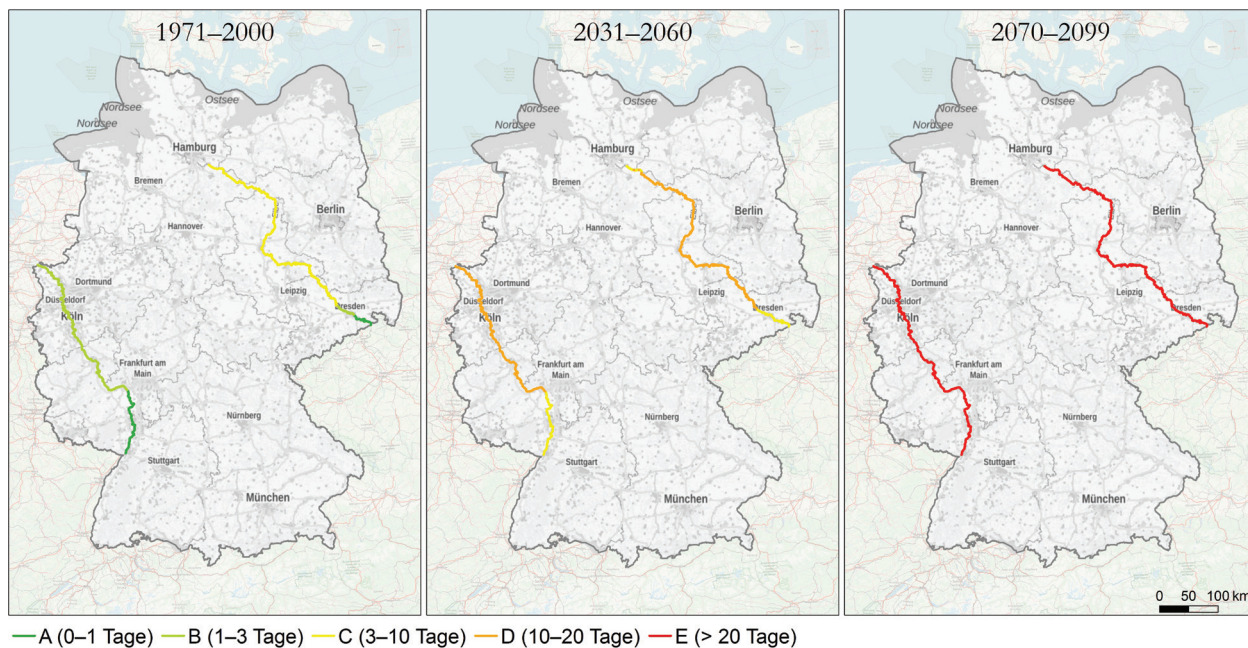


Abbildung 3-16: Mittlere Anzahl von Tagen mit Wassertemperatur über 25 °C von Elbe und Rhein, simuliert auf Basis von fünf Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* für den *Bezugszeitraum* (links) sowie die *nahe* (Mitte) und die *ferne Zukunft* (rechts).

Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet größer 10 ha den "guten ökologischen Zustand"³⁰ bzw. das "gute ökologische Potential"³¹ erreichen bzw. diese Bewertung behalten. Eine Verschlechterung des Zustandes ist nicht erlaubt. Der Klimawandel könnte aber genau hierzu beitragen.

Die durchgeführte modellgestützte Analyse bezieht die Größen Wassertemperatur (auch für Kühlwassernutzung relevant), Sauerstoffkonzentration (für das Wohlbefinden bzw. den "Stress" der Fauna relevant) und den Algengehalt³² (u. a. für das Sedimentmanagement der WSV relevant) ein. Eingesetzt wurde das Wassergütemodell QSim für den Rhein und die Elbe. Alle hier vorgestellten Auswertungen

beziehen sich auf eine Auswahl von fünf Zukunftsprojektionen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*.

In der Elbe und im Rhein wird die Anzahl an Tagen mit kritischen Wassertemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen. Abbildung 3-15 zeigt dies exemplarisch in Form eines Längsschnittes für den ökologisch relevanten Schwellenwert von 25 °C in der Elbe. Abbildung 3-16 setzt die heutige und zukünftige Exposition gegenüber hohen Wassertemperaturen (ebenfalls Anzahl Tage > 25 °C) kartografisch für Rhein und Elbe um. Waren es im *Bezugszeitraum* in der Elbe noch 3 bis 6 Überschreitungstage, ist in der *fernen Zukunft* an diesen Flüssen mit 20 bis 40 Überschreitungstagen pro Jahr zu rechnen. Der auch für die Kühlwassernutzung relevante Schwellenwert von 28 °C könnte in beiden Flüssen am Ende des Jahrhunderts an gut vier Tagen pro Jahr überschritten werden (*Bezugszeitraum*: 0 Tage).

Eng verknüpft mit der Wassertemperatur sowie mit den Änderungen des Abflusses (s. Abschnitt 2.4) werden sich auch der Sauerstoffgehalt und die Konzentrationen des

³⁰ Bewirtschaftungsziel der EU-WRRL im Hinblick auf die Fischfauna, das Makrozoobenthos, die Makrophyten und das Phytoplankton bzw. Phytobenthos.

³¹ Bewirtschaftungsziel der EU-WRRL, das für erheblich veränderte und künstliche Gewässer gilt.

³² Phytoplankton approximiert durch den Gehalt Pigment Chlorophyll-a.

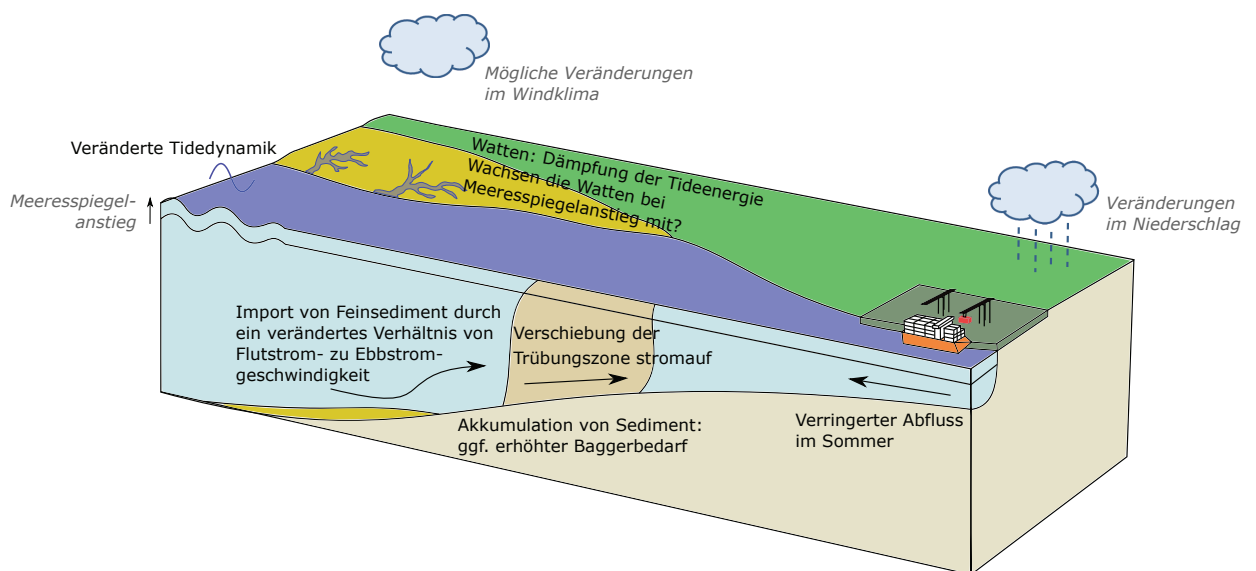


Abbildung 3-17: Schematische Darstellung der Klimawirkungen auf Seeschiffahrtsstraßen im Ästuar. Die Eingangsgrößen für die Simulationen im Ästuarbereich sind als grauer Text gesetzt.

Phytoplanktons (frei schwebende Algen) verändern. Vor allem in den Spätsommer- und Herbstmonaten können die Phytoplanktondichten in der Elbe zurückgehen. Die Gründe dafür sind vielfältig und die Wirkungszusammenhänge komplex. Bedingt durch die längeren Wasseraufenthaltszeiten kann es zu höheren Populationsdichten von Fressfeinden (z. B. Muscheln, Rädertierchen) kommen. Bedingt durch sowohl verringerte Algendichten (als Sauerstoffproduzent) als auch höhere Temperaturen (geringere Löslichkeit des Sauerstoffs) kann es insbesondere in der *fernen Zukunft* zu einer Verringerung der Sauerstoffkonzentrationen kommen, die aber noch keine kritisch niedrigen Werte erreichen. In Kombination würden sich die dargestellten Änderungen besonders aufgrund der hohen Wassertemperaturen erheblich auf Stress und Fitness der Wassertiere auswirken. Auch eine erhöhte Mortalität mancher Arten ist denkbar.

3.4.4 Klimawirkungen auf Seeschiffahrtsstraßen

Seeschiffahrtsstraßen werden maßgeblich durch den Meeresspiegelanstieg beeinflusst. Der Meeresspiegelanstieg führt zu einem erhöhten Verhältnis

von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit und dadurch zu einem erhöhten Import von marinen Feinsedimenten. Zudem führt er zu einer Verschiebung von Brackwasser- und Trübungszone nach stromauf. Neben dem Meeresspiegelanstieg können langanhaltende niedrige Abflusssituationen den Feinsedimentimport in das Ästuar ebenfalls verstärken und die Brackwasser- und Trübungszone zeitweise nach stromauf verschieben. Falls sich die Wassertiefe aufgrund des erhöhten Sedimentimports stärker verringert, als sie sich durch den Meeresspiegelanstieg vergrößert, muss mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden. Weitergehende Informationen zu diesem Themenbereich sind in den Schlussberichten zu den Schwerpunktthemen *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) sowie *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) nachzulesen.

Auf die Seeschiffahrtsstraßen wirkt sich der Klimawandel über den beschleunigten Meeresspiegelanstieg, Änderungen im Abflussgeschehen im Binnenbereich und Änderungen von Windrichtung und -stärke aus (Abbildung 3-17). Einen dominanten Einfluss auf die Nutzung und Unterhaltung der Wasserstraßen haben dabei der Meeresspie-

gelanstieg (s. Abschnitt 2.6) und die damit einhergehenden Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und den Ästuaren (s. Abschnitt 2.7). Mit dem Meeresspiegelanstieg geht u. a. ein erhöhtes Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit einher sowie eine Verschiebung von Brackwasser- und Trübungszone nach stromauf (Seiffert et al. 2014). Das erhöhte Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit führt zu einem erhöhten Import von marinen Feinsedimenten in die Ästuare. Dies bewirkt morphologische Veränderungen, die zu erhöhten Baggermengen führen können auf die gegebenenfalls mit einer Fortschreibung des Sedimentmanagementkonzepts und eventuell Strombaumaßnahmen reagiert werden muss.

Ob der Meeresspiegelanstieg insgesamt zu einer Vergrößerung oder Verringerung der Wassertiefe (aufgrund des erhöhten Sedimentimports) führt, ist derzeit noch ungewiss. Für die Tide- und Sedimentdynamik spielen die Wattgebiete in den Außenästuaren eine zentrale Rolle. Aufgrund der geringen Wassertiefe wird hier Tideenergie dissipiert, sodass der Eintrag von Tideenergie ins stromauf gelegene Ästuar reduziert wird. Dadurch wird die Tidedynamik im gesamten Ästuar hinsichtlich der Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen positiv beeinflusst. Dieser dämpfende Effekt der Watten wird bei einem Meeresspiegelanstieg reduziert, falls das Wattwachstum nicht mit dem Meeresspiegelanstieg Schritt halten kann (s. Abschnitt 2.7). Aus diesen Gründen ist eine den Meeresspiegelanstieg begleitende Förderung des Wattwachstums nicht nur für den Küsten- und Naturschutz, sondern auch für die Unterhaltung der Seehafenzufahrten von hoher Relevanz (s. Abschnitt 4.4.3). Neben dem Meeresspiegelanstieg spielen auch Änderungen im Abfluss eine Rolle. Die Verlängerung und Intensivierung von Niedrigwasserperioden im Binnenbereich (s. Abschnitte 2.4 und 3.4.1) kann zeitweise zu einer landwärtigen Verschiebung der Brackwasser- und Trübungszone führen und den oben beschriebenen Effekt des Feinsedimentimports in das Ästuar verstärken. Eine mögliche Anpassungsmaßnahme ist ein flexibles, angepasstes Sedimentmanagement, in dem je nach Abflussverhältnissen Baggereinsätze geplant werden. Eine notwendige Voraussetzung dafür stellt die Vorhersage des Abflussgeschehens auf längeren Zeitskalen dar (bis hin zur saisonalen Vorhersage), um die Durchführung von Maßnahmen des Sedimentmanagements kurz- bis mittelfristig besser planen zu können und damit ihre Effektivität zu erhöhen.

Änderungen der Windverhältnisse in der Deutschen Bucht (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Häufigkeit von Stürmen) können neben dem Meeresspiegelanstieg die morphologische Entwicklung an den deutschen Küsten ebenfalls stark prägen und ferner die Sicherheit der Seeschifffahrt direkt gefährden. Die aktuellen Modellsimulationen zeigen jedoch keine bzw. nur geringfügige Änderungen der mittleren sowie maximalen Windgeschwindigkeit bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Bereich der Nordsee und der Deutschen Bucht (s. Abschnitt 2.8 sowie Ganske et al. (2016)). Das Zusammenspiel von Meeresspiegelanstieg, Binnenhydrologie und Windklimatologie wirkt sich ebenfalls auf die Bewirtschaftung und die Befahrbarkeit des Nord-Ostsee-Kanals aus. Diese Fallstudie wird in Abschnitt 3.6.2 behandelt.

3.5 Bewertung der Kritikalität

Die Klimawirkungsanalyse umfasst eine vereinfachte Bewertung der verkehrlichen Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten des Bundesverkehrsnetzes. Bei dieser als Kritikalitätsanalyse bezeichneten Bewertung werden Indikatoren dazu verwendet, die Bedeutung von Streckenabschnitten vor dem Hintergrund von möglichen Einschränkungen der Verfügbarkeit zu beschreiben.

Das in der Kritikalitätsanalyse verwendete Datenmaterial stammt überwiegend aus dem Bundesverkehrswegeplan (BMVI 2015a). Die sogenannte Verkehrsverflechtungsprognose erlaubt z. B. eine Bewertung der aktuellen (Bezugsjahr 2010/2015) und zukünftigen (Prognosejahr 2030) Verkehrsbelastung. Die hier durchgeführte verkehrliche Kritikalitätsanalyse für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße unterscheidet sich nicht für die betrachteten, oben genannten klimatischen Einflüsse und Folgewirkungen (Abschnitte 3.3 und 3.4). Sie basiert auf Daten, die im Grundsatz unabhängig von der Thematik "Klimawandel und Wetterextreme" generiert wurden. Unterschiede ergeben sich jedoch für die einzelnen Verkehrsträger aufgrund deren Netzstrukturen und unterschiedlichen Funktionen im Verkehrssystem. In einer gesonderten Betrachtung (Wassergüte, Abschnitt 3.5.3) wurde exemplarisch ein Ansatz zu einer ökologischen Kritikalitätsbewertung gewählt.

3.5.1 Straße

Die Bewertung der Kritikalität von Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes erfolgt anhand eines indikatorenbasierten Bewertungsansatzes. Erste Ergebnisse der derzeit noch in Entwicklung befindlichen Kritikalitätsanalyse werden am Beispiel des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen vorgestellt. Diese vereinfachte Auswertung lässt erkennen, dass vor allem Bundesautobahnen in und zwischen Metropolregionen verkehrliche Belastungsschwerpunkte darstellen, womit sie diesbezüglich eine hohe Relevanz aufweisen. Die Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz erfolgt im Rahmen eines externen Forschungsprojektes und wird sich im Weiteren auf zusätzliche Indikatoren stützen.

Für den Verkehrsträger Straße beinhaltet die Kritikalitätsanalyse eine indikatorenbasierte Bewertung der verkehr-

lichen Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes für die Jahre 2015 und 2030. Die Entwicklung des Bewertungsansatzes und die Durchführung der Kritikalitätsanalyse erfolgen im Rahmen eines externen Forschungsprojektes (Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG 2019). Nachfolgend sind erste Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse am Beispiel des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen dargestellt.

Datengrundlage der Kritikalitätsanalyse sind die Ergebnisse der Bundesverkehrswegeplanung. Dazu zählen auf die Jahre 2015 bzw. 2030 bezogene Ist- und Prognosedaten zu den Verkehrsbelastungen im gegenwärtigen bzw. zukünftigen Straßennetz. Die Bewertung der verkehrlichen Bedeutung basiert auf Indikatoren, die aus dieser Datengrundlage abgeleitet werden. Ein zentraler und derzeit noch einziger Indikator in der aktuellen Fassung der Kritikalitätsanalyse ist der DTVw. Er beschreibt die durchschnittliche Anzahl an Kfz pro Werktag auf Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes.

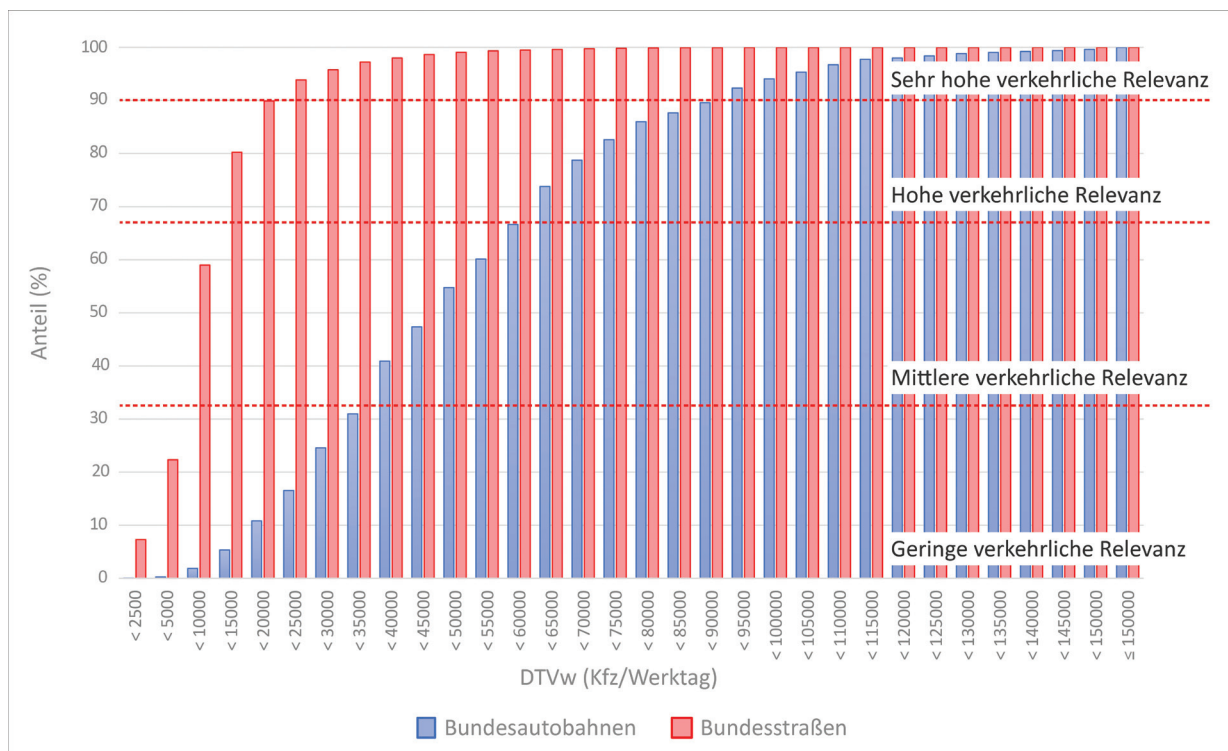


Abbildung 3-18: Ermittlung der Klassengrenzen für den Indikator durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTVw) differenziert nach Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).

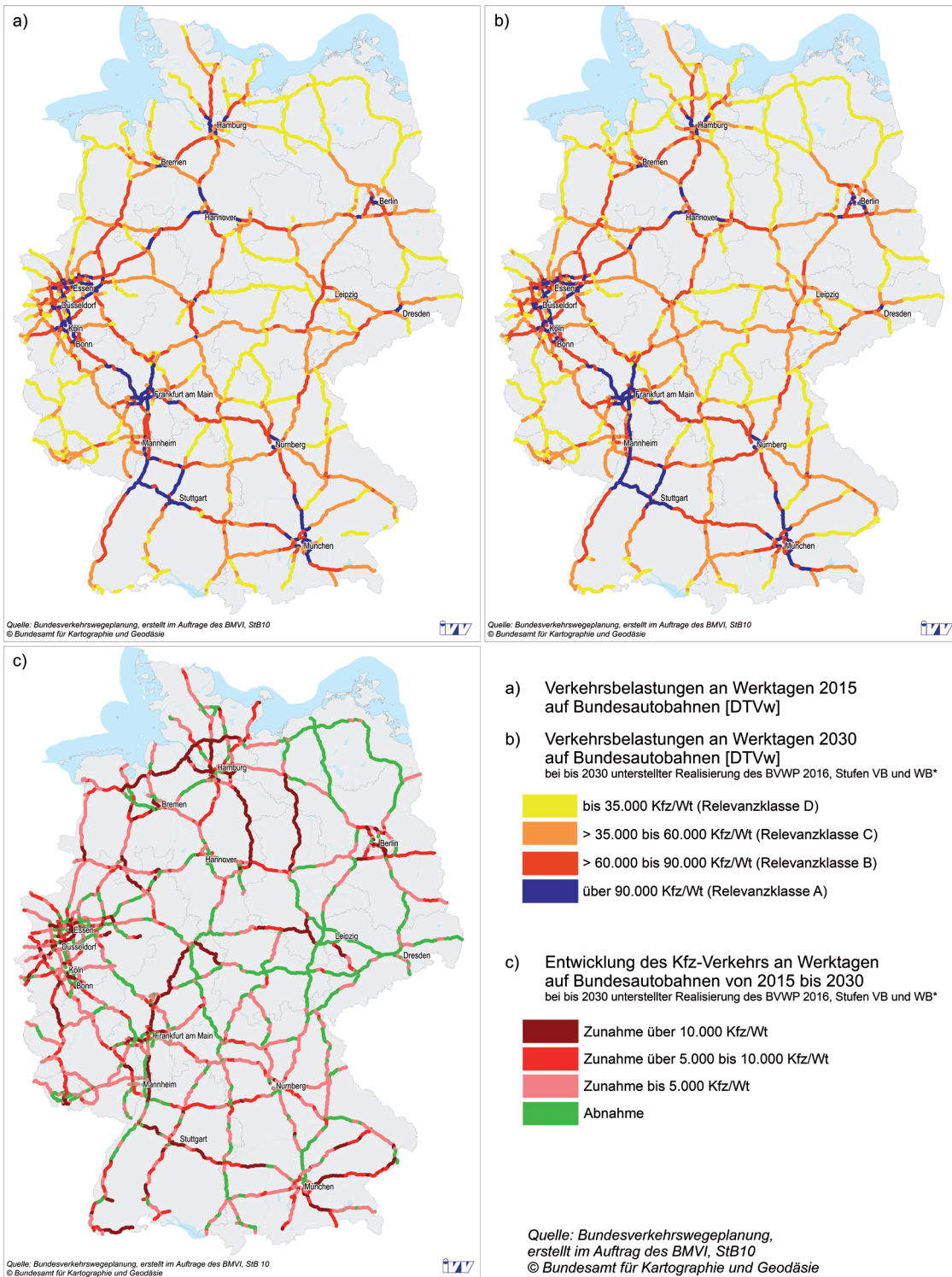


Abbildung 3-19: Erste Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse am Beispiel des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen (Quelle: Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).

Tabelle 3-5: Einteilung des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen in verkehrliche Relevanzklassen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG (2019)).

Klasse	Beschreibung	Durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTVw)
A	sehr hohe verkehrliche Relevanz	> 90.000 Kfz
B	hohe verkehrliche Relevanz	> 60.000 Kfz bis ≤ 90.000 Kfz
C	mittlere verkehrliche Relevanz	> 35.000 Kfz bis ≤ 60.000 Kfz
D	geringe verkehrliche Relevanz	≤ 35.000 Kfz

Der in Entwicklung befindliche Bewertungsansatz sieht eine Klassifizierung der auf Verkehrsmengen bezogenen Indikatoren in verkehrliche Relevanzklassen vor. Dazu wurden vier Klassen gebildet, die von geringer bis zu sehr hoher verkehrlicher Relevanz reichen. Die Klassifizierung erfolgte differenziert nach Bundesautobahnen und außerörtlichen Bundesstraßen. Es wurden prozentuale Klassenanteile ermittelt und diese der Festlegung der Klassengrenzen zugrunde gelegt (Abbildung 3-18).

Eine mögliche Klasseneinteilung für den DTVw auf Bundesautobahnen ist in Tabelle 3-5 dargestellt. Abbildung 3-19 zeigt die Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse anhand dieser Klasseneinteilung. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass Bundesautobahnen vor allem in Ballungsräumen verkehrlich stark belastet sind. Eine hohe bis sehr hohe verkehrliche Relevanz besitzen deshalb zumeist in oder zwischen Metropolregionen (FGSV 2008) befindliche Streckenabschnitte des Bundesautobahnnetzes. Die Verkehrsentwicklung bis 2030 lässt keine wesentliche Veränderung der verkehrlichen Belastungsschwerpunkte erwarten. Dieses Beispiel stellt eine vereinfachte Betrachtung dar und ist bei der Weiterentwicklung der Kritikalitätsanalyse um zusätzliche Indikatoren zu ergänzen. Als zusätzliche Indikatoren werden derzeit beispielsweise der durchschnittliche werktägliche Schwerverkehr (DTVw(SV)), die durchschnittliche Reiseweite im DTVw bzw. DTVw(SV) und die Straßennetzdichte diskutiert.

3.5.2 Schiene

Die wirtschaftliche Bedeutung einer möglicherweise klimawandelbedingt eingeschränkten Verfügbarkeit der Schienenverkehrsinfrastruktur hängt u. a. vom Verkehrsaufkommen ab. Für den Schienengüterverkehr weisen Strecken in den TEN-V-Korridoren hohe Zugzahlen auf. Unterbrechungen auf wichtigen Schienenwegen ziehen erhebliche volkswirtschaftliche Folgeschäden nach sich. Beispielsweise hat die Streckensperrung bei Raststatt im Jahr 2017 Kosten in Höhe von 2 Mrd. Euro ausgelöst.

Der Eisenbahnverkehr lässt sich in drei große Bereiche unterteilen, den Schienengüterverkehr, den Schienenpersonenfernverkehr und den Schienenpersonennahverkehr. Zur Bewertung der Kritikalität wurde der Indikator "Anzahl der Züge pro Tag" herangezogen (siehe Abbildung 3-20). Die Kritikalität der Schiene wird somit in dieser ersten Projektphase insbesondere auf viel befahrenen Streckenabschnitten als hoch und auf wenig befahrenen Strecken als niedrig eingestuft. Die Einteilung erfolgt wie bei der Straße in vier Klassen, wobei die Einteilung (in Anzahl der Züge pro Tag) wie folgt ist: ≤ 30, 30 ≤ 60, 60 ≤ 120 und > 120. Hiervon abweichend können auch Strecken mit geringem Verkehrsaufkommen eine hohe Kritikalität aufweisen, wenn diese Abschnitte zur Versorgung bestimmter Einrichtungen dienen, die auf andere Weise nicht logistisch bedient werden können.

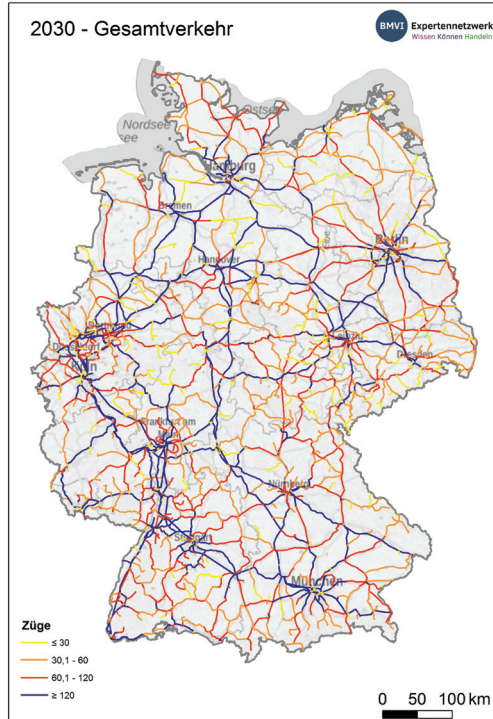
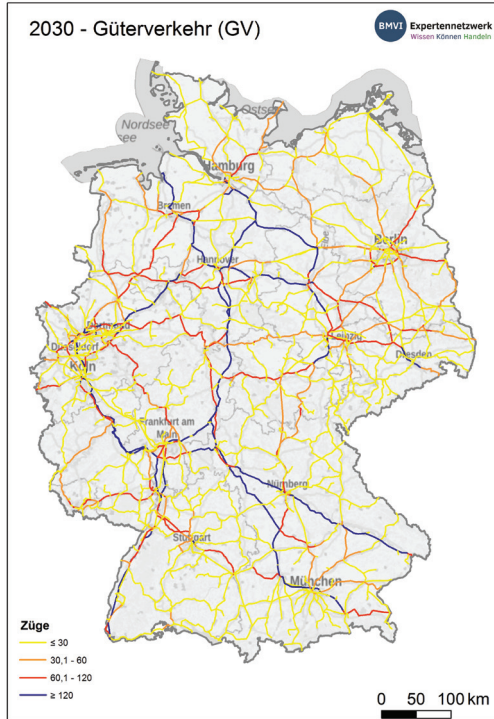
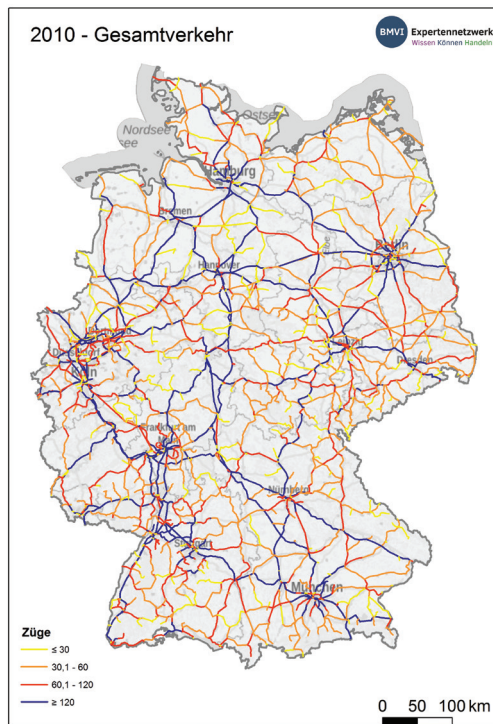
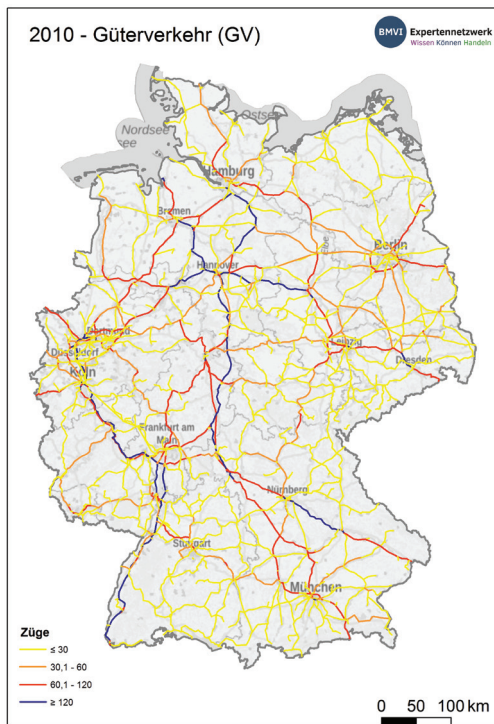


Abbildung 3-20: Bewertung der Kritikalität der Streckenabschnitte des Schienennetzes mittels der Anzahl der Züge für den Güterverkehr (links) sowie den Gesamtverkehr (rechts) für das Referenzjahr 2010 (oben) und das Prognosejahr 2030 (unten; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015a)).

Im Schienengüterverkehr weisen insbesondere die TEN-V-Korridore³³ hohe Zugzahlen für das Referenzjahr 2010 auf. Diese verbinden zur besseren Vernetzung im Binnenmarkt u. a. wichtige Häfen und Wirtschaftsstandorte in Europa. Hierzu gehören beispielsweise der Rhein-Alpen-Korridor, der von den niederländischen und belgischen Nordseehäfen über Köln und Frankfurt nach Basel und an die italienische Mittelmeerküste (Genua) führt, oder der Skandinavien-Mittelmeer-Korridor, der in Deutschland von den deutschen Nordseehäfen über Hannover und München Richtung Italien stark befahren ist. In Ost-West-Richtung verlaufen der Nordsee-Ostsee-Korridor, der von den Nordseehäfen über Köln-Hannover-Berlin nach Polen/Litauen/Lettland/Estland führt, sowie der Rhein-Donau-Korridor, der von Frankfurt über Nürnberg bzw. über Stuttgart und München bis ans Schwarze Meer verläuft. Ebenfalls hohe Zugzahlen liegen für den Korridor Orient-Östliches Mittelmeer vor, der von Hamburg-Berlin-Prag bzw. Wilhelmshaven/Bremerhaven-Bremen-Leipzig-Prag bis an die griechische Mittelmeerküste führt. Die Prognose für das Jahr 2030 geht weiterhin von hohen Zugzahlen in diesen Korridoren für den Güterverkehr aus.

Im Schienenpersonenfernverkehr verkehren besonders viele Züge zwischen den großen Ballungsräumen. Hierzu zählen insbesondere die Streckenabschnitte Hamburg-Hannover, Berlin-Hannover, Hannover-Frankfurt, Köln-Frankfurt, Frankfurt-Mannheim-Basel, Frankfurt-Mannheim-Stuttgart-München und Frankfurt-Nürnberg-München. Hierbei sind insbesondere Frankfurt (M) Hauptbahnhof und Frankfurt Flughafen Fernbahnhof hoch frequentierte Drehkreuze für den Fernverkehr. Die Prognose für das Jahr 2030 zeigt hohe Zugzahlen für die gleichen Abschnitte wie im Jahr 2010, teilweise wird mit einer Zunahme der Anzahl der Züge pro Tag auf einzelnen Streckenabschnitten gerechnet.

Der Schienenpersonennahverkehr ist besonders relevant in und um die Großstädte sowie in den Metropolregionen wie Berlin, Hamburg, München, Stuttgart, Hannover, Nürnberg, Rhein-Ruhr, Rhein-Main und Rhein-Neckar. In diesen Regionen herrscht bereits jetzt ein hohes Verkehrsaufkom-

men und auch für die Zukunft (für das Jahr 2030) wird weiterhin ein hohes Verkehrsaufkommen prognostiziert.

3.5.3 Wasserstraße

In verkehrlicher Sicht sind auch bei der Wasserstraße TEN-V-Korridore von besonderer Bedeutung. In einer gewichtsbezogenen Betrachtung treten der Seeverkehr sowie der Rhein als wichtigste Binnenschiffahrtsstraße hervor. Anzumerken ist jedoch, dass Wasserstraßentransporte auch auf relativ wenig befahrenen Abschnitten eine hohe Bedeutung für die regionale Wirtschaft haben können. Ferner sind weitere Funktionen der Wasserstraßen (z. B. ökologische) bei der Bewertung der Kritikalität zu berücksichtigen.

Die Kritikalitätsbewertung der Wasserstraße zeigt einige grundlegende Unterschiede zu den anderen Verkehrsträgern. (1) Der Personentransport spielt im vorliegenden Zusammenhang nur eine untergeordnete Rolle. Das ist nicht in wirtschaftlicher Hinsicht zu verstehen – die "weiße Flotte", der Fährverkehr, der Boottourismus und die Freizeitschiffahrt sind an mehreren Orten wirtschaftlich relevant –, sondern erschließt sich über die im Vergleich zur Güterschiffahrt geringere Verwundbarkeit (v. a. geringere Tiefenansprüche) der Personenschiffahrt gegenüber den Folgen des Klimawandels. (2) Die Seeschiffahrt und in einigen Wasserstraßenabschnitten auch die Binnenschiffahrt haben nicht nur aufgrund der umgeschlagenen Gütermengen, sondern auch aufgrund ihrer Alternativlosigkeit eine hohe Kritikalität. (3) Wasserstraßen sind – wie in Abschnitt 3.4 bereits angemerkt – nicht nur Verkehrsträger, sondern auch Natur- und Lebensraum und stellen darüber hinaus eine wichtige Ressource – eben Wasser – bereit. Somit wird neben der verkehrlichen Kritikalitätsbewertung (hier gewichtsbezogen in Mio. t pro Jahr) auch eine Bewertung aus ökologischer Perspektive vorgenommen. Eine umfangreiche ökonomische Bewertung der Ressource "Wasser", z. B. für die Versorgung der Bevölkerung und der Industrie, ist nicht Gegenstand des BMVI-Expertenetzwerks.

Die in Abbildung 3-21 dargestellte Kartenserie offenbart zunächst, dass die verkehrliche Bedeutung der verschiede-

³³ transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V); auf Englisch: TEN-Transport bzw. TEN-T https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en

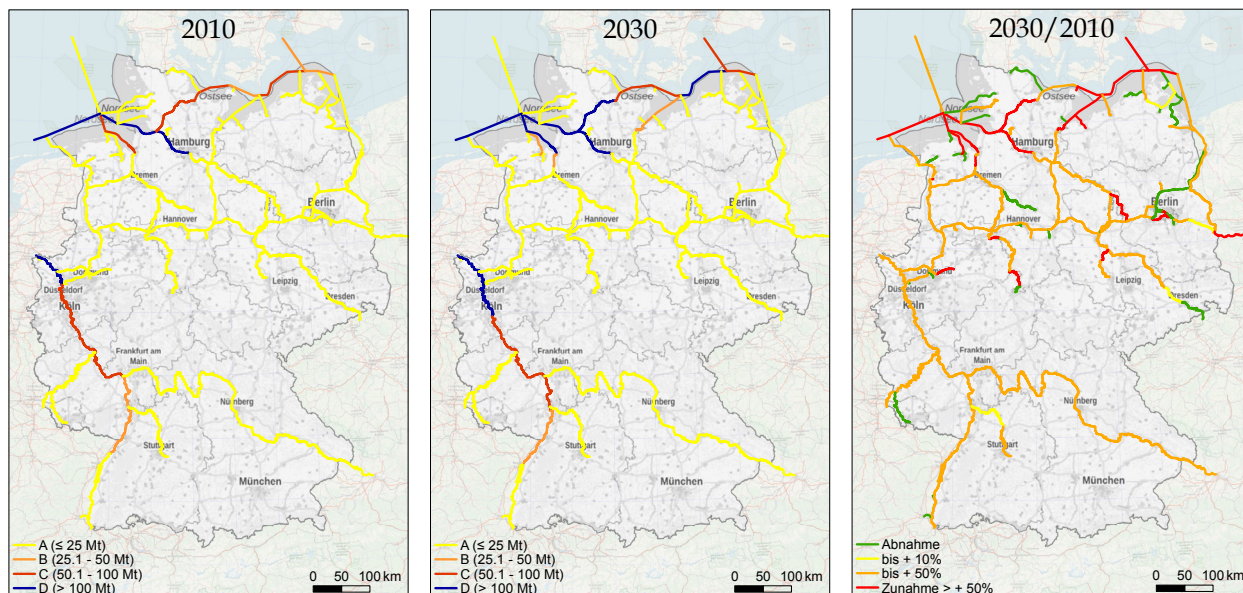


Abbildung 3-21: Bewertung der Kritikalität unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte inverkehrlicher Sicht (Güteraufkommen in Mio. t pro Jahr) für das Referenzjahr 2010, das Prognosejahr 2030 sowie Änderung zwischen beiden Jahren. Datengrundlage: PlanGIS/BVWP (BMVI 2015a).

nen Wasserstraßenabschnitte räumlich stark differiert. Die besondere Bedeutung des Seeverkehrs sowie des Rheins als wichtigste Binnenschiffahrtsstraße tritt in dieser Ansicht deutlich hervor. Anzumerken ist, dass Wasserstraßen-transporte auch auf den hier dargestellten gelben – also im gewählten gewichtsbezogenen Indikator wenig kritischen, weil "schwach" belasteten – Abschnitten eine hohe Bedeutung haben können. Dies trifft dann zu, wenn z. B. die Abmessungen spezieller Güter keinen Transport auf Straße und Schiene, sondern nur den Wasserstraßentransport zulassen (z. B. großes Schwergut, s. g. Projektladung auf der Elbe). Auch eine volumenbezogene Betrachtung, d. h. ein stärkerer Bezug auf Containertransport, würde teilweise zu einem anderen Bild führen. Die dargestellte Änderungskarte (rechts) zeigt, dass das Güteraufkommen bis 2030 fast überall ansteigen wird. Besonders starke Zuwächse werden im Seeverkehr erwartet.

Auch aus ökologischer Perspektive sind klimawandelbedingte Veränderungen an unterschiedlichen Wasserstraßenabschnitten unterschiedlich bedeutsam. Abbildung 3-22 definiert die Kritikalität anhand des "Ökologischen Zustandes" oder "Ökologischen Potenzials" gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. Bis spätestens 2027 ist allorts ein mindestens guter ökologischer Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potenzial mit geeigneten Maßnahmen zu erreichen oder zu erhalten. Der dargestellte Indikator gibt einerseits Aufschluss über die heutige Robustheit der flussnahen Ökosysteme und damit zur Sensitivität (rot = wenig resistent gegenüber weiterem Stress durch den Klimawandel). Andererseits wird deutlich, wo klimawandelbedingte Änderungen, z. B. durch hohe Wassertemperaturen, dem Ziel des guten ökologischen Zustands/Potenzials entgegenstehen.

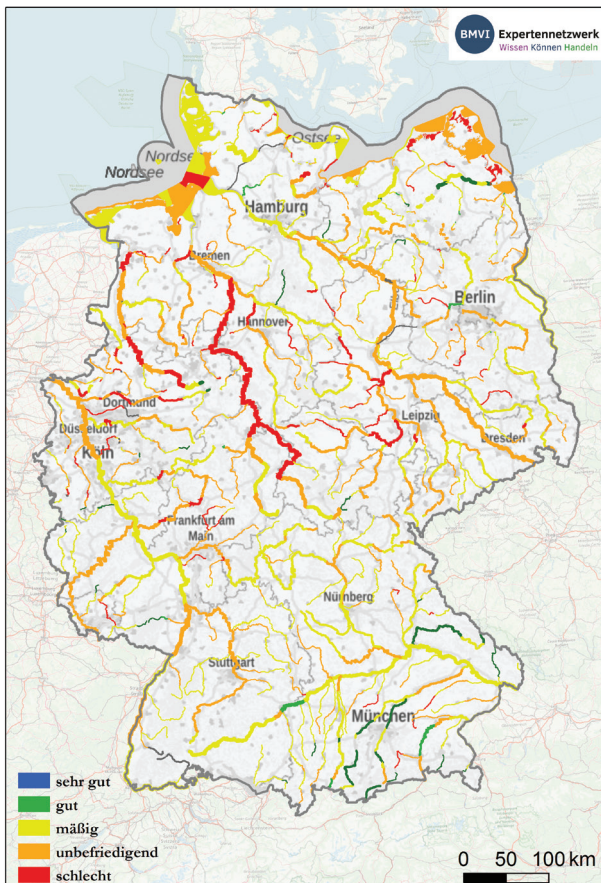


Abbildung 3-22: "Kritikalität" unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte in ökologischer Sicht. Bezug auf die Bewertung nach ökologischem Zustand bzw. ökologischem Potenzial. Datengrundlage: Berichtsportal WasserBLiCK/ BfG, 2. WRRL-Bewirtschaftungsplan, Stand: 30.04.2017.

3.6 Regionale Fallstudien

3.6.1 Stresstests Mittelrhein

Die Stresstests "Mittelrhein" haben gezeigt, dass unter den Annahmen der Verkehrsstrommodellierung (z. B. zu Lagerzeiten, zur Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Fahrern, zur Nutzung ausländischer Netze etc.) die Personen- und Güterverkehre in dieser verkehrlich wichtigen Region auch unter den Annahmen langer witterungsbedingter Verkehrseinschränkungen und -unterbrechungen (z. B. durch

Hangrutschungen, Hoch- und Niedrigwasser) im Wesentlichen abgewickelt werden können. Dazu bietet die Verkehrsinfrastruktur im Mittelrheingebiet sowie weit darüber hinaus genug Alternativen und Kapazitäten für die z. T. großräumigen Umroutungen. Die zeitlichen, logistischen und damit finanziellen Mehraufwände sind jedoch beträchtlich und können für bestimmte Ereignistypen etwa 2 Mio. Euro pro Tag erreichen, wobei Folgekosten durch eine veränderte Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen noch nicht eingerechnet sind. Hintergründe und Einzelheiten zu diesem Thema finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Fokusgebiete Binnen* (Hänsel et al. 2020c).

Klimatisch beeinflusste Naturgefahren können die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur und somit regionale und überregionale Verkehrsströme beeinträchtigen. Besonders relevant sind diese Zusammenhänge auf hochprioritären Verkehrsachsen, an denen aufgrund der naturräumlichen Bedingungen durch Ereignisse (oder Ereigniskombinationen) mehrere Verkehrsträger gleichzeitig beeinträchtigt sein können. Diese Bedingungen sind z. B. im Verkehrskorridor des Mittelrheingebietes zwischen Bingen und Bonn gegeben. Der Einfluss von Naturgefahren auf die Verkehrsströme wurde dort im Rahmen des Forschungsprojektes "Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Stresstestszenario Mittelrhein" (Kotzagiorgis et al. 2019) für ausgewählte Ereignisse untersucht.

Das Untersuchungsgebiet (s. Abbildung 3-23) umfasst mit dem Rhein die wichtigste deutsche Binnenschiffahrtsstraße, zwei mit Güter- und Personenverkehr hoch ausgelastete Eisenbahnstrecken auf beiden Seiten des Rheins sowie entlang der Mosel und zwei parallel zu den Flüssen verlaufende Bundesstraßen sowie zwei Bundesautobahnen (BAB 3, BAB 61) im Hinterland. Als Teil des TEN-V (Rhein-Alpen-Korridor) verbindet dieser Bereich des Verkehrssystems wichtige Wirtschaftszentren und kann damit als verkehrlich besonders bedeutsam angesehen werden. Ferner traten in diesem Bereich in den letzten Jahren mehrfach witterungsbedingte Verkehrseinschränkungen auf. Hangrutschungen an den steilen Hängen des Mittelrheintals führen immer wieder zu Sperrungen und Beschädigungen an der

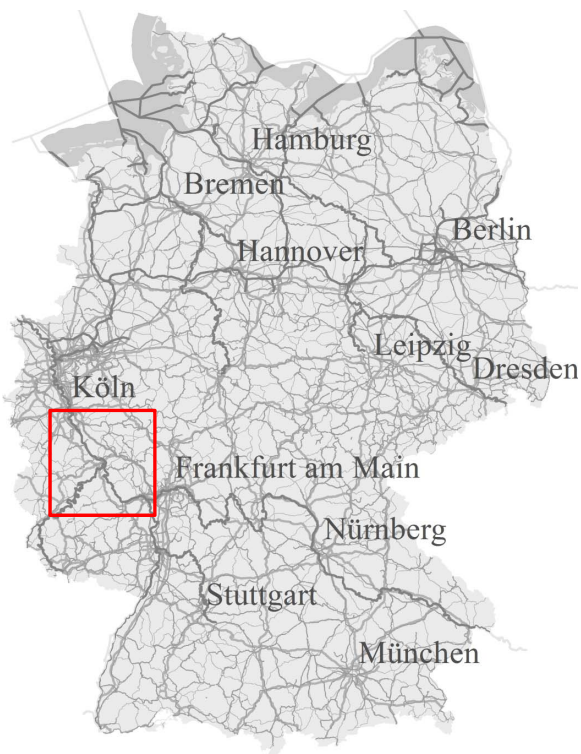


Abbildung 3-23: Lage des Fallstudiengebietes "Mittelrhein"³⁴.

Straßen- und Schieneninfrastruktur. Die Niedrigwassersituation des Jahres 2018, die zu langanhaltenden Einschränkungen der Schifffahrt führte und starke wirtschaftliche Auswirkungen hatte, ist noch gut in Erinnerung. Die bei den letzten großen Hochwasserereignisse am Rhein (1993, 1995) führten zu erheblichen Beeinträchtigungen aller drei hier betrachteten Verkehrsträger mit entsprechend weitreichenden Konsequenzen.

Mithilfe von Verkehrsstrommodellierungen (Netzumlegungen von Güter- und Personenverkehrsströmen) wurden Auswirkungen naturgefahrenbedingter Einschränkungen und Unterbrechungen im Personennah- und -fernverkehr sowie im Güterverkehr untersucht. Potenzielle verkehrliche Zusatzkosten der jeweiligen Verfügbarkeitseinschränkungen wurden verkehrsträgerübergreifend abgeschätzt.












³⁴ Der Abbildung liegen folgende Verkehrsnetze zugrunde: Bundes-schiennetz (Deutsche Bahn AG), Bundeswasserstraßennetz (WSV) und Bundesstraßennetz (BMVI).

Die den Stresstests zugrundeliegenden Szenarienannahmen wurden vereinfachend und drastisch gewählt, um die Wirkung bislang unbeobachteter, aber theoretisch möglicher "Stresssituationen" im Verkehrssystem modellhaft zu erfassen. Mittels einer Medienanalyse sowie einer Befragung ausgewählter transportabhängiger Unternehmen wurde ein Einblick in den Umgang der Unternehmen mit entsprechenden Extremsituationen gewonnen. Eine großräumige und für längere Zeiträume repräsentative Anwendung der Verkehrsstrommodellierungen im Sinne einer deutschlandweiten Klimafolgenbewertung im Verkehrssektor war nicht Ziel dieser Studie.

Konstruiert wurden naturgefahrenbedingte Verkehrsunterbrechungen bzw. -einschränkungen von bisher nicht beobachteter Länge von drei Wochen bis zu einem halben Jahr. Als Auslöser der Störungen wurden unter anderem gravitative Massenbewegungen sowie Hoch- und Niedrigwasser angenommen. Bei den Verkehrsstrommodellierungen wurde die begrenzte Kapazität der Verkehrsinfrastruktur soweit möglich berücksichtigt. Die entsprechenden Daten stammen aus der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) für das Analysejahr 2010 und für das Prognosejahr 2030 (BMVI 2016). Aufgrund fehlender Informationen konnte die Verfügbarkeit von Fahrzeugen (Lkw, Triebfahrzeuge, Waggons, Schiffe) und entsprechendem Personal nicht berücksichtigt werden. Daher wurde vereinfachend eine unbegrenzte Verfügbarkeit angenommen. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind die Auswirkungen des derzeit in Planung befindlichen Wasserstraßenprojektes "Abladeoptimierung Mittelrhein", das die Beseitigung abladerelevanter Schwellen und damit eine Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen bei Mittel- und Niedrigwasser zum Ziel hat. Mit dieser Maßnahme wird gleichzeitig die Sensitivität der Leistungsfähigkeit der Wasserstraße gegenüber Niedrigwasser verringert.

Die Ergebnisse der Stresstestanalysen sind sehr vielschichtig und bieten zahlreiche Auswertungs- und Interpretationsmöglichkeiten. In Tabelle 3-6 sind einige wichtige Zielgrößen für die fünf gewählten Extremszenarien, die drei betrachteten Verkehrsträger und – soweit realisiert – zwei unterschiedliche Zeitbezüge zusammengestellt. Als ein zentrales Ergebnis lässt sich festhalten, dass unter den getroffenen Annahmen der Verkehrsstrommodellierung (z. B. zu Lagerzeiten, zur Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Fahrern, zur Nutzung ausländischer Netze etc.) die Personen-

Tabelle 3-6: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse der Stresstests "Mittelrhein".

Szenario	1 – gravitative Massenbewegung (Felssturz Loreley)		2 – Hochwasser Rhein		3 – Niedrigwasser Rhein		4 – Extremereignis Straße		5 – Extremereignis-Schiene	
	2010	2030	2010	2030	2010	2030	2010	2030	2010	2030
Beschreibung des Stressszenarios	 Typ: Sperrung Strecken: Bundesstraße 42 und Schienenstrecke 3507 (rechtsrheinisch) zwischen St. Goarshausen und Urbar Dauer: 21 Tage		 Typ: Sperrung Strecken: Bundesstraße 9, Schienenstrecke 2630 (linksrheinisch) und BWAstr Rhein (inkl. Fähren) im Raum Oberwesel		 Typ: Starke Einschränkung Strecken: Mittelrhein, Raum Oberwesel (Pegel Kaub: 53 cm)		 Typ: Sperrung Strecke: BAB 3 zwischen Dierdorf und Ransbach-Baumbach Dauer: 180 Tage		 Typ: Sperrung Strecke: Mosekstrasse 3010 zwischen Koblenz-Gäls und Wimmingen Dauer: 180 Tage	
Bezugsjahr	2010	2030	2010	2030	2010	2030	2010	2030	2010	2030
 betroffene Kfz pro Tag zusätzliche Distanz in km pro Fahrt a) Personenverkehr b) Güterverkehr zusätzlicher Zeitaufwand in Min pro Fahrt a) Personenverkehr b) Güterverkehr Transportausfall in 1000 t pro Tag	3.100	2.250	8.900	10.100	—	—	98.000	—	—	—
 betroffene Züge pro Tag betroffene Personen pro Tag* zusätzliche Reisezeit in Min. pro Personenfahrt** betroffene Gütermengen in 1000 t pro Tag Transportausfall in a) Zügen pro Tag b) 1000 t pro Tag	194	220	156	253	—	—	—	—	131	131
 betroffene Gütermenge in 1000 t pro Tag Transportausfall in 1000 t pro Tag Verlagerungsauf (zus. Gütermenge in 1000 t pro Tag)	—	—	134	176	204	255	—	—	—	—
 3,6 0 4	27,2	87	66	87	13,1	15,8	0	0	4,3	4,3
 0 4	0	0	71	100	124	166	0	0	0	0
 4 4	4,7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Verkehrliche Kosten in €										
a) für die gesamte Ereignisdauer	2.310.000	14.154.000	39.200.000	51.681.000	301.500.000	255.240.000	87.480.000	25.020.000	87.480.000	25.020.000
b) pro Ereignistag	110.000	674.000	1.900.000	2.461.000	1.675.000	1.418.000	486.000	139.000	486.000	139.000

*Im Nah- und Fernverkehr; **Im Nahverkehr. Der Mehraufwand im Fernverkehr ist geringer.

und Güterverkehre in allen Stresstestzenarien im Wesentlichen durchgeführt werden konnten, allerdings zu höheren Kosten und mit teilweise erheblichem (zeitlichem, logistischem) Mehraufwand (Tabelle 3-6). Der Aspekt der Verkehrsverlagerung wird auch in Abschnitt 4.4.5 adressiert.

In der verkehrsträgerübergreifenden Gesamtsicht treten die spezifischen Charakteristika der Verkehrsträger deutlich hervor. Zunächst einmal zeigt sich die Straße gegenüber allen betrachteten Einwirkungen als recht flexibel und kann naturgefahrenbedingte Sperrungen aufgrund der hohen Netzredundanz durch Umrouing innerhalb des Straßennetzes oft kompensieren. Dies ist jedoch mit zusätzlich zu fahrenden Kilometern und längeren Fahrzeiten verbunden. Verkehrsverlagerungen finden eher von der Schiene und der Wasserstraße auf die Straße statt als umgekehrt und mit Blick auf den Güterverkehr insbesondere zwischen diesen beiden massengut-affinen Verkehrsträgern (s. dazu auch Abschnitt 4.4.5). Beiden Verkehrsträgern ist u. a. gemeinsam, dass sie im Unterschied zur Straße kaum innerhalb des eigenen Netzes Verkehre verlagern können. Die Verlagerung des Massenguttransportes auf die Straße ist preislich wiederum nicht attraktiv. Innerhalb des Wasserstraßennetzes sind die Ausweichmöglichkeiten naturgemäß sehr gering. Im Schienennetz des Untersuchungsraumes sind zwar theoretisch Ausweichrouten vorhanden, jedoch nicht mit in geeigneter Qualität vorliegender, ausreichender Kapazität (z. B. fehlende Elektrifizierung, Achslastbeschränkungen).

Mit Blick auf die verkehrlichen Kosten ist das Stresstest-szenario "Niedrigwasser" aufgrund seiner langen Andauer und der großen betroffenen und teilweise zu verlagern den Gütermenge mit Zusatzkosten zwischen 250 und 300 Mio. Euro am teuersten. Dass ein solches Ereignis allerdings tatsächlich sehr selten ist, zeigt ein Blick in die insgesamt rund 4.000 Jahre simulierter Abflüsse (alle Szenarien, alle validen Projektionen), die im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks entstanden sind. Die im Stresstestszenario angenommene ununterbrochene Dauer von 180 Tagen mit einem Pegelstand von unter 53 cm am Pegel Kaub wird nur einmal simuliert³⁵.

Pro Tag sind die Kosten beim Stresstestszenario "Hochwasser" am höchsten (ca. 2 Mio. Euro), da hierbei alle drei Verkehrsträger betroffen sind. Die kürzere Dauer dieses Stresstests (21 Tage mit Sperrungen) erlaubt es einigen Branchen, den Transportengpass in gewissem Umfang über Lagerhaltung auszugleichen.

Die dargestellten Kosten der Transportausfälle- oder -einschränkungen umfassen keine über den reinen Transport hinausgehenden Folgekosten. Kosten für Unternehmen, deren Rentabilitäts- und Wettbewerbssituation unter den zwischenzeitlichen Transportengpässen leidet, sind nicht berücksichtigt. Bezüglich des Untersuchungsansatzes muss zudem einschränkend angemerkt werden, dass in der Realität nicht nur die Kapazität der Verkehrsinfrastruktur, sondern auch die Verfügbarkeit und Kapazität von Fahrzeugen (insb. Lkw, Triebfahrzeuge, Waggon) und Fahrzeugführern limitierend wirkt, was im vorliegenden Untersuchungsansatz mangels entsprechender Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden konnte. Auch die Allgemeingültigkeit der Aussagen und Kosten muss derzeit noch infrage gestellt werden. Beispielsweise gehört zu jedem Stresstestszenario auch eine Storyline, das heißt eine Abfolge von Ereignissen und Prozessen, die bei der Frühwarnung oder Vorhersage zum jeweiligen Ereignis beginnt und die individuellen Möglichkeiten der betroffenen Unternehmen zur Lagerhaltung und ggf. auch Zeiträume und Entscheidungswege zu einer Anpassung logistischer Prozesse einschließt. Hierbei mussten im Rahmen der Untersuchung pauschale und daher mit Unsicherheiten behaftete Annahmen getroffen werden.

Eine Medienanalyse zeigte, dass in den lokalen Medien immer wieder von extremwetterbedingten Sperrungen bzw. Verkehrseinschränkungen im Mittelrheingebiet berichtet wird. Dies zeigt die Relevanz der durchgeführten Analysen. Einblicke in das unternehmerische Management von Verkehrseinschränkungen ergab die Befragung ausgewählter Unternehmen in der Region. Die von Unternehmensseite genannten Anpassungsmaßnahmen bestätigen dabei im Wesentlichen die Ergebnisse früherer Projekte (Nilson et al. 2014, Scholten 2010, Scholten und Rothstein 2012). Diese werden in Kapitel 4 bzw. im Bericht des Schwerpunktthemas *Anpassungsmaßnahmen* (Norpoth et al. 2020) des BMVI-Expertennetzwerks zusammengestellt.

³⁵ Zeitraum: 210 Tage zwischen Mai und Dezember 2092 bei der Modellkette RCP85-HadGEM2HADGEM2-r1-REMO-LARSIM.

3.6.2 Entwässerungskapazität des Nord-Ostsee-Kanals

Am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) werden vor allem aufgrund des Meeresspiegelanstiegs (*Weiter-wie-bisher-Szenario* RCP8.5 oder RCP8.5 "high end"³⁶) am Ende des Jahrhunderts verkehrlich relevante angespannte Entwässerungssituationen häufiger auftreten als heute. Hintergründe und Einzelheiten zu diesem Thema finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020).

Als Fallstudie für den Küstenbereich wurde im BMVI-Expertennetzwerk der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) bezüglich seiner Resilienz gegenüber den zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen (insb. Meeresspiegelanstieg und Änderungen in der Binnenhydrologie) untersucht (Fallstudiengebiet siehe Abbildung 3-24). Der NOK ist eine der meistbefahrenen künstlichen Wasserstraßen für seegehende Schiffe weltweit. Jährlich werden ungefähr 100 Millionen Tonnen Güter zwischen Nord- und Ostsee transportiert. Schiffszahlen nehmen mit ca. 30.000 (im Jahr 2016) weltweit eine Spitzenposition ein. Neben seiner Hauptfunktion als Schifffahrtsstraße dient der NOK auch der Entwässerung eines Einzugsgebiets von etwa 1.530 km², was etwa 10 % des Gesamtgebiets Schleswig-Holsteins ausmacht. Er ist damit der größte künstliche Vorfluter Schleswig-Holsteins. Im BMVI-Expertennetzwerk wurden deshalb die Entwässerungsmöglichkeiten des NOK unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels untersucht.

Die Bewirtschaftung des NOK erfolgt mit Bezug auf einen Kanalwasserstand, der möglichst konstant auf derzeitigem mittlerem Meeresniveau (-0,2 bis +0,5 m Normalhöhennull) gehalten wird. Diese Steuerung ist notwendig, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Schiffsverkehrs einschließlich des Querverkehrs durch die Fahren zu gewährleisten. Auch die Standsicherheit der Böschungen und Was-

³⁶Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (RCP8.5) ergibt sich bis 2100 ein Meeresspiegelanstieg von 84 cm (Median) mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 61 bis 110 cm (IPCC, 2019). Zusätzlich wird das sogenannte RCP8.5 *High-End-Szenario* verwendet. Dieses Szenario geht von einem Anstieg des Meeresspiegels von 174 cm bis 2100 (Grinstedt et al., 2015) aus und gilt als WorstCase für die Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals.



Abbildung 3-24: Lage des Fallstudiengebietes "Nord-Ostsee-Kanal"³⁵.

serbauwerke hängt mit dem Wasserstand zusammen. Die Regulierung des (Kanal-)Wasserstandes erfolgt im Regelfall, d. h. für Wasserstände bis 5,25 m PNP (Pegelnullpunkt, -5,0 m über Normalhöhennull), über die Kleine Schleuse in Brunsbüttel und/oder über das Entwässerungssiel in Kiel-Holtenau. Eine Entwässerung ist nur im Freigefälle möglich. Das heißt, dass die meeresseitigen Wasserstände niedriger sein müssen als die Kanalwasserstände. Die Entwässerung erfolgt in der Regel im Zeitfenster des meeresseitigen Tideniedrigwasserstands zu 90 % über die Schleuse Brunsbüttel in die Elbe/Nordsee, da die Wasserstands-differenz hierbei meist eine deutlich effektivere Entwässerung ermöglicht als über Kiel-Holtenau in die Ostsee. Es zeigt sich jedoch, dass oft die effektivste Entwässerung im Zusammenspiel der Schleusen Brunsbüttel und Kiel-Holtenau möglich ist, da beispielsweise ein positiver Windstau in Brunsbüttel mit einem negativen Windstau in Kiel-Holtenau einhergeht.

Der Blick in die Vergangenheit zeigt, dass sich das Entwässerungszeitfenster in den letzten 100 Jahren durch den

Meeresspiegelanstieg (ungefähr 20 cm) verringert hat. Hohe bzw. langanhaltende Niederschläge im Einzugsgebiet des NOK führten in Verbindung mit gleichzeitig auftretenden hohen Außenwasserständen vereinzelt zu solch hohen Wasserständen im NOK, dass der Fährverkehr und die Schifffahrt reduziert oder eingestellt werden mussten. Im Zuge des zukünftig erwarteten Klimawandels werden die Wasserstände in der Tideelbe (Nordsee) und der Ostsee weiter ansteigen (s. Abschnitt 2.6). Gleichzeitig ist mit Veränderungen der Binnenhydrologie zu rechnen (s. Abschnitt 2.4). Es stellt sich daher die Frage, wie sich zukünftig die Häufigkeit von angespannten Entwässerungssituationen im Bereich des NOK ändern wird.

Um mögliche Klimaauswirkungen auf dieses komplexe System belastbar zu erfassen, haben das BSH und die BfG zwei unterschiedliche Ansätze und Methoden vergleichend nebeneinandergestellt. Beide zielen darauf ab, Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOK zu identifizieren und Häufigkeitsänderungen für die Zukunft abzuleiten. Die Ergebnisse beider Ansätze decken sich in der Richtungsangabe, liefern aber jeweils spezifische Einblicke. Unter den gewählten Szenarienannahmen ist von einer fortgesetzten und deutlichen Zunahme von Grenzzuständen der Bewirtschaftung des NOK auszugehen. Die Zunahme verkehrlich relevanter Bewirtschaftungssituationen ist dabei fast ausschließlich dem Meeresspiegelanstieg zuzuschreiben und nur untergeordnet den Änderungen der Binnenhydrologie. Eine Bewertung weiterer wasserwirtschaftlicher Aspekte (Entwässerung des Binnenlandes) erfolgt hierbei nicht.

Bei einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 50 cm wird der kritische Kanalwasserstand von 5,40 m PNP gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000) an ca. zwei zusätzlichen Tagen für mindestens eine Stunde überschritten. Die meteorologischen Änderungen im Binnenland spielen unabhängig vom Klimaszenario und vom Betrachtungszeitraum keine wesentliche Rolle (Abbildung 3-25, BfG-Ansatz). Ein Anstieg von 55 cm würde das Entwässerungspotenzial bis zum Ende des Jahrhunderts um 40 % verringern (blaue Linie in Abbildung 3-26, BSH-Ansatz), während ein Anstieg von 110 cm (obere Grenze der wahrscheinlichen

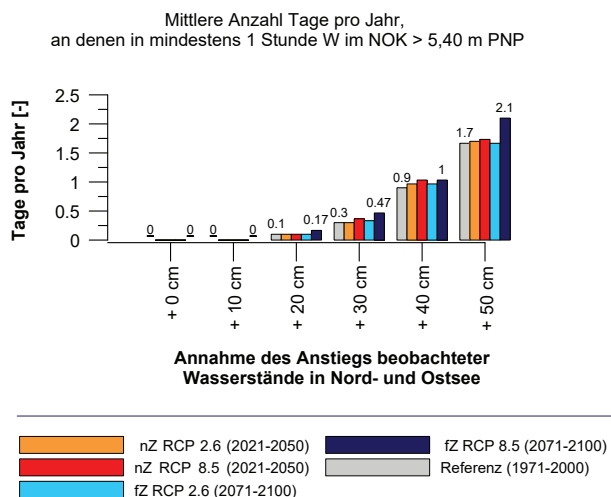


Abbildung 3-25: Auftretshäufigkeit von simulierten kritischen Bewirtschaftungssituationen - mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird. Ergebnis der Szenarienrechnungen (nZ = nahe Zukunft, fZ = ferne Zukunft) mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen. (Ebner von Eschenbach und Hohenrainer in Vorbereitung)³⁷.

Bandbreite aus IPCC, 2019) das Entwässerungspotential sogar um über 70 % verringern würde. Berücksichtigt man ferner die aktuelle Landsenkung im südwestlichen Schleswig-Holstein (gelbe und orange Linie) und mögliche höhere Meeresspiegelanstiegsraten aufgrund eines höheren Beitrages der Kryosphäre (aus Grinsted et al. (2015), für Hamburg 174 cm Meeresspiegelanstieg bis 2100; lila und grüne Linie) sowie höhere Niederschläge, stellt man fest, dass sich das Entwässerungspotenzial noch deutlich stärker reduziert. Unter Annahme dieser Extremszenarien kann am Ende des 21. Jahrhunderts im jährlichen Mittel keine vollständige Entwässerung im freien Gefälle mehr erfolgen. Spätestens dann müssten neue Lösungen gefunden werden (siehe auch Kapitel 4.4.3).

Während es in der Praxis möglich ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung, wenn zwei oder mehr aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser mit erhöhten Wasserständen auftreten. Tabelle 3-7 zeigt die mittlere Anzahl von Ereignissen mit 1 bis 6 aufeinanderfolgenden Niedrigwassern mit erhöhten Wasserständen pro Jahr (BSH-Ansatz). Unter den getroffenen Szenarienannahmen ist ein rapider Anstieg an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern (sogenannten

³⁷ Ergebnisdarstellung hier bis 50 cm; Ergebnisse für 80 cm bis 170 cm werden im BfG-Abschlussbericht (gerade in der Erstellung) und zusätzlich im SP-108-Bericht gezeigt.

Kettentiden) zu verzeichnen. Während demnach aktuell (1981-2010) im Durchschnitt etwa 17 einzelne Niedrigwasser (N=1) oberhalb des definierten Schwellwertes für den Kanalwasserstand pro Jahr beobachtet werden, wird sich

die Zahl in Zukunft durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen. Die derzeit noch unbesetzte Klasse von 5 bis 6 aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern ist in der fernen Zukunft mit 3 bzw. 2 Fällen pro Jahr besetzt.

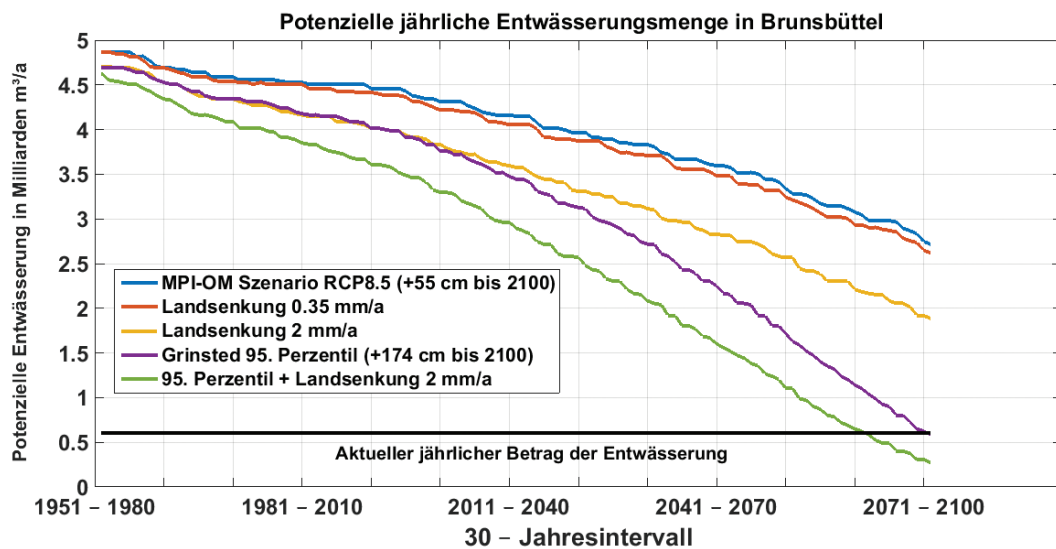


Abbildung 3-26: 30-jähriges gleitendes Mittel des jährlichen Entwässerungspotenzials des NOK in Brunsbüttel in Mrd. m³/Jahr unter Annahme des Weiter-wie-bisher-Szenarios RCP8.5 ohne/mit Einbezug der Effekte durch Landsenkung (blaue, gelbe und orange Linie) und einer Abschätzung der zusätzlichen Gletscherschmelze der Polargebiete (lila und grüne Linie). Die schwarze Linie zeigt den aktuellen jährlichen Betrag, der entwässert werden muss (600 Mio. m³/Jahr).

Tabelle 3-7: Mittlere Anzahl entwässerungsrelevanter Niedrigwasserereignisse (NW) am Pegel Brunsbüttel pro Jahr, die höher sind als der Wasserstand von 4,80 m im NOK, dargestellt für 1 bis 6 aufeinanderfolgende Niedrigwasser für verschiedene Zeiträume bis Ende des Jahrhunderts aus dem MPI-OM/REMO RCP8.5 Lauf (Meeresspiegelanstieg 55 cm bis 2100).

NW Ereignis	1951-1980	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
N=1	12	17	19	32	58
N=2	3	5	6	11	23
N=3	1	2	2	6	13
N=4	0	1	2	2	6
N=5	0	0	0	1	3
N=6	0	0	0	1	2

4 Klimaanpassung - Welche Maßnahmen machen das Verkehrssystem resilienter?

- Anpassungsmaßnahmen sind sehr vielfältig und lassen sich in vorbereitende und operative/technische Maßnahmen differenzieren. Im BMVI-Expertennetzwerk wurden aus der Vielzahl möglicher Anpassungsmaßnahmen exemplarisch einige für verschiedene Verkehrsträger und Klimawirkungen relevante Maßnahmen betrachtet.
- Maßgeblich für eine erfolgreiche Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen ist eine fundierte, gut zugängliche und einheitliche Datengrundlage sowie Methodik. Zu deren Erarbeitung wurde im BMVI-Expertennetzwerk ein wichtiger Beitrag geleistet. Das Angebot der für Planungsprozesse notwendigen Datenprodukte benötigt jedoch die Etablierung eines Klimadienstes (z. B. der im Aufbau befindliche DAS-Basisdienst "Klima und Wasser"), der Datengrundlagen dauerhaft und allgemein zugänglich bereitstellt und somit die kohärente Planung von Anpassungsmaßnahmen in Deutschland ermöglicht.
- Bei der Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und Strategien muss die Bandbreite der möglichen zukünftigen Klimaentwicklung berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich 1) ein enges Monitoring der tatsächlichen Klimaentwicklung, der Klimawirkungen und der Wirksamkeit bereits durchgeführter Anpassungsmaßnahmen zur Identifizierung passender Eingriffszeitpunkte, 2) die Nutzung flexibler Elemente in der Maßnahmenplanung sowie 3) eine Bewertung der Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen.
- Während die Klimaforschung Bandbreiten der möglichen Entwicklung bereitstellt, werden in der Planung von Maßnahmen konkrete Vorgaben zu zukünftigen Klimakennwerten erwartet. In den planungsrelevanten Regelwerken müssen also nicht nur entsprechend der zu erwartenden Klimaentwicklung aktualisierte Werte hinterlegt werden, sondern auch Vorgehensweisen, welche die Planer bei der Auswahl von Kennwerten für die spezifischen Planungsrandbedingungen unterstützen.
- In den Planungsprozessen ist der Klimawandel nur eine der zu berücksichtigenden Komponenten. Zur Beurteilung der Umsetzbarkeit und Umsetzungswürdigkeit von (baulichen) Anpassungsmaßnahmen muss der mögliche Nutzen in einen größeren Kontext gestellt werden. Bei der Maßnahmenbewertung sind Synergien zu anderen gesellschaftlichen Zielen sowie potenzielle negative Wirkungen und Kosten (im weiteren Sinne) zu berücksichtigen (Mainstreaming).
- Aufgrund langwieriger Prozesse bei Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und der Tatsache, dass viele Infrastrukturelemente für eine lange Lebensdauer geplant und angelegt werden, ist es wichtig, bereits heute aktiv zu werden und die gewonnenen Erkenntnisse einfließen zu lassen.
- Die Kooperation im BMVI-Expertennetzwerk und darüber hinaus mit externen Partnern ermöglicht es, den Herausforderungen zu begegnen, die bei der Anpassung des Verkehrssektors an den Klimawandel auftreten.

4.1 Einleitung

Die Anpassung an veränderte Klimabedingungen und extreme Wetterereignisse ist neben der Verminderung der menschenbedingten Treibhausgasemissionen und somit der Verringerung von Veränderungen im Klimasystem

der zweite wichtige Baustein im Umgang mit dem Klimawandel. Mit der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, Bundesregierung (2008)) wurde für Deutschland ein politischer Handlungsrahmen geschaffen, der durch den Aktionsplan Anpassung (APA) mit konkreten Maßnahmen unterlegt wird.

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks (Themenfeld 1) zeigen die beteiligten Bundesoberbehörden und Ressortforschungseinrichtungen den klimawandelbezogenen Anpassungsbedarf im Verkehrssektor auf und untersuchen spezifische Ansätze zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und -strategien. Erfolgsfaktoren sind dabei die enge Zusammenarbeit und der kontinuierliche Austausch der im BMVI-Expertennetzwerk beteiligten Partner, die gemeinsame fundierte Datengrundlage, die abgestimmten Methoden zur Bewertung von Klimawirkungen und der direkte Austausch mit den Betreibern und Nutzern der Verkehrsinfrastruktur (wie WSV, DB, etc.). Mit der Entwicklung von Methoden sowie der Bereitstellung von Daten und Analysen leistet das BMVI-Expertennetzwerk einen Beitrag zur Umsetzung der DAS.

Unternehmensbefragungen, die im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks (s. Hänsel et al. (2020c)) und auch in Vorgängerprogrammen (z. B. KLIWAS) durchgeführt wurden, haben eine breite Palette denkbarer Anpassungsmaßnahmen ergeben. Aus Ressourcengründen ist es nicht möglich, diese für alle Verkehrsträger und Managementaspekte im Detail zu analysieren. Daher konzentrierte sich das BMVI-Expertennetzwerk in seiner ersten Phase auf die Betrachtung ausgewählter exemplarischer Maßnahmen für die verschiedenen Verkehrsträger, die jeweils hinsichtlich ihrer Wirkung und/oder Implementierung untersucht und beschrieben wurden (Abschnitt 4.4). Anhand dieser Beispiele wird aufgezeigt, welches Spektrum an verschiedenartigen Möglichkeiten die einzelnen Verkehrsträger haben, um negativen Klimawirkungen erfolgreich zu begegnen. Durch die Einbindung von Anwendern aus der Praxis in die Projektbearbeitung wurden potenzielle Schwierigkeiten in der praktischen Umsetzung von Maßnahmen aufgedeckt und somit erste Ansätze zu deren Überwindung identifiziert (Abschnitt 4.5).

4.2 Klassifizierung von Anpassungsmaßnahmen

Die Anpassung an den Klimawandel und an das gehäufte Auftreten extremer Wetterereignisse kann im Verkehrsbereich mit unterschiedlichsten Maßnahmen realisiert werden. Mit vielfältigen vorbereitenden Maßnahmen kann die Resilienz des Verkehrssystems erhöht werden, sodass im Ereignisfall der auftretende Schaden – sprich die Schäden

an der Verkehrsinfrastruktur sowie die Einschränkungen von Verkehrsflüssen – reduziert wird. Hinsichtlich der Ansätze und Eigenschaften werden im BMVI-Expertennetzwerk folgende Arten von Anpassungsmaßnahmen unterschieden:

- informatorische Ansätze durch die Entwicklung zentraler Dienste zur Bereitstellung von Klimadaten,
- regulatorische Ansätze über die Anpassung von Regelwerken und Bemessungsgrundlagen,
- ingenieurtechnische Ansätze, die in baulichen Anpassungsmaßnahmen münden,
- operatives Management der Verkehrsinfrastruktur durch angepasstes Management und Handlungsempfehlungen sowie
- operatives Management des Verkehrsbetriebs mittels Verkehrsverlagerungen sowie Anpassungsmaßnahmen seitens des Infrastrukturnutzers.

Nicht jede Maßnahme ist eine reine Klimaanpassungsmaßnahme, vielmehr werden Überlegungen zur Klimaanpassung in die Planung und Weiterentwicklung vorhandener Maßnahmen(-pakete) einbezogen. Die Maßnahmen lassen sich also danach differenzieren, wie konkret sie auf den Klimawandel ausgerichtet sind. Maßnahmen, die speziell und ausschließlich zur Verminderung der Folgen des Klimawandels entwickelt werden und die Folgen teilweise oder idealerweise hundertprozentig kompensieren, entsprechen dem *höchsten Grad der Anpassung* und können Klimafolgen am effektivsten abmildern oder nutzen. Bei der potenziellen Umsetzung dieser Maßnahmen treten jedoch die größten Hürden (s. Abschnitt 4.5) auf. In vielen Fällen müssen bereits bestehende Maßnahmen an zukünftige Klimabedingungen angepasst werden. Je nachdem, wie aufwendig und umfangreich sich dieser Prozess darstellt, ist der Grad der Anpassung gering, mittel oder hoch. Da häufig bereits bestehende Herausforderungen durch den Klimawandel verstärkt werden, kann es sinnvoll sein, diesem bereits heute entgegenzuwirken. Die zügige Umsetzung von Maßnahmen, die heutigen Herausforderungen begegnen sollen und die klimawandel-unabhängig bereits geplant worden sind, entspricht einem *mittleren bis geringen* zusätzlichen *Grad der Anpassung*, sofern die Anpassung an den Klimawandel eine nur geringfügige zusätzliche Modifikation der

bestehenden Planung erfordert. Ebenso existieren bereits heute Einrichtungen, die als Anpassung an klimabedingte Einflüsse errichtet wurden. Dazu zählen z. B. Deiche (als Anpassungsmaßnahme gegen Hochwasser und Sturmfluten) oder Entwässerungseinrichtungen (als Maßnahme zur Abführung eines Überangebots von Wasser). Die zukünftige Unterhaltung und die Instandhaltung dieser bereits bestehenden Anpassungsmaßnahmen entsprechen somit einem *sehr geringen* zusätzlichen *Grad der Anpassung*, da sie einen geringen bis keinen Mehraufwand bedeuten.

4.3 Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen

Das methodische Vorgehen zur Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme kann sehr unterschiedlich ausfallen und von Modell- bzw. Verfahrensketten bis hin zu Umfragen bei Betroffenen reichen. Konzeptionelle Gemeinsamkeiten sind schematisch in Abbildung 4-1 dargestellt und im Folgenden erläutert. Um abzuschätzen, in welchen räumlichen und thematischen Bereichen veränderte Klimabedingungen Auswirkungen auf den Verkehrssektor haben und welche Anpassungsmaßnahmen in der Folge notwendig sind, wird im ersten Schritt eine *Klimawirkungsanalyse* (Abschnitt 3.1) durchgeführt. Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse bilden die Basis für die Abschätzung des *Anpassungsbedarfs* und die Entwicklung von *Anpassungs-*

maßnahmen. Aufgrund der großen Bandbreite möglicher zukünftiger Klimabedingungen und der daraus resultierenden Folgen (auch bezogen auf spezifische Betroffenheiten der einzelnen Verkehrsträger), kann es keine pauschalen Aussagen darüber geben, bis zu welchem Zeitpunkt eine Anpassung stattgefunden haben muss. Bei der Festlegung von Eingriffszeitpunkten sind neben den Reaktions-, Planungs- und Umsetzungszeiten von Maßnahmen zur Abwendung potenzieller Schäden auch Risikoabwägungen der Betreiber in Abhängigkeit von der Lebensdauer des betrachteten Elementes sowie der Bedeutung und Kosten seines Ausfalls bzw. seiner Beeinträchtigung zu berücksichtigen. Aufgrund der bereits thematisierten Bandbreite zukünftiger Klimaentwicklungen und der daraus resultierenden Folgen, muss bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen mit Unsicherheiten umgegangen werden (Abschnitt 4.5).

Ob die Anpassungsmaßnahme die gewünschte Wirkung hat und welche nachteiligen Effekte sie gegebenenfalls hervorrufen würde, wird in der *Wirksamkeitsabschätzung* untersucht. In die *Wirksamkeitsabschätzung* fließen erneut die Ergebnisse aus der Klimawirkungsanalyse ein. Zur Optimierung der Wirksamkeit kann die Maßnahme verändert und anschließend erneut geprüft werden. In manchen Fällen ist die Wirksamkeit der Maßnahme von Anfang an klar. Dann fällt dieser Schritt sehr kurz aus. In anderen Fällen ist

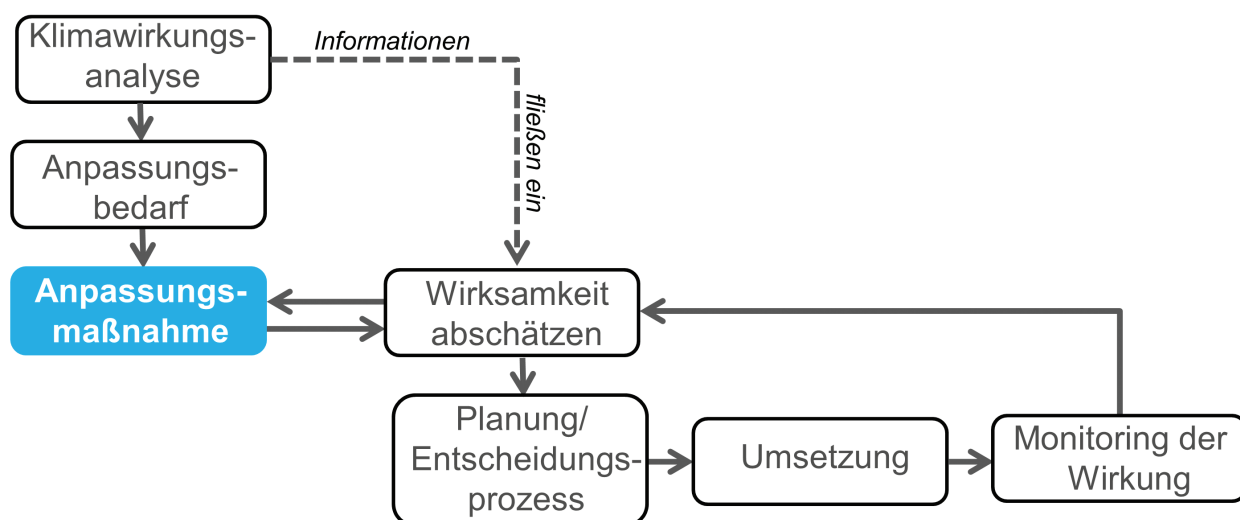


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Prozesses der Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme.

die Abschätzung der Wirkung schwieriger. In diesen Fällen ist es besonders wichtig, die Wirkung nach der Umsetzung zu prüfen und gegebenenfalls zu überwachen (*Monitoring*). Falls die umgesetzte Maßnahme nicht die gewünschte Wirkung hat, sollte sie angepasst werden und der Planungs- und Entscheidungsprozess beginnt ggf. erneut.

Die *Planung und der Entscheidungsprozess* hängen stark von der Art und dem Umfang der Anpassungsmaßnahme ab. Generell wird dabei auf bereits vorhandene Wege/Instrumente zurückgegriffen. In einigen Fällen muss beispielsweise ein Planfeststellungsverfahren eingeleitet werden. Ein solches Verfahren betrachtet in umfassender Weise alle Belange, die für oder gegen eine bestimmte Maßnahme sprechen. Aus diesem Grund kann das Verfahren sehr lange (bis zu mehreren Jahren/Jahrzehnten) dauern. Kleinere Maßnahmen bedürfen oft keines solch umfangreichen Verfahrens. Jedoch sind in den meisten Fällen im Entscheidungsprozess verschiedene Akteure mit unterschiedlichen Interessen beteiligt. Dadurch nimmt der Prozess ebenfalls eine gewisse Zeit in Anspruch, bevor mit der Umsetzung begonnen werden kann. Der Zeitraum für die *Umsetzung* kann somit sehr unterschiedlich ausfallen. Die Durchführung größerer Baumaßnahmen, aber auch die Anpassung umfangreicher Regelwerke kann zum Beispiel mehrere Jahre dauern. Aus diesen Gründen sollte mit dem gesamten Prozess der Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen frühzeitig begonnen werden.

Der in Abbildung 4-1 dargestellte Prozess der Maßnahmenentwicklung beschränkt sich auf den Aspekt der Anpassung an den Klimawandel. In der Praxis ist die Anpassung beispielsweise bei der Planung eines Bauvorhabens jedoch häufig nur ein Aspekt von vielen, die berücksichtigt werden müssen. Vielfältige Randbedingungen und Zielvorstellungen aus verschiedenen gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Bereichen müssen ebenfalls einbezogen werden. Die im nachfolgenden Kapitel genannten Anpassungsmaßnahmen durchlaufen bisher nur einen Teil des in Abbildung 4-1 dargestellten Prozesses. Einige beinhalten bereits die Wirksamkeitsabschätzung, andere beschreiben als ersten Schritt nur die Idee der Maßnahme. Detailliertere Informationen und Ergebnisse zu den dargestellten Maßnahmen und den in Abschnitt 4.4 beschriebenen Inhalten finden sich im Endbericht des Schwerpunktthemas *Anpas-*

sungsoptionen (Norpoth et al. 2020) und der dort aufgeführten Literatur.

4.4 Untersuchte Anpassungsmaßnahmen

Im Verkehrssektor existiert eine breite Palette an Maßnahmen, mit denen möglichen Einflüssen durch veränderte meteorologische und hydrologische Bedingungen begegnet werden kann. Im BMVI-Expertenetzwerk wurden exemplarisch verschiedene Maßnahmen für die im Netzwerk adressierten Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße hinsichtlich unterschiedlicher Klimawirkungen und Regionen untersucht. Um ein möglichst breites Spektrum an Anpassungsmaßnahmen in die Betrachtung einbeziehen zu können und das in den Bundesoberbehörden vorhandene Wissen effektiv zu nutzen, werden dabei auch Erkenntnisse von verkehrsträgerspezifischen Projekten der Bundesoberbehörden vor dem Zusammenschluss im Expertenetzwerk sowie aktuelle benachbarte bzw. begleitende Projekte der Bundesoberbehörden einbezogen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Analysen sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Dabei werden Maßnahmen aus dem informatorischen (4.4.1), regulatorischen (4.4.2), ingenieurstechnischen (4.4.3) und operativen Management der Verkehrsinfrastruktur (4.4.4) und dem operativen Management des Verkehrsbetriebs (4.4.5) unterschieden.

4.4.1 Informatorischer Ansatz – Dienste

Mit Rückgriff auf konsolidierte methodische Entwicklungen des BMVI-Expertenetzwerks erfolgten mit dem außerhalb des BMVI-Expertenetzwerks angesiedelten Pilotprojekt ProWaS und dessen Erweiterung ProWaS-DE erste Schritte hin zu einem verkehrsträger- und handlungsfeldübergreifenden DAS-Basisdienst "Klima und Wasser". Die begonnene Etablierung eines solchen Dienstes und somit das dauerhafte und allgemein zugängliche Angebot der für Planungsprozesse notwendigen Datenprodukte ist Voraussetzung für die kohärente Planung von Anpassungsmaßnahmen in Deutschland.

Die Anpassung an den Klimawandel ist nach aktueller Gesetzeslage bei der Planung von Maßnahmen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur zu berücksichtigen. Entsprechende Passagen finden sich im Raumordnungsgesetz (ROG, Abschnitt 1 unter § 2 Absatz 2 Nummer 6), im Baugesetzbuch (BauGB, Kapitel 2, Teil 1, Abschnitt 1 unter § 136 Absatz 2 Nummer 1), im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG, Anlage 4 Nummer 4 Buchstabe c Doppelbuchstabe hh sowie im Wasserhaushaltsgesetz (WHG, Kapitel 2, Abschnitt 1, § 6 Absatz 1 Nummer 5). Damit einher geht ein Bedarf an einer verkehrsträgerübergreifenden und im weiteren Kontext auch handlungsfeldübergreifenden kohärenten Datenbasis. Eine belastbare und einheitliche Datenbasis ist erforderlich, um die behördliche Prüfung von Maßnahmen zu beschleunigen und Wider- und Einsprüche in den Verfahren zu vermeiden.

Die Bundesoberbehörden DWD, BfG, BAW und BSH haben das Konzept für einen DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" vorgelegt, mit dem klimatologische, ozeanografische sowie hydrologisch-gewässerkundliche Kennwerte und Dienstleistungen dauerhaft für verschiedene Handlungsfelder der DAS bereitgestellt werden können. Als ein erster Baustein wird im Pilotprojekt ProWaS ein Angebot für die Handlungsfelder Verkehr (Wasserstraßen) und Wasserwirtschaft aufgebaut (Nilson 2019). Bis 2021 werden für die Einzugsgebiete der großen Flüsse (Wasserstraßen) und die Deutsche Bucht konsistente Daten und Interpretationshilfen bereitgestellt, die konsolidierte methodische Entwicklungen u. a. des BMVI-Expertennetzwerks aufgreifen. Ab 2020 wird der DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" mit ersten Stellen und entsprechenden Aufgabenprofilen bei den Bundesoberbehörden DWD, BfG, BAW und BSH etabliert. Eine Erweiterung des Aufgaben- und Dienstleistungsspektrums ist im Rahmen weiterer Ressourcenzuweisungen in den kommenden Jahren angedacht.

Im Unterschied zu Forschungsdaten, die oft in Fallstudien generiert werden, sich auf methodische Entwicklungen fokussieren und sich in ihrer Darreichungsform immer wieder verändern, handelt es sich bei dem zu entwickelnden Dienst um ein nachhaltiges Angebot von Daten und Produkten, das gezielt, flächendeckend und dauerhaft abgestimmte Schnittstellen zur Praxis bedienen soll (Nilson und Klein 2019). Ein besonders wichtiger Teil der Dienstleistung ist die Diskussion der Datenprodukte mit anderen

Institutionen, z. B. den Behörden der Bundesländer. Diese Abstimmung gewährleistet, dass bei der Planung von Anpassungs- oder sonstigen Maßnahmen keine unbekannteren anderslautenden Ergebnisse vorgebracht werden und Unstimmigkeiten auftreten. Weiterhin ist es von Bedeutung, Datenprodukte und Interpretationshilfen allgemein zugänglich im Internet zu platzieren und über Metadienste wie das Klimavorsorgeportal (<https://www.klivoportal.de>) bekannt zu machen. Somit können alle Maßnahmenplanungen a priori auf einer einheitlichen Datenbasis durchgeführt werden. Dadurch können Kosten – z. B. für eigene Forschungsarbeiten der Maßnahmenplaner – und Widersprüche vermieden werden.

4.4.2 Regulatorischer Ansatz – Regelwerke und Bemessungsgrundlagen

Anwender benötigen bei Planungsvorgängen konkrete Angaben und Anleitungen, um klimawandelrelevante Aspekte in der Konstruktion und im Bau zu berücksichtigen und dadurch frühzeitig zu integrieren. Um dies zu erreichen, besteht eine wesentliche Klimaanpassungsmaßnahme darin, Regelwerke im Hinblick auf Handlungserfordernisse zu überprüfen, konkrete Vorgaben darin anzupassen und den Nutzern nach Möglichkeit weitere Leitfäden (wie Handbücher) zur Verfügung zu stellen.

Regelwerke (z. B. technische Normen, Richtlinien) und Bemessungsgrundlagen geben Handlungs- und Ausführungsvorschriften oder Empfehlungen sowie technische Vorschläge in Planungsvorgängen vor und basieren auf gesicherten Erkenntnissen aus Wissenschaft, Technik und Erfahrung. Die Festlegungen in den Regelwerken werden in Gremienarbeit unter Konsens erstellt und von anerkannten Institutionen angenommen (z. B. Deutsches Institut für Normung). Sie sind ein wichtiges Instrument zur Realisierung der Anpassung an den Klimawandel, da zukünftige Einflüsse in die Regelwerke integriert werden und somit in Planungsvorhaben einfließen können. Durch eine bessere Berücksichtigung zukünftiger Klimabedingungen bei normativen Festlegungen können Beeinträchtigungen und Schäden wirksam begrenzt und minimiert werden.

Im Rahmen von verkehrsinfrastrukturellen Bauvorhaben werden Regelwerke zur Bemessung herangezogen, die u. a. die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit dieser Elemente für die nächsten Jahrzehnte gewährleisten müssen. Bisher werden die Auswirkungen zukünftiger Änderungen durch den Klimawandel jedoch häufig nur unzureichend geprüft und somit nicht oder nur teilweise berücksichtigt, da die einfließenden Daten i. d. R. "rückwärtsgewandt" sind, das heißt auf vergangenen Ereignissen beruhen. Eine wesentliche Herausforderung bei der Anpassung der Regelwerke unter Nutzung von Klimaprojektionen stellt der Umgang mit den Unsicherheiten in den Projektionen zu den voraussichtlichen Folgen des Klimawandels dar. In den Technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS 310) wurde daher z. B. bei zukünftigen Planungsvorgängen "als pragmatischer Ansatz ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 eingeführt" (Köppke 2012, Köppke et al. 2013). Dieser Ansatz stellt zwar eine Möglichkeit der Berücksichtigung des Klimawandels dar, ist aber zu unkonkret, weil regions- und ortsspezifische Unterschiede nicht einfließen. Es besteht die Gefahr der Überdimensionierung verbunden mit entsprechend hohen vermeidbaren Kosten.

Vor dem Hintergrund des stetig voranschreitenden Klimawandels und der Langlebigkeit von z. B. Infrastrukturelementen im Verkehrssektor ist es notwendig, die erforderlichen Anpassungen der Regelwerke rechtzeitig zu identifizieren. Im Rahmen des BMVI-ExpertenNetzwerks wurden vom DZSF/EBA ausgewählte, den Bahnbetrieb betreffende **Regelwerke** auf klimawandelrelevante Kenngrößen und Parameter in einem Forschungsprojekt (EBA 2018a) untersucht. Analysiert wurden Regelwerke, Verordnungen und Normen, der Europäischen Normen (EN), des Deutschen Instituts für Normung (DIN), des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und der Deutschen Bahn (DB) zu den Bereichen Infrastruktur, Fahrzeuge, Energie und Sicherheit. Die ausgewählten Regelwerke wurden systematisch hinsichtlich der Klimaeinflüsse Temperatur, Niederschlag, Sturm und Blitzschlag überprüft und klimawandelrelevante Inhalte und Passagen in den Texten identifiziert. Angaben dazu wurden in einer standardisierten Ergebnistabelle gesammelt und auf Basis von Expertenwissen bewertet, zudem wurde der Anpassungsbedarf ermittelt. Eine Vielzahl der untersuchten Regelwerke ist nicht allein bahnspezifisch, sondern auch für andere Verkehrs-

träger (z. B. Straße) maßgeblich. Dies betrifft beispielsweise einige der untersuchten DIN-Normen.

Die Ergebnisse dieses Projektes erlauben eine erste Priorisierung der Handlungserfordernisse und werden in die entsprechend zuständigen Normungsgremien getragen. Dort dienen sie als wesentliche Diskussionsgrundlage. Sie helfen, den komplexen Prozess der Aufnahme klimawandelrelevanter Aspekte in die Regelwerke und die damit einhergehenden (zum Teil kontroversen) Diskussionen konstruktiv zu gestalten.

Ein häufig diskutierter Punkt ist die Angabe von "harten Zahlen" in den Regelwerken. Während seitens der Wissenschaft mit Bandbreiten gearbeitet wird, um die Unsicherheiten zukünftiger Klimaprojektionen zu berücksichtigen, sind es Planer gewohnt, konkrete Angaben und Werte zu verwenden. Ermessensentscheidungen werden damit überflüssig gemacht. Wird im Rahmen einer Überarbeitung eine Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung in eine Norm übernommen, muss dem Planer gleichzeitig eine methodische Vorgehensweise zur Auswahl eines Wertes aus der Bandbreite angeboten werden. Die Auswahlkriterien sollten spezifische Planungsparameter bzw. Randbedingungen berücksichtigen, z. B. die Lebensdauer sowie die Kritikalität des Bauwerkes. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Festlegung von Regelwerken für längere Zeiträume. Trotz regelmäßiger Überarbeitungen sind Regel- und Bauwerke auf Langfristigkeit ausgelegt und müssen über entsprechende Zeiträume belastbar sein. Da eine regelmäßige Aktualisierung notwendig und bedeutsam ist, um neues Wissen aus der Forschung einfließen zu lassen, wäre ein dynamischerer Normungsprozess, der ein Denken in kürzeren Zeiträumen erlaubt, wünschenswert.

Neben der Überprüfung der Regelwerke auf klimawandelrelevante Parameter sind die Bemessungsgrundlagen für **Entwässerungseinrichtungen von Straße und Schiene** hinsichtlich ihrer Dimensionierung einer quantitativen Analyse unterzogen worden (BASt (2014) und EBA (2019)). Entwässerungseinrichtungen dienen dazu, schädliche Wasseranreicherungen – z. B. während und nach Starkregeneignissen – im Umfeld von Straßen- bzw. Gleisbereichen zu verhindern und somit die Tragfähigkeit des Planums sowie die Funktionsfähigkeit und die Standsicherheit der Infrastrukturbauwerke zu jeder Jahreszeit zu gewährleisten. In

den beiden Forschungsvorhaben wurden die wesentlichen aktuellen Regelwerke für Straße (RAS-Ew und RiStWag) und Schiene (u. a. DB Ril 836) im Hinblick auf die Bemessungsgrundlagen (Regenspenden) und Dimensionierungen untersucht und rechnerisch auf ihre Restkapazität unter Annahme höherer Niederschläge überprüft. Die Ergebnisse beider Studien zeigten einen geringen Anpassungsbedarf aufgrund von ausreichend bemessenen Entwässerungsanlagen. Bei Speicherbauwerken der Straße wird lediglich eine Erhöhung der Beckenvolumina oder eine Erhöhung der tolerierbaren Überlaufhäufigkeiten vor dem Hintergrund des Klimawandels empfohlen. Für die Schiene umfassen die Handlungsempfehlungen eine Erhöhung der Intervalle der regelmäßigen Wartung und Instandsetzung der Entwässerungseinrichtungen der freien Strecke, um eine reibungslose Abführung von Wassermengen zu jeder Zeit gewährleisten zu können. Darüber hinaus ist eine Anpassung der konservativen Ansätze zur Bestimmung der Bemessungswassermengen denkbar. Allgemeine flächendeckende Aussagen zur Dimensionierung von Durchlässen sind nicht möglich. Einzelnachweise sind standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten.

Um eine Hilfestellung/Anleitung zur Art und Weise der Berücksichtigung der Änderungen des Klimawandels in der Aufgaben- und Maßnahmenplanung sicherzustellen und somit den Gesetzen und Normen zu genügen, wird für die WSV ein Handbuch ("WSV-Climate Proofing") erstellt. Dieses Handbuch verfolgt das Ziel, die Leistungsfähigkeit, die Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit der Bundeswasserstraßen einschließlich der Anlagen, das heißt die Sicherheit und die Leichtigkeit der Schifffahrt sowie die ökologischen und wasserwirtschaftlichen Funktionen der Wasserstraße, zu gewährleisten. Es wird in einer Coproduktion aus Akteuren der WSV sowie von vier Bundesoberbehörden des BMVI (BAW, BfG, BSH und DWD) im Rahmen diverser Workshops und Kleingruppensitzungen erarbeitet. Es enthält einen abgestimmten Arbeitsablauf von Prüfungsvorgängen und Analysen in der WSV, um Klimawandeleinflüsse in die strategische und objektbezogene Maßnahmenplanung einzubeziehen. Darüber hinaus wird ein begleitendes Schulungsprogramm für WSV-Beschäftigte zur Nutzung des Handbuchs konzipiert. Ein Erfahrungsaustausch zu diesem Projekt mit dem EBA und der DB AG zeigte die Möglichkeit einer Übertragung dieses Ansatzes auch auf andere Bereiche, wie die Schiene.

4.4.3 Ingenieurtechnischer Ansatz – bauliche Anpassungsmaßnahmen

Zur Beurteilung der Umsetzbarkeit und Umsetzungswürdigkeit einer Maßnahme muss der mögliche Nutzen i. d. R. in einen größeren Kontext gestellt und den potenziellen negativen Wirkungen und "Kosten" (im weiteren Sinne) der Eingriffe gegenübergestellt werden. Synergien und Ökosystemdienstleistungen spielen für die Bewertung eine zunehmend bedeutende Rolle. Die Umsetzung jeder ingenieurtechnischen Maßnahme umfasst daher in der Praxis einen umfangreichen Bewertungs-, Beteiligungs- und teilweise Ausgleichsprozess, der eine ganzheitliche Perspektive sicherstellt und mehrjährige Vorbereitungs- und Planungsphasen mit sich bringt. Daraus folgt unmittelbar, dass vorausschauendes Entscheiden und Handeln von zentraler Bedeutung bei der baulichen Anpassung an den Klimawandel sind.

Das übergeordnete Ziel von Anpassungsstrategien bzw. baulicher Anpassung ist es, den jeweiligen Verkehrsträger oder das umgebende System mit ingenieurtechnischen Mitteln konzeptionell bzw. direkt an die bereits eingetretenen und zukünftig zu erwartenden Folgen des Klimawandels und extremer Wetterereignisse anzupassen und somit widerstandsfähiger zu gestalten. Die nachfolgend dargestellten baulichen Maßnahmen zielen auf die Minderung ausgewählter Klimafolgen ab (hier: Hitze/Trockenheit, Hochwasser und Meeresspiegelanstieg).

Zu den robusten Aussagen der Klimafolgenforschung gehört eine Zunahme hitzebedingter Belastungen (Abschnitt 2.2). Für den Straßenverkehr ist u. a. eine erhöhte thermische Belastung des Straßenoberbaus, insbesondere des Asphalts, bedeutsam. Es ist davon auszugehen, dass hohe Temperaturen zu einer Verkürzung der Nutzungsdauer von Asphalttragschichten und zu Schäden in Asphaltdeckschichten infolge bleibender Verformungen führen (Wellner et al. 2017). Ein Ansatz zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Straße ist die **Entwicklung neuer Asphaltarten**. Entsprechende Forschungsarbeiten sind bei der BAST angesiedelt. Das noch laufende Projekt (Projektende 2020) ist in zwei Phasen gegliedert, die aus der Entwicklung eines thermischen Belastungsmodells und der Konzepti-

on klimaangepasster Asphalte bestehen. Das entwickelte Modell beschreibt die thermische Beanspruchung und Temperaturentwicklung über die gesamte Einbautiefe und bildet somit eine wichtige Grundlage für die Entwicklung temperaturangepasster Asphalte. Ausgewählte Varianten von Asphalten wurden in Laborversuchen experimentell geprüft. Die verschiedenen Asphalte lassen sich durch eine Kombination aus Änderung der Wärmeleitfähigkeit in die Tiefe und Modifikationen der Helligkeit der Asphaltoberfläche klassifizieren. Dabei ist eine Asphaltierung mit heller Asphaltoberfläche und herabgesetzter Wärmeleitfähigkeit für die zukünftig zu erwartenden höheren Temperaturextreme besonders vorteilhaft. Zu prüfen ist noch, ob eine rein materialspezifische Anpassung ausreicht, um die Asphalttemperatur auf ein akzeptables Niveau zu senken.

Für den Transport auf Binnenwasserstraßen ist insbesondere eine mögliche zukünftige Häufung und Intensivierung von Niedrigwassersituationen relevant (Abschnitt 3.4.1). Diese haben direkte Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt und die Transportkosten insgesamt (vgl. auch Abschnitt 4.4.5), aber auch auf den Unterhalt der Wasserstraßen durch die WSV. Ein Beispiel für eine solche Einschränkung der Nutzbarkeit stellt die **Deutzer Platte** an der freifließenden Strecke des Rheins im Stadtgebiet von Köln dar (Abbildung 4-2a). Die Ablagerung von Geschiebe hat hier in der Vergangenheit bereits zu **Einschränkungen der Schifffahrt** geführt. Es ist wahrscheinlich, dass sich die Beeinträchtigungen infolge des Klimawandels weiter verschärfen (Abbildung 4-2b sowie Abbildung 3-12). Von der BAW wurde ein standardisierter Arbeitsablauf entwickelt, um Fehlstellen an der Wasserstraße zu identifizieren, zu analysieren und darauf aufbauend Anpassungsoptionen zu erarbeiten (Nilson et al. 2020). Dieser Ablauf wurde am Beispiel der Deutzer Platte exemplarisch getestet. Die Untersuchungen zeigen, dass Unterhaltungsbaggerungen allein nicht zielführend sind. Sie können unter abnehmenden Abflussbedingungen sogar kontraproduktiv sein, da es dadurch zu einem Verfall der Wasserspiegellagen und damit zur dauerhaften Unterschreitung der Mindestwassertiefe in der Fahrrinne (Bereich Köln: 2,50 m unter dem Bezugswasserstand GIW20) kommen kann. Unter heutigen Abflussbedingungen wird das Bauwerk derart dimensioniert, dass die nötige Unterhaltung minimiert wird. Unter abnehmenden Abflüssen

kann die weitere Unterhaltung durch Baggern aber nicht ausgeschlossen werden. Mithilfe von gängigen flussbaulichen Regelungselementen mit bekannter prinzipieller Wirkung kann dem entgegen gewirkt werden: Ein Parallelwerk am rechten Ufer und eine Leitmole am linken Ufer sollen durch die Verringerung der Fließbreite für eine Erhöhung der Transportkapazität und damit verminderte Anlandungen sorgen (Abbildung 4-2c). Eine Flexibilisierung des Bauwerks im Sinne möglicher zukünftiger Nachregelung kann im Hinblick auf die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Auswirkungen des Klimawandels zielführend sein.

Um eine Maßnahme im Bereich der Wasserstraße wirtschaftlich bewerten zu können, müssen die Auswirkungen auf die Schifffahrt betrachtet werden. Wie beschrieben, kann eine flussbauliche Maßnahme Engstellen entschärfen oder beseitigen. Durch den Bau können z. B. Querströmungen erzeugt werden, die zu einem erhöhten Fahrspurenbedarf führen können. Kann diesem Bedarf nicht entsprochen werden, bedeutet das eine verschlechterte Situation für die Schifffahrt. Um eine flussbauliche Maßnahme bewerten und optimieren zu können, werden die fahrdynamischen Parameter wie Breitenbedarf (Sicherheit, Leichtigkeit) und mögliche Abladetiefe (Wirtschaftlichkeit) ausgewertet. Für diese Analyse wurde an der BAW als Anwendungsbeispiel der Mittelrheinabschnitt gewählt. Zur **fahrdynamischen Bewertung** wurden Ergebnisse des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells des jeweiligen Referenzzustandes ohne Bauwerke und der Ausbauvariante mit Bauwerk verwendet, wobei zur Fehlerelimination stets vergleichende Betrachtungen durchgeführt wurden. Die fahrdynamischen Analysen wurden zum Teil mit einem Binnenschiffssimulationsverfahren durchgeführt. Im Zuge dieser Untersuchung für den Mittelrhein wurden Bewertungskriterien und Analyseverfahren neu- und weiterentwickelt sowie angewendet. Durch die geplanten und hierbei untersuchten Maßnahmen konnte eine Verbesserung für die Schifffahrt im Hinblick auf die Abladetiefen festgestellt werden. In einigen Bereichen wurde durch den Einbau von Flussbauwerken der Breitenbedarf leicht erhöht, was aber den Verkehr nicht weiter beeinträchtigt. In Teilbereichen konnten auch Optimierungsvorschläge unterbreitet werden.

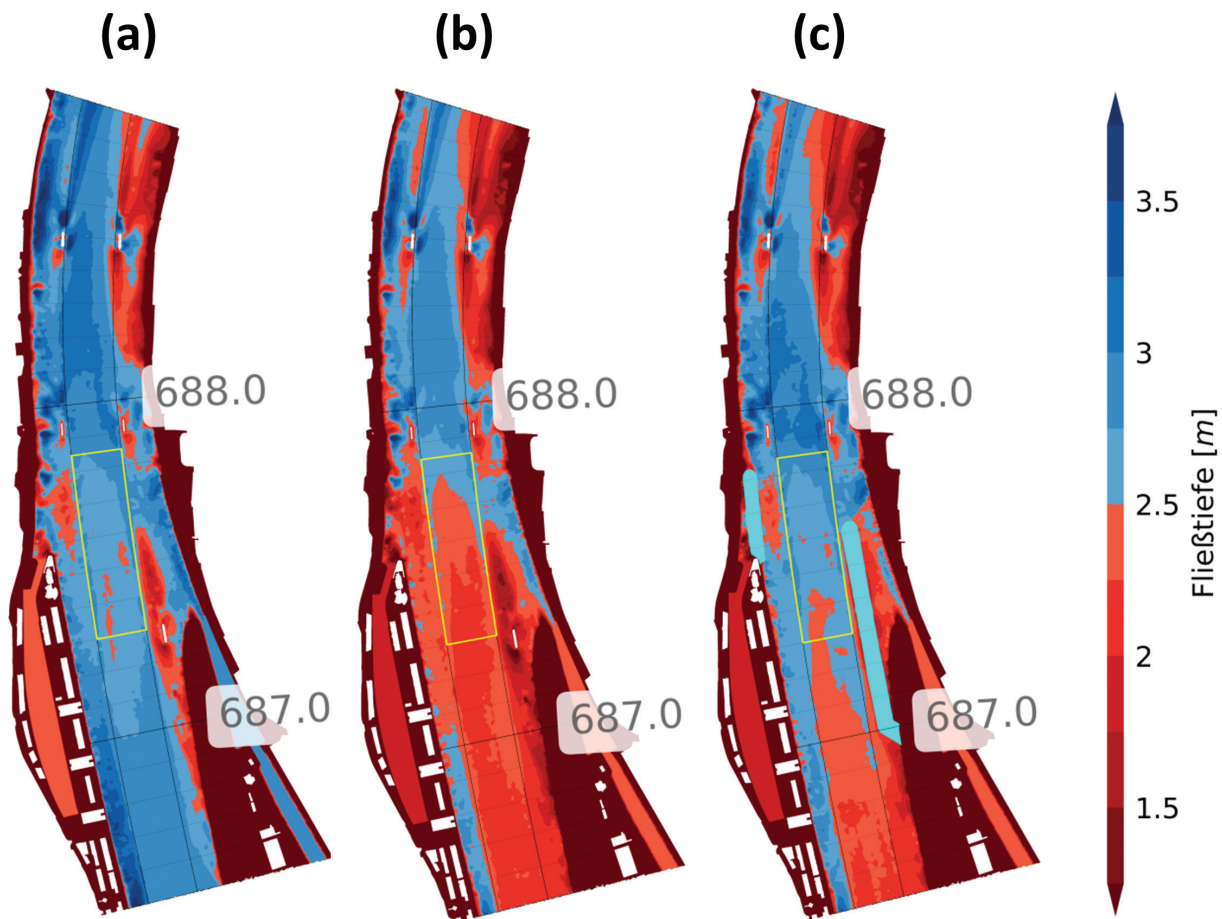


Abbildung 4-2: Fehlstelle Deutzer Platte (innerhalb des gelben Polygons) im Ist-Zustand mit heutigem Niedrigwasserabfluss (a), mit 20 %-Abflussreduktion, simulierter Sohlevolution in der *fernen Zukunft* inkl. Unterhaltungsbaggerungen (b) und nach Umsetzung einer Ausbauvariante (Bauwerke in cyan) (c). Mindestwassertiefe in der Fahrrinne im Bereich Köln: 2,50 m unter dem Bezugswasserstand GLW_{20} .

Die im BMVI-Expertennetzwerk erstellten Abflussprojektionen und Auswertungen deuten auf eine Zunahme der Zahl von Gefährdungen durch **Hochwassersituationen** hin (hier: Flusshochwasser, Abschnitte 3.3.1 und 3.4.2). Bereits seit den verheerenden Hochwassern im Rhein-, Oder-, Donau- und Elbegebiet in den 1990er- und 2000er-Jahren wurden zahlreiche Hochwasserschutzmaßnahmen ergriffen, um das Risiko wirtschaftlicher Schäden – inklusive Schäden an der Verkehrsinfrastruktur – durch Hochwasser zu reduzieren. Für die Umsetzung des Hochwasserschutzes sind in Deutschland die Bundesländer verantwortlich. Einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung leistet seit 2007 auch die EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie. Unmittelbar nach den Hochwassern vom Juni 2013 beschloss

die Umweltministerkonferenz in einer Sondersitzung die Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP). Es enthält als Kernstück eine gemeinsam von Bund und Ländern aufgestellte Liste mit prioritären Maßnahmen für einen überregional wirksamen, präventiven Hochwasserschutz. Gefördert werden sowohl gesteuerte Hochwasserrückhalteräume (Flutpolder, Hochwasserrückhaltebecken) als auch die Wiedergewinnung von natürlichen Überschwemmungsflächen (bspw. durch Deichrückverlegungen).

Die fachliche Begleitung des NHWSP erfolgt seit 2014 durch die BfG. Im Fokus der Untersuchungen steht derzeit die Ermittlung der überregionalen Maßnahmenwirkungen

mittels mathematischer Wellenablaufberechnungen. Die bisher vorliegenden (teilweise bilanzbasierten) Wirkungsabschätzungen zeigen, dass die Gesamtheit der NHWSP-Maßnahmen in den Flussgebieten prinzipiell geeignet ist, um die beobachteten Hochwasserscheitel großer historischer Hochwasserereignisse an Donau, Rhein und Elbe um mehrere $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. mehrere Dezimeter zu senken. Die Wirksamkeit der Maßnahmen unterscheidet sich in Abhängigkeit von Hochwassergenese, Wellenablauf und Maßnahmensteuerung ganz wesentlich. Aufwendige flussgebietsweite hydrodynamische Modellierungen, die durch die BfG gemeinsam mit den Ländern im Rahmen des NHWSP derzeit durchgeführt werden, nehmen unterschiedliche Hochwassergenese (Wellenablauf, Scheitelcharakteristika) und -intensitäten in den Blick und sind für detaillierte Aussagen zu den Maßnahmenwirkungen erforderlich.

Nicht nur dem Hochwasserschutz dienen die verstärkt seit Beginn des 20. Jahrhunderts errichteten Talsperren. Als multifunktionale Bauwerke stellen sie eine bedeutende ingenieurtechnische Anpassung an ein veränderliches Wasserdargebot dar und erfüllen zumeist mehrere Funktionen, u. a. für die Trinkwasserversorgung, Energieproduktion, Niedrigwasseraufhöhung (Schifffahrt, Wasserqualität) oder Freizeitnutzung. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes der Flussgebietsgemeinschaft Elbe und der BfG wurde der großräumige Einfluss der Talsperren in Tschechien und Thüringen auf den Hochwasserablauf der Elbe untersucht. Die modellbasierten Untersuchungen belegen, dass an der Elbe Unterlieger durch Rückhaltungen in Talsperren der Oberlieger – in einem Ausmaß wie vermutlich an keinem anderen großen Gewässer in Deutschland – profitieren. Die in der Untersuchung berücksichtigten Talsperren (u. a. Moldau- und Saalekaskade) sind geeignet, um die Hochwasserscheitel der Elbe bis vor die Tore Hamburgs um mehrere $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. Dezimeter zu senken.

Im **Nord-Ostsee-Kanal (NOK)** wird die Sicherstellung des Betriebswasserstands durch den Meeresspiegelanstieg und mögliche klimawandelbedingte Änderungen des Niederschlags erschwert (Abschnitt 3.6.2). Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs wird sich das Zeitfenster zur Entwässerung des NOKs in die Elbe und die Ostsee verringern. Mithilfe des in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen Modellsystems konnten Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOKs identifiziert und mögliche zukünftige Änderungen in deren Auftreten abgeleitet werden. Die WSV sieht diese Untersuchungen als essentielle Basis zur Entscheidungsfindung an, um den Einschränkungen der Entwässerung des NOK durch den Meeresspiegelanstieg und Änderungen im Niederschlag entgegenwirken zu können. Es werden dabei zwei Optionen berücksichtigt: a) ein angepasstes Wassermanagement und b) ein Neubau der Schleusen. Zu Punkt a) können vorausschauende Vorgehensweisen, z. B. langzeitliche Handlungsoptionen wie die Bereitstellung von Überflutungsgebieten oder der Neubau einer Pumpstation genannt werden. Bei einem Ersatz von Schleusen in Kiel-Holtenau, die einen langfristigen ungestörten Schiffsverkehr im NOK ermöglichen sollen, werden die aktuellen Erkenntnisse zum beschleunigten Meeresspiegelanstieg bereits entsprechend beachtet. Die WSV wird dabei den neuen projizierten Meeresspiegelanstieg von 1,74 m (siehe Grinsted et al. (2015)) anstelle der 0,50 m nach dem bisherigen Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein (2012-2013, MELUR SH (2013)) berücksichtigen. Die Schleusen werden deshalb bereits jetzt so geplant, dass eine nachträgliche Erhöhung entsprechend dem neuen Projektionswert zukünftig möglich sein wird, sobald sich dieser abzeichnen sollte. Dafür ist es beispielsweise bereits jetzt nötig, die Konstruktionsart der Schleusentore entsprechend zu wählen. Dies stellt eine Optimierung des Ressourcenverbrauchs anhand des tatsächlichen Bedarfs sicher.

4.4.4 Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – angepasstes Management

Die potenziellen Folgen des Klimawandels haben direkte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit sowie die Unterhaltung der Verkehrsträger und somit auf mittel- und langfristige Planungen. Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wurden einerseits exemplarisch bereits bestehende Maßnahmen im Management der verschiedenen Verkehrsträger hinsichtlich ihrer Bedeutung vor dem Hintergrund des Klimawandels bewertet. Andererseits wurden auch neue Anpassungsoptionen im Management der verschiedenen Verkehrsträger exemplarisch und regional auf ihre Wirkung hin untersucht. Letztere müssen vor einer Umsetzung hinsichtlich verkehrssicherheits- sowie naturschutzrelevanter Aspekte genau überprüft werden.

Ein angepasstes Management oder die Umsetzung von Handlungsempfehlungen sind insbesondere bei prozessabhängigen Wirkungsweisen von Bedeutung. Einem äußeren Prozess (z. B. Vegetationswuchs), der kontinuierlich oder wiederkehrend auf die Verkehrsinfrastruktur wirkt, muss begegnet werden. Diese Art der Anpassungsoption zeichnet sich in der Umsetzung durch wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahmen aus, die in geeigneten Intervallen umgesetzt werden. Im Unterschied zu beispielsweise baulichen Maßnahmen kann das Management vergleichsweise kurzfristig angepasst werden. Die Entwicklung neuer Maßnahmen im Management und die Überprüfung ihrer Wirksamkeit kann jedoch eine Herausforderung sein, wenn vielfältige Prozesse berücksichtigt werden müssen. Anpassungen im Management erfordern deshalb ein umfassendes Verständnis der Prozesse, die den Verkehrsträger in seiner Funktions- bzw. Betriebsfähigkeit beeinflussen. Für die Umsetzung von Maßnahmen im Management können kurz- bis mittelfristige (z. B. saisonale) Vorhersagen relevanter klimatischer Parameter (z. B. Niederschlag, Abfluss, Temperatur) sinnvoll sein, um die Durchführung der Maßnahmen planen zu können und damit ihre Effektivität zu erhöhen. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen befassen sich mit den Klimawirkungen "Sturm" (insb. relevant an Straße und Schiene), "Niedrigwasser" (insb. relevant

an den Binnenwasserstraßen) sowie "Meeresspiegelanstieg" (insb. relevant an den Seeschiffahrtsstraßen).

Bereits heute lässt sich eine Vielzahl von Verkehrsbehinderungen und Schäden an Verkehrsinfrastruktur auf die direkte sowie indirekte Wirkung hoher Windgeschwindigkeiten zurückführen. Im Vergleich zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) zeigen aktuelle Projektionen sowohl für den Mittelwind als auch für Starkwinde nur sehr geringfügige Änderungen von $\pm 5\%$ ohne konkrete regionale Differenzierung. Die zum Teil massiven Schäden an der Eisenbahninfrastruktur und die damit verbundenen bzw. vorsorglichen regionalen oder sogar vollständigen Einstellungen des Bahnbetriebes zeigen, dass bereits heute ein verstärkter Anpassungsbedarf gegenüber Sturmfolgen besteht. Damit sind – unabhängig von möglichen zukünftigen Erhöhungen in der Häufigkeit oder Intensität von Sturmereignissen im Rahmen des Klimawandels – Maßnahmen zur Minderung der Sturmfolgen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrsinfrastruktur sinnvoll.

Einer möglichen direkten Einwirkung durch Seitenwind wird im **Bahnsystem** bereits durch konstruktive Maßnahmen im Fahrzeugbau, z. B. Ballastierung in Verbindung mit einem niedrigen Schwerpunkt, begegnet. Auf hohen Talbrücken kann die Seitenwindwirkung zusätzlich durch Schutzwände minimiert werden. Eine generelle Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit ist nicht vorgesehen, jedoch können Infrastrukturunternehmen lokal solche Langsamfahrstellen einrichten, wenn die Bedingungen dies erforderlich machen. Systembedingt ist der Schienenverkehr aufgrund der spurgeführten Anlage in Verbindung mit langen Bremswegen besonders gegenüber Hindernissen im und am Gleis anfällig. Hinzu kommt die Oberleitung mitsamt den verbundenen Einrichtungen bei elektrifizierten Strecken, welche die Sensitivität der Bahn gegenüber Sturmwirkungen durch Baumwurf weiter erhöht (s. Abschnitt 3.3.2). Diesem Umstand kann durch ein angepasstes und konsequent durchgeführtes Vegetationsmanagement begegnet werden, wobei naturschutzfachliche und -rechtliche Bestimmungen sowie lokale Gegebenheiten Berücksichtigung finden müssen.

Die aktuelle Richtlinie der DB AG (DB Ril 882, Landschaftspflege, DB Netz AG (2019)) befasst sich nicht direkt mit der Anpassung des Vegetationsbestandes im **Bahnsystem** an

den Klimawandel. Allerdings betrachtet die hierin verankerte Durchforstungsstrategie jeden Baum entlang einer Bahnstrecke als mögliche Gefährdung für den Eisenbahnbetrieb, sofern er im Falle eines Sturzes eine Bahnanlage treffen kann (Vorhandensein von Bäumen entlang der Schiene, siehe Expositionsanalyse Abschnitt 3.3.2). Hierbei wird der sicherheitsrelevante Bereich betrachtet, der die Rückschnitts- und Stabilisierungszone umfasst. Im direkten Gleisbereich und in der Rückschnittszone (Minimum 6 m von der Gleismitte des äußeren Gleises) wird die Vegetation mittels chemischer, thermischer oder mechanischer Verfahren zurückgedrängt (vertikaler Querschnitt entspricht einem U-Profil). In der daran anschließenden Stabilisierungszone erfolgt grundsätzlich einmal jährlich (abwechselnd belaubt und unbelaubt) die Regelinspektion mit baumbezogener Prüfung einer Vielzahl von Faktoren (wie Schrägstand, Höhe-Durchmesser-Verhältnis und Beurteilung des Wurzel-, Stamm- und Kronenbereichs). Somit können potenzielle Gefahrenbäume erkannt und bei Bedarf entnommen werden. Für die Umsetzung der Vegetationspflegemaßnahmen in der Stabilisierungszone stellt die Richtlinie unterschiedliche Leitbilder bereit. Hierbei wird im Zusammenhang mit der Minimierung von Störungen durch Extremwetterereignisse das Leitbild "Waldrand/Hedden, Feldgehölze und Sträucher" genannt. Demnach sollen "keine Bäume, die entsprechend ihrer Höhe und Entfernung zum Gleisbereich eine potenzielle Gefährdung für die Fahrwegverfügbarkeit darstellen", entlang der Gleisstrecken stehen (DB Ril 882, DB Netz AG (2019); V-Profil).

Auch für die **Bundesfernstraßen** sind hinsichtlich der sturmbedingten Klimafolgen die Aspekte Sturmwurf und Seitenwind besonders relevant. Bereits bestehende Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Sturmwurf an Bundesfernstraßen betreffen verschiedene Aspekte der Grünflächenpflege. Ein entsprechendes Vegetationsmanagement ist in Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) beschrieben. Im "Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege" (FGSV 2006), sind insbesondere die Abschnitte 3 "Gehölzflächen" und 4 "Straßenbäume" im Zusammenhang mit der Sturmwurfgefährdung von Relevanz. Die Pflegemaßnahmen in Gehölzflächen gliedern sich grundsätzlich in die drei Abschnitte "Fertigstellungspflege", "Entwicklungspflege" und "Unterhaltungspflege". Dazu gehört beispielsweise die rechtzeitige Entfernung stand- und bruch-

gefährdeter Gehölze aus den Beständen, das Freihalten des Lichtraumprofils von Gehölzen sowie die Pflege und Verjüngung der Gehölzflächen. Die Pflegemaßnahmen an Straßenbäumen beinhalten Baumschau, Baumbeobachtung, Baumkontrolle, Baumerziehung und Baumpflege. In der seitens der FGSV geplanten Aktualisierung des Merkblattes sollte auch der Klimawandel Berücksichtigung finden.

Insbesondere auf Brücken stellt die Seitenwindgefährdung für Verkehrsteilnehmer eine besondere Gefahrenquelle dar. Einige Brücken sind bereits mit Windschutzeinrichtungen ausgestattet, um seitenwindbedingte Unfälle zu reduzieren oder bestenfalls zu vermeiden. Jedoch kann es sein, dass aus konstruktiven Gründen die Anbringung von Windschutzeinrichtungen auf den betroffenen Brücken gar nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. In diesen Fällen kann die Realisierung einer sogenannten Windwarnanlage sinnvoll sein. Über Geschwindigkeitsbeschränkungen, Teillableitungen gefährdeter Fahrzeuggruppen und Vollsperrungen können windbedingte Unfälle vermieden werden. Es gilt hierbei zunächst zu überprüfen, welche der genannten Anpassungsmaßnahmen bereits in der Praxis angewendet werden und ob sie den Einflüssen des Klimawandels auch zukünftig gerecht werden.

Eine zentrale Aufgabe der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ist die Vorhaltung einer ausreichend breiten und tiefen Fahrrinne der Wasserstraße. Durch Baggerung wird bei Bedarf auf eine definierte Tiefe (Baggerhorizont) unterhalb eines Bezugswasserstandes unterhalten. Eine potenzielle klimawandelbedingte Einschränkung der **Binnenschifffahrt** stellt insbesondere die Absenkung des Bezugswasserstands infolge dauerhaft sinkender Niedrigwasserabflüsse dar (Abschnitt 3.4.1). Sinkt der Bezugswasserstand, sinkt auch der Baggerhorizont und der Baggeraufwand erhöht sich, was zu Einschränkungen der Fahrrinne und erhöhten Kosten führt. Ein sofort wirksamer und kostengünstiger Ansatz dafür, die Binnenwasserstraßen auch bei künftigen ungünstigeren Abflussbedingungen entsprechend der Aufgabe der WSV unterhalten zu können, stellt ein Überdenken der heutigen Fahrrinne dar. Deshalb wurde im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks mithilfe eines einfachen Ansatzes zur Ermittlung von Fehlvolumen in der Fahrrinne die Effektivität veränderter Fahrrinnenparameter exemplarisch für den Niederrhein untersucht. Dafür wurde die Fahrrinne im digitalen Modell unter

einem berechneten Bezugswasserstand "unterhalten" und das Fehlvolumen ermittelt. Somit verdoppelt sich dieses Volumen auf der Strecke Bonn–Köln bei einer Absenkung des GIQ³⁸ um 10 % und auf der Strecke Orsoy–Wesel bereits bei einer Absenkung des GIQ um 5 %. Eine moderate Anpassung der Fahrrinne kann den Unterhaltungsaufwand streckenabhängig zum Teil erheblich reduzieren, ohne zu schiffahrtlichen Einschränkungen zu führen, die deutlich über das heutige Maß hinausgehen. Eine Änderung der Fahrrinnenparameter kann jedoch nur unter Berücksichtigung fahrdynamischer und sicherheitsrelevanter Aspekte umsetzungsreif geplant werden.

Eine wichtige Voraussetzung für die Optimierung des Sedimentmanagements am Niederrhein ist ein vertieftes Systemverständnis. Dieses Systemverständnis kann über die Analyse historischer Daten verbessert werden. Seit mindestens zwei Jahrhunderten beeinflussen anthropogene Faktoren die Sohlhöhenentwicklung am Niederrhein erheblich. Ihr Einfluss ist seit dieser Zeit wesentlich stärker als langfristige, natürliche Prozesse das Abflussgeschehen. Beispielsweise führten umfangreiche industrielle Kiesentnahmen zu erheblichem Sedimentverlust, während der Bau von Staustufen am Oberlauf und an den Nebenflüssen den Eintrag von Sediment verringerte. Der Kohleabbau im Untergrund des Rheins führte zu einer zusätzlichen lokalen Sohlensenkung. Die Sohlerosion bzw. Sohlensenkung führte zu einer Wasserspiegelsenkung entlang großer Abschnitte des Niederrheins mit Raten von bis zu 4 cm/Jahr. Diese Wasserspiegelsenkung ist für die Unterhaltung und den Betrieb des Rheins problematisch und erforderte vielerlei Anpassungen (z. B. Vertiefung von Häfen, geringere Abladung von Schiffen aufgrund einer verringerten Wassertiefe über den Drempeln der Eingangsschleusen zu den Kanälen). Um der Sohlerosion und der damit einhergehenden Wasserspiegelsenkung entgegenzuwirken und damit die Funktionsfähigkeit von Fahrrinne und Bauwerken zu erhalten, wurden seitens der WSV seit den 1970er-Jahren und verstärkt seit Ende der 1980er-Jahre Geschiebezugaben als Teil eines Sedimentmanagementkonzeptes durchgeführt. Neben der Geschiebezugabe umfasst das Sedimentmanagement auch Baggerungen und Sedimentzugaben, Sohlstabi-

lisierungen sowie ortsnahe Umlagerungen (Geschiebe wird z. B. aus der Fahrrinne in die angrenzenden Bühnenfelder verbracht). Durch diese Maßnahmen konnte die Absenkung der Wasserspiegellinie beim mittleren Niedrigwasserabfluss im gesamten Flussabschnitt seit den 1970er-Jahren stark reduziert, in Teilbereichen sogar gestoppt werden. Ein klimawandelbedingt verändertes Abflussgeschehen könnte sich auf die Entwicklung der mittleren Sohlhöhe auswirken und damit an Bedeutung gewinnen. Die Erfahrungen und das Systemverständnis, die im Rahmen des bisherigen Sedimentmanagements am Rhein erarbeitet wurden, ermöglichen eine Anpassung an derartige klimawandelbedingte Änderungen.

An den **Seeschiffahrtsstraßen** ergibt sich ein Anpassungsbedarf des Sedimentmanagements infolge eines Meeresspiegelanstiegs, der zu einem erhöhten Import von Feinsedimenten führen wird. Da die Wattgebiete den Eintrag von Tideenergie und Sediment ins Ästuar reduzieren und somit einen positiven Effekt auf das Sedimentmanagement haben (Abschnitt 2.7), ist ihr Erhalt auch für die Unterhaltung der Seehafenzufahrten von großer Bedeutung. Eine Anpassungsmaßnahme kann deshalb eine den Meeresspiegelanstieg begleitende Förderung des Wattwachstums im Mündungsbereich der Ästuar sein. Dies kann durch die Umlagerung von Baggergut in die Rinnen der Wateinzugsgebiete im Mündungsbereich realisiert werden (Abbildung 4-3), von wo aus die Sedimente mithilfe tidegetriebener Prozesse (Effekt der Flutstromdominanz) auf die Wattflächen transportiert werden. Da ein Meeresspiegelanstieg die Flutstromdominanz in den Tiderinnen und damit den Sedimentimport in Wattgebiete verstärkt (Abschnitt 2.7), steht eine derartige Maßnahme im Einklang mit der natürlichen Dynamik der Wattgebiete. Zudem sind Maßnahmen zum Erhalt des Wattenmeers auch im Interesse des Küsten- und Naturschutzes. Maßnahmen zur Förderung des Wattwachstums werden deshalb auch von der "Strategie Wattenmeer 2100" des Landes Schleswig-Holstein (MELUR SH 2015) aufgegriffen, die von Küsten- und Naturschutz gemeinsam entwickelt wurde.

Relevante Faktoren dieser Maßnahme sind Ort (Rinnensystem bzw. Wateinzugsgebiet), Zeitpunkte auf unterschiedlichen Skalen (Beginn innerhalb des 21. Jahrhunderts, Jahreszeit, Tidephase), Intervall und Umfang des Sedimenteintrags sowie die Beschaffenheit des eingebrachten

³⁸Der GIQ ist der Bezugswasserstand für die Unterhaltung der Fahrrinne. Er ist definiert als Abfluss, der an 20 (eisfreien) Tagen im Jahr unterschritten wird.

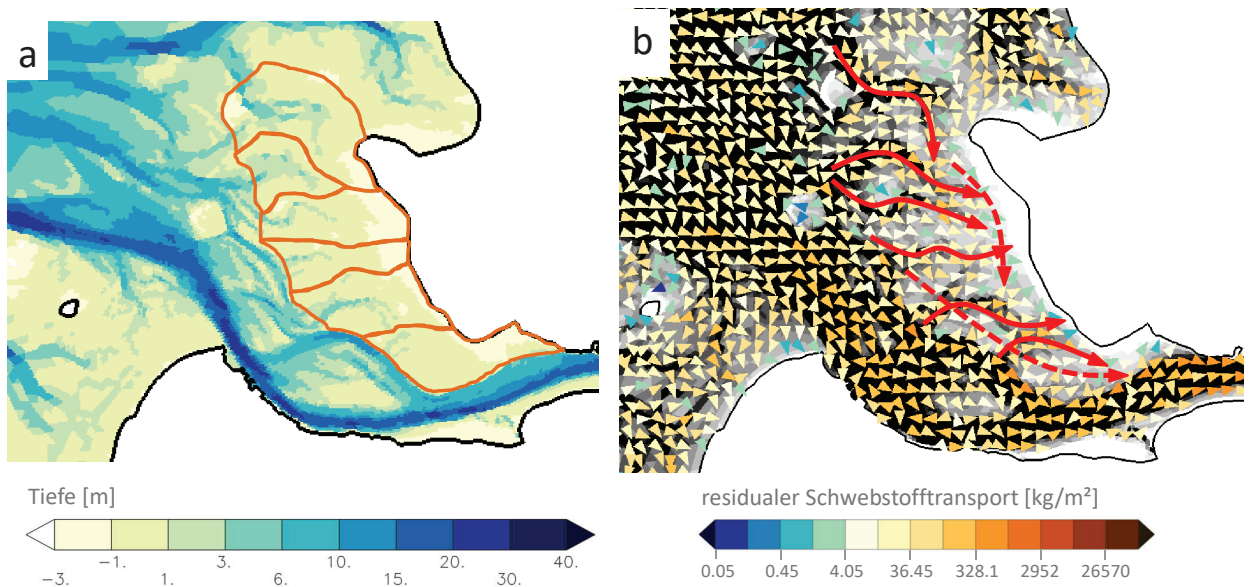


Abbildung 4-3: Topografie der Elbmündung mit Watteinzugsgebieten (braune Polygone), die mitwachsen sollen (a). Mittlerer residueller Schwebstofftransport (Dreiecke) und schematische Transportwege im gegenwärtigen Zustand (rote Pfeile) mit in Grautönen hinterlegter Topografie (b).

Sediments. Die Umlagerungsstellen müssen stets an die aktuelle morphologische Entwicklung der Rinnensysteme angepasst werden. Mit zunehmender Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs erhöht sich die Notwendigkeit und Wirksamkeit der Maßnahme. Um eine hohe Effektivität der Maßnahme zu gewährleisten, sollte das Sediment möglichst im Sommer umgelagert werden, wenn der windinduzierte Seegang gering ist. Die günstigste Tidephase für das Verbringen von Sediment in den Rinnen der Wattgebiete liegt zwischen Ebbstromkenterung (etwa bei Tideniedrigwasser) und maximaler Flutstromgeschwindigkeit (etwa 2 Stunden nach Ebbstromkenterung), da somit der Transport mit dem Flutstrom in Richtung Watt am effektivsten ausgenutzt wird. Herausforderungen sind unter anderem die notwendige Menge der Umlagerungen (insb. bei starker Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs)³⁹ sowie die Verfügbarkeit von Baggergut mit den erforderlichen Eigenschaften. Um das Wattwachstum in allen Wattzonen (rinnennah und rinnenfern) gleichermaßen zu fördern, sollte das eingebrachte Baggergut in etwa dem gegenwärtigen

Korngrößenspektrum der Wattoberfläche entsprechen. Eine weiterführende Beschreibung von Anhaltspunkten für eine sinnvolle Umsetzung dieser Maßnahme findet sich im Schlussbericht des Schwerpunktes Anpassungsoptionen (Norpoth et al. 2020).

4.4.5 Operativer Ansatz Verkehrsbetrieb – Anpassungsmaßnahmen seitens des Infrastrukturnutzers

Die räumliche (Umrouing) oder zeitliche Verlagerungen (Verschiebung, bei ausreichender Vorwarnzeit auch Vorverschiebung) des Verkehrs ist eine bereits heute übliche Anpassungsmaßnahme im Fall von Verfügbarkeitseinschränkungen eines Verkehrsträgers. Die Flexibilität und die Kapazität dieser Art "Anpassung" hängen von der Verfügbarkeit freier Kapazitäten der jeweils alternativen Verkehrsträger (Umschlag, Infrastruktur und Fahrzeuge/Fahrerführer) sowie einer hinsichtlich Dauer und Verlässlichkeit ausreichenden Vorhersage ab.

³⁹ Beispielsweise werden zur Kompensation von 0,8 m Meeresspiegelanstieg allein in der Elbmündung ca. $108 \text{ m}^3 = 0,1 \text{ km}^3$ Sediment benötigt.

Extreme meteorologische und hydrologische Ereignisse (z. B. Hochwasser, Niedrigwasser, Hangrutschungen, Sturm) können zu einer eingeschränkten oder unterbundenen Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur führen. Bei derartigen Ausfällen oder Einschränkungen kommt es automatisch zu räumlichen (Umroufung) oder zeitlichen Verlagerungen (Verschiebung, bei ausreichender Vorwarnzeit auch Vorverschiebung) des Verkehrs, die somit als reaktive Anpassungsmaßnahme verstanden werden kann. Diese Verlagerungen können sowohl innerhalb des Netzes des betroffenen Verkehrsträgers stattfinden, als auch zu Verlagerungseffekten auf andere Verkehrsträger führen (intermodal). Untersuchungen zu den Wirkungsmechanismen solcher Verlagerungen sowie entsprechende Simulationen zu den Verkehrsströmen und Verkehrsverlagerungen im Ereignisfall können die Verkehrsbetreiber und Logistiker unterstützen, um bei Eintreten eines tatsächlichen Ereignisses vorbereitet zu sein. Aus der spontanen reaktiven Maßnahme der Verkehrsverlagerung könnte eine geplante Option werden.

Im Rahmen der Arbeiten im Schwerpunkt *Fokusgebiete Binnen* und in Vorläuferprogrammen des BMVI-Expertenetzwerks (BMVI 2015b, Scholten 2010) wurden Möglichkeiten und Einschränkungen von Verkehrsverlagerungen mittels Modellen bzw. auf Basis von Unternehmensbefragungen sowie Datenauswertungen analysiert. Demnach sind auf der Straße aufgrund der hohen Redundanz im Netz Umroufungen ad hoc möglich und werden im Ereignisfall regelmäßig praktiziert. Eine Verlagerung von der Straße auf andere Verkehrsträger findet aufgrund der relativ geringen Kosten des Mehraufwandes einer Umroufung und der Spezifika des straßengebundenen Gütertransportes (just in time und Tür-zu-Tür Transporte, hohes Verhältnis von Güterwert zu Transportkosten) kaum statt. Umgekehrt erfolgt auch eine Verlagerung von den Verkehrsträgern Schiene und Binnenschifffahrtsstraße hin zur Straße aufgrund der dort transportierten Gütereigenschaften (Massengut) aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur in geringem Umfang.

Verlagerungen sind insbesondere zwischen den beiden massengut-affinen Verkehrsträgern Schiene und Binnenschifffahrtsstraße denkbar. Dieser Verkehrsträgerwechsel benötigt gegenüber der Umroufung einen längeren zeitlichen Vorlauf (Bedarf an längerfristigen Vorhersagen) und

ist auf multi-modale Verknüpfungen entlang der Transportrouten (Umschlagpunkte) angewiesen. Ferner ist er durch begrenzte Kapazitäten im Bereich der Fahrzeuge (Triebfahrzeuge, Waggons, Binnenschiffe sowie Lok- bzw. Schiffsführer) limitiert. Die Verkehrsinfrastruktur selbst hat im Grundsatz Kapazitäten, die ausreichen würden, um einen Großteil der Transporte abzuwickeln, wengleich zu höheren Kosten und zeitlich ggf. suboptimal (Abschnitt 3.6.1, Stresstest). Tatsächlich erfolgt daher eine Verlagerung von Gütertransporten zwischen den Verkehrsträgern aus Wirtschaftlichkeitsgründen in relativ engen Grenzen.

Eine zeitliche Verschiebung von Verkehren setzt eine geringe Dringlichkeit des Transportes und das Vorhandensein ausreichender Lagerkapazitäten am Quell- und/oder Zielort des Transportes voraus. Hierbei wirken neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kosten hochdimensionierter Lager) auch raumordnerische Rahmenbedingungen limitierend.

4.5 Unsicherheiten und Herausforderungen bei der Klimaanpassung

Die Umsetzung konkreter Maßnahmen stellt in der Praxis eine oft vielschichtige Herausforderung dar. Sie ergibt sich einerseits aus den Kerneigenschaften der wissenschaftlichen Betrachtung des Klimawandels (Übertragung des globalen Klimasignals auf lokale Ebene, Angabe von Bandbreiten, Flexibilität). Andererseits betrifft sie die praktische Planung und Umsetzung der Maßnahmen und adressiert die *Anwender* auf unterschiedlichen Ebenen (rechtlich/plannerisch, organisatorisch/betrieblich, technisch/baulich). Das derzeitige deutsche Planungs- und Genehmigungsrecht steht den Anforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel entgegen: Es ist langwierig, kostspielig und unflexibel. Eine grundsätzliche Herausforderung liegt in der Identifizierung geeigneter Maßnahmen: Mehr heißt nicht unbedingt gleich besser. Die Bündelung und Verfügbarkeit von Wissen ist von zentraler Bedeutung.

In Abschnitt 4.3 wurde der Weg zur Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen (Abbildung 4-1) beschrieben und im Abschnitt 4.4 wurden die im BMVI-Expertenetzwerk exemplarisch untersuchten Anpassungsmaßnahmen vorgestellt. Die Umsetzung konkreter Maßnahmen in der Praxis stellt jedoch eine oft vielschichtige Herausforderung dar.

Eine Reihe von Herausforderungen ergibt sich aus den Kerneigenschaften der wissenschaftlichen Betrachtung des Klimawandels. Um lokale Folgen des Klimawandels abzuschätzen, wird das globale Klimasignal in mehreren Schritten auf die lokale Ebene übertragen. Jeder dieser Schritte ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden, die sich angefangen von den Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre über die natürliche Variabilität des Klimas bis hin zu spezifischen, aus der regionalen Klima(folgen)modellierung abgeleiteten Kennwerten aufaddieren (s. a. Abschnitt 2.1). Im Rahmen der Klimawirkungsbewertung begegnet man diesen Unsicherheiten durch die Betrachtung von Modellbandbreiten der möglichen zukünftigen Entwicklung. Bei der Entwicklung und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen bestehen verschiedene Strategien zum Umgang mit diesen Unsicherheiten. Beispielsweise können für die jeweiligen Ausprägungsstufen eines Klimawandelparameters (z. B. Meeresspiegelanstieg) verschiedene – ggf. aufeinander aufbauende – geplante Maßnahmen vorgehalten werden. Je nachdem, wie stark sich das Klima ändert, kann die eine oder andere Maßnahme umgesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Umsetzung von Maßnahmen, die auch ohne Klimawandel einen Nutzen haben (no-regret). Auch Investitionen, die auch bei weniger stark ausgeprägten Klimaänderungen für die Gesellschaft oder ein Unternehmen gewinnbringend sind, stellen eine Option dar, insbesondere dann, wenn die Anpassungsmaßnahme selbst nur einen verhältnismäßig geringen Mehraufwand bedeutet (low-regret). Da sich Planungs- und Genehmigungszeiten oft über mehrere Jahre bis Jahrzehnte hinziehen, ist rechtzeitiges Handeln wichtig (Abbildung 4-4) und ein kontinuierliches Monitoring der klimabeeinflussten Größen (Indikatoren) und deren Berücksichtigung im Laufe des Planungs- und Genehmigungsprozesses ein weiterer Weg, mit der systemimmanenten Unsicherheit umzugehen.

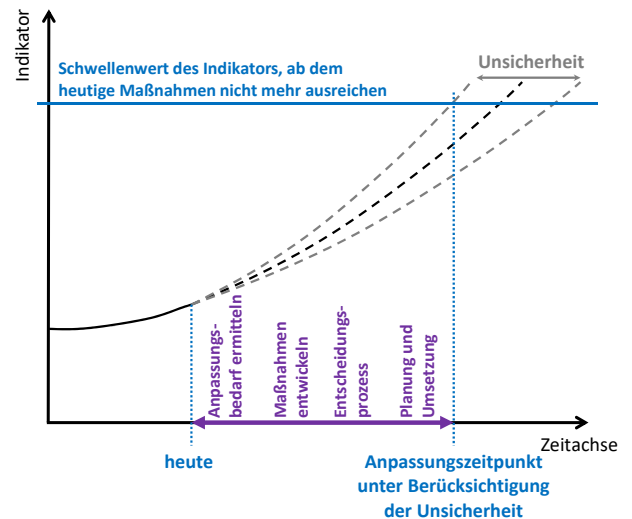


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung von Entwicklungs- und Planungszeiten unter Berücksichtigung der Unsicherheit (aus Lowe et al. (2009), verändert; © Crown Copyright 2009).

Weitere Herausforderungen betreffen die praktische Planung und Umsetzung der Maßnahmen und damit die Anwender. Um mögliche Hürden auf Anwenderseite zu identifizieren und einzuordnen, wurde im November 2018 zu dieser Thematik vom BMVI-Expertenetzwerk ein Workshop durchgeführt. Teilnehmer des Workshops waren vorwiegend Vertreter aus Bundes-, Landes- und Kommunalbehörden, der Privatwirtschaft (Ingenieure und Beratung) sowie der Forschung. In drei Themenbereichen wurde über mögliche Hürden und deren Überwindung diskutiert. Aufgrund des eingeschränkten Teilnehmerkreises ist die nachfolgende Zusammenstellung möglicher Hürden nicht als abschließend oder allgemeingültig zu verstehen. Sie erlaubt einen ersten Überblick über vorhandene sowie gefühlte Defizite, denen zukünftig mit informatorischen und ggf. regulatorischen Mitteln zu begegnen ist.

Der Themenbereich "**rechtlich/planerisch**" befasste sich mit Hürden, die auf der Ebene von Planung, Planfeststellung, Gesetzgebung und Gesetzesvollzug auftreten können. Als wesentliche Schwierigkeiten wurden unklare Zuständigkeiten zwischen Bund und Ländern sowie innerhalb der Bundesländer, Interessenkonflikte innerhalb der Planung und zum Teil widersprüchliche Gesetzgebung genannt. Darüber hinaus fehlt derzeit in vielen Gesetzen und Re-

gelungen eine klare Festlegung zur Art und Weise der Berücksichtigung des Klimawandels. Beispiele für relevante Gesetze sind das Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) oder das Baugesetzbuch (BauGB). In Bezug auf Normen und Richtlinien wurde festgehalten, dass diese "rückwärtsgewandt" seien und bisher den Klimawandel nicht berücksichtigen (Abschnitt 4.4.2). In diesem Zusammenhang steht auch der Wunsch nach einem geeigneten dynamischen Mechanismus, der den Klimawandel und die regelmäßigen neuen Erkenntnisse bezüglich des zukünftig zu erwartenden Klimas in die Regelwerke einbringt. Insgesamt sind zusätzliche Hilfestellungen durch Vorgaben, Beratung oder Interpretationshilfen für Datensätze nötig. Anpassung an den Klimawandel ist ebenfalls eine Frage der Finanzierbarkeit und sollte daher auch in die Finanzplanung einbezogen werden.

Im Hinblick auf eine mögliche Beseitigung der Hürden wurde deutlich, dass vielen Anwendern nicht vollständig klar ist, wer die Verantwortlichen im Planungsprozess für die Thematik "Klimawandel" sind. Generell wird daher mehr Transparenz bezüglich aller relevanten Beteiligten für die Planfeststellung benötigt. Erschwert wird eine solche Übersicht jedoch dadurch, dass die Planfeststellung bei jedem Verkehrsträger anders geregelt ist. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erstellt derzeit in Zusammenarbeit mit dem Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks ein Handbuch zum Climate Proofing (Abschnitt 4.4.2). In diesem werden Hinweise gegeben, wie der Klimawandel in Planungen der Wasserstraße berücksichtigt werden soll. Solche Handbücher können auch für andere Verkehrsträger hilfreich sein.

Aus **organisatorischer/betrieblicher** Perspektive einer Organisation bzw. eines Betriebes können sich vielfältige weitere Hürden bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zeigen. Zunächst muss das Bewusstsein für die Notwendigkeit zur Anpassung an Klimavariabilität und -wandel (der "Wille" zu handeln) mit dem entsprechenden Know-how zusammentreffen. Um dies zu realisieren, müssen die Unternehmen zum einen für diese Themen sensibilisiert, zum anderen muss der Wissensstand mittels Schulungen und Informationsveranstaltungen verbessert

werden. Dabei sind eine adressatengerechte Aufbereitung der Informationen zum Klimawandel und eine klare, verständliche Sprache wichtig. Zudem muss dem Bedürfnis der Entscheidungsträger nach "harten" Daten für die Ermittlung des Anpassungsbedarfs und konkreter Maßnahmen nachgekommen werden. Eine Möglichkeit, diesem Bedürfnis zu begegnen, besteht in der Ausrichtung bzw. Dimensionierung der Anpassungsmaßnahme an heute bereits auftretenden – mit hohem Schadenspotenzial verbundenen – Extremwetterereignissen. Da das "Freiwilligkeitsprinzip" bezüglich der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen von den Workshopteilnehmern oftmals als nicht ausreichend empfunden wird, wären zur Maßnahmenumsetzung in Unternehmen und Behörden gesetzliche Vorgaben hilfreich. Der Klimawandel ist dabei in strategischen Planungen häufig nur ein Aspekt unter vielen, den es zu berücksichtigen gilt. Ein für Unternehmen entscheidendes Kriterium für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis. Bei den Risikoabschätzungen ist es wichtig, auch die durch Anpassungsmaßnahmen vermiedenen Kosten zu berücksichtigen. Sie fließen derzeit i. d. R. nicht in die Betrachtung ein.

Allgemeiner Konsens unter den Workshop-Teilnehmern ist, dass die meisten **technischen/baulichen** Hemmnisse bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen aus dem Weg geräumt werden können, wenn der allgemeine Wille zur Lösung vorhanden ist und entsprechende Budgets zur Verfügung stehen. Die Umsetzbarkeit scheitert in der Regel nicht an technischen Hürden, sondern an mangelnder Konsensfähigkeit der Beteiligten. Fachliche oder politische Vorgaben und Kompromisswilligkeit der Politik und Gesellschaft sowie der Mut, neue Wege zu beschreiten, bestimmen die Machbarkeit damit mindestens genauso wie der Stand des Wissens. Technische oder bauliche Hürden entstehen dort, wo entsprechende Materialien (noch) nicht zur Verfügung stehen (z. B. erweitertes Hitzetoleranzspektrum bei gleichzeitigem Erhalt der dynamischen Eigenschaften). An dieser Stelle muss vorausschauende Materialforschung geleistet werden. Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der konkreten Maßnahmenplanung ist das Vorliegen von Bemessungswerten. Liegt ein solcher vor, können technisch-bauliche Lösungen gefunden werden. Die Festlegung dieser Werte ist im Kontext des Klimawan-

dels jedoch schwierig. Während der klassische Bemessungswert auf Werten aus der Vergangenheit basiert, fordert der Klimawandel eine Bemessung auf eine ungewisse bzw. mit einer Bandbreite möglicher Entwicklungen verknüpfte Zukunft (s. Absatz zu den rechtlichen/planerischen Hürden).

Eine grundsätzliche Herausforderung bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsoptionen liegt in der Identifizierung geeigneter Maßnahmen. Zum Beispiel muss die Summe mehrerer Einzelmaßnahmen nicht zwangsläufig eine bessere Wirkung bedeuten, sondern Einzelmaßnahmen können sich unter Umständen auch konterkarieren. Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen und die Entwicklung sinnvoller Anpassungsstrategien ist Systemverständnis auf vielen Skalen und

Wirkungsebenen erforderlich. Das beinhaltet das Verständnis darüber, wie die Einzelmaßnahme in einer Maßnahmengruppe wirkt und wie die Maßnahmengruppe in einer eventuell vorliegenden Anpassungsstrategie aufgeht. Das dafür notwendige Wissen (soweit vorhanden) zusammenzutragen bzw. es zu generieren, kann ebenfalls eine Herausforderung für die Umsetzung des Anpassungsbedarfs darstellen. Daher ist die Wissensbündelung ein zentraler Baustein auf dem Weg zu tragfähigen Anpassungsstrategien und der Ableitung von Maßnahmen. Mut zur Umsetzung auch beispielsweise neuartiger technischer Maßnahmen wird benötigt, um mit den gesammelten Erfahrungen unser Wissen immer mehr zu erweitern und damit die Klimaanpassung des Verkehrssystems zukünftig zielgerichteter und effektiver gestalten zu können.

5 Fazit und Ausblick

- Das übergeordnete Ziel, die Methodenkompetenzen der Oberbehörden durch die enge Zusammenarbeit im BMVI-Expertennetzwerk zu stärken und einheitliche Ansätze zur Bewertung von Klimafolgen für die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße zur Verfügung zu stellen, wurde für den Themenbereich Klimaanpassung des Bundesverkehrssystems erreicht. Im Rahmen des ressortübergreifenden Austauschs erfolgten zudem Schritte in Richtung einer im Bund konsistenten und kohärenten Perspektive auf die Thematik Klimawandel und Anpassung an die Folgen des Klimawandels.
- Das BMVI-Expertennetzwerk hat Daten und Modelle weiterentwickelt und so eine einheitlichere und besser begründete Basis für gefahren- und verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalysen geschaffen, die den aktuellen Sachstand berücksichtigt. Damit wurde die Informationsbasis erheblich verbessert. Viele frühere Erkenntnisse bezüglich zu erwartender Klimaänderungen und damit einhergehenden Klimawirkungen auf das Verkehrssystem wurden bestätigt. Einige Aspekte können jedoch noch nicht als konsolidiert gelten und bedürfen weiterer Forschungsarbeit.
- Die im BMVI-Expertennetzwerk neu generierten bzw. zusammengestellten Daten erlauben eine differenzierte Analyse spezifischer Klimawirkungen auf das Verkehrssystem in Vergangenheit und Zukunft. Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* wird in Bezug auf fast alle berücksichtigten Kennwerte eine Verschärfung der potenziellen Gefährdung des Verkehrssystems projiziert. In Verbindung mit der Bewertung der Kritikalität und Sensitivität von Strecken und Objekten können prioritäre, vertieft zu untersuchende und ggf. anzupassende Bereiche des Verkehrssystems identifiziert werden.
- Die projizierten Auswirkungen des Klimawandels führen zu einem erhöhten Anpassungsdruck. Die für das Verkehrsinfrastrukturmanagement verantwortlichen Organisationseinheiten verfügen bereits über ein reichhaltiges Spektrum von Maßnahmen, mit denen die Verkehrsinfrastruktur und damit der Verkehr resilienter gegenüber klimatisch beeinflussten Naturgefahren gemacht werden können. Das BMVI-Expertennetzwerk hat sowohl bestehende als auch einige neue Maßnahmen vor dem Hintergrund der projizierten Klimaänderungen exemplarisch bewertet und liefert damit Diskussionsgrundlagen für praktische Umsetzungsfragen.
- Die im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten Methoden und Datenprodukte sind von grundsätzlicher Bedeutung für Klimawirkungsanalysen in Deutschland. Sie werden unmittelbar oder mittelbar durch verschiedene Akteure im Geschäftsfeld des BMVI und darüber hinaus genutzt. Dazu gehören neben den Verkehrsnetzbetreibern auch die verschiedenen Akteure aus den Handlungsfeldern und die Gremien der DAS (z. B. DAS-Behördennetzwerk). Auch im Ausland werden Impulse des BMVI-Expertennetzwerks als Beispiele guter Praxis aufgenommen.
- Das BMVI-Expertennetzwerk hat viele Fragen beantwortet, aber auch – wie für ein Forschungsprogramm üblich – neue Fragen aufgeworfen. Ausgewählte Wirkungszusammenhänge, Datenlücken sowie das heterogene und wachsende Nutzerfeld bedürfen weiterer Befassung. Somit kann der klimawirkungsbezogene Informationsbedarf des Verkehrssektors und verknüpfter Handlungsfelder in den wichtigsten Punkten erfüllt werden.
- Einige der noch offenen Forschungsfragen wird das Themenfeld 1 in seiner nächsten Bearbeitungsphase (2020–2025) aufgreifen. Bearbeitet wird die Thematik der Gestaltung eines klimaresilienteren Verkehrssystems in vier Schwerpunktthemen, die entlang der Hauptkomponenten der in Phase 1 entwickelten Klimawirkungsanalyse und -bewertung (Exposition, Sensitivität, Kritikalität und Integration) formuliert sind.

Im BMVI-Expertennetzwerk wurden in der ersten Forschungsphase (2016–2019) viele Datenprodukte und Methoden zur Einschätzung der beobachteten und projizierten Klimaänderungen erarbeitet und bewertet (Kap. 2). Auf dieser Grundlage erfolgten für ausgewählte klimatische Einflüsse Analysen bezüglich der aktuellen und zukünftig zu erwartenden Klimawirkungen auf das deutsche Bundesverkehrssystem (Kap. 3). Der Themenkomplex Anpassungsoptionen wurde konzeptionell aufgearbeitet und für einige Teilbereiche wurden beispielhafte Anpassungsmaßnahmen erarbeitet (Kap. 4). Neben den spezifischen Ergebnissen zu einzelnen Klimaänderungen, Klimawirkungen und Anpassungsmaßnahmen, die in den vorangegangenen Kapiteln zusammengestellt sind, wurden auch die nachfolgend zusammengefassten übergeordneten Erkenntnisse gewonnen.

Mit den entwickelten Datenprodukten, Methoden und Ergebnissen zur Einschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung, deren zu erwartenden Auswirkungen auf das Bundesverkehrssystem sowie der Forschung zu exemplarischen Anpassungsoptionen leistet das BMVI-Expertennetzwerk einen wichtigen **Beitrag zur Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie** an den Klimawandel.

Die im Bericht dargestellten, projizierten Änderungen des Klimas und damit einhergehender Folgen für das Verkehrssystem zeigen, dass Überlegungen im Hinblick auf die Gestaltung eines klimaresilienteren Verkehrssystems sinnvoll erscheinen. In Bezug auf viele Aspekte des Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmanagements können gezielte Anpassungsmaßnahmen die absehbaren Folgen klimatischer Veränderungen mindern. Dabei sind die Notwendigkeit und der Typus der Klimaangepasstung – wie in der Maßnahmenplanung üblich – im Kontext mit verschiedenen weiteren Aspekten zu bewerten. Hierzu gehören beispielsweise Aspekte der Wirtschaftlichkeit (auch vor dem Hintergrund zukünftig zu erwartender Transportnachfragen) sowie umweltbezogene, soziale und viele weitere Aspekte. Die im BMVI-Expertennetzwerk zusammengestellten Informationen, inklusive der näher untersuchten Anpassungsmaßnahmen, stellen hierbei die Diskussionsgrundlage dar.

5.1 Übergeordneter Erkenntnisgewinn

Klimawandel und für das Verkehrssystem relevante Extremereignisse

Das BMVI-Expertennetzwerk hat Daten und Modelle weiterentwickelt und somit eine einheitlichere und besser begründete Basis für Klimawirkungsanalysen geschaffen, die einerseits den aktuellen Sachstand berücksichtigen und andererseits die Einbindung verschiedener klimatischer Einflüsse und Verkehrsträger ermöglichen. Damit wurde die Informationsbasis erheblich verbessert. Viele frühere Erkenntnisse bezüglich zu erwartender Klimaänderungen und damit einhergehenden Klimawirkungen auf das Verkehrssystem wurden bestätigt. Einige Aspekte können jedoch noch nicht als konsolidiert gelten und bedürfen weiterer Forschungsarbeit.

Basierend auf methodisch und inhaltlich aktualisierten **Klimareferenzdatensätzen** wurde die Klimaentwicklung der jüngeren Vergangenheit in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung (5 km x 5 km, Tageswerte) nachgezeichnet und neueste **Klimamodell Datensätze** evaluiert, hinsichtlich systematischer Modellfehler korrigiert und für die weitere Anwendung in hydrologischen **Klimawirkungsmodellen** aufbereitet. In den Bereichen Ozeanografie, Hydrologie und Wassergüte wurden die eingesetzten Klimawirkungsmodelle teilweise erheblich weiterentwickelt. Für nachgelagerte Wirkungen (z. B. Hangrutschungen, Sturmgefahren, Wasserbewirtschaftung) wurden wichtige Datengrundlagen zusammengestellt, so dass nun – in Verbindung mit den Klimareferenz- und Klimamodell Daten – ein einheitlicher Rahmen für eine gut begründete Klimawirkungsanalyse geschaffen wurde, der erstmalig die Einbindung verschiedener klimatischer Einflüsse und damit verbundene Naturgefahren für drei verschiedene Verkehrsträger (Straße, Schiene und Wasserstraße) ermöglicht.

Mittels der **Klimaprojektionsensembles für die drei Szenarien Klimaschutz, Weiter-wie-bisher und Moderat** können die mögliche zukünftige Entwicklung des mittleren Klimazustandes sowie die zu erwartenden Veränderungen und Folgen von Extremereignissen wie Starkniederschläge, Flusshochwasser, hohen Tidewasserstände, Niedrigwas-

ser, Hitze oder Stürme bewertet werden. Insbesondere für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* zeigen sich für einige der genannten Größen **deutliche Änderungen**. Eine **vorausschauende Anpassung** an die zu erwartenden Klimaänderungen **kann negative Auswirkungen des Klimawandels abmildern** (z. B. Hoch- und Niedrigwasser). Ferner wird deutlich, dass die zu erwartenden **Auswirkungen durch international umgesetzte Klimaschutzmaßnahmen stark reduziert** werden können.

Mit den neuen Daten und Modellen werden viele der in früheren Forschungsprogrammen getroffenen Aussagen zu den Folgen des Klimawandels hinsichtlich Richtung und Ausmaß der anzunehmenden Veränderungen bestätigt und bleiben somit gültig. Einige Aspekte hingegen können nicht als konsolidiert betrachtet werden und bleiben Gegenstand weiterer Untersuchungen. Hierzu gehören Aspekte des Meeresspiegelanstieges sowie hydrometeorologische Veränderungen in Ostdeutschland.

Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem

Die im BMVI-Expertennetzwerk neu generierten bzw. zusammengestellten Daten erlauben eine differenzierte Analyse spezifischer Klimawirkungen auf das Verkehrssystem in Vergangenheit und Zukunft. Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* wird in Bezug auf fast alle berücksichtigten Kennwerte eine Erhöhung der Gefährdung projiziert. In Verbindung mit der Bewertung der Kritikalität und Sensitivität von Strecken und Objekten können prioritäre, vertieft zu untersuchende und ggf. anzupassende Bereiche des Verkehrssystems identifiziert werden.

Das BMVI-Expertennetzwerk hat das verfügbare Wissen zu den Folgen des Klimawandels für den Verkehrsbereich zusammengetragen und in einen verkehrsträgerübergrei-

fenden Bewertungsrahmen überführt. Somit können die heutige und die zukünftige Exposition der Verkehrsinfrastruktur gegenüber **Extremereignissen** wie Hochwasser und Stürmen oder auch durch klimatische Einflüsse ausgelöste Hangrutschungen unter Berücksichtigung der Bedeutung einzelner Strecken- oder Teilnetze bewertet werden. Entsprechende Hinweiskarten liegen für das Bundesgebiet bzw. größere Fallstudiengebiete vor und zeigen, welche Teile der Straßen-, Schienen- und Wasserstraßennetze von ausgewählten klimatisch beeinflussten Naturgefahren getroffen werden können. **Zu den bereits heute gefährdeten Bereichen gehören auch Teile der wichtigen TEN-V-Korridore. Für die Zukunft wird unter Annahme des Weiter-wie-bisher-Szenarios in Bezug auf fast alle berücksichtigten Kennwerte eine steigende Gefährdung projiziert.**

Eine **Stressteststudie** hat gezeigt, dass die Verkehrsinfrastruktur auch in heute bereits hoch belasteten Regionen (Ausschnitt TEN-V Mittelrhein) grundsätzlich in der Lage ist, das zusätzliche Verkehrsaufkommen durch spontane Umleitungen, Verkehrsverlagerungen und zeitliche Transportverschiebungen zu bewältigen. Das ist jedoch nur möglich, wenn pro Ereignisfall ausreichend Fahrzeuge und fahrzeugführende Personen zur Verfügung gehalten werden und auch Kapazitäten der Verkehrsnetze der Nachbarländer genutzt werden können. Diese Art der spontanen Anpassung ist **mit erheblichen Mehrkosten verbunden, die einer dauerhaft herzustellenden Klimawandelresilienz gegenüberzustellen sind.**

Die Bedeutung von Verkehrsachsen lässt sich nicht allein mittels der hier verwendeten Zugehörigkeit zu TEN-V-Korridoren oder anhand bundesweiter Verkehrsbelastungsdaten bestimmen. Zum einen können Verkehrsachsen, die im Bundesvergleich eine vergleichsweise geringe Bedeutung aufweisen, für die strukturelle Entwicklung einer Region größte Bedeutung haben. Zum anderen kommt einigen Verkehrsachsen teilweise auch eine nichtverkehrliche (z. B. ökologische) Bedeutung zu.

Anpassungsbedarf und konkrete Maßnahmen für das Bundesverkehrssystem

Die projizierten Auswirkungen des Klimawandels führen zu einem erhöhten Anpassungsdruck. Die für das Verkehrsinfrastrukturmanagement verantwortlichen Organisationseinheiten verfügen bereits über ein reichhaltiges Spektrum an Maßnahmen, mit denen die Verkehrsinfrastruktur und damit der Verkehr resilienter gegenüber Naturgefahren gemacht werden kann, die aufgrund des Klimawandels gehäuft und/oder verstärkt auftreten. Das BMVI-Expertenetzwerk hat, vor dem Hintergrund der projizierten Klimaänderungen, sowohl bestehende als auch einige neue Maßnahmen exemplarisch bewertet und liefert damit Diskussionsgrundlagen für praktische Umsetzungsfragen.

Die vorgestellten Analysen zur Exposition, Sensitivität und Kritikalität des Verkehrssystems bilden eine wichtige Grundlage für die Identifizierung und Priorisierung von Anpassungserfordernissen und konkreten Maßnahmen durch die Planer, Betreiber und Eigner der Verkehrsinfrastruktur. Dabei ist das Spektrum der Anpassungsmaßnahmen sehr vielfältig. Eine wesentliche Voraussetzung zur kohärenten Anpassung eines heterogenen, multidisziplinären Gefüges wie dem Verkehrssystem bildet eine einheitliche, belastbare und regelmäßig aktualisierte Datengrundlage. Dieses nachhaltige Angebot muss durch operationelle Klimadienste bereitgestellt werden (z. B. durch den im Aufbau befindlichen DAS-Basisdienst "Klima und Wasser"), die gezielt, flächendeckend und dauerhaft abgestimmte Schnittstellen zur Praxis bedienen (**informativische Anpassungsmaßnahmen**). Diese Schnittstellen sind teilweise in bestehenden Arbeitsabläufen und Regelwerken bereits angelegt, teilweise müssen sie jedoch durch entsprechende Novellen noch geschaffen werden. Solche **regulatorischen Maßnahmen** integrieren den Aspekt "Klimawandel" in die Planung langlebiger Infrastrukturelemente. Bei der Planung liefern **ingenieurtechnische Maßnahmen** die Möglichkeit, das bestehende System baulich an die Klimawandelfolgen anzupassen, z. B. über flussbauliche Maßnahmen, Veränderungen von Deichhöhen oder Verwendung klimaangepasster Materialien beim Verkehrsinfrastrukturbau. Einige Konsequenzen des Klimawandels erfordern

möglicherweise auch **operative Maßnahmen**. Hierzu gehören einerseits Praktiken beim Management der Verkehrsinfrastruktur, beispielsweise ein verändertes Vegetations- oder Sedimentmanagement, und andererseits Maßnahmen beim Management des Verkehrsbetriebs aufgrund zukünftig voraussichtlich häufigerer Umroutungen, Verkehrsverlagerungen oder zeitlicher Verschiebungen von Transporten.

Auch ohne größere Anpassung verfügt das Verkehrssystem über Reserven, um auftretende Extremereignisse (z. B. Starkregentwässerung) und verkehrliche Wirkungen (z. B. Umroutungen) in gewissem Umfang kompensieren zu können. Das Spektrum der Maßnahmen, über welche die für das Verkehrsinfrastrukturmanagement verantwortlichen Organisationseinheiten bereits heute verfügen, eröffnet weitere Spielräume. Insbesondere die für die **nahe Zukunft** projizierten weitgehend **moderaten Änderungen können in vielen Fällen wahrscheinlich ausgeglichen werden**, ohne die heutige Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems maßgeblich zu beeinträchtigen. In Bereichen, in denen das Verkehrssystem bei Extremereignissen heute schon belastet ist, und **unter Annahme extremer Szenarien muss über neue Lösungskonzepte nachgedacht werden**. Aufgrund langwieriger Prozesse bei Planung und Umsetzung und der Tatsache, dass viele Infrastrukturelemente für eine lange Lebensdauer geplant und angelegt werden, ist es wichtig, bereits heute Anpassungsoptionen zu entwickeln.

Es wird nicht empfohlen, kostenintensive Maßnahmen allein aufgrund der hier vorgestellten Klimaänderungen und ihrer Auswirkungen auf das Verkehrssystem umzusetzen. Wie bei allen Maßnahmen üblich, muss eine umfassende Bewertung u. a. aus ökonomischer, ökologischer, naturschutzfachlicher, kultureller, gesellschaftlicher und sozialer Perspektive unter Beteiligung aller Akteure erfolgen. Der Klimawandel ist jedoch als Zusatzinformation in die Bewertung einzubeziehen. Dies gilt insbesondere bei Maßnahmen mit einem langen Planungshorizont und einer langen Lebensdauer (z. B. ingenieurtechnische Maßnahmen). Wie bereits an anderer Stelle festgestellt, sind No- oder Low-regret-Lösungen dabei zu bevorzugen. Dies umfasst Lösungen, die unabhängig von den Folgen des Klimawandels positive ökonomische, ökologische und soziale Wirkungen entfalten, sowie Lösungen, die bzgl. des

Aspektes Klimawandel heute nur geringe Zusatzinvestitionen erfordern, bei Bedarf jedoch eine flexible Erweiterung ermöglichen.

Zusammenarbeit innerhalb und außerhalb des BMVI-Expertennetzwerks

Das übergeordnete Ziel, die Methodenkompetenzen der Oberbehörden durch die enge Zusammenarbeit im BMVI-Expertennetzwerk zu stärken und die Ansätze zur Bewertung von Klimafolgen für die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße einheitlicher zu gestalten, wurde erreicht. Im Rahmen des zusätzlichen ressortübergreifenden Austauschs erfolgten zudem Schritte in Richtung einer bundesweit gemeinsamen Perspektive auf die Thematik Klimawandel und Klimaanpassung.

Jede Behörde baute bei der Netzwerkarbeit auf ihren – z. T. sehr unterschiedlichen – Vorerfahrungen auf und brachte unterschiedliche Vorgehensweisen in die Netzwerkarbeit ein. Für den Verkehrsträger Wasserstraße konnte auf langjährigen Vorerfahrungen in der Fachzusammenarbeit von vier Behörden (BfG, BAW, BSH und DWD) sowie Methodenkompetenz aus dem Ressortforschungsprogramm KLIWAS zurückgegriffen werden. Darauf aufbauend wurden Werkzeuge und Methoden für das nun erweiterte Netzwerk fortentwickelt. Auch im Bereich der Straße konnte auf bestehende verkehrsträgerspezifische Forschungsnetzwerke sowie Vorerfahrungen aus der Vergabe von Forschungsprojekten zurückgegriffen werden. Wichtige Impulse zur integrierten Bewertung von klimatischen Einflüssen und deren Wirkung auf das Verkehrssystem sowie der Resilienzbewertung wurden u. a. aus dem Forschungsprogramm AdSVIS in das Netzwerk eingebracht und von den Vertretern der übrigen Verkehrsträger aufgegriffen. Im Eisenbahn-Bundesamt wurde während der zurückliegenden Phase Pionierarbeit geleistet, indem der Bereich der Eigenforschung aufgebaut wurde. Das BMVI-Expertennetzwerk unterstützte dabei die schienenbezogene Umweltforschung, die im Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) weitergeführt werden wird. Mit der Deutschen Bahn bestand zur Umweltforschung ein bereits etablierter, reger und somit für beide Seiten vorteilhafter Austausch. Dabei zeigte sich, dass auch der verkehrsträger-

übergreifende, durch das BMVI-Expertennetzwerk initiierte Austausch zwischen den operativen Einheiten (hier: WSV und DB AG) wichtige Impulse für die Facharbeit und die Etablierung der Aufgabe "Anpassung an den Klimawandel" in der Praxis liefert.

Neben den reinen Fachergebnissen hat das BMVI-Expertennetzwerk Erfahrungen zur Bedeutung des vernetzten Arbeitens auch über den Kreis der Oberbehörden hinaus erbracht bzw. bestätigt. Somit kann nur im ressortübergreifenden Austausch (z. B. DAS-Behördennetzwerk) eine gemeinsame Perspektive auf die Thematik Klimawandel und Klimaanpassung gewonnen werden. Gleiches gilt für den Austausch mit den Behörden der Bundesländer. Dabei ist zusätzlich der Übergang von der bundesweiten und damit teilweise aggregierten Betrachtungsskala auf eine regionale und lokale Betrachtungsskala zu vollführen. Zudem zeigt sich, dass der in beide Richtungen verlaufende Datenaustausch zwischen Bund und Ländern gewisse Betrachtungen und Auswertungen teilweise überhaupt erst ermöglicht (z. B. Bundesländer nutzen die Klima- und Abflussprojektionen aus dem BMVI-Expertennetzwerk bzw. das BMVI-Expertennetzwerk verwendet die Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer).

5.2 Verwertung der Ergebnisse

Die im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten Methoden und Datenprodukte sind über den Verkehrssektor hinaus von grundsätzlicher Bedeutung für Klimawirkungsanalysen in Deutschland. Sie werden unmittelbar oder mittelbar durch verschiedene Akteure im Geschäftsfeld des BMVI und darüber hinaus genutzt. Wichtige Anwender für die Daten und Erkenntnisse des Themenfelds 1 sind neben den Verkehrsnetzbetreibern auch die verschiedenen Akteure aus den Handlungsfeldern und die Gremien der DAS. Auch im Ausland werden Impulse des BMVI-Expertennetzwerks als Beispiel guter Praxis aufgenommen.

Das BMVI-Expertennetzwerk hat mit den Arbeiten des Themenfeldes 1 im Bereich des Themenkomplexes "Klimawandel" grundlegende Daten zu zentralen Aspekten des Klimawandels in Deutschland geliefert – angefangen mit

auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Referenzdatensätzen über regionalisierte Projektionen zur zukünftigen Entwicklung von Klima, Ozean und Wasserhaushalt bis hin zu spezifischen anwenderrelevanten Kenn- und Bemessungswerten. Entsprechend groß ist die Liste der aktuellen und potenziell zukünftigen Nutzer, die deshalb hier nur exemplarisch genannt werden können.

Zu den Hauptanwendern der Daten und Ergebnisse des Themenfeldes 1 gehören neben dem DAS-Behördennetzwerk – und hierbei insbesondere die Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 (KWVA 2021) – auch und insbesondere die WSV. Hier wird eine direkte Schnittstelle zum Prozess des WSV *Climate Proofing* geschaffen. Diskutiert und in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks weiter auszugestaltet ist ferner eine Schnittstelle zur Methodik des Bundesverkehrswegeplans des BMVI.

Im Rahmen mehrerer Nutzer- und Stakeholderworkshops⁴⁰, der 1. Verkehrs- und Infrastrukturtagung⁴¹ sowie vielen weiteren nationalen und internationalen Tagungen hat das Expertennetzwerk seine Forschungsideen, -ansätze und Ergebnisse mit interessierten Anwendern aus unterschiedlichsten Bereichen (z. B. Verkehrsbetreiber, Bundes- und Landesbehörden, Forschungsinstitute, Universitäten, Logistiker etc.) diskutiert und deren Impulse für die weitere Forschungsarbeit aufgenommen. Viele Fragen konnten dabei beantwortet werden, jedoch blieben auch offene Punkte auf der Forschungsagenda, die in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks bearbeitet werden.

⁴⁰ Zu nennen sind hierbei zwei Nutzerworkshops des Themenfeldes 1 (01./02.12.2016 und 15.11.2018), drei Stakeholderworkshops für den Küstenbereich (12.05.2016, 11.04.2017, 20.11.2018), zwei Stakeholderdialoge mit dem BMVI (fachlicher Begleitkreis: 07.02.2019 und 25.09.2019), das jährliche Plenum des Themenfeldes 1 unter Beteiligung der WSV (18./19.10.2016, 16./17.10.2017, 14.11.2018, 11./12.12.2019), die Workshop-Reihe mit der DB zu möglichen Klimawandelrisiken: "Kritische Infrastrukturelemente und Schadensbilder" (24./25.10. und 17.11.2017) und viele weitere Dialogformate und Workshops der beteiligten Partner mit Bezug zu Aktivitäten des BMVI-Expertennetzwerks (z. B. DB-Fachtagung "Naturschutz" am 12.05.2017; eingeladene Vorträge zum Thema Entwässerung an der Küste (9. Hydrol. Gespräch am 19./20.03.2019 in Berlin, 7. BWK Küstentag am 27.04.2018)).

⁴¹ www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Termine/2018/VIT www.bmvi-expertennetzwerk.de/VIT.

Die fortgeschriebenen und weiterentwickelten meteorologischen Referenzdaten namens "HYRAS", die bereits als früher Meilenstein des BMVI-Expertennetzwerks vorlagen und meteorologische Datensätze der an Deutschland angrenzenden Länder einbinden, werden bereits durch viele Landesbehörden genutzt. Ein prominentes Beispiel ist die Kooperation Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Die aufbereiteten Klimaprojektionsdaten werden direkt in die ressortübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Bundes (DAS-KWVA 2021) eingespeist und fließen ebenso auf Landesebene in die Impaktmodellierung ein. Sowohl die Daten als auch die Methoden des BMVI-Expertennetzwerks werden bei den Schwesterbehörden in den Nachbarländern eingesetzt. "HYRAS" wird beispielsweise bereits beim niederländischen Wetterdienst (KNMI) im wasserwirtschaftlichen Zusammenhang genutzt.

Die im BMVI-Expertennetzwerk weiterentwickelten abfluss- und küstenbezogenen Modellbausteine und Datenprodukte werden über das Projekt ProWaS (Pilotprojekt zum DAS-Basisdienst "Klima und Wasser") sowie zukünftig auch durch das Klimavorsorgeportal des Bundes (KLiVO-Portal) an Schlüsselkunden weitergegeben. Als Metaportal bündelt das KLiVO-Portal vorhandene Daten und Informationen zum Klimawandel sowie Dienste zur zielgerichteten Anpassung an die Klimafolgen. Viele der im BMVI-Expertennetzwerk produzierten Datenprodukte werden über dieses Portal erreichbar sein und stehen somit zukünftig einer breiten Öffentlichkeit zur Unterstützung der Eigenvorsorge und zur Anpassung an die zu erwartenden Klimaveränderungen zur Verfügung. Die Ergebnisse und Methoden des BMVI-Expertennetzwerks werden nicht nur innerhalb, sondern auch außerhalb Deutschlands genutzt. Beispielsweise befinden sich hydrologische Modellbausteine (LARSIM) in Gemeinschaftsprojekten mit dem Tschechischen Hydrometeorologischen Institut (CHMI) und dem Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Einsatz.

Die im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks entwickelten Hinweiskarten (zu Hochwasser und

Hangrutschungen)⁴² werden bereits heute für die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) im Rahmen der Planfeststellung beim EBA und bei der DB verwendet. Die UVP ist ein umweltpolitisches Instrument der Umweltvorsorge mit dem Ziel, umweltrelevante Vorhaben vor ihrer Zulassung auf mögliche Umweltauswirkungen hin zu überprüfen. Seit 2017 ist im Gesetz zur Modernisierung des Rechts der UVP verankert, dass die Anfälligkeit der Vorhaben gegenüber den Folgen des Klimawandels geprüft werden muss. Diese Novelle des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes (UVPG) sowie anderer Vorgaben und Normen ist auch eine Motivation für den Prozess des WSV *Climate Proofings*.

Ein intensiver, auf einen möglichen (informativ, regulatorischen oder auch ingenieurtechnischen) Anpassungsbedarf ausgerichteter Dialog mit der WSV wurde bereits während des BMVI-Forschungsprogrammes KLIWAS etabliert. Im Rahmen dieses Dialoges wurde die Idee des Handbuchs *Climate Proofing* entwickelt. Mit diesem Handbuch, das nun nach Abschluss der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks im Entwurf vorliegt, erhalten die Mitarbeiter der WSV einen für ihre Arbeitspraxis tauglichen Rahmen zur Integration von klimawandelbezogenen Überlegungen in das konkrete Verwaltungshandeln. Begleitet wird die Einführung dieses Handbuchs mit einem Schulungsprogramm, das derzeit in Zusammenarbeit von WSV und im BMVI-Expertenetzwerk beteiligten Bundesoberbehörden ausgearbeitet wird. Auch die DB Netz arbeitet seit Anfang 2018 im neuen Expertenteam "Vegetation und Naturgefahren" aus eigener Kraft am Thema "Klimafolgen". Das BMVI-Expertenetzwerk steht dabei im engen Austausch mit der DB Netz.

Der Grad der Implementierung des Aspekts Klimawandel in das Handeln der für das Infrastrukturmanagement verantwortlichen operativen Einheiten ist je Verkehrsträger unterschiedlich zu bewerten. Ob ein dem WSV *Climate Proofing* nachempfundenen Ansatz auch für andere Verkehrsträger tragfähig und sinnvoll ist, ist Gegenstand weiterer Diskussionen.

⁴²Die Geodaten für Hochwasser und Hangrutschungen entlang des Schienennetzes stehen auf folgender Webseite zur Verfügung <http://lpg001/mapbender3a/app.php/application/geodaten>.

Der Wissenstransfer aus dem BMVI-Expertenetzwerk erfolgte auch im weiteren internationalen Kontext. Beispielsweise waren Mitarbeiter/-innen in die Expertengruppe zu Klimafolgen und Klimaanpassung für Verkehrsnetze und -knoten⁴³ der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) eingebunden. Die von deutscher Seite präsentierten Methoden und Ergebnisse des BMVI-Expertenetzwerks zur Analyse von Klimawirkungen und zur Prüfung von Richtlinien und Regelwerken wurden als wichtige Anregung für andere Nationen in ein gemeinsames Abschlussdokument aufgenommen und bilden eine Vorlage für ähnliche Maßnahmen in anderen Ländern. Die konkreten Fallstudien zu Niedrigwassersituationen am Rhein, zu den "Stresstestszenarien Mittelrhein" (s. Abschnitt 3.6.1) sowie zur Bewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals (s. Abschnitt 3.6.2) sind international auf großes Interesse gestoßen. Über den in englischer, französischer und russischer Sprache erscheinenden Endbericht der UNECE-Expertengruppe sind diese Ergebnisse des BMVI-Expertenetzwerks weltweit für eine breite Öffentlichkeit verfügbar.

Es wird deutlich, dass die Forschungsarbeiten im BMVI-Expertenetzwerk das Ansehen der beteiligten Bundesoberbehörden für den Themenbereich der Klimaanpassung weiter gesteigert haben. Sie werden als kompetente Ansprechpartner für Forschungsfragen zur Analyse von Klimawirkungen und zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen für das Handlungsfeld Verkehr und Infrastruktur gesehen. Insbesondere die Praxisorientierung – einschließlich Relevanz für konkrete Fragestellungen für Betrieb und Unterhaltung der Bundesverkehrsinfrastruktur sowie konkrete Planungsvorhaben der Verkehrsnetzbetreiber – wird dabei geschätzt.

5.3 Zweite Forschungsphase des Expertenetzwerks (2020–2025)

Die in Phase 1 (2016–2019) begonnenen Arbeiten des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zur Zielvorstel-

⁴³Für Informationen zur UNECE Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes siehe <https://www.unece.org/trans/areas-of-work/trends-and-economics/activities/group-of-experts-on-climate-change-impacts-and-adaptation-for-transport-networks-and-nodes-wp5ge3.html>.

lung der Gestaltung eines klimaresilienteren Verkehrssystems werden ab 2020 in einer zweiten Bearbeitungsphase (2020–2025) weitergeführt und vertieft. Die fachliche Ausgestaltung der zweiten Phase orientiert sich dabei an der Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks *Wissen – Können – Handeln* einschließlich der thematischen Roadmap des Themenfeldes 1 (BMVI-Expertennetzwerk 2018). Von der Identifikationsphase, in der die Potenziale von Forschungs- und Fachdaten sowie von technischen Neuentwicklungen identifiziert und verkehrsträgerübergreifend aktiviert wurden, kommt das BMVI-Expertennetzwerk nun in die Integrationsphase. Hier werden die vorliegenden Ergebnisse fortentwickelt und weitere wissenschaftliche Daten und Methoden integriert, wobei ganzheitliche Lösungsansätze zur Förderung von Synergien zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung im Vordergrund stehen. In die fachliche Roadmap des Themenfeldes 1 und somit auch die fachliche Ausgestaltung der Phase 2 sind viele wichtige in Phase 1 neu aufgeworfene bzw. unbeantwortet gebliebene Forschungsfragen eingeflossen.

Offene Forschungsfragen

Mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn im Forschungskontext werden immer wieder neue Fragen aufgeworfen, so auch in der 1. Forschungsphase des BMVI-Expertennetzwerks. Ausgewählte Wirkungszusammenhänge, Datenlücken sowie das heterogene und wachsende Nutzerfeld bedürfen zukünftig einer weiteren Befassung, um den klimawirkungsbezogenen Informationsbedarf des Verkehrssektors und verknüpfter Handlungsfelder in den wichtigsten Punkten noch besser zu erfüllen.

Die offenen Fragen stammen teilweise aus dem Forschungsnetzwerk selbst. Sie beziehen sich beispielsweise auf die naturwissenschaftlichen Untersuchungsgegenstände und betreffen z. B. das in Modellen abgebildete Prozessgefüge, entlang dem der Klimawandel auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr wirkt. Insbesondere besteht Forschungsbedarf zu den Komponenten und Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs an der Deutschen Küste einschließlich der spezifischen Auswirkungen auf das Verkehrssystem sowie zur Abbildung von konvektiven Starkre-

genereignissen und den daraus resultierenden Sturzfluten einschließlich möglicher Entwässerungsfragen entlang der Verkehrsträger Straße und Schiene. Auch bestimmte Wechselwirkungen zwischen Klima und Wasserhaushalt (z. B. Trockenheit in Ostdeutschland) bzw. Klima und Boden (z. B. Hangrutschung) sowie Binnenland und Küste (Gleichzeitigkeit extremer Bedingungen) bedürfen weiterer gemeinsamer Grundlagenarbeit.

Zu den offenen Punkten, die auch auf Nutzerseite wahrgenommen werden, gehören Fragen nach dem nachhaltigen Nutzen der beschriebenen Forschungsarbeit und der dauerhaften und flächendeckenden Verfügbarkeit von Datenprodukten und Beratungsdienstleistungen. Das BMVI-Expertennetzwerk hat erfolgreich Methoden entwickelt und Daten generiert, die exemplarisch den Nutzen für verschiedene Akteure im Verkehrssektor und anderen Sektoren aufzeigen. Es gehört jedoch nicht zu den Aufgaben von "Forschung und Entwicklung", dieses Angebot dauerhaft bereitzustellen. Gleichzeitig besteht nutzerseitig der Bedarf nach stets aktuellen und bundesweit einheitlichen Informationen. Die Pflege von konsolidierten Methoden und die Aktualisierung wiederholt angefragter Datenprodukte muss nun in ein dauerhaftes Angebot (Datenbereitstellungs- und Beratungsdienste) überführt werden. Erste Schritte in diese Richtung werden mit der Einrichtung des DAS-Basisdienstes "Klima und Wasser" begonnen.

Fehlende Daten sind stets limitierende Faktoren von Forschungsarbeiten. In der zurückliegenden Phase hat sich insbesondere das Fehlen von ereignis- und infrastrukturbezogenen Daten sowohl auf der Strecken- als auch der Objektebene als Defizit und offener Punkt für die nächste Phase herausgestellt. Zu nennen sind hierbei detaillierte Geländeinformationen und Aspekte der Sensitivität von Straßen- und Schienenkörpern (Hochwassergefährdung, Schutz durch Dammlage) oder auch detaillierte Informationen zur infrastrukturnahen Vegetation und Topografie (Sturmereignisse). Auch im Bereich der hydrologisch-meteorologischen Daten gibt es Potenzial, das noch ausgeschöpft werden muss (erweiterte Hochwassergefahrenkarten, Radar-Niederschlagsdaten, konvektionserlaubende Klimamodelle, Klimavorhersagen). Die Akquise und Auswertung dieser Daten bilden eine weitere Aufgabe in den folgenden Jahren.

Arbeitsprogramm ab 2020

Das Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks wird in seiner nächsten Bearbeitungsphase (2020–2025) einige der soeben formulierten noch offenen Forschungsfragen aufgreifen. Die Bearbeitung der Thematik einer Gestaltung eines klimaresilienten Verkehrssystems wird dabei in vier Kernthemen erfolgen. Diese umfassen die Analysebausteine der in Phase 1 entwickelten Klimawirkungsanalyse und -bewertung (Exposition, Sensitivität, Kritikalität und Integration).

Das Arbeitsprogramm der zweiten Bearbeitungsphase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) adressiert in Themenfeld 1 neue Fragen, die u. a. von Nutzerseite an das BMVI-Expertennetzwerk herangetragen wurden, sowie die Schließung bestehender Daten- und Wissenslücken. Dies bezieht ein:

- Betrachtungen auf der lokalen und **Objektebene**, welche die bisherigen netzweiten Betrachtungen der Verkehrsträger Wasserstraße, Straße und Schiene ergänzen,
- die Entwicklung einer **netzweiten Betrachtungsmöglichkeit** dort, wo die Betroffenheit bisher lediglich auf der regionalen Ebene analysiert werden konnte (Wasserstraße),
- den Aspekt der **Klimavorhersage**, d. h. den Lückenschluss zwischen der gängigen Vorhersage (Tage bis Monate) und den Projektionen (ab 30 Jahre),
- eine stärkere Berücksichtigung der **Intermodalität** des Verkehrs, d. h. eine Zusammenschau von Verkehrsströmen auf Schiene, Straße und Wasserstraße,
- einen stärkeren Fokus auf **wirtschaftliche Konsequenzen** von Verkehrsunterbrechungen (in Zusammenarbeit mit dem Themenfeld 6 "Verkehrswirtschaftliche Analysen"),
- eine weitere Bearbeitung der in der ersten Phase noch als entwicklungsfähig befundenen Aspekte zum beschleunigten **Meeresspiegelanstieg** sowie zur **Sommertrockenheit**,

- die Ausweitung der Methoden und Verfahren der **Extremwertanalyse**, z. B. in Bezug auf das gleichzeitige Auftreten hoher seeseitiger Wasserstände und landseitiger Abflüsse an den Küsten oder extreme konvektive Niederschlagsereignisse und deren Folgen.

Die für eine erfolgreiche Klimaanpassung des Verkehrssystems notwendigen Analyse- und Bewertungsschritte werden in vier – im Vergleich zur 1. Forschungsphase neu strukturierten – Schwerpunktthemen bearbeitet (Abbildung 5-1). Die Forschungsarbeiten reichen dabei wie bisher von der Generierung und Bewertung von Zukunftsszenarien und Daten als Grundlage für die Analyse spezifischer Klimafolgen für das deutsche Verkehrssystem über die Bewertung der Sensitivität und Kritikalität der Infrastrukturen bis hin zur Ableitung von Anpassungsmaßnahmen und Strategien sowie der Priorisierung von Handlungserfordernissen. Neu ist – neben den Inhalten (s. o.) – die Vernetzung aller beteiligten Partner in den Schwerpunktthemen, die sich nicht mehr (wie die Schwerpunkte in der ersten Phase) an den einzelnen Naturgefahren orientieren, sondern die Komponenten der Klimawirkungsanalyse in den Fokus nehmen. Durch diese Bündelung soll ein noch einheitlicheres verkehrsträger- und naturgefahrenübergreifendes Bild erzeugt werden.

Konkret werden folgende Schwerpunktthemen bearbeitet:

- "*SPT-101 Klimawandel & Extreme*" beinhaltet alle Analyseschritte von der Szenarienbildung bis zur Expositionsanalyse für Verkehrsinfrastrukturen (i. S. v. Klimafolgenbetrachtungen).
- "*SPT-102 Verkehrsinfrastruktur & Anpassung*" untersucht die Sensitivität der Verkehrsinfrastrukturen bezüglich Klimawandel und Extremereignissen sowie Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung von deren Sensitivität.
- "*SPT-103 Verkehr & Anpassung*" bewertet die Kritikalität von klimawandel- und extremwetterbedingten Ausfällen bzw. Funktionseinschränkungen.
- "*SPT-104 Integrierte Klimawirkungsbewertung & Nuterdialog*" integriert die Ergebnisse von KT-101 bis 103 in eine verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungs-

bewertung und stellt im Dialog mit den Betreibern der Verkehrsinfrastruktur Produkte, die zur Erhöhung der Klimaresilienz des Verkehrssystems dienen können, bereit.

Extremjahre im Projektverlauf Fallbeispiele zu ausgewählten klimatischen Einflüssen betrachtet und über alle vier Kernthemen hinweg bearbeitet. Solche Fallbeispiele helfen bei der Kommunikation von zu erwartenden Klimafolgen für das Verkehrssystem, demonstrieren die Notwendigkeit, zu handeln, und geben zugleich Empfehlungen bezüglich möglicher Anpassungsstrategien

Neben der Erweiterung der grundlegenden Basisinformationen werden anhand aktueller Extremereignisse bzw.

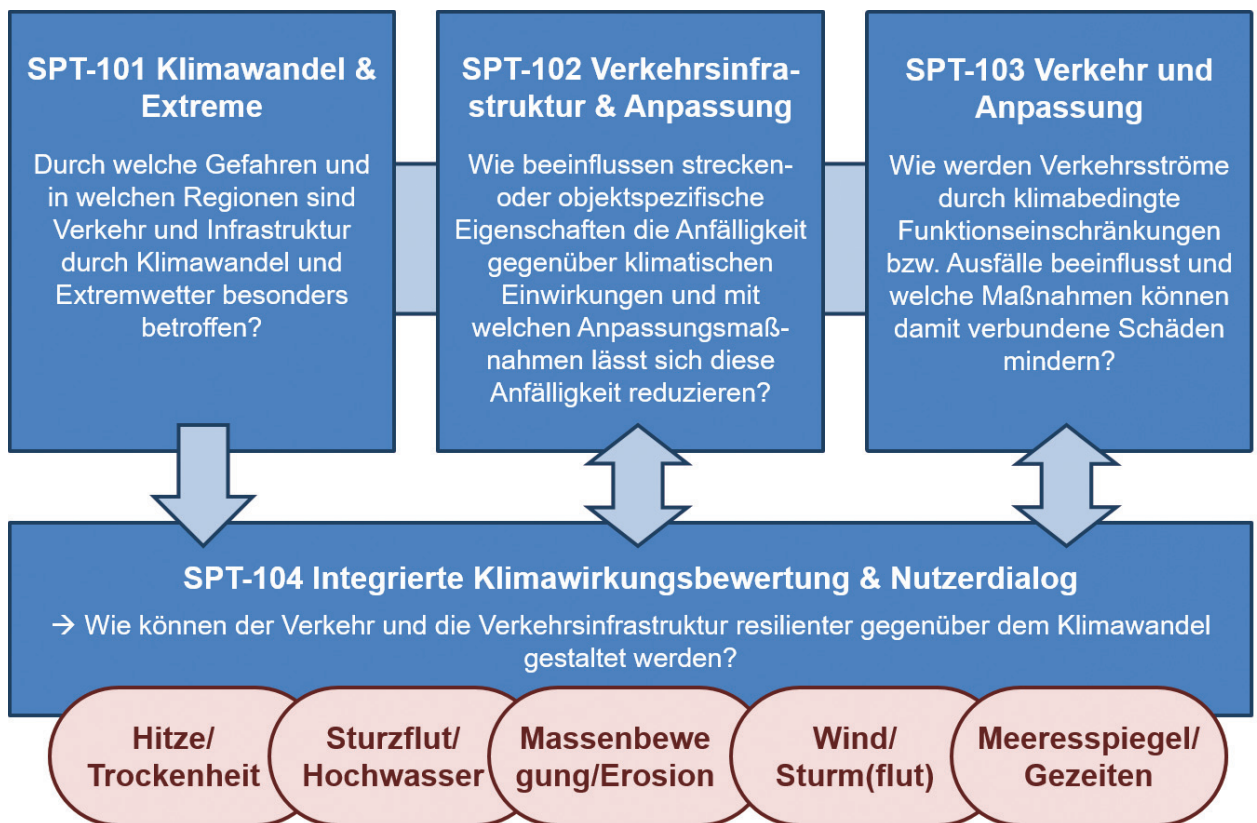


Abbildung 5-1: Organisationsstruktur, Kernthemen und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase (2020-2025).

6 Literatur

Albrecht A (2009) Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, 42.

Auerbach M, Herrmann C, Krieger B und Mayer S (2014) Klimawandel und Straßenverkehrsinfrastruktur. Straße und Autobahn, 65(7), 531–539, Kirschbaum Verlag, Bonn.

Becherer J, Hofstede J, Gräwe U, Purkiani K, Schulz E und Burchard H (2018) The Wadden Sea in transition - consequences of sea level rise. Ocean Dynamics 68(1), 131-151. DOI:10.1007/s10236-017-1117-5

Bissolli P und Dittmann E (2001) The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. Meteorologische Zeitschrift 10(4), 253-260. DOI:10.1127/0941-2948/2001/0010-0253

BMU (2016) Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), pp. 92.

BMU (2019) Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), pp. 173.

BMVI (2015a) Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen. Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße.

BMVI (2015b) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

BMVI (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, Germany. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-gesamtplan.pdf>

BMVI-Expertennetzwerk (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn. <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Forschungsstrategie.pdf>

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.

Brahmer G, Brinkmann M, Busch N, Creusot R, Diezig R, Friese R, Hammer M, Lammersen R, Mehlig B, Plonka B, Schmid-Breton A, Schulte-Wülwer-Leidig A, Vogt R, Wagner J-P und Willkomm M (2015) Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsänderung durch die hochwasserreduzierenden Maßnahmen entlang des Rheins., Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz., https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0229.pdf

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, Rauthe 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.

Bülow K, Dietrich C, Elizalde A, Gröger M, Heinrich H, Hüttl-Kabos S, Klein B, Mayer B, Meier HEM, Mikolajewicz U, Narayan N, Pohlmann T, Rosenhagen G, Schimanke S, Sein D und Su J (2014) Comparison of three regional coupled ocean atmosphere models for the North Sea under today's and future climate conditions. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-27/2014. BfG, Koblenz, 265 S. pp. DOI:10.5675/Kliwas_27/2014

Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung. Bundesregierung (ed), https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf

Buth M, Kahlenborn W, Savelsberg J, Becker N, Bubeck P, Kabisch S, Kind C, Tempel A, Tucci F, Greiving S, Fleischhauer M, Lindner C, Lückenkötter J, Schonlau M, Schmitt H, Hurth F, Othmer F, Augustin R, Becker D, Abel M, Bornemann T, Steiner H, Zebisch M, Schneiderbauer S und Kofler C (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, pp. 690.

Buth M, Kahlenborn W, Greiving S, Fleischhauer M, Zebisch M, Schneiderbauer S und Schausser I (2017) Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen - Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung. 2363-832X (Internet), Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>

DB Netz AG (2019) Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik. Landschaftspflege. Handbuch Landschaftsplanung und Vegetationskontrolle (DB Ril 882), DB Netz AG.

EBA (2018a) Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn. https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-08.html

EBA (2018b) Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn. https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-13.html

EBA (2019) Beurteilung der Bemessung von Gleisentwässerungsanlagen und Durchlässen von Fließgewässern, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn. https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2019-05.html

Ebner von Eschenbach A-D und Hohenrainer J (in Vorbereitung) Wassermengenbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen. Phase 1 von 2014 bis 2019.

FGSV (2006) Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst: Teil: Grünpflege. Ausgabe 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. -FGSV-, Arbeitskreis Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV 390/1, FGSV Verlag, Köln.

FGSV (2008) Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN), Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, FGSV 121, FGSV Verlag, Köln.

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

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

Haeseler S, Bissolli P, Lefebvre C, Daßler J und Zins V (2019) Serie von Sturmtiefs im März 2019 über Europa mit Orkanböen in Deutschland. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20190320_sturmtiefs_europa.pdf

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 (2020a) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre.

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 (2020b) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.

Hänsel S, Forbriger M, Nilson E, Patzwahl R und Klose M (2020c) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.

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.

IKSR (2014) Bericht über die Erstellung der Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten in der internationalen Flussgebietseinheit ‚Rhein‘ (Einzugsgebiet >2.500 km², Teil A) und den Informationsaustausch nach Artikel 6 Abs. 2 der EG-Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (HWRM-RL). Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz. https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Rheinkarten/HWRM-RL-2._Bericht.pdf

Imbery F, Plagemann S und Namyslo J (2013) Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. *Advances in Science and Research* 10(1), 91-98. DOI:10.5194/asr-10-91-2013

Ingenieurgruppe IVV (2019) Kritikalitätsanalyse, Beschreibung des indikatorenbasierten Bewertungsansatzes, Zwischenstand. Bericht zum Zwischenstand des Forschungsprojektes Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz, Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG, Aachen, 20.03.2019 (unveröffentlicht).

IPCC (2019) Summary for Policymakers. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

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, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014) 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

Kirchesch V, Schöl A, Becker A, Bergfeld-Wiedemann T und Fischer H (2018) QSim - das Gewässergütemodell der BfG. Infoblatt mit weiterführender Literatur. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/QSim

Köppke K-E (2012) Neue Technische Regeln für Anlagensicherheit - TRA 310. In: Thomé-Kozmiensky K-J, Versteil A, Thiel S, Rotard W und Appel M (eds), Immissionsschutz - Band 3 - Aktuelle Entwicklungen im anlagenbezogenen Planungsprozess und Immissionsschutz. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, pp. 123-137. https://www.vivis.de/wp-content/uploads/IS3/2012_IS_123_138_Koepcke.pdf

Köppke K-E, Sterger O, Stock M und Selbmann B (2013) Grundlagen für die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 310: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser. UBA-FB 001691, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. UBA (ed), <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4447.pdf>

Korn M, Leupold A, Mayer S, Kreienkamp F und Spekat A (2017) RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Reihe S: Straßenbau, Heft S 109. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

Kotzagiorgis S, Rothstein B und Scholten A (2019) Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Stresstestszenario Mittelrhein, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 69.0001/2017/, Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).

Krauß B, Grotehusmann D, Jasper-Tönnies A und Einfalt T (2014) Beurteilung der Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen nach RAS-Ew und RiStWag vor dem Hintergrund veränderter Temperatur- und Niederschlagsereignisse durch den Klimawandel in Deutschland bis zum Jahr 2100, Bundesanstalt für Straßenwesen. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/start/1/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/ras-ew/docId/2161>

Lamb HH (1972) British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns 1861-1971. Her Majesty's stationery office.

Lefebvre C, Bissolli P, Hafer M und Rocek M (2018) Sturmtief FABIENNE bringt am 23. September 2018 Sturm und Regen. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20180923_sturm_fabienne.pdf

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-Expertenetzwerks.

MELUR SH (2013) Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel. <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/generalplanKuestenschutz.html>

MELUR SH (2015) Strategie für das Wattenmeer 2100. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf

Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard K, Jones R, Kainuma M, Kelleher J, Lamarque JF, Manning M, Matthews B, Meehl J, Meyer L, Mitchell J, Nakicenovic N, O'Neill B, Pichs R, Riahi K, Rose S, Runci P, Stouffer R, van Vuuren D, Weyant J, Wilbanks T, van Ypersele JP und Zurek M (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies. IPCC Expert Meeting Report, 19–21 September, 2007, Noordwijkerhout, Niederlande. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Genf, Schweiz. DOI:10.1038/nature08823

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 und Helms M (2017) Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten "Hochwasser" für die Binnenschifffahrtsstraßen im Kontext der Klimafolgenanalyse. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.

Nilson E (2019) Pilotprojekt Klima und Wasser – Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS). Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.

Nilson E und Klein B (2019) Von der Forschung zum Dienst – Langfristige Vorhersage- und Projektionsprodukte der BfG, BfG-Veranstaltungen 2019, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, pp. 7.

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: Wasserstraßen-spezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.

Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger 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.

Oppermann R, Schumacher F und Kirchesch V (2015) HYDRAX: Ein hydrodynamisches 1-D Modell. Mathematisches Modell und Datenschnittstellen, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/Hydrax

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-Expertenetzwerks.

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-Expertenetzwerks.

Schipek M und Kallmeier E (2019) Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 89.0338/2017/, Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).

Scholten A (2010) Massenguttransport auf dem Rhein vor dem Hintergrund des Klimawandels. Eine Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. Geographische Gesellschaft Würzburg.

Scholten A und Rothstein B (2012) Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins. Untersuchungen zur gegenwärtigen und zukünftigen Vulnerabilität durch Niedrigwasser. Geographische Gesellschaft Würzburg.

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

Taylor KE, Stouffer RJ und Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society 93(4), 485. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

United Nations (2015) Paris Agreement. United Nations, Paris, pp. 27.

Van Goor MA, Zitman TJ, Wang ZB und Stive MJF (2003) Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. Marine Geology 202(3-4), 211-227. DOI:10.1016/S0025-3227(03)00262-7

Wellner F, Kayser S und Clauß M (2017) Projizierter Klimawandel und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik 1128. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau, Bonn.

Mitarbeiter/-innen des BMVI-Expertennetzwerks

Nachfolgend sind die Mitarbeiter/-innen des Themenfeldes 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" aufgelistet. Die Auflistung erfolgt dabei in alphabetischer Reihenfolge (Nachname) und enthält auch die Zugehörigkeit zur Behörde, die Funktion im Themenfeld, die fachliche Mitwirkung in den Schwerpunktthemen des TF1 sowie Angaben zur Autorenschaft von Abschnitten dieses Endberichtes.

Name, Vorname	Behörde	Funktion im TF1	Mitwirkung im SP	Beiträge in:
Astor, Birgit	BfG	Wiss. Mitarbeiterin	106	–
Bergmann, Linda	BAW	Wiss. Mitarbeiterin	106, 107, 109	Abschnitt 3.4.1, 4.4.3 und 4.4.4
Brendel, Christoph	DWD	Wiss. Mitarbeiter und Koordinator SP-103 (zeitweise)	101, 103, 105	Abschnitt 2.3, 2.9, 3.3.1 und 3.3.3
Dr. Brienen, Susanne	DWD	Fachbetreuung und Koordination SP-101 (zeitweise)	101, 104	–
Brunel, Marie	BAW	Wiss. Mitarbeiterin	106, 107	–
Dr. Deutschländer, Thomas	DWD	Fachbetreuung, TF1-Behördenvertreter und Koordination SP-103 (zeitweise)	101, 103, 105, 106	–
Dr. Ebner von Eschenbach, Anna-Dorothea	BfG	Fachbetreuung	108	Abschnitt 3.6.2
Dr. Fischer, Helmut	BfG	Fachbetreuung	106, 107	Abschnitt 2.5 und 3.4.2
Fleischer, Claudius	BfG	Wiss. Mitarbeiter	101, 102, 106, 107, 108	Abschnitt 3.3.1, 3.4.2 und 3.4.1
Forbriger, Markus	DZSF/ EBA	Wiss. Mitarbeiter, Koordination SP-104 und Leitung der GIS AG (zeitweise)	101, 102, 103, 104, 105, 107, 109	Abschnitt 3.3.2, 3.3.3, 3.5.2, 3.6.1 und 4.4.4
Dr. Früh, Barbara	DWD	Fachbetreuung	101, 104	–
Dr. Ganske, Anette	BSH	Wiss. Mitarbeiterin	101, 104, 108	Abschnitt 2.8 und 3.3.2
Dr. Gates, Lydia	DWD	Fachbetreuung	108	–
Dr. Gratzki, Annegret	DWD	TF1-Koordination und DWD-Behördenvertreterin (zeitweise)	–	–
Dr. Hänsel, Stephanie	DWD	TF1-Koordination und Koordination SP-101 (zeitweise)	alle	Kapitel 1 und 5.3; Review des gesamten Dokuments
Dr. Haller, Michael	DWD	Wiss. Mitarbeiter	101, 104	Abschnitt 2.8 und 3.3.2
Dr. Haunert, Gundula	BfG	Wiss. Mitarbeiterin	106	–
Hatz, Marcus	BfG	Fachbetreuer	107	Abschnitt 4.4
Dr. Heinrich, Hartmut	BSH	Fachbetreuung, TF1-Behördenvertreter und Koordination SP-108 (zeitweise)	108	–

Name, Vorname	Behörde	Funktion im TF1	Mitwirkung im SP	Beiträge in:
Dr. Helms, Martin	BfG	Wiss. Mitarbeiter	101, 102, 103, 106, 109	Abschnitt 3.3.1, 3.4.2 und 3.4.1
Herrmann, Carina	DZSF/ EBA	Fachbetreuung, TF1-Behördenvertreterin und Koordination SP-104, 107 (zeitweise)	101, 102, 103, 104, 105, 107	Abschnitt 3.3.2, 3.3.3, 3.5.2 und 4.4
Dr. Hillebrand, Gudrun	BfG	Fachbetreuung und TF1-Behördenvertreterin	102, 106	–
Höpp, Simona	DWD	Wiss. Mitarbeiterin	101, 106	–
Dr. Hüttl-Kabus, Sabine	BSH	Fachbetreuung und Koordination SP-108 (zeitweise)	108	–
Jensen, Corinna	BSH	Wiss. Mitarbeiterin	101, 108	Abschnitt 2.9
Dr. Jochumsen, Kerstin	BSH	Fachbetreuung und TF1-Behördenvertreterin (zeitweise)	108	Abschnitt 2.1 sowie Review Kapitel 2
Dr. Kelbin, Olga	DWD	Wiss. Mitarbeiterin	101	–
Kikillus, Alexander	BAW	Wiss. Mitarbeiter	103, 106, 107	Abschnitt 3.4.2
Kirsten, Jens	BAST	Wiss. Mitarbeiter, Koordination SP-105 und Leitung GIS AG (zeitweise)	102, 103, 105	Abschnitt 3.3.1
Dr. Klein, Holger	BSH	Fachbetreuung und Koordination SP-108 (zeitweise)	108	–
Dr. Klose, Martin	BAST	Wiss. Mitarbeiter, TF1-Behördenvertreter und Koordination SP-102, 105 (zeitweise)	102, 105, 109	Abschnitte 3.2 und 3.5.1
Dr. Krähenmann, Stefan	DWD	Wiss. Mitarbeiter	101	Abschnitt 2.2
Krieger, Beata	BAST	Fachbetreuung	–	–
Dr. Labadz, Martin	BfG	Wiss. Mitarbeiter	106	–
Lifschiz, Elise	BAW	Wiss. Mitarbeiterin und Koordination SP-107 (zeitweise)	106, 107	–
Lohrengel, Anne-Farina	BAST	Wiss. Mitarbeiterin und Koordination SP-104, 105 (zeitweise)	102, 103, 104, 105, 107	Abschnitt 3.3.3, 4.4.2 und 4.4.4
Löwe, Peter	BSH	Fachbetreuung	108	–
Mannfeld, Marcus	BfG	Wiss. Mitarbeiter und Leitung der GIS AG (zeitweise)	106	Abschnitt 2.5, 3.4.2 und 3.5.3
Meine, Lennart	BAST	Wiss. Mitarbeiter	102, 103	Abschnitt 3.3.1, 3.3.2, 3.5.1, 4.4.2 und 4.4.4

Name, Vorname	Behörde	Funktion im TF1	Mitwirkung im SP	Beiträge in:
Melero-Corell, Jorge	BASt	Wiss. Mitarbeiter	104	–
Möller, Jens	BSH	Wiss. Mitarbeiter	101, 108	Abschnitt 2.6 und 3.6.2
Dr. Nilson, Enno	BfG	Fachbetreuung, TF1-Behördenvertreter und Koordination SP-106	101, 102, 103, 106, 107, 108, 109	Abschnitt 2.4, 3.1, 3.3.1, 3.4, 3.6.1 und 4.4 sowie Kapitel 5.1 und 5.2; Review Kapitel 3
Norpoth, Maike	DZSF/ EBA	Wiss. Mitarbeiterin und Koordination SP-107 (zeitweise)	102, 103, 104, 107	Abschnitt 3.3.1, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4.2 und 4.5 sowie Review Kapitel 4
Ork, Jan Paul	BASt	Wiss. Mitarbeiter und Koordination SP-109	107, 109	Abschnitt 4.4.3
Dr. Patzwahl, Regina	BAW	Fachbetreuung, Behördenvertreterin und Koordination SP-107 (zeitweise)	101, 102, 106, 107, 109	Abschnitt 3.4.2, 3.6.1, 4.4.3 und 4.5 sowie Review Kapitel 4
Rasquin, Caroline	BAW	Wiss. Mitarbeiterin	103, 106, 108	Abschnitt 2.7 und 3.4.4
Dr. Rauthe, Monika	DWD	Fachbetreuung und Koordination SP-103 (zeitweise)	101, 103, 106	Abschnitt 3.3.1
Razafimaharo, Christène	DWD	Wiss. Mitarbeiterin	101, 106	Abschnitt 2.2 und 2.3
Dr. Rudolph, Elisabeth	BAW	Fachbetreuung	101, 103, 108	–
Dr. Schade, Nils	BSH	Wiss. Mitarbeiter und Koordination SP-108 (zeitweise)	101, 102, 103, 107, 108	Abschnitt 2.6, 2.9, 3.6.2 und 4.4.3
Dr. Schröder, Michael	BAW	Fachbetreuung	106, 107	–
Schulz, Dirk	BfG	Wiss. Mitarbeiter	106	–
Dr. Seiffert, Rita	BAW	Fachbetreuung und Koordination SP-107 (zeitweise)	103, 106, 107, 108	Abschnitt 3.4, 3.4.4, 4.1, 4.2, 4.3 und 4.5 sowie Review Kapitel 4
Stachel, Hauke	BAW	Wiss. Mitarbeiter	106, 107	–
Stanley, Kelly	DWD	Wiss. Mitarbeiter	101	Abschnitt 2.2 und 2.3
Dr. Tinz, Birger	DWD	Fachbetreuung	108	–
Dr. Voß, Norman	BASt	Wiss. Mitarbeiter und Koordination SP-109 (zeitweise)	109	–
Wachler, Benno	BAW	Wiss. Mitarbeiter	106, 107, 108	Abschnitt 2.7, 3.4.4 und 4.4.3
Dr. Walter, Andreas	DWD	Fachbetreuung und Koordination SP-101	101	–
Wehring, Sabrina	DWD	Fachbetreuung	101	–
Dr. Winkel, Norbert	BAW	Fachbetreuung und TF1-Behördenvertreter	103, 106, 107, 108	–

Danksagung

Die Analysen des BMVI-Expertennetzwerks bauen auf vielfältigen, von anderen Forschungsprojekten erstellten Datengrundlagen auf, deren Leistung wir hiermit würdigen möchten. Die globalen Klimamodelldaten (CMIP5; im Projekt verwendete Modelle siehe Anlage 1 und Anlage 2) sind auf dem WHOI CMIP5 Community Storage Server (Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA, USA) über die Webseite <http://cmip5.whoi.edu/> abrufbar⁴⁴. Die verwendeten regionalen Klimamodelldaten stammen aus der europäischen Initiative EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe)⁴⁵ bzw. der Vorgängerinitiative ENSEMBLES⁴⁶ und dem Projekt "Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland" (ReKliEs-De). Wir danken allen Modellierergruppen, die der internationalen Forschungsgemeinschaft globale und regionale Klimaprojektionsdaten bereitgestellt haben, und würdigen die für diese Bereitstellung durch die Earth System Grid Federation (ESGF)⁴⁷ zur Verfügung stehende technische Infrastruktur.

Weitere Daten wurden dankenswerterweise durch die Bundesländer (Hochwassergefahrenkarten) sowie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Pegeldaten, Wasserstraßennetz) bereitgestellt. Gewürdigt seien auch die vielen Kolleginnen und Kollegen aus anderen Projekten und Institutionen, die mit Rat und Daten die Arbeit des BMVI-Expertennetzwerks bereichert und vorangebracht haben.

⁴⁴"CMIP5 model output data was provided by the WHOI CMIP5 Community Storage Server, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA, USA from their website at <http://cmip5.whoi.edu/>."

⁴⁵We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate, and the Working Group on Coupled Modelling, former coordinating body of CORDEX and responsible panel for CMIP5. We also thank the climate modelling groups (listed in Annex 1 and 2 of this paper) for producing and making available their model output.

⁴⁶The ENSEMBLES data used in this work was funded by the EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) whose support is gratefully acknowledged.

⁴⁷We acknowledge the Earth System Grid Federation infrastructure an international effort led by the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, the European Network for Earth System Modelling and other partners in the Global Organization for Earth System Science Portals (GO-ESSP).

Anhang

Anlage 1: Übersicht über das im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerk für die Untersuchungen im Binnenbereich verwendete DWD-Referenzensemble v2018 mit den verwendeten Global- und Regional-Modell-Paaren pro RCP-Szenario und Illustration ihrer Herkunft (blau: EURO-CORDEX, grün: ReKliEs-De)

GCM/RCM	RCP 2.6					RCP 4.5					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			r12	r1 r12	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 r2	r1	r1		r1	r1 r2		r1		r1	r1 r2	r1
Zahl Ensemblemember	11					12					21				

Anlage 2: Übersicht über die im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks für Untersuchungen im Küstenbereich verwendeten gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Klimamodelle (ORCAM) und die atmosphärischen RCMs sowie ihren Globalmodellantrieb pro RCP-Szenario und ihre Herkunft (C: EURO-CORDEX, K: KLIWAS, R!: RACE!, S: SMHI)

RCM oder OARCM	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	

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Internet: www.bmvi.de
E-Mail: poststelle@bmvi.bund.de

Editoren

Stephanie Hänsel, Carina Herrmann, Kerstin Jochumsen, Martin Klose, Enno Nilson, Maike Norpoth, Regina Patzwahl, Rita Seiffert

Stand

September 2020, 3. Auflage

Gestaltung | Druck

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat Z 32, Druckvorstufe | Hausdruckerei

Bildnachweis

Titelseite:
Links oben: Julian Düll
Links unten: Gerald Volkmer
Rechts oben: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Rechts unten: Enno Nilson
Abbildungsverzeichnis

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung.
Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

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. DOI: 10.5675/ExpNBmvi2020.2020.12

