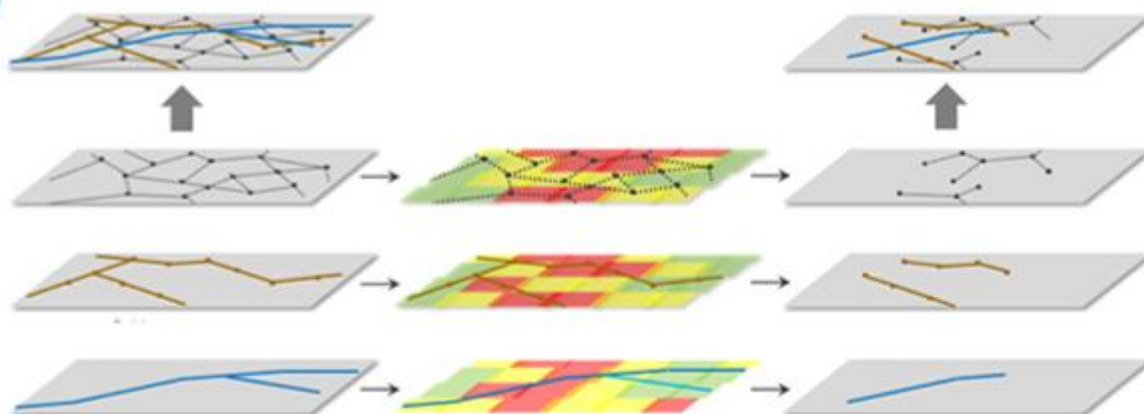


Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse

Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

S. Hänsel, G. Hillebrand, E. Nilson, M. Rauthe, A.-F. Lohrengel, L. Meine, C. Herrmann, C. Brendel, M. Forbriger, J. Kirsten, M. Klose, J.P. Ork, R. Patzwahl, N. Schade



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

Zitiervorschlag

Hänsel S, Hillebrand G, Nilson E, Rauthe M, Lohrengel A-F, Meine L, Herrmann C, Brendel C, Forbriger M, Kirsten J, Klose M, Ork JP, Patzwahl R, Schade N (2020) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.03

Impressum

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

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

Internet: www.bmvi-expertennetzwerk.de

Autoren:

Deutscher Wetterdienst:

Dr. Stephanie Hänsel, Dr. Monika Rauthe, Christoph Brendel

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:

Dr. Nils Schade

Bundesanstalt für Gewässerkunde:

Dr. Gudrun Hillebrand, Dr. Enno Nilson

Bundesanstalt für Straßenwesen:

Anne-Farina Lohrengel, Lennart Meine, Jens Kirsten, Dr. Martin Klose, Jan Paul Ork

Bundesanstalt für Wasserbau:

Dr. Regina Patzwahl

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung/ Eisenbahn-Bundesamt:

Carina Herrmann, Markus Forbriger

Redaktionsschluss: April 2020

Titelbild: Schema zur Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertennetzwerks (eigene Darstellung)

DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.03

Inhalt

Kurzfassung.....	1
1 Hintergrund und Zielstellung.....	2
1.1 Klimaänderungen in Deutschland.....	2
1.2 Klimawirkungs-, Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen.....	3
1.3 Einordnung des SP-102 Klimawirkungsanalyse in das Themenfeld 1.....	4
1.4 Zielstellung und Vorgehensweise des SP-102 Klimawirkungsanalyse.....	5
2 Methodische Überlegungen zur Analyse von Klimawirkungen.....	7
2.1 Festlegungen in Bezug auf die Auswertung von Projektionsdatensätzen.....	7
2.2 Methodischer Rahmen der <i>Klimawirkungsanalyse</i>	8
2.2.1 Einleitung und Zielsetzung.....	8
2.2.2 Grundlegende Definitionen und verkehrsträgerübergreifende Festlegungen.....	9
2.2.3 Expositionsanalyse.....	12
2.2.4 Sensitivitätsanalyse.....	13
2.2.5 Kritikalitätsanalyse.....	14
2.3 Wirkungsketten für die im Themenfeld 1 betrachteten klimatischen Einflüsse und Wirkungen.....	17
2.3.1 Grundlagen und Methodik.....	17
2.3.2 Notationsform für die Schemata zu Wirkungszusammenhängen und deren technischer Umsetzung.....	18
2.3.3 Wirkungsketten im Schwerpunktthema <i>Hochwassergefahren</i>	19
2.3.4 Wirkungsketten im Schwerpunktthema <i>Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit</i>	19
2.3.5 Wirkungsketten im Schwerpunktthema <i>Sturmgefahren</i>	19
2.3.6 Wirkungsketten im Schwerpunktthema <i>Hangrutschungen</i>	30
2.4 Praktische Umsetzung der Klimawirkungsanalyse.....	30
2.4.1 Technische Umsetzung der Wirkungsketten.....	30
2.4.2 Vereinbarungen zur Visualisierung der Analyseergebnisse mittels GIS.....	36
2.4.3 Übergabe von Daten, Analysen und Kartenprodukten aus SP-103 bis 106 an SP-102.....	38
2.5 Adressatengruppen der Wirkungsabschätzungen.....	39
3 Expositionsanalyse.....	40
3.1 Einleitung.....	41
3.2 Hochwasser.....	42
3.2.1 Grundlagen.....	42
3.2.2 Exposition von Straße und Schiene im Binnenbereich – Hochwassergefahrenkarten.....	42
3.2.3 Exposition von Straße und Schiene im Küstenbereich – Sturmflut.....	48
3.2.4 Exposition der Bundeswasserstraßen – Höchster Schifffahrtswasserstand.....	49
3.3 Sturm.....	50
3.3.1 Grundlagen.....	50
3.3.2 Exposition von Straße und Schiene.....	52
3.4 Gravitative Massenbewegungen.....	55

3.4.1	Grundlagen.....	55
3.4.2	Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen.....	55
3.4.3	Einbeziehung eines Klimamodifikators.....	57
3.5	Niedrigwasser.....	60
3.5.1	Grundlagen.....	60
3.5.2	Expositionskarten unter Nutzung von GIW und GIQ (bzw. RNW und RNQ).....	61
3.5.3	Wasserbauliche Analyse für den Niederrhein.....	64
3.6	Wassergüte.....	65
3.6.1	Grundlagen.....	65
3.6.2	Änderung der Gewässertemperatur.....	66
3.7	Klimawirkungen auf Seeschifffahrtsstraßen.....	67
3.8	Klimawirkungen auf den Nord-Ostsee-Kanal.....	69
4	Sensitivitätsanalyse.....	73
4.1	Einleitung.....	73
4.2	Exemplarische Sensitivitätsbetrachtungen.....	73
4.2.1	Sensitivität von Schiene und Straße gegenüber <i>Sturmgefahren</i>	73
4.2.2	Sensitivität von Schiene und Straße gegenüber <i>Hochwasser</i>	74
4.2.3	Wasserstraßenspezifische Sensitivitätsbewertung.....	74
5	Kritikalitätsanalyse.....	76
5.1	Einleitung und methodische Grundlagen.....	76
5.2	Verkehrsträger Straße.....	77
5.2.1	Einleitung und Grundlagen.....	77
5.2.2	Indikatorenbasierter Bewertungsansatz.....	78
5.2.3	Erste Ergebnisse.....	79
5.2.4	Ausblick.....	84
5.3	Verkehrsträger Schiene.....	84
5.4	Verkehrsträger Wasserstraße.....	89
6	Integrierte Klimawirkungsanalyse – Erste Ansätze.....	92
6.1	Einleitung.....	92
6.2	Exemplarische Umsetzung der Integration.....	92
6.3	Weiteres Vorgehen.....	94
7	Fazit und Ausblick.....	95
7.1	Erkenntnisse.....	95
7.2	Arbeitsprogramm ab 2020.....	99
8	Literatur.....	101
9	Abkürzungsverzeichnis.....	105

Kurzfassung

Der Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* (SP-102) des BMVI-Expertennetzwerks führt die Ergebnisse anderer Schwerpunktthemen des Themenfeldes 1, die jeweils konkrete Klimawirkungen analysieren, zusammen. Der dazu entwickelte und angewandte methodische Ansatz der Klimawirkungsanalyse bietet einen geeigneten Rahmen, um Naturgefahren und auf sie wirkende klimatische Einflüsse verkehrsträgerübergreifend nach einem einheitlichen Vorgehen zu analysieren und zu bewerten. Der methodische Ansatz – mit seinen drei Teilkomponenten Expositions-, Sensitivitäts- und Kritikalitätsanalyse – baut dabei auf im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) entwickelten und verwendeten Methoden auf. Für die im Themenfeld 1 betrachteten klimatischen Einflüsse und deren potenzielle Wirkung auf das Verkehrssystem wurden die aus dem DAS-Kontext vorhandenen Wirkungsketten fachlich weiterentwickelt und mit einem Schema zur technischen Umsetzung anhand der im BMVI-Expertennetzwerk genutzten Daten, Methoden und Modellwerkzeuge ergänzt.

Auf dieser methodischen Grundlage wurde in der aktuellen Phase die heutige und zukünftig potenziell veränderte Exposition von Schiene, Straße und Wasserstraße gegenüber den mit Sturm, Hoch- und Niedrigwasser, gravitative Massenbewegungen, Meeresspiegelanstieg und Wasserqualitätsaspekten verbundenen Klimawirkungen auf das Bundesverkehrssystem untersucht. Die Bewertung der Anfälligkeit des Verkehrssystems gegenüber Klimawirkungen, beschrieben über die Sensitivität, benötigt Informationen zu sensitivitätsbestimmenden Eigenschaften von Strecken oder Objekten. Flächendeckende Analysen der Sensitivität scheitern deshalb häufig an der Datenlage. Besonders für die Betrachtung objektspezifischer Sensitivitäten liegen bisher kaum geeignete Informationen für netzweite Analysen vor. Die Klimawirkungsanalyse wurde im BMVI-Expertennetzwerk um den Aspekt der Bedeutung von Streckenabschnitten erweitert (Kritikalitätsanalyse). Die Bewertung der Kritikalität von Streckenabschnitten erfolgt anhand verschiedener Indikatoren, die vor allem auf Datengrundlagen aus der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) basieren. Für die Beschreibung der verkehrlichen Bedeutung werden beispielsweise Güteraufkommen oder Fahrzeugzahlen verwendet. Für die Wasserstraße werden neben der verkehrlichen Bedeutung beispielsweise auch ökologische Funktionen bei der Bewertung der Kritikalität berücksichtigt.

Das Konzept der Klimawirkungsanalyse schafft einen praktikablen und transparenten Rahmen zur netzweiten und verkehrsträgerübergreifenden Bewertung und Priorisierung des Anpassungsbedarfs des Bundesverkehrssystems an veränderte zukünftige Klimabedingungen. Es leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Schaffung einer klimaresilienten und auch in Zukunft verlässlichen Verkehrsinfrastruktur. Die erzielten Erkenntnisse, erarbeiteten Methoden und zusammengestellten Datensätze sowie Kartenprodukte sind neben dem Geschäftsbereich des BMVI sowohl für die Geschäftsfelder anderer Ressorts als auch für die Bundesländer relevant. Mit seiner Arbeit liefert das Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks somit wichtige Grundlagen für die Umsetzung der DAS.

Die geschaffenen Datenprodukte erlauben vielfältige Analysen und Bewertungen, sind jedoch nicht immer bundesweit und auch nicht vollumfänglich für alle potenziell für das Verkehrssystem relevanten Klimawirkungen 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 auf Objekt- und Streckenebene.

Das BMVI-Expertennetzwerk kann als Forschungsnetzwerk zwar prototypische Datensätze zur Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Gefährdung des Verkehrssystems liefern, kann jedoch keinen Klimadienst ersetzen, der die für Planungsprozesse notwendigen Datenprodukte dauerhaft in aktueller und allgemein zugänglicher Form verfügbar macht. Ein solcher Klimadienst wird derzeit im Ressort des BMVI mit dem DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ etabliert.

1 Hintergrund und Zielstellung

- Die Analyse und Einschätzung der Betroffenheit des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur durch den Klimawandel und ggf. häufiger auftretende Witterungsextreme wird durch das BMVI-Expertennetzwerk basierend auf abgestimmten Datensätzen und Methoden vorgenommen.
- Projizierte Klimaänderungen für Deutschland sind mit einer erhöhten Gefährdung von Teilbereichen des Verkehrssystems verbunden.
- Die aktuellen Analysen zur Klimawirkung bestätigen im Grundsatz Ergebnisse früherer Einzelstudien, sind aber nun aufgrund der abgestimmten Randbedingungen und Auswertungen über die Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasserstraße und verschiedene klimatische Einflüsse bzw. Naturgefahren hinweg konsistent und vergleichbar.
- Die Klimawirkungsanalyse im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks fügt sich methodisch in verschiedene nationale und internationale Aktivitäten zur Klimafolgenabschätzung ein.

1.1 Klimaänderungen in Deutschland

Die Anzeichen und Auswirkungen des Klimawandels treten regional, zeitlich und je nach betrachtetem Kennwert in unterschiedlicher Stärke und Ausprägung in Erscheinung und erfordern eine entsprechend differenzierte Analyse. Bisher erfolgten bereits verschiedene solcher Analysen für einzelne Verkehrsträger unter Nutzung unterschiedlicher Datengrundlagen. So liegen für die Verkehrsträger Wasserstraße mit KLIWAS (BMVI 2015a) und für die Straße mit AdSVIS (Auerbach et al. 2014) bereits klimawandelbezogene Informationen vor, die von den operativen Einheiten (insb. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; WSV) für die Bewertung von Klimawirkungen und die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt wurden. Im Rahmen der Arbeiten des Themenfeldes 1 erfolgte im BMVI-Expertennetzwerk eine Analyse der zu erwartenden Änderungen des Klimas und von Extremereignissen in Deutschland mit Fokus auf Klimaparameter und abgeleiteten Kenngrößen, welche für die Bewertung der Resilienz des Verkehrssystems relevant sind (s. Schlussbericht des Schwerpunktes *Szenarienbildung*, Brien et al. (2020)). Die dabei verwendeten bzw. generierten Datensätze bilden die Grundlage für eine verkehrsträgerübergreifend möglichst einheitliche und vergleichbare Bewertung von Klimawirkungen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Im Wesentlichen bestätigen die aktuellen Ergebnisse des BMVI-Expertennetzwerks die in Vorgängerprojekten gewonnenen Erkenntnisse zur möglichen zukünftigen Klimaentwicklung. Im Detail wird ein Vergleich mit früheren Studien jedoch durch unterschiedliche und entsprechend dem wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt weiterentwickelte Szenarienannahmen, Klima(folgen)modelle und Betrachtungszeitscheiben erschwert.

Basierend auf den im Schwerpunkt *Szenarienbildung* aufbereiteten Klimaprojektionen ist in Deutschland zukünftig mit einer weiter ansteigenden mittleren Lufttemperatur zu rechnen. Für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5) wird ein Anstieg von +3,1–4,7 °C für die *ferne Zukunft* (2071–2100) projiziert. Die konsequente Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im internationalen Maßstab kann den Anstieg auf +0,9–1,6 °C begrenzen. Besonders deutliche Zunahmen sind im Auftreten extrem hoher Temperaturen und Hitzewellen zu erwarten, während Frostereignisse voraussichtlich seltener auftreten. In Bezug auf die Niederschlagsentwicklung ist zukünftig im Mittel mit einem leichten Anstieg zu rechnen, insbesondere im Winter und Frühjahr. Dagegen sind im Sommer zukünftig auch Niederschlagsabnahmen möglich. Zudem ist im Sommer mit mehr Trockentagen zu rechnen. Hohe Tagesniederschlagssummen von beispielsweise 20 mm treten zukünftig voraussichtlich häufiger auf und auch die Intensität von Starkniederschlägen (basierend auf Ta-

gesdaten) nimmt zu. Bei den Starkniederschlägen nehmen besonders seltene Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zu als weniger extreme Ereignisse. Windgeschwindigkeiten unterliegen auch zukünftig einer hohen zeitlichen Variabilität bei nur geringen langfristigen Änderungssignalen.

Mit der ansteigenden mittleren Lufttemperatur nimmt auch die Wassertemperatur der großen Fließgewässer zu. Vielerorts ändert sich der Abfluss der großen Flüsse im Jahresmittel kaum, da eine winterliche Abflusszunahme durch eine sommerliche Abnahme kompensiert wird. Bestehende Tendenzen zu starken Winterregen verstärken sich in einigen Flussregionen. Dadurch erwarten einige Flussabschnitte, die schon heute durch winterliche Hochwasserereignisse geprägt sind, zukünftig eine zunehmende Gefährdung durch Flusshochwasser. Niedrigwasserereignisse werden dort intensiver, wo schon heute Sommer und Herbst die typische Niedrigwassersaison sind.

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 Festlandseismassen der Antarktis und von Grönland weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Watten im Küstenbereich sind grundsätzlich in der Lage, mit dem projizierten Meeresspiegelanstieg mitzuwachsen. Jedoch ist diese Kapazität begrenzt und es wird ein Verlust an Wattfläche erwartet. Die zu erwartenden Veränderungen der Tidekennwerte sind räumlich und zeitlich heterogen. Das erwartete häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee geht potenziell mit einem häufigeren Auftreten angespannter Entwässerungssituationen an der Nordseeküste einher.

Die beschriebenen Klimaänderungssignale sind potenziell mit einer erhöhten Gefährdung von Teilbereichen des Verkehrssystems verbunden. Für ausgewählte klimatische Einflüsse und Klimawirkungen, wie Hoch- und Niedrigwasser, Meeresspiegelanstieg, gravitative Massenbewegungen, Stürme und Sturmfluten, erfolgte die spezifische Analyse der derzeitigen und zukünftigen Wirkung geänderter Klimabedingungen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße im Rahmen der in diesem Bericht dargestellten Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertenetzwerks.

1.2 Klimawirkungs-, Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen

Die Bewertung der Wirkung geänderter Klimabedingungen auf die betrachteten Systeme – im Falle des BMVI-Expertenetzwerks auf das Verkehrssystem – und der damit einhergehenden geänderten Gefährdung ist eine wichtige Grundlage für strategische und praktische Entscheidungen zur Klimaanpassung. So ist die Bewertung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels eine wichtige Komponente für die DAS (Bundesregierung 2008). Diese Bewertung erfolgte im Jahr 2015 basierend auf Datengrundlagen des 4. Sachstandsberichtes des Weltklimarates IPCC¹ für 14 Handlungsfelder im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse 2015 (Buth et al. 2015). Derzeit wird im Rahmen der Arbeit des Behördennetzwerkes „Klimawandel und Anpassung“ die Bewertung möglicher Klimawandelauswirkungen in den DAS-Handlungsfeldern aktualisiert. Die Veröffentlichung der entsprechenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse – kurz KWVA 2021 – ist für das Jahr 2021 geplant. Für das Handlungsfeld „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“ fließen die Datenprodukte und Ergebnisse des Themenfeldes 1 in die KWVA 2021 ein.

Hinsichtlich der verwendeten Begrifflichkeiten und Konzepte, mit denen die Auswirkungen des Klimawandels auf die jeweils betrachteten Systeme beschrieben und bewertet werden, existiert ein breites Spektrum an Möglichkeiten. Zu nennen sind hier beispielsweise a) Vulnerabilitätsanalysen, wie diejenige des Bundes im Jahr 2015 (Buth et al. 2015), b) Klimawirkungsanalysen, wie die seitens des Bundes für 2021 vorgesehene

¹ IPCC steht für *Intergovernmental Panel on Climate Change*, zu Deutsch: Zwischenstaatliches Expertengremium zum Klimawandel oder kurz Weltklimarat.

Studie sowie die Analyse im BMVI-Expertennetzwerk und c) Risikoanalysen, wie sie beispielsweise in Kanada (PIEVC 2008) und in der Entwicklungszusammenarbeit z. B. durch die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ² und ihre Partnerorganisationen unter Anwendung des sogenannten PIEVC-Ingenieurprotokolls³ durchgeführt werden. Zudem gab es in der wissenschaftlichen Literatur und den darauf aufbauenden Praxiskonzepten mit der Zeit Verschiebungen bezüglich des Begriffsverständnisses, wie beispielsweise bei den Begriffen Vulnerabilität und Sensitivität. Trotz dieser Unterschiede verfolgen Klimawirkungs-, Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen das gleiche Ziel – nämlich Entscheidungsgrundlagen für die Ableitung des Anpassungsbedarfs sowie konkreter Anpassungsoptionen zu liefern. Zudem enthalten sie i. d. R. ähnliche Analyse- und Bewertungsschritte – auch wenn diese z. T. unterschiedlich benannt sind.

Methodisch und begrifflich bauen die im BMVI-Expertennetzwerk vorgenommenen Klimawirkungsanalysen auf den Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel (IMA-A) der Bundesregierung auf, wie sie im Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen dargestellt sind (Buth et al. 2017). Zudem wurden auch aktuelle Weiterentwicklungen bei der Erstellung der KWVA 2021 im Rahmen der Zusammenarbeit der Bundesoberbehörden im Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung berücksichtigt. Einbezogen wurden außerdem verkehrsträgerspezifische Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt FE 09.0147/2011/ARB „RIVA Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (Korn et al. 2017).

1.3 Einordnung des SP-102 Klimawirkungsanalyse in das Themenfeld 1

Im Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ des BMVI-Expertennetzwerks steht die Resilienz des Verkehrssystems gegenüber den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels und häufigeren bzw. intensiveren Extremereignissen im Fokus. Die mit ausgewählten Klimaänderungen und Extremereignissen verbundenen Klimawirkungen werden systematisch erfasst, bewertet und für Entscheider sowie Praktiker aufbereitet. Dabei erfolgt die spezifische Analyse der mit Hochwasser, Stürmen, gravitativen Massenbewegungen, Niedrigwasser und Wasserqualitätsaspekten verbundenen Einwirkungen auf das Verkehrssystem in den Schwerpunkten SP-103 *Hochwassergefahren*, SP-104 *Sturmgefahren*, SP-105 *Hangrutschungen*, SP-106 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* sowie für den Küstenbereich auch im SP-108 *Fokusgebiete Küsten* (s. Abbildung 1-1). Die in diesen Schwerpunktthemen gewonnenen Erkenntnisse werden dann im SP-102 *Klimawirkungsanalyse* zusammengeführt. Die im SP-102 zusammengestellten Analysen bilden eine wichtige Grundlage für die Ableitung des konkreten Anpassungsbedarfs sowie die Entwicklung modaler und intermodaler Anpassungsstrategien und spezifischer Maßnahmen mit Bezug auf das Verkehrssystem innerhalb des SP-107 *Anpassungsoptionen*.

² Im Rahmen des Projektes „Verbesserte Climate Services für Infrastrukturinvestitionen (CSI)“ werden im Zeitraum 2017–2020 mit den Ländern bzw. Regionen Brasilien, Costa Rica, die Nilbeckeninitiative und Vietnam Services für eine klimaresiliente Infrastruktur entwickelt (s. <https://www.giz.de/de/weltweit/57471.html>).

³ Das PIEVC-Protokoll ist eine durch das *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee* (PIEVC) von *Engineers Canada* entwickelte Methodik zur Bewertung von Klimarisiken und Vulnerabilitäten über einen Bereich von Infrastrukturelementen hinweg (s. <https://pievc.ca/>).

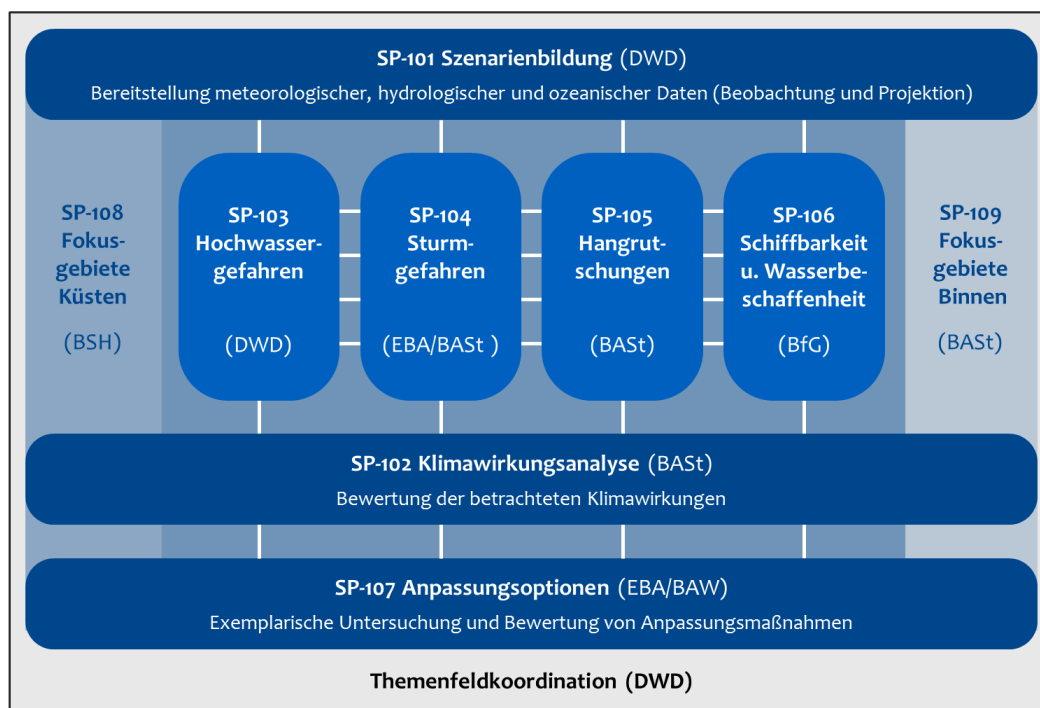


Abbildung 1-1: Projektstruktur von Themenfeld 1 *Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen* (Förderphase 2016–2019) mit seinen neun Forschungsschwerpunkten (SP: Schwerpunktthema). In Klammern ist jeweils die den SP koordinierende Behörde angegeben.

1.4 Zielstellung und Vorgehensweise des SP-102 Klimawirkungsanalyse

Die Analyse und Bewertung von derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Klimawirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr nimmt eine Schlüsselrolle bei der sicheren und nachhaltigen Entwicklung der Verkehrssysteme in Deutschland ein. Dies wird im BMVI-Expertenetzwerk mit der entwickelten Klimawirkungsanalyse umgesetzt. Die in Vorgängerprojekten wie KLIWAS und AdSVIS entwickelten Konzepte und Methoden zur Bewertung von Klimawirkungen werden im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks weiterentwickelt und in konsistenter Weise auf alle Verkehrsträger 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-Expertenetzwerk sind dementsprechend

- (a) verkehrsträgerübergreifend kohärente Szenarien zu den zukünftigen meteorologischen, ozeanographischen und hydrologischen Rahmenbedingungen (s. Abschnitt 2.1) und
- (b) eine einheitliche Vorgehensweise, diese in ihrer spezifischen Wirkung auf unterschiedliche Verkehrsträger zu bewerten (s. Abschnitt 2.2).

Zudem wird das Konzept der Wirkungsketten aufgegriffen und die im Behördennetzwerk erstellten Wirkungsketten für die im Themenfeld 1 betrachteten Wirkungen weiterentwickelt sowie mit konkreten (Wirk-)Modellen und Indikatoren hinterlegt (s. Abschnitt 2.3). Die Auswirkungen des Klimawandels werden dabei jeweils in Größen gefasst, die für Planungsvorgänge relevant sind.

Die Analyse und Bewertung von Klimawirkungen basiert auf Datengrundlagen zur vergangenen und zukünftigen klimatologischen, hydrologischen und ozeanischen Entwicklung (Kernaussagen s. Abschnitt 1.1), welche im Schwerpunkt *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) erstellt wurden. Den methodischen Rahmen

für die Aus- und Bewertung klimawandelbezogener Einflüsse setzt der im Themenfeld 1 abgestimmte *Auswerterahmen* (Hänsel et al. 2020a). In der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks erfolgte bezüglich der betrachteten Klimawirkungen eine Konzentration auf die Gefährdung des Verkehrssystems durch *Hochwasser* (Rauhe et al. 2020), *Stürme* (Bott et al. 2020) und *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) sowie auf wasserstraßenspezifische Aspekte der *Schiffbarkeit* (z. B. Niedrigwasser) und *Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020). Die gefahren- und verkehrsträgerspezifischen Ergebnisse dieser *Klimawirkungsanalysen* wurden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengestellt und in vergleichbarer Weise visualisiert (siehe Kapitel 2 bis 4). Zusätzlich zu den in den Gefahrenschwerpunkten erfolgten Analysen zur Exposition und Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur erfolgte im SP-102 die Bewertung der verkehrlichen (und ökologischen) Bedeutung von Streckenabschnitten in den Netzen der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße (Kritikalität; siehe Kapitel 5). Ergänzt wurde die auf der 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* – hier insbesondere Stressteststudien für das Mittelrheingebiet (Hänsel et al. 2020b).

Nicht alle Änderungen, die aus dem Klimawandel erwachsen, wirken gleichermaßen auf alle Verkehrsträger und an allen Orten. Beispielsweise betreffen Niedrigwassersituationen in erster Linie die Binnenschifffahrtsstraßen, während andere Verkehrsträger im Niedrigwasserfall ggf. sekundär durch mögliche Verkehrsverlagerungen betroffen sind. Umgekehrt sind Gefahren wie gravitative Massenbewegungen oder auch Starkregenereignisse vor allem für die Straße und die Schiene relevant. Die Einschränkungen der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur sind vor allem an Streckenabschnitten relevant, deren Verkehrsbelastung und Bedeutung besonders hoch ist. Entsprechende Bewertungen erfolgen im Rahmen der Kritikalitätsanalyse (Kapitel 5). Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des Schwerpunktthemas *Klimawirkungsanalyse* (SP-102) aus der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks (2016–2019) dar. Die im Bericht dargelegten Forschungsergebnisse wurden unter Koordination von BASt und DWD gemeinschaftlich durch die Bundesoberbehörden BSH, BfG, BASt, BAW, DWD und DZSF/EBA erarbeitet.

2 Methodische Überlegungen zur Analyse von Klimawirkungen

- Der im BMVI-Expertennetzwerk entwickelte und angewandte methodische Ansatz der Klimawirkungsanalyse basiert auf Vorgängerprojekten und verkehrsträgerspezifischen Vorgehensweisen. Dieser Ansatz bietet einen geeigneten Rahmen, um Naturgefahren und auf sie wirkende klimatische Einflüsse nach einem einheitlichen Vorgehen zu analysieren und zu bewerten.
- Darüber hinaus greift der methodische Ansatz die im Kontext der DAS entwickelten und verwendeten Methoden auf und erweitert die Analysen um die Betrachtung der Bedeutung von Streckenabschnitten (Kritikalitätsanalyse).
- Für die im Themenfeld 1 betrachteten klimatischen Einflüsse und deren Wirkungen auf das Verkehrssystem wurden die aus dem DAS-Kontext vorhandenen Wirkungsketten weiterentwickelt und mit einem Schema zur technischen Umsetzung anhand der im BMVI-Expertennetzwerk genutzten Daten, Methoden und Modellwerkzeuge ergänzt.
- Auf dieser methodischen Grundlage wurde die heutige und zukünftig potenziell veränderte Exposition von Schiene, Straße und Wasserstraße gegenüber den mit Sturm, Hoch- und Niedrigwasser, gravitativen Massenbewegungen und Wasserqualitätsaspekten verbundenen Klimawirkungen auf das Bundesverkehrssystem untersucht.

2.1 Festlegungen in Bezug auf die Auswertung von Projektionsdatensätzen

Hinsichtlich der Bewertung vergangener und zukünftiger Klimaänderungen werden im BMVI-Expertennetzwerk verschiedene meteorologische Größen (Temperatur, Niederschlag), hydrologische Größen (Abfluss, Wassertemperaturen) sowie ozeanographische Größen (Meeresspiegel, Tidekennwerte) betrachtet. Lange Messreihen erlauben es bereits heute, stattfindende Veränderungen zu identifizieren und zu bewerten. Aussagen über den zukünftigen Klimawandel in Deutschland werden aus Klimamodelldaten unter Annahme verschiedener Klimaszenarien (Projektionsdaten) abgeleitet.

Die im BMVI-Expertennetzwerk verwendete Szenariengeneration der *Repräsentativen Konzentrationspfade* (RCP) stellt mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaantrieb⁴ im Jahr 2100 dar. Im Fokus stehen dabei zwei Pfade, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. Nachfolgend werden diese Pfade als *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaantrieb von 2,6 W/m² im Jahr 2100) und *Weiter-nie-bisher-Szenario* (RCP8.5.; Klimaantrieb von 8,5 W/m² im Jahr 2100) bezeichnet. Für einige Auswertungen wird auch noch ein *Moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaantrieb von 4,5 W/m² im Jahr 2100) hinzugezogen. Bei Vergleichen zwischen den unterschiedlichen Szenarien sind aufgrund des geringeren Klimaantriebs die Änderungssignale im *Klimaschutzszenario* zumeist deutlich weniger ausgeprägt als im *Weiter-nie-bisher-Szenario*. Unsicherheitsbetrachtungen und systematische Vergleiche zwischen den Szenarien werden durch die teilweise unterschiedlichen Realisierungen (Größe und Zusammensetzung des Ensembles) erschwert.

Mit Blick auf relevante Klimakenngrößen für die Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden beobachtete Änderungen der jeweils zu erwartenden Entwicklung gegenübergestellt. Die Bewertung der jüngsten Klimaentwicklung basiert dabei auf im BMVI-Expertennetzwerk neu- bzw. weiterentwickelten Referenzdatensätzen (s. Auswerterahmen, Hänsel et al. (2020a)). Die zukünftige Klimaentwicklung in

⁴ Der Klimaantrieb – oder wissenschaftlich Strahlungsantrieb – beschreibt den Einfluss externer Faktoren (z. B. Konzentration von Treibhausgasen und Aerosol, veränderte Erdoberflächenalbedo, Sonneneinstrahlung) auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde.

Deutschland wird mittels im BMVI-Expertenetzwerk qualitätsoptimierter regionaler Klimaprojektionen⁵ bewertet, die durch die internationale und nationale Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt werden (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014). Für diese Klimadatensätze wurden vielfältige Indizes berechnet, die für die Bewertung geänderter Klimawirkungen auf das Verkehrssystem herangezogen werden. Zudem gehen die Klimadatensätze direkt in Klimawirkungsmodelle wie hydrologische Modelle und Wassergütemodelle (BfG) sowie hydrodynamische und morphodynamische Modelle (BfG, BAW) ein. Aus den damit generierten gewässerbezogenen und ozeanographischen Daten können dann ebenfalls für die Klimawirkungsbewertung relevante Kennwerte abgeleitet werden. Diese im Folgenden für die Klimawirkungsanalyse herangezogenen Kennwerte werden bezüglich ihrer zukünftig zu erwartenden Änderungssignale für die Zeitscheiben *nabe Zukunft* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) bewertet. Dabei werden die Kennwerte der jeweiligen Zukunftszeitscheibe derjenigen des *Bezugszeitraums* (1971–2000) gegenübergestellt.

Alle Daten und damit auch die nachfolgend vorgestellten Analyseergebnisse zu spezifischen Klimawirkungen unterliegen gewissen Unsicherheiten. Diese ergeben sich aus den oben genannten Annahmen zur Entwicklung des Klimaantriebs in den RCP-Szenarien, der natürlichen (internen) Variabilität des Klimasystems, den notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung und der räumlich und zeitlich begrenzten Erfassung und Verarbeitung von Beobachtungsdaten. Um den Unsicherheiten – insbesondere der Zukunftssimulationen – Ausdruck zu verleihen, werden – soweit möglich – Ergebnisbandbreiten für die Indizes angegeben. Die dargestellte Bandbreite entspricht in der Regel dem Bereich zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil des Simulationsensembles und beinhaltet somit 70 % aller vorliegenden Modellergebnisse. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten ist es nicht möglich, einen einzigen verlässlichen „Zukunftswert“ im Sinne eines klimawandelmodifizierten Bemessungswertes zu liefern. Stattdessen wird den Entscheidern in der Praxis eine Wertespanne zugänglich gemacht, die den aktuellen Kenntnisstand der Klima(folgen)modellierung abbildet.

Details und weitere Hintergründe zu den verwendeten Klimadatensätzen sowie den basierend auf diesen Daten beobachteten und zukünftig zu erwartenden Änderungen in Klima, Hydrologie und Ozeanographie sind den Abschlussberichten der Schwerpunktthemen *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020), *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) und *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) bzw. den darin zitierten Fachberichten zu entnehmen.

2.2 Methodischer Rahmen der *Klimawirkungsanalyse*

2.2.1 Einleitung und Zielsetzung

Netzbezogene Analysen sowie strecken- und objektspezifische Fallstudien zu den Wirkungspotenzialen von klimatischen Einflüssen und Naturgefahren sind für die 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 zu den Auswirkungen des Klimawandels besitzen für verschiedene Fragestellungen klimaangepasster Verkehrs- und Infrastrukturplanung eine hohe praktische Relevanz. Klimawirkungsanalysen bieten zum einen die Möglichkeit potenzielle Gefährdungen und relevante klimatische Einflüsse 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.

⁵ Details zur Methodik und den Ergebnissen der Bias-Adjustierung und Regionalisierung der Klimaprojektionsdaten finden sich im Auswerterahmen (Hänsel et al., 2020a) und im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung* (Brienen et al., 2020).

Ziel der Klimawirkungsanalysen ist es, Streckenabschnitte in den Verkehrsnetzen zu identifizieren, entlang derer die im Fokus stehenden Naturgefahren derzeit und zukünftig auftreten können (Exposition). Im nächsten Schritt sollen Streckenabschnitte identifiziert werden, die aufgrund ihrer Eigenschaften besonders anfällig gegenüber den betrachteten klimatischen Einflüssen bzw. daraus resultierenden Wirkungen sind (Sensitivität). Schließlich verfolgen die Analysen das Ziel, die Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten aus verkehrlicher und ökologischer Sicht zu bewerten.

Die Klimawirkungsanalysen erfolgen im ersten Schritt zumeist differenziert nach den Verkehrsträgern (verkehrsträgerspezifisch) für ausgewählte Naturgefahren und auf sie wirkende klimatische Einflüsse (gefahrenspezifisch). Die Anwendung eines methodischen Rahmens für die Klimawirkungsanalysen (Abbildung 2-1), der sich verkehrsträgerübergreifend anwenden lässt und die Struktur sowie den Ablauf der Analysen soweit möglich vereinheitlicht, ermöglicht die Vergleichbarkeit und Zusammenführung von Analyseergebnissen für einzelne Verkehrsträger. Zudem wird mit dem methodischen Rahmen ein einheitliches Begriffsverständnis geschaffen, die inhaltliche Zielsetzung der einzelnen Analyseteilschritte festgelegt und die Verknüpfung zwischen ihnen hergestellt.

Mit den im Rahmen der Forschungsarbeit im Themenfeld 1 entwickelten und durchgeführten Klimawirkungsanalysen für die Bundesverkehrswege werden Erkenntnisse darüber gewonnen, wo und wie stark die Bundesverkehrswege derzeit und zukünftig von durch meteorologische Parameter beeinflussten Naturgefahren betroffen sein können. Mit den Bundesfernstraßen, den Bundesschienenwegen und den Bundeswasserstraßen werden dabei drei verschiedene Verkehrsträger in den Analysen berücksichtigt. Die im BMVI-Expertenetzwerk betrachteten potenziellen Gefährdungen für das Verkehrssystem sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

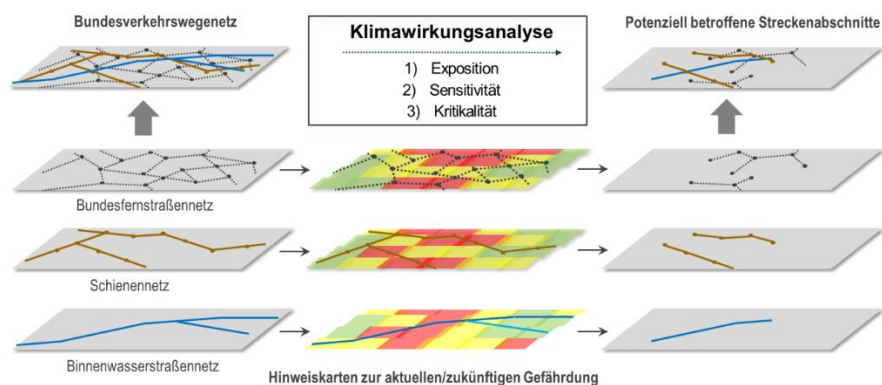


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Klimawirkungsanalyse im BMVI-Expertenetzwerk.

2.2.2 Grundlegende Definitionen und verkehrsträgerübergreifende Festlegungen

Klimawirkungsanalysen können für verschiedene Betrachtungsebenen durchgeführt werden – von der Ebene des gesamten Bundesverkehrswegegenetzes über die spezifischen Netze der jeweiligen Verkehrsträger (Gesamt- oder Teilnetz) bis hin zur Objektebene, wo es um die Planung und den Bau einzelner Infrastrukturelemente geht. In der ersten Forschungsphase des BMVI-Expertenetzwerks wurden die Klimawirkungen streckenabschnittsbezogen für Netze bzw. Teilnetze analysiert und bewertet. Daher wird nachfolgend der methodische Rahmen der Klimawirkungsanalyse am Anwendungsbeispiel der (Teil-)Netzebene beschrieben. Auch die Korridorebene, die Verkehrsachsen eines oder mehrerer Verkehrsträger umfasst, besitzt eine zentrale Bedeutung für die Wirkungsbetrachtungen innerhalb des Themenfeldes 1.

Tabelle 2-1: 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-Expertenetzwerks Analysen durchgeführt wurden.

Klimat. Einfluss bzw. dadurch veränderte Rahmenbedingung	betroffener Verkehrsträger	Unterkategorie	aktuelle Gefährdung	Bewertung von Änderungen in der zukünftigen Gefährdung	
			Datengrundlage (z. T. unter Berücksichtigung von Aspekten der Sensitivität)	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 Tage über HSW
	Wasserstraße; NOK	angespannte Entwässerungssituationen	Anzahl der Tage über kritischem Wasserstand NOK		Meeresspiegelanstieg, lokale Landsenkung, Hydrologie des Einzugsgebietes (Zufluss)
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 Tage mit einer Niederschlagshöhe von > 20 mm
				Frost-Tau-Wechsel	Anzahl Tage mit Frost-Tau-Wechsel
				Niederschlag	Jahresniederschlag sowie mittlerer Winter- und Sommerniederschlag
Niedrigwasser	Wasserstraße	Niedrigwasserabfluss	Anzahl Tage unterhalb des GIQ (basierend auf Beobachtungsdaten)	Niederschlag, verdunstungssteuernde Größen (Temperatur, Strahlung, Wind)	Anzahl Tage unterhalb des GIQ
Wassergüte	Wasserstraße	Wassertemperatur	Anzahl Tage oberhalb 25°C und 28°C (basierend auf Gegenwartssimulationen)	Niedrigwasser, Lufttemperatur	Anzahl Tage oberhalb 25°C und 28°C
Sturmflut	Schiene, Straße; Wasserstraße	Überflutung	Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer	Meeresspiegelanstieg, lokale Landsenkung	Wasserstände (Scheitelwasserstand), Dauer hoher Wasserstände
Tidedynamik	Wasserstraße	Sedimentdynamik Wassertiefe	Baggerengen	Meeresspiegelanstieg, Niederschlag, verdunstungssteuernde Größen (Temperatur, Strahlung, Wind)	Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten

Der den Klimawirkungsanalysen zugrundeliegende methodische Rahmen (schematische Darstellung siehe Abbildung 2-1) wurde in Anlehnung an die sektorenübergreifenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen im Kontext der 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 KWVA 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 (Korn et al. 2017) zu nennen ist.

Für die Ermittlung von Exposition, Sensitivität und Kritikalität als den drei Zielgrößen der Klimawirkungsanalyse im BMVI-Expertenetzwerk sind entsprechend folgende Teilanalysen vorgesehen: 1) Expositionsanalyse (s. Abschnitt 2.2.3), 2) Sensitivitätsanalyse (s. Abschnitt 2.2.4) und 3) Kritikalitätsanalyse (s. Abschnitt 2.2.5). Jede dieser drei Teilanalysen kann als eigenständige Analyse behandelt und ausgewertet werden. Eine vollständige Analyse und Bewertung von Klimawirkungen bezieht sich auf die Durchführung und nachfolgende inhaltliche Verknüpfung aller Teilanalysen, wozu sich die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS) anbietet.

Mit dem Analyseschritt zur Bewertung der Kritikalität geht das BMVI-Expertenetzwerk einen Schritt über die Ansätze der KWVA 2021 hinaus. Die Kritikalitätsanalyse basiert u. a. auf Datengrundlagen der BVWP und berücksichtigt somit mittelbar die dortigen sozioökonomischen Szenarienannahmen. Die KWVA 2021 bezieht hingegen explizit sozioökonomische Szenarien in die Analyse ein, um den nicht durch den Klimawandel bedingten Bedeutungswandel unterschiedlicher Teilsysteme zu verdeutlichen.

Auch in Bezug auf die betrachteten Klimaszenarien bestehen Unterschiede in den Vorgehensweisen und Analysen zwischen dem BMVI-Expertenetzwerk und der KWVA 2021. So fokussiert sich die KWVA 2021 auf Zukunftsprojektionen unter Annahme hoher Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre (*Weiter-wie-bisher-Szenario* RCP8.5), während die Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertenetzwerks auch Varianten einer mehr oder weniger erfolgreichen internationalen Mitigationpolitik (*Klimaschutzszenario* RCP2.6 sowie *moderates Szenario* RCP4.5) mit Daten hinterlegt.

Der Klimawirkungsanalyse liegt ein indikatorenbasierter Ansatz zugrunde, d. h. zur Ermittlung der Exposition, Sensitivität und Kritikalität von Streckenabschnitten werden Indikatoren verschiedener Art verwendet. Für die betrachteten Naturgefahren und klimatischen Einflüsse beinhaltet Tabelle 2-1 die in der Expositionsanalyse verwendeten Indikatoren, die i. d. R. aus Klimadaten und Wirkmodellen abgeleitet werden. Die Sensitivitätsanalyse bezieht sich auf Eigenschaften der Infrastruktur und erfordert Indikatoren, anhand derer sich die Anfälligkeit von Streckenabschnitten gefährdungsspezifisch operationalisieren lässt. Bislang beschränkt sich die Sensitivitätsanalyse jedoch aufgrund fehlender bzw. nicht ad-hoc zugänglicher Daten auf wenige beispielhafte Betrachtungen (z. B. Sturmwurfgefahren für den Verkehrsträger Schiene im Abschnitt 4.2.1). Besonders bei modellgestützten Detailuntersuchungen werden Exposition und Sensitivität nicht getrennt voneinander, sondern gemeinsam analysiert. 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.

Die Klimawirkungsanalysen erfolgen im Wesentlichen für die einleitend definierten Zeiträume der *nahen Zukunft* (2031–2060) und der *fernen Zukunft* (2071–2100). Zum Vergleich wird der Zeitraum 1971–2000 als „Gegenwart“ und *Bezugszeitraum* für die Berechnung von Änderungssignalen herangezogen. Bei einigen Betrachtungen wird zusätzlich die Zeitscheibe 2021–2050 in die Auswertungen einbezogen, um den Vergleich zu Vorarbeiten aus anderen Projekten (z. B. KLIWAS) herstellen zu können. Die Kritikalitätsanalyse stützt sich auf die Datengrundlagen und die Betrachtungsjahre 2010 und 2030 der Bundesverkehrswegeplanung (BMVI 2016). Für den Verkehrsträger Straße wurde abweichend 2015 anstatt 2010 als Bezugsjahr gewählt.

In der 2. Forschungsphase des BMVI-Expertennetzwerks ist der vorgestellte methodische Ansatz weiterzuentwickeln und zu konkretisieren, so dass sich die in Phase 1 vorgenommenen Teilanalysen in ein einheitliches Bewertungssystem integrieren lassen (erste Ansätze siehe Kapitel 6). Die nachfolgend in den Kapiteln 3 bis 5 dargestellten Teilanalysen zeigen erste Möglichkeiten auf, wie Klima- bzw. Naturgefahren und die auf sie wirkenden klimatischen Einflüsse netzbezogen analysiert und bewertet werden können. Zugleich machen sie aber auch deutlich, dass derzeit vor allem die Datenverfügbarkeit ein Hindernis darstellt, Klimawirkungsanalysen auf der Netzebene für alle drei Teilanalysen vollständig durchzuführen. Schließlich ist zwingend zu beachten, dass netzbezogene Klimawirkungsanalysen lokale Detailuntersuchungen nicht ersetzen können.

Die drei Bausteine der Klimawirkungsanalyse im BMVI-Expertennetzwerk sind in den nachfolgenden Abschnitten bezüglich des Begriffsverständnisses und ihrer Charakteristik beschrieben.

2.2.3 Expositionsanalyse

Die Expositionsanalyse beantwortet die Frage "Inwieweit ist ein betrachtetes System aufgrund seiner räumlichen Lage bestimmten klimatischen Einflüssen und somit den zu erwartenden Klimaänderungen ausgesetzt?". Derartige Klimawandel- bzw. Klimafolgenanalysen wurden bereits in verkehrsträgerspezifischen Projekten vor Beginn des BMVI-Expertennetzwerks durchgeführt, so z. B. in KLIWAS für die Wasserstraßen. Dabei werden die Auswirkungen angenommener Emissions- bzw. Konzentrationsszenarien zur zukünftigen Entwicklung der Treibhausgase und des damit verbundenen Klimaantriebs auf die Handlungsebene (Deutschland, Regionen, Streckenabschnitte, Pegel, spezifische Infrastrukturelemente etc.) heruntergebrochen.

Die Analyse kann untergliedert werden in eine Systemanalyse, in der die existierenden Wirkungszusammenhänge (synonym: Wirkungsweisen, Wirkungsketten) zwischen relevanten Teilsystemen beschrieben werden (s. a. Abschnitt 2.3), und in eine technische Analyse, die die technischen Möglichkeiten einer Implementierung oder Umsetzung der Zusammenhänge in Form von Daten, Modellen und statistischen Methoden (Modell- und Verfahrensketten) beschreibt (s. Abschnitt 2.3.6). Generiert werden dabei für die Adressatengruppen des Themenfeldes 1 relevante Informationen zu spezifischen Kennwerten in folgenden Kategorien:

- absolute quantitative Angaben (Einheiten)
- relative quantitative Angaben (Prozent)
- relative semiquantitative Angaben (Richtungsangaben "viel mehr", "mehr", "weniger", "viel weniger")

Technisch können diese Informationen generiert werden anhand von

- a) **Modellen**: Oberkategorie für die eingesetzten numerischen und konzeptionellen Modelle (z. B. Wasserhaushaltsmodelle im SP-106 oder ingenieurgeologischer Ansatz im SP-105)
- b) **Statistischen Verfahren**: Oberkategorie für eingesetzte statistische Verfahren (z. B. Kernschätzer oder extremwertstatistische Methoden)
- c) **Datenbanken**: Oberkategorie für Datenbanken und Tabellenwerke (insbesondere für Bauwerks- und Fahrzeugparameter)
- d) **Regelwerken**: Oberkategorie für berücksichtigte Regeln und Standards
- e) **Expertenmeinungen**: Oberkategorie für Auswertungen von Experteninterviews und Literatur

Im BMVI-Expertennetzwerk werden alle geschilderten Ansätze – z. T. in kombinierter Form – verwendet. Für den Bereich der Wasserstraßen sind viele der betrachteten Systemzusammenhänge (Wirkungsketten, Sensitivitäten) bereits in Computermodellen abgebildet worden. Diese Modelle reduzieren das real ablaufende Prozessgeschehen so, dass einerseits darstellbare Rechenzeiten erreicht und andererseits die wesentlichen aus Beobachtungen abgeleiteten Phänomene wiedergegeben werden können.

Die Expositionsanalysen werden jeweils für eine Referenzsituation und verschiedene Szenarisituationen durchgeführt. Die Referenzsituation, die zumeist dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 entspricht, beschreibt die Gegenwart bzw. die jüngere Vergangenheit. Im *Bezugszeitraum* sind der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur bereits – regional unterschiedlich ausgeprägt – infolge der genannten Wirkungszusammenhänge von *klimatischen Einflüssen* bzw. von "vorgelagerten Klimawirkungen" betroffen. *Klimatische Einflüsse* sind dabei nach der Terminologie der DAS unmittelbar durch meteorologische Größen und Indikatoren darstellbar, während "vorgelagerte Klimawirkungen" weitere Systemkompartimente einbeziehen und z. B. durch hydrologische oder ozeanographische Größen und Indikatoren ausgedrückt werden. Anhand von Szenarien werden Modifikationen der Referenzinformationen dargestellt. Die Wirkungszusammenhänge sind dabei per se dieselben wie im *Bezugszeitraum*, jedoch werden nun Klimaszenarien, d. h. ein Wandel der *klimatischen Einflüsse*, angenommen. Die Analysen im BMVI-Expertenetzwerk erfolgen dabei für drei Klimaszenarien, die einen unterschiedlichen Klimaantrieb bis zum Ende des 21. Jahrhunderts annehmen. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, sind dies die Szenarien *Klimaschutz*, *moderat* und *Weiter-wie-bisher*. Weitere Szenariennahmen (z. B. bzgl. Landnutzungswandel) werden nur in Teilstudien berücksichtigt.

2.2.4 Sensitivitätsanalyse

Die Auswirkungen des Klimawandels sind nicht überall gleich bedeutsam. Es gibt im Bundesgebiet regionale Unterschiede in dem Grad, in dem der Verkehr oder die Verkehrsinfrastruktur sensitiv gegenüber veränderten klimatischen Einflüssen oder daraus resultierenden Klimawirkungen reagieren. Dies wird durch die regional differenzierte Sensitivität abgebildet, sprich die Anfälligkeit des Verkehrs oder der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen oder Klimawirkungen. Entscheidend sind hier regions-, strecken-, bauwerks- oder nutzungsbezogene Parameter (Bauwerksbemessung, Bauweisen, Schiffstypen, Tiergesellschaften etc.) und die daraus resultierenden regionalen Unterschiede beispielsweise in den Bauweisen, den Umgebungs- und Gewässereigenschaften (Geologie, Böden, Topographie, Landnutzung, Gewässerregime etc.) oder auch unterschiedlichen Schiffsgrößen im Bereich der Wasserstraßen.

Hinsichtlich der Definition und technischen Umsetzung der Sensitivität(sanalyse) können verschiedene Blickwinkel eingenommen und Wege beschritten werden. Zu unterscheiden sind beispielsweise:

- a) Gebietsbezogene Sensitivität: Aus dem Blickwinkel von Binnenwasserstraßen steuern zahlreiche Einzugsgebietsparameter die Wasser- und Stoffflüsse aus den Flussgebieten in die als Wasserstraßen genutzten Gewässer. Hierzu gehören z. B. die Topographie, die Böden, der geologische Untergrund, die Landnutzung und -bearbeitung oder Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Tal Sperren. Die verfügbaren Wasserressourcen sowie die Sediment-, Nähr- und Schadstoffeinträge werden entscheidend hierdurch geprägt. Für gravitative Massenbewegungen sind ebenfalls Gebietsmerkmale entscheidende Faktoren, die bei den Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen einbezogen wurden.
- b) Streckenbezogene Sensitivität: Spezifische Parameter können bestimmend für die Sensitivität einzelner Streckenabschnitte sein. Für die Straße und Schiene können beispielsweise Wälder und Alleen die Sensitivität gegenüber der sturmbedingten Gefährdung erhöhen. Bei der Schiene sind elektrifizierte Strecken stärker sensitiv gegenüber Sturmwurf als nicht-elektrifizierte. Andererseits können bereits umgesetzte Hangsicherungsmaßnahmen entlang der Verkehrswege die Sensitivität gegenüber gravitativen Massenbewegungen herabsetzen. Für die Binnenwasserstraßen ist der Verkehr auf kanalisiertem Streckenabschnitten gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen des Abflusses weniger sensitiv als in freifließenden Abschnitten, da das System gesteuert werden kann und weitgehend von den hydrometeorologischen Gegebenheiten des Einzugsgebietes entkoppelt ist. Gleichzeitig ist in langsam fließenden, kanalisiertem Abschnitten die Sensitivität der Wassergüte gegenüber einer Änderung der Luft- bzw. Wassertemperaturen höher. Wasserbauliche Maßnahmen wie Bühnenfelder verändern ebenfalls die streckenbezogene Sensitivität, z. B. mit Blick auf die Sedimentflüsse.

- c) **Bauwerksbezogene Sensitivität:** Die Sensitivität einzelner Bauwerke gegenüber dem Klimawandel ist durch zwei Faktoren bestimmt: Einerseits bestimmen Bauweise und Bemessung die Sensitivität. Bauwerke können ihre Wirkung oder auch Standfestigkeit verlieren, wenn sich die Bemessungsgrößen (z. B. Durchflüsse, Wasserstände) nachhaltig verändern. Zum anderen entscheidet der Zustand von Bauwerken darüber, ob ein Bauwerk z. B. unter extremen Bedingungen seine Funktion einbüßt und ggf. beschädigt wird.
- d) **Fahrzeugbezogene Sensitivität:** Im Fall der Schifffahrt ist hier vor allem die Schiffsgröße/Bauweise in Verbindung mit der Ladungsart als sensitivitätsbestimmend zu bezeichnen. Größere Schiffe, die mit trockenem oder flüssigem Massengut beladen sind, sind sensitiver gegenüber Änderungen der Wassertiefen als kleinere und/oder mit Containern oder Projektladung beladene Schiffe (Volumenladung). Größere Schiffe fahren unter günstigen Fahrwasserbedingungen deutlich kostengünstiger als kleinere Schiffe, sind aber auch sensitiver gegenüber ungünstigen Bedingungen (Niedrigwasser). Auf der Straße sind beispielsweise Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (z. B. Lkw) besonders anfällig gegen Seitenwind.
- e) **Sensitivität der Ökosysteme:** Viele Lebewesen sind nur bedingt in der Lage, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Als Beispiel seien hier wechselwarme Tierarten genannt, die ihre Körpertemperatur nicht selber regulieren können, sondern Umgebungen mit einem geeigneten Temperaturregime wählen. Wenn diese Umgebungen z. B. infolge einer Erhöhung der Wassertemperatur zu stark eingeschränkt werden und keine Wanderung möglich ist, könnte eine Art unter Stress geraten und ggf. in einigen Regionen verschwinden. Eine Bewertung und Operationalisierung der Sensitivität könnte vor diesem Hintergrund über die Zusammenstellung der Verbreitung von Habitaten und kritischer Schwellenwerte der aquatischen Umwelt gelingen, allen voran bietet sich die Analyse der Verbreitung relevanter Arten und ihrer bevorzugten Wassertemperaturen an.

Viele sensitivitätsbestimmende Eigenschaften, insbesondere auf der Gebietsebene, sind in den im Schwerpunktthema *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* eingesetzten Modellansätzen bereits berücksichtigt. Die Topographie ist beispielsweise im Wasserhaushaltsmodell, im Bodenerosionsmodell und im Ästuarmodell berücksichtigt. Die ersteren beiden Modelle berücksichtigen ferner die Landnutzung und die Bodeneigenschaften.

Je nach Fragestellung können unterschiedliche Eigenschaften des Verkehrssystems relevant und für eine grundsätzliche, übergeordnete Differenzierung der Sensitivität geeignet sein. Als Beispiel für die netzweite Differenzierung der streckenbezogenen Sensitivität kann die Unterscheidung in elektrifizierte vs. nicht-elektrifizierte Schienenstrecken mit Blick auf die Gefährdung Sturmwurf genannt werden. Für das Wasserstraßennetz des Binnenlandes liegen zur grundsätzlichen Differenzierung der streckenbezogenen Sensitivität (verkehrlich und wassergütebezogen) Informationen über den sogenannten "Fließtyp" (Kanal-, stau-regelte und freifließende Strecken) als Geodaten vor und werden dementsprechend in die Klimawirkungsanalyse einbezogen. Eine weitere Differenzierung der streckenbezogenen Sensitivität erfolgt innerhalb der eingesetzten hydrodynamischen Modelle, die die Topographie und weitere Eigenschaften der Gewässer-sole berücksichtigen.

Daten zur objektbezogenen Sensitivität am Beispiel der Wasserstraße sind im Grundsatz in entsprechenden Datenbanken der WSV wie "WADABA" (Bemessung) und WSV Pruf (Zustand) zu finden. Ihre Nutzbarkeit ist jedoch aufgrund der vorliegenden Datenstruktur und damit fehlender Abfragemöglichkeiten im vorliegenden Kontext nur sehr eingeschränkt gegeben, weshalb in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks auf eine Betrachtung der Objektebene verzichtet wird.

2.2.5 Kritikalitätsanalyse

Der dritte Baustein der Klimawirkungsanalyse erfasst schließlich die Bedeutung eines Streckenabschnitts bzw. einer Transportrelation. Hier können neben verschiedenen verkehrlichen Perspektiven (Gütermenge und -werte, Fahrzeugzahlen, Redundanz der Verkehrsnetze) auch weitere Perspektiven (z. B. ökologische

oder kulturelle Wertigkeit) eingenommen werden. Diese Art der Betrachtung wird mit dem Begriff Kritikalität belegt und sollte nicht mit dem Begriff "kritische Infrastrukturen" verwechselt werden, der im Bereich der Katastrophenvorsorge definiert ist (BMI 2009).

Bei der Bewertung der Kritikalität von Teilen des Verkehrsnetzes geht es um die Beschreibung des Wertes bzw. der Bedeutung von Verkehrsachsen vor dem Hintergrund eines möglichen funktionellen Versagens bzw. einer Einschränkung. Diese Bewertung kann unabhängig von der Thematik "Klimawandel/ Wetterextreme" bzw. unabhängig von einem konkreten Wirkungszusammenhang vorgenommen werden und ist eigentlich kein originärer Gegenstand einer Klimafolgenabschätzung. Daher wird auf vorhandenes Datenmaterial zurückgegriffen. Die Bewertung der verkehrlichen Bedeutung kann aus verschiedenen Blickwinkeln vorgenommen werden, z. B.:

- a) Bedeutung nach dem Güteraufkommen (gewichtsbezogen). Das Kriterium "Güteraufkommen" ist für die verkehrliche Bewertung der Bundeswasserstraßen gängig. Üblicherweise wird das Güteraufkommen auf das Gewicht bezogen und in der Einheit Mio. t pro Jahr (Mt/a) angegeben. Entsprechende Angaben werden regelmäßig durch das Statistische Bundesamt publiziert (DESTATIS 2019).

In Zusammenhang mit der jüngsten Novelle des Bundesverkehrswegeplans (BMVI 2016) wurden streckenbezogene Geodatenätze der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 veröffentlicht (BMVI 2015b). Diese fußt auf umfangreichen Analysen und daraus abgeleiteten Szenarienannahmen zur sozioökonomischen Entwicklung Deutschlands (u. a. inkl. makroökonomischer, demographischer, raumplanerischer Entwicklung). Gemeinsam mit der ebenfalls in der Verkehrsverflechtungsprognose bereitgestellten Referenzsituation des Jahres 2010 liegt somit ein hinsichtlich Inhalt und technischer Anwendbarkeit geeigneter Datenbestand vor. Die Daten für die Wasserstraße sind auch über das System TRAVIS online als WebMapping Service abrufbar⁶.

- b) Bedeutung nach dem Güteraufkommen (volumenbezogen). Ausgehend von der Beobachtung, dass der Containerverkehr in den vergangenen Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen hat und voraussichtlich auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird, kann ergänzend zu a) eine volumenbezogene Betrachtung des Güteraufkommens herangezogen werden.
- c) Bedeutung nach dem Güterwert. Ergänzend zu den gewichts- und volumenbezogenen Betrachtungen (a und b) könnte der Güterwert eine weitere alternative und wichtige Differenzierung des Streckennetzes erlauben. Im Fall der Binnenschiffahrtsstraßen ist hier beispielsweise die sogenannte Projektladung relevant. Diese sehr großformatigen Transporte haben teilweise einen hohen wirtschaftlichen Wert und können nur mit großem Aufwand über Schiene oder Straße abgewickelt werden. Hierzu gehören z. B. große Anlagenteile der chemischen Industrie, Turbinen oder Rotorblätter für Windräder.
- d) Bedeutung nach Fahrzeugzahlen. Die Bewertung der Bedeutung von Verkehrsachsen und Streckenabschnitten anhand von Fahrzeugzahlen ist insbesondere im Straßen- und Schienenverkehr üblich (vgl. Verkehrsverflechtungsprognose 2030; BMVI (2015b)). Streckenbezogene Angaben zur Zahl der Schiffsbewegungen im Küsten- und Binnenbereich liegen seit ca. 2010 jährlich über das Automatic Identification System (AIS; ZKR (2011)) vor. Auch könnten Schleusungszahlen und die vorhandenen Zählstellen herangezogen werden.
- e) Bedeutung nach Anzahl der beförderten Personen. Auch dieser Bewertungsansatz stammt vor allem aus dem Bereich des Straßen- und Schienenverkehrs (z. B. Pendlerverflechtungen). Von Seiten der Schifffahrt könnten sich hier interessante Perspektiven aus der Analyse der "Weißen Flotte" ergeben (v. a. Touristenzahlen), die in den bisherigen Klimafolgenanalysen nicht explizit berücksichtigt wurde.

⁶ Weitere Informationen sind auf der TRAVIS-Webseite <https://travis.baw.de> zu finden.

- f) Bedeutung nach Redundanz. Das Straßennetz weist allgemein eine recht hohe Redundanz, das Schienennetz eine mittlere Redundanz auf. Im Gegensatz dazu besteht eher keine nennenswerte Redundanz bei der Binnenschifffahrtsstraße. Die Bewertung hängt immer auch von der Betrachtungsskala ab. Ein Streckenabschnitt kann im Netzvergleich verkehrlich unbedeutend sein, im regionalen Kontext jedoch eine unverzichtbare Rolle spielen.

Im Unterschied zu den Verkehrsträgern Schiene und Straße haben Wasserstraßen neben der rein verkehrlichen Bedeutung auch eine Bedeutung in wasserwirtschaftlicher Dimension und als Ökosystem. Vor diesem Hintergrund wird der Kritikalitätsbegriff erweitert, beispielsweise hinsichtlich:

- g) Bedeutung nach entnommener Wassermenge. Das Wasser der Wasserstraßen wird nicht nur für verkehrliche Zwecke genutzt, sondern hat auch für andere Sektoren im Umfeld der Wasserstraßen eine Bedeutung. Als Beispiel kann die Entnahme von Beregnungswasser für die landwirtschaftlichen Nutzflächen im Bereich des Elbe-Seiten-Kanals (ESK) oder die Entnahme von Kühlwasser für Kraftwerke genannt werden.
- h) Bedeutung nach ökologischem Zustand und Schutzwürdigkeit. Wasserstraßen sowie wasserstraßen- nahe Landschaften sind Lebensräume für viele Tier- und Pflanzenarten. Hinweise auf die ökologische Bedeutung der Lebensräume können über die Attribute der ausgewiesenen Schutzgebiete entlang der BWaStr gewonnen werden. Eine Bewertung dieser Lebensräume kann grundsätzlich über den ökologischen Zustand bzw. das ökologische Potential vorgenommen werden, der z. B. im Kontext der EG-Wasserrahmenrichtlinie erhoben wird. Ziel der Richtlinie ist es, einen "guten Zustand" bzw. ein "gutes Potenzial" u. a. der Oberflächengewässer zu erreichen. Gleichzeitig wird ein Verschlechterungsverbot ausgesprochen, d. h. zukünftige Entwicklungen durch den Menschen dürfen sich nicht negativ auf den Zustand auswirken. Hieraus ergeben sich Möglichkeiten der technischen Umsetzung im Rahmen der Kritikalitätsanalyse auf Grundlage der vorliegenden Berichtsdaten der Bundesländer, die bei der BfG im Portal "WasserBlick" zusammengeführt werden.

Die Bewertung und Auswahl möglicher Bewertungsansätze der "Kritikalität" erfolgt im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks entsprechend der folgenden Kriterien, die als "zwingend" oder "optional" eingeordnet werden:

- i) Relevanz (zwingend): Der Bewertungsansatz muss für die im Themenfeld 1 adressierten Zielgruppen nutzbar sein, d. h. einen aus Nutzerperspektive wichtigen Aspekt der "Bedeutung" von Verkehrsachsen in den Fokus nehmen.
- ii) Datenverfügbarkeit (zwingend): Es müssen Daten zur Verfügung stehen, mit denen die Bewertung im Rahmen der dem Themenfeld 1 zur Verfügung stehenden Zeit und Ressource technisch umgesetzt werden kann.
- iii) Streckenbezogenheit (optional): Es sollten Angaben für einzelne Streckenabschnitte vorliegen, um ein differenziertes Bild erzeugen zu können.
- iv) Szenarienverfügbarkeit (optional): Es sollten Angaben möglichst auch für zukünftige Perioden vorliegen, um Aussagen zu Änderungen des Kritikalitätsbegriffs erzeugen zu können.

Das Kriterium i) "Relevanz" kann bei allen vorgestellten Bewertungsansätzen als erfüllt betrachtet werden, da in die Formulierung bereits Erfahrungen aus der Beratungspraxis eingeflossen sind. Unklarer wird das Bild beim Aspekt "Datenverfügbarkeit", insbesondere in Verbindung mit den optionalen Kriterien der "Streckenbezogenheit" und "Szenarienverfügbarkeit". Hier scheiden nach aktueller Sachlage viele der vorgeschlagenen Bewertungsansätze aus. Je nach Verkehrsträger verbleiben nach derzeitiger Sachlage unterschiedliche Bewertungsansätze (vgl. Kapitel 5).

2.3 Wirkungsketten für die im Themenfeld 1 betrachteten klimatischen Einflüsse und Wirkungen

2.3.1 Grundlagen und Methodik

Grundlegende Systemzusammenhänge für die im BMVI-Expertennetzwerk betrachteten Klimawirkungen wurden bereits in der Anlage des Leitfadens der IMA-A (Umweltbundesamt 2017) beschrieben und schematisch erfasst. Um möglichst viele Zusammenhänge und Begrifflichkeiten des DAS-Prozesses zu nutzen und Redundanzen zu vermeiden, werden diese grundlegenden Systemzusammenhänge im Folgenden aufgegriffen und wo erforderlich präzisiert bzw. ergänzt.

Die im BMVI-Expertennetzwerk adressierten *Klimawirkungen* haben ihre Ausgangspunkte in verschiedenen DAS-Handlungsfeldern, wie beispielsweise "Küsten- und Meeresschutz", "Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" und "Boden" (Tabelle 2-2). Die *Themenfelder* bilden eine Art von Oberkategorien für die relevanten *klimatischen Einflüsse* und *Klimawirkungen* und sind nicht zu verwechseln mit den sechs Themenfeldern des BMVI-Expertennetzwerks. Die aus BMVI-Expertennetzwerksicht relevanten *Themenfelder* und *Klimawirkungen* werden als Startpunkte in die Detaillierung und technische Umsetzung der Wirkungsketten übernommen. Die Wirkungsketten enden i. d. R. in den Handlungsfeldern "Verkehr, Verkehrsinfrastruktur" (Adressatengruppen "Nutzer" und "Betreiber") sowie "Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" und "Fischerei" (Adressatengruppe "Umwelt").

Tabelle 2-2: Handlungs- und Themenfelder des IMA-Leitfadens, die Ausgangspunkte der Systemanalyse im BMVI-Expertennetzwerk sind.

Handlungsfeld	Themenfelder	Betrachtete Wirkungen
Küsten- und Meeresschutz	Wasserstand und Dynamik der Meere	Meeresspiegelhöhe/-anstieg, Seegang, Sturmfluten, Strömungen und Tidedynamik
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Abfluss u. Wasserstand von Oberflächengewässern	Hochwasser, Niedrigwasser, Wasserbeschaffenheit
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Behinderung/Verzögerung, Unterbrechung/Streckensper- rung (durch Hochwasser, Niedrigwasser, Starkwind/Wind- wurf, gravitative Massenbewegungen) Schäden an Verkehrsleitsystemen und Stromversorgungs- anlagen (Oberleitungen), Schäden an Straßen-/Schienen- infrastruktur durch Windwurf, Hindernisse auf Straßen- und Schienenwegen durch umgestürzte Bäume/Windwurf, Unfallgefahr durch Starkwind, Grundberührung, Querströmungen Unterhaltungsaufwand
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Verknüpfung des Gefährdungspotenzials durch geologi- sche und klimatische Einflussgrößen
Boden	Gravitative Massenbewegungen	
Boden	Erosion, Gewässeromorphologie	Erosion/Anlandung durch Wasser

Von den Ausgangspunkten der Wirkungsketten in den Handlungsfeldern und Themenfeldern spalten sich jeweils verschiedene Stränge der Wirkungsketten auf. In den Abschnitten 2.3.3 bis 2.3.4 sind die grundlegenden, innerhalb des Themenfeldes 1 betrachteten Wirkungsketten entsprechend der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Notationsform zusammengestellt. Diese Wirkungsketten sowie deren im Abschnitt 2.4.1 zu-

sammengefasste technische Umsetzung wurde innerhalb der Schwerpunktthemen 103 bis 106 erstellt. Nähere Informationen und Details sind in den entsprechenden SP-Schlussberichten nachzulesen (Bott et al. 2020, Lohrengel et al. 2020, Nilson et al. 2020, Rauthe et al. 2020).

2.3.2 Notationsform für die Schemata zu Wirkungszusammenhängen und deren technischer Umsetzung

Es gibt zahlreiche Formen zur schematischen Darstellung funktionaler Zusammenhänge in den Umweltwissenschaften. Eine gemeinsame Notationsform gewährleistet die Vergleichbarkeit der Vorgehensweisen und Analysen u. a. zwischen dem BMVI-Expertenetzwerk und dem DAS-Behördenetzwerk Klimawandel und Anpassung. Daher greift das BMVI-Expertenetzwerk die seitens des Umweltbundesamtes (UBA) im Auftrag der IMA-A entwickelte Notationsform (UBA 2016) auf und ermöglicht so den Transfer der Arbeiten aus dem BMVI-Expertenetzwerk in den DAS-Prozess. Tabelle 2-3 beschreibt die in den Klimawirkungsketten verwendeten Bausteine.

Tabelle 2-3: Notationselemente zur Darstellung von *klimatischen Einflüssen*, *Klimawirkungen* und *Sensitivitäten* lt. IMA-Vorgehen, ergänzt um den Aspekt der technischen Umsetzung.

Bezeichnung	Notationsform (Beispiel)
<i>Klimatische Einflüsse</i> (weiße Boxen), zusammengefasst in einem "Themenfeld" (graue Box)	
<i>Klimawirkungen</i> (weiße Sechsecke), verknüpft über Wirkungsbeziehungen (schwarze Pfeile) mit einem <i>klimatischen Einfluss</i> (s. o.) oder einer <i>vorgelagerten Klimawirkung</i> (hier als Text), zusammengefasst in einem "Themenfeld" (graue Box)	
<i>Sensitivität</i> (sensitivitätsbestimmende Parameter; Oval), zusammengefasst unter einer Oberkategorie (grüne Box)	
Modelle und Methoden (gerundete Vierecke) zur technischen Umsetzung von Wirkungszusammenhängen, subsumiert in einer Oberkategorie (blaue Box)	

Um die technische Umsetzung der Wirkungsketten und Sensitivitäten durch die konkret verfügbaren Modelle, Methoden und Daten anschaulich zu machen, wird der IMA-Notation im BMVI-Expertenetzwerk ein weiteres Element hinzugefügt (Blaue Boxen; vgl. Tabelle 2-3). Diese zusätzlichen Schemata stellen die technische Umsetzung dar und spiegeln dabei weitgehend die Struktur der Wirkungsschemata wider. An die Stelle der *klimatischen Einflüsse* und *Klimawirkungen* (Wirkungsketten) treten nun jedoch die Modelle, Methoden, Realdaten und Regelwerke, die zur Beschreibung der Wirkungskette herangezogen werden.

2.3.3 Wirkungsketten im Schwerpunktthema *Hochwassergefahren*

Allgemein lässt sich die Wirkungskette für Hochwasser auf die Infrastruktur der Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße wie in Abbildung 2-2 zusammenfassen. Dabei sei angemerkt, dass für Schiene und Straße die Wirkung durch Überflutungen der Verkehrsinfrastruktur im Vordergrund der Betrachtungen stehen (Wirkungsweise „Hochwasser, Überflutung von Straße/Schiene“, Abbildung 2-3), während bei der Wasserstraße eher die Wirkungen auf den Verkehr betrachtet werden, wie sie mit der Überschreitung des höchsten Schifffahrtswasserstands (HSW) einhergehen (Wirkungsweise „HSW-Überschreitung“, Abbildung 2-4). Hinzu kommen küstenspezifische Herausforderungen bezüglich der Entwässerung (Abbildung 2-5) sowie von Sturmfluten (Abbildung 2-6). Diese vier z. T. verkehrsträgerspezifischen Wirkungsweisen wurden im Schwerpunkt 103 *Hochwassergefahren* im Detail betrachtet und in entsprechenden Wirkungsketten illustriert. Entsprechende Erläuterungen zu den Wirkungsketten sind im Abschlussbericht des SP-103 nachzulesen (Rauthe et al. 2020). Diese spezifischen Wirkungsketten wurden in den Schwerpunkten dann in einem weiteren Schritt technisch umgesetzt. Die dafür verwendeten Daten, Methoden und Werkzeuge sind im Abschnitt 2.4.1 zusammengestellt.

2.3.4 Wirkungsketten im Schwerpunktthema *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*

Im Schwerpunktthema *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* wurden vier Wirkungsweisen vertieft betrachtet und einige weitere angerissen. Dies sind „HSW-Überschreitung/Überflutung“ (bereits adressiert im Schwerpunkt *Hochwassergefahren*; s. Abbildung 2-4), „Tiefenengpass/Abladebeschränkung“ (Abbildung 2-7), „Erosion/Anlandung, Schadstoffe“ (Abbildung 2-8) und „Kritische Wassergüte“ (Abbildung 2-9). Die Wirkungskette „Tiefenengpass/Abladebeschränkung“ ist dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zuzuordnen. Einerseits werden Wirkungen auf den Verkehr betrachtet, andererseits Auswirkungen für den Betreiber der Infrastruktur (WSV), z. B. ein erhöhter Unterhaltungsaufwand der Infrastruktur im Rahmen des Sedimentmanagements. In Abbildung 2-7 sind die Links zu anderen Wirkungsketten angedeutet.

Während die Wirkungskette „Tiefenengpass/Abladebeschränkung“ eher mit Niedrigwasserbedingungen, also „zu wenig Wasser“, zusammenhängt, sind für die Wirkungsweise „Erosion/Anlandung, Schadstoffe“ eher Situationen mit (zu) viel Wasser maßgebend (Starkregen, Hochwasser). Auch diese Wirkungskette adressiert zum Teil das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, aber auch andere Handlungsfelder wie „Boden“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, je nach verfolgtem Strang der Wirkungskette (Abbildung 2-8).

Auch die Wirkungskette „kritische Wassergüte“ (Abbildung 2-9) adressiert teilweise indirekt den Betreiber der Verkehrsinfrastruktur (z. B. hinsichtlich von Beschränkungen von Unterhaltungsbaggerungen), andererseits diverse Umweltaspekte und damit verbunden weitere Gewässernutzungen wie die Trinkwassergewinnung oder die Fischerei.

2.3.5 Wirkungsketten im Schwerpunktthema *Sturmgefahren*

Die für das Schwerpunktthema *Sturmgefahren* relevanten Wirkungsketten des Leitfadens werden im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ beschrieben. Die aus Sicht der Arbeiten im Themenfeld 1 relevanten Aspekte sind in Abbildung 2-10 zusammengestellt. Das Thema Sturmgefahren wurde in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks hauptsächlich für Straße und Schiene und hier mit dem Fokus auf Windwurf betrachtet. Entsprechende Erläuterungen zu den Wirkungsketten sind im Abschlussbericht des Schwerpunkts *Sturmgefahren* nachzulesen (Rauthe et al. 2020). Die Wirkungskette „Sturmflut“ wurde bereits im Bereich der *Hochwassergefahren* (Abschnitt 2.3.3) adressiert.

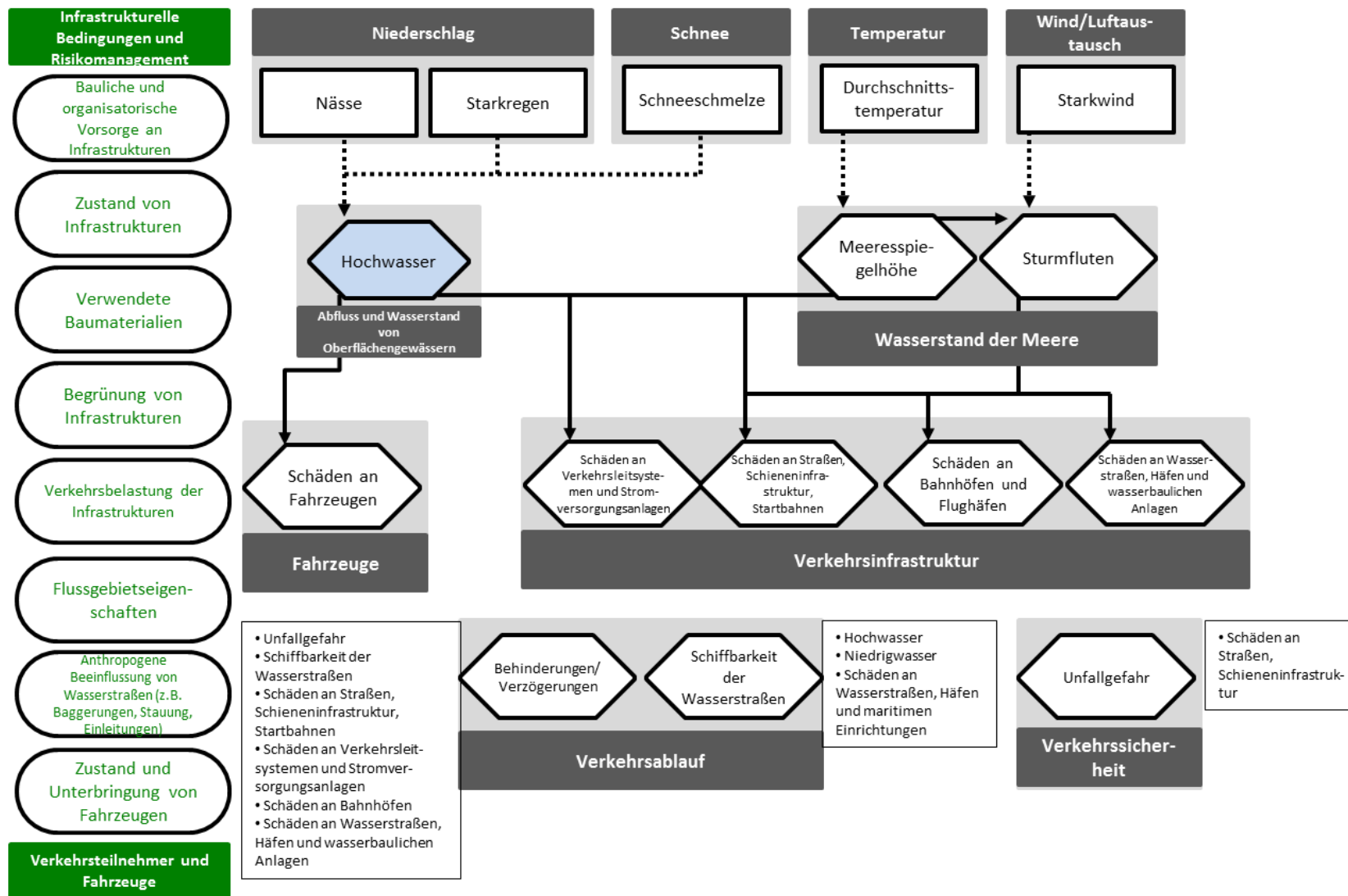


Abbildung 2-2: Allgemeines Schema der Wirkungskette „Hochwasser“ aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, verändert nach Klimawirkungsketten der IMA Anpassung (UBA 2016).

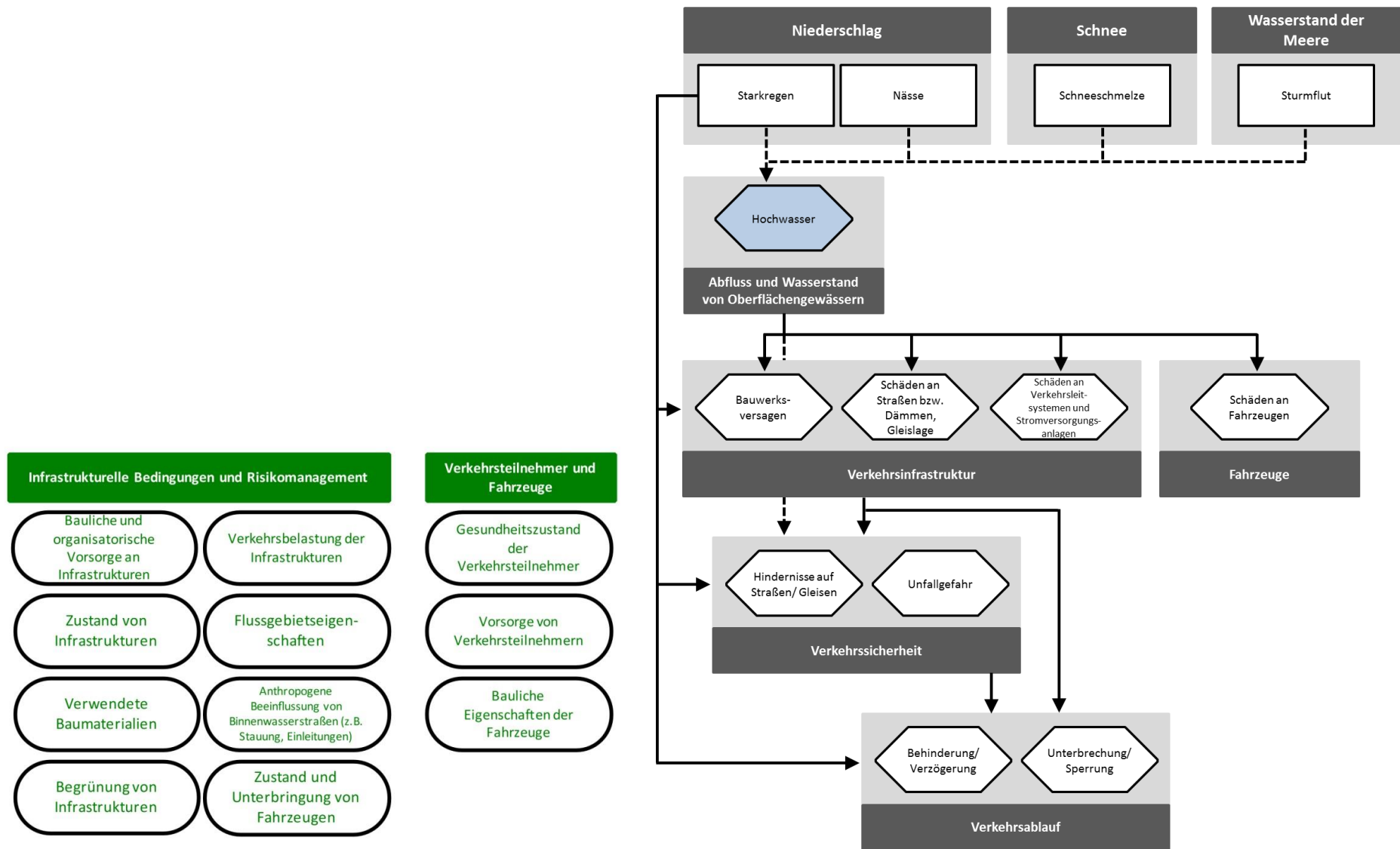


Abbildung 2-3: Wirkungsweise "Hochwasser, Überflutung von Straße/Schiene"; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts).

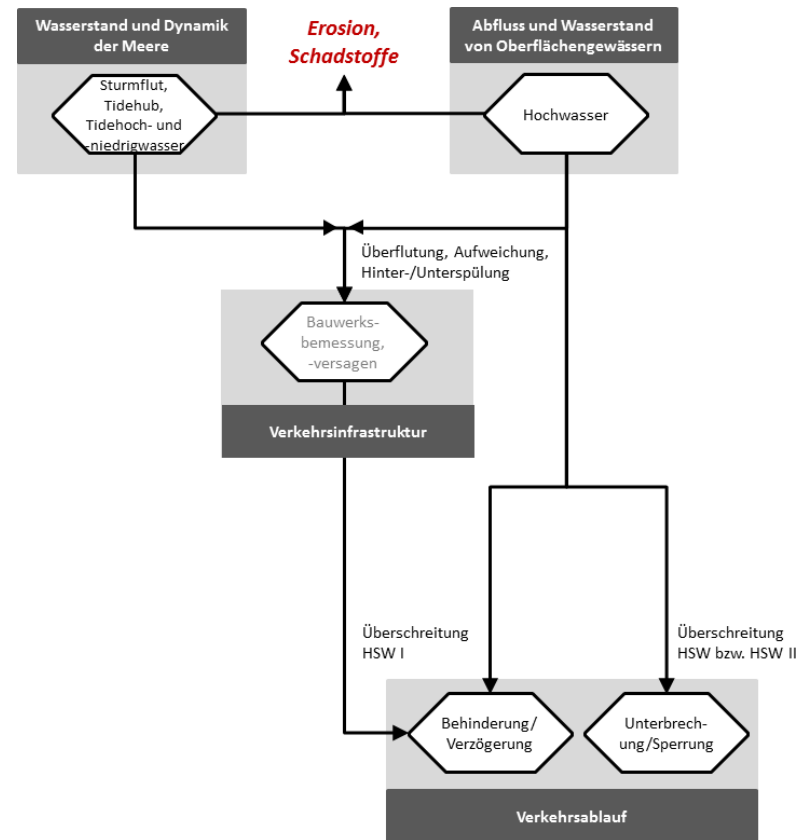


Abbildung 2-4: Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" mit Bezug zur Wasserstraße; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts).

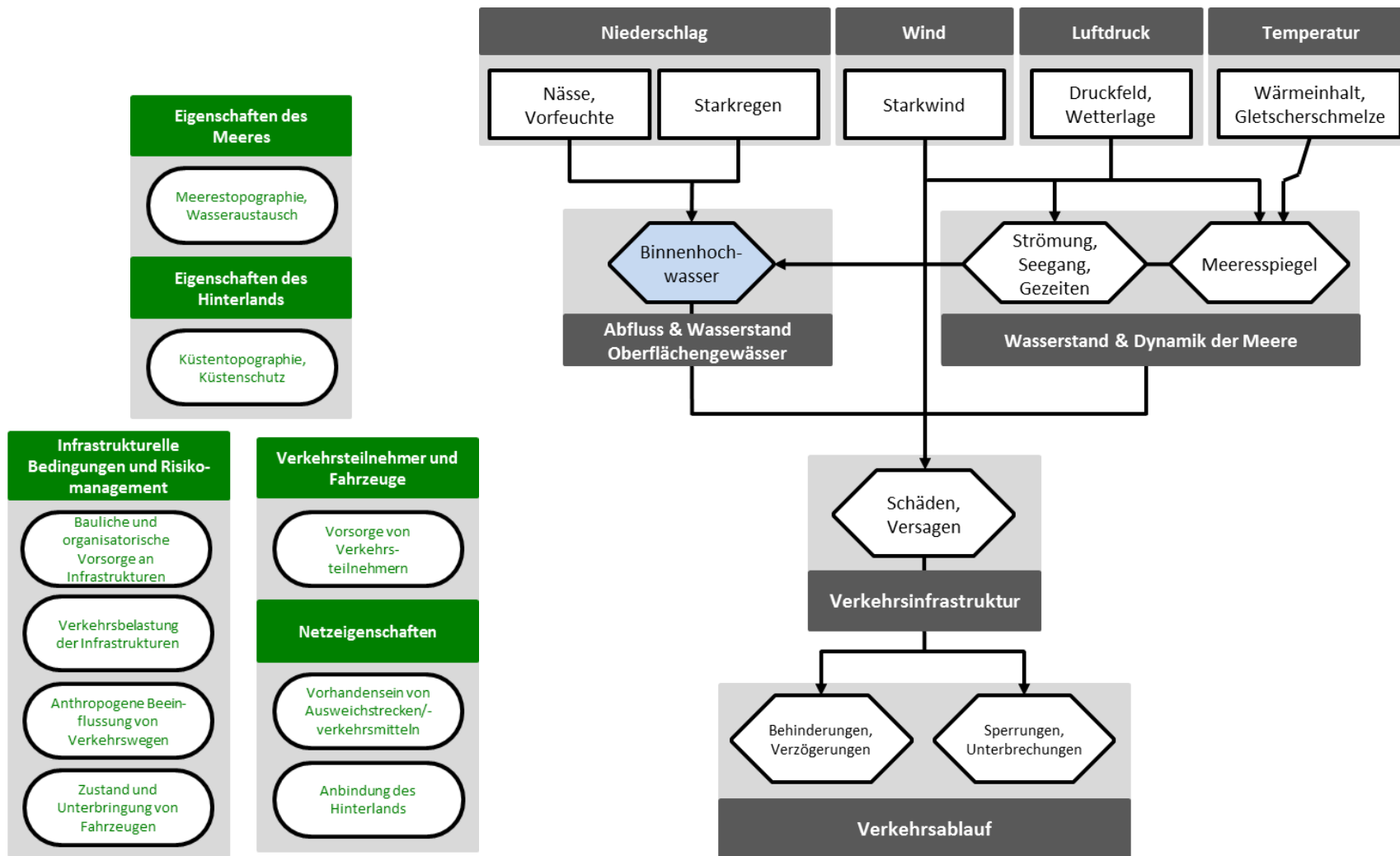


Abbildung 2-5: Wirkungsweise "Küstenentwässerung"; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts).

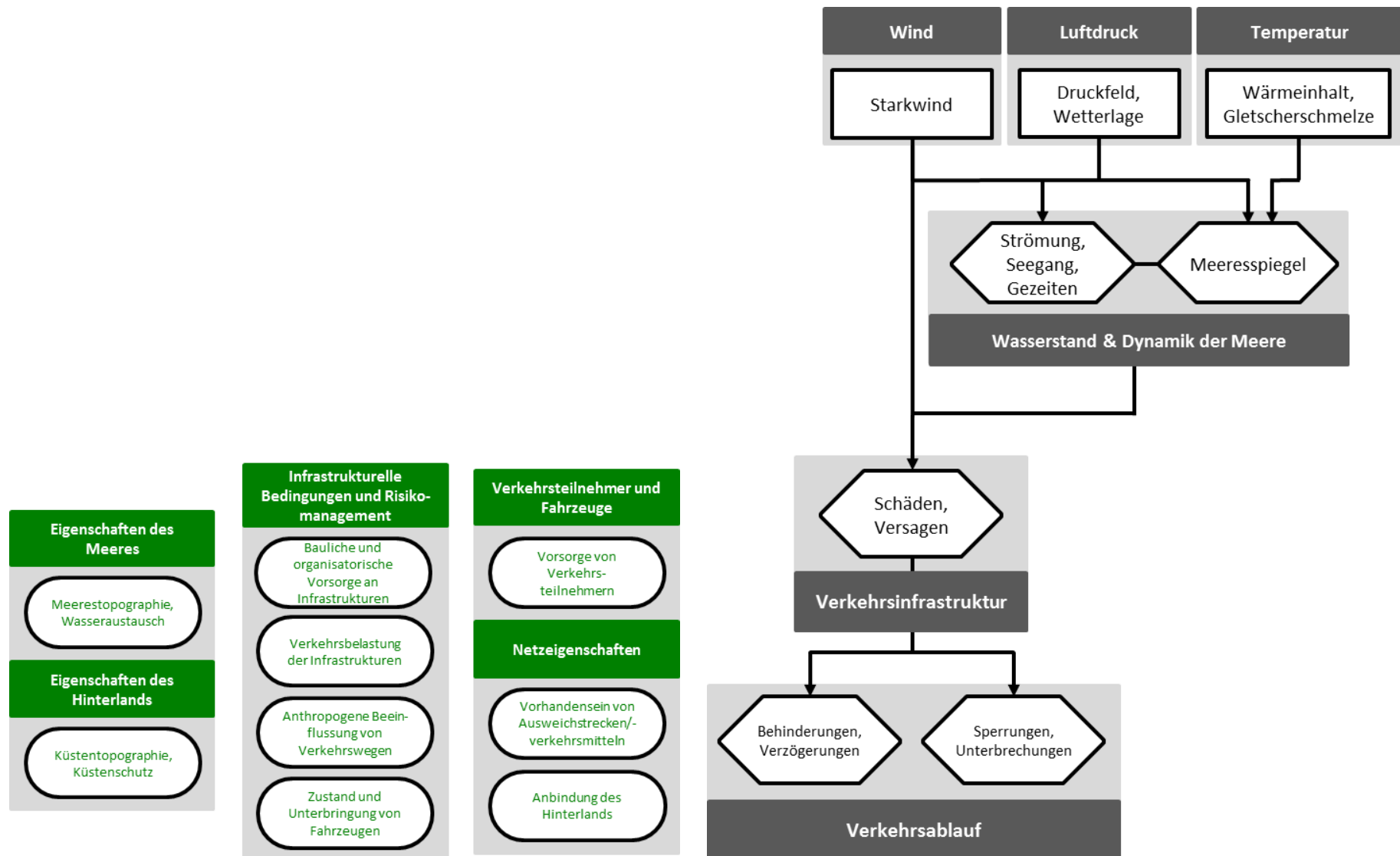


Abbildung 2-6: Wirkungsweise "Sturmfluten"; Sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und vereinfachte schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts).

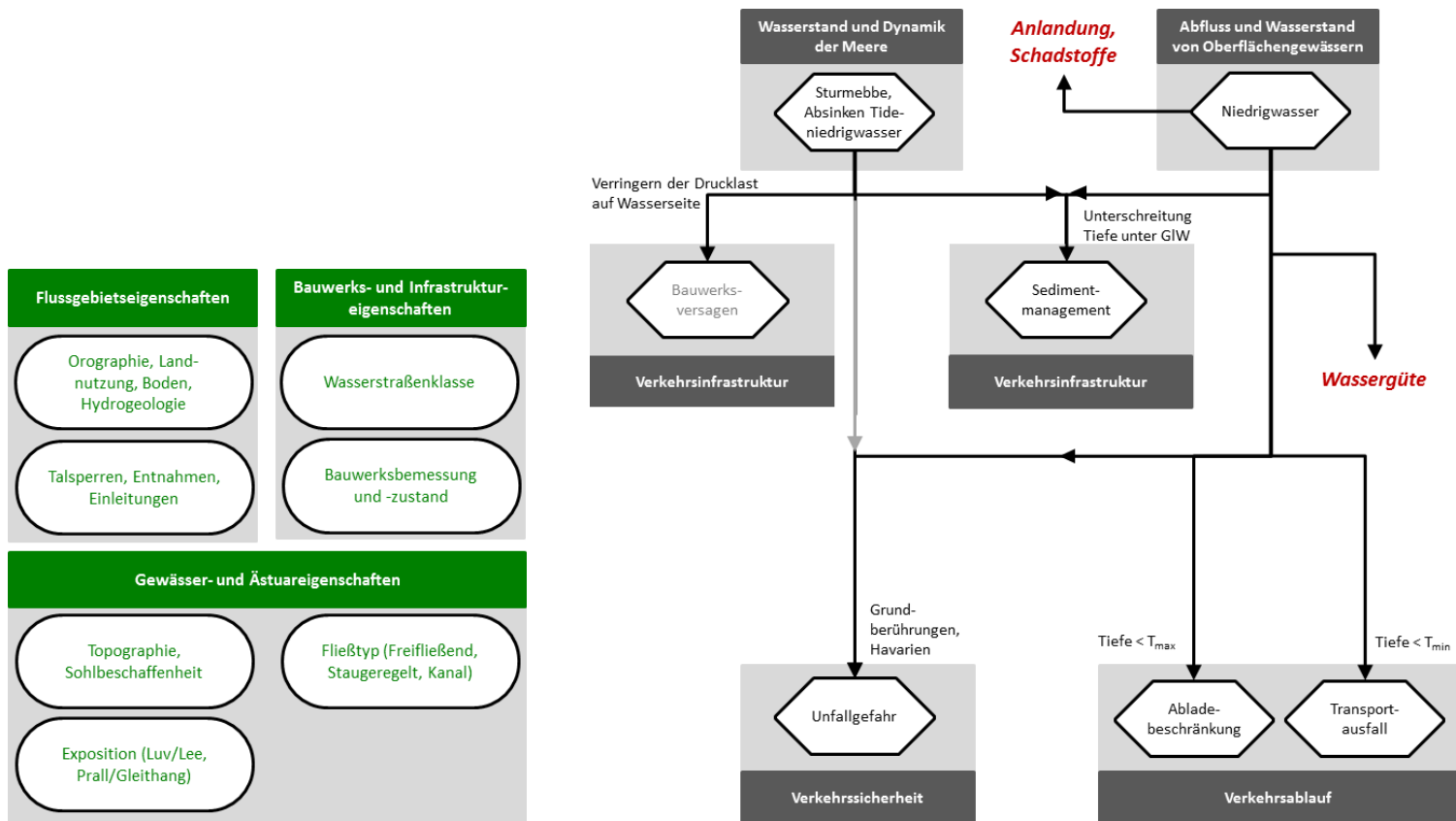


Abbildung 2-7: Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung"; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts). Grau hinterlegte Elemente wurden in Phase 1 nicht bearbeitet.

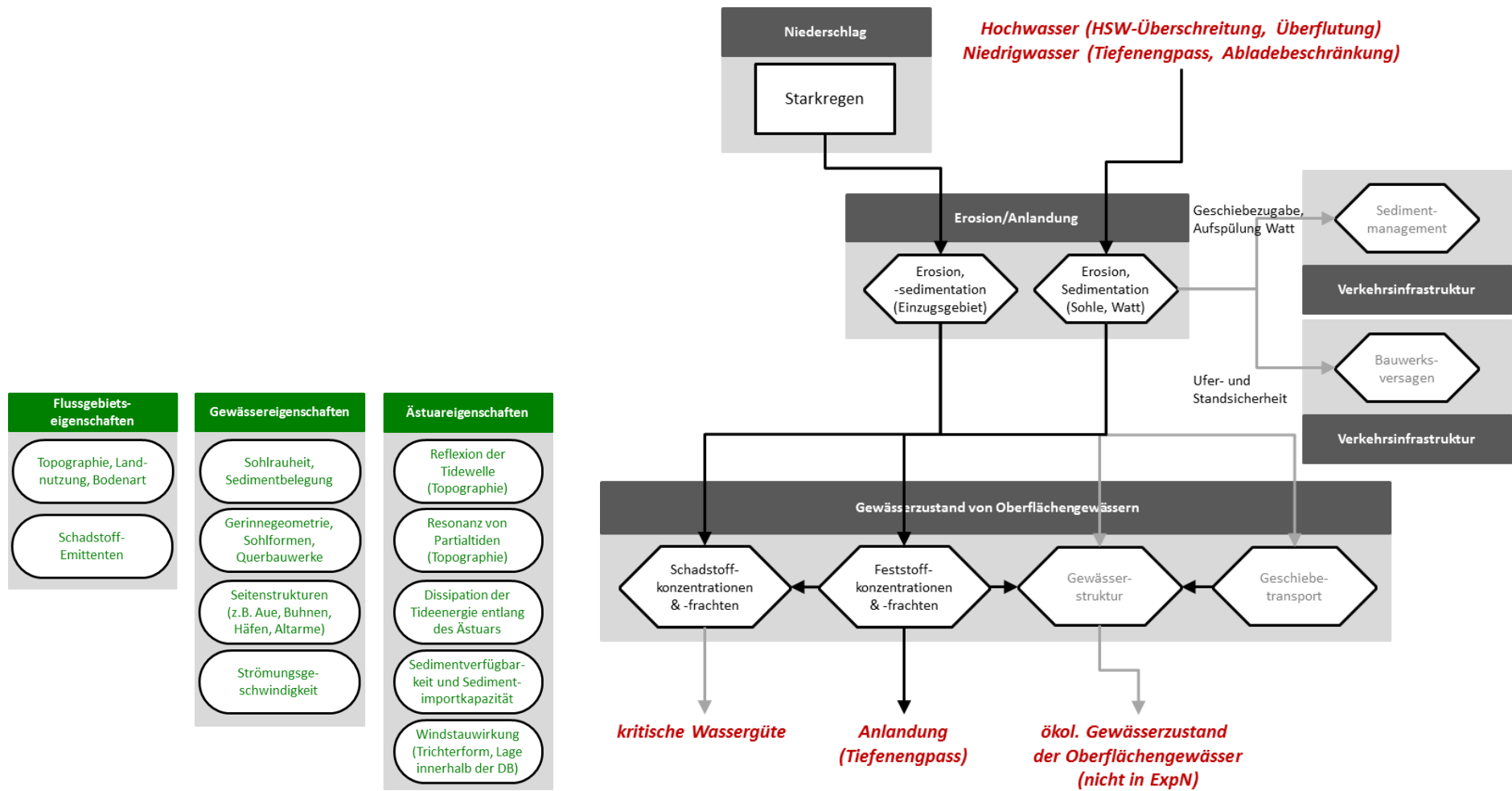


Abbildung 2-8: Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe"; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts). Grau hinterlegte Elemente wurden in Phase 1 nicht bearbeitet.

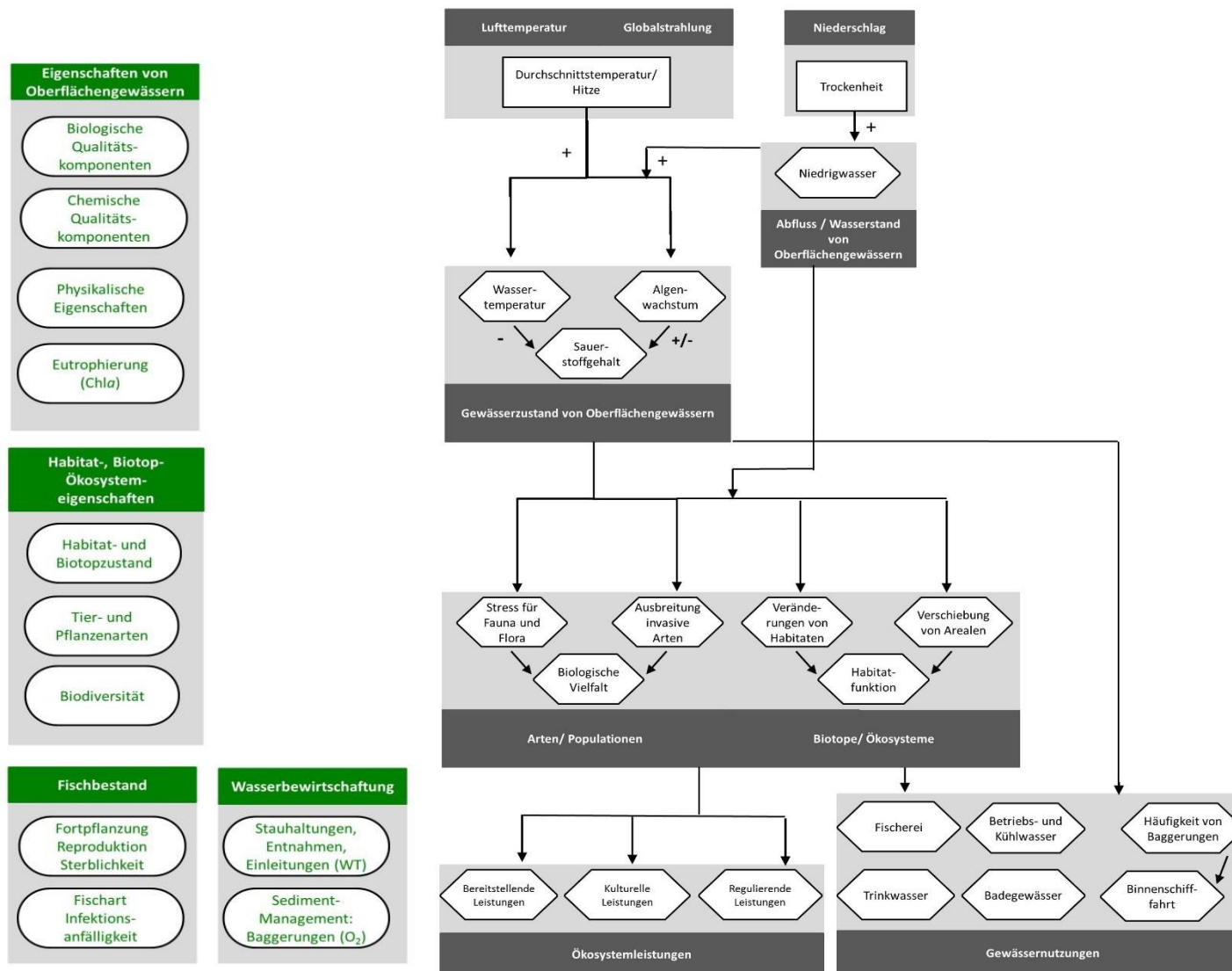


Abbildung 2-9: Wirkungsweise "kritische Wassergüte"; sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften (links) und schematische Darstellung der Wirkungskette (rechts) (Temperatur, Sauerstoff).

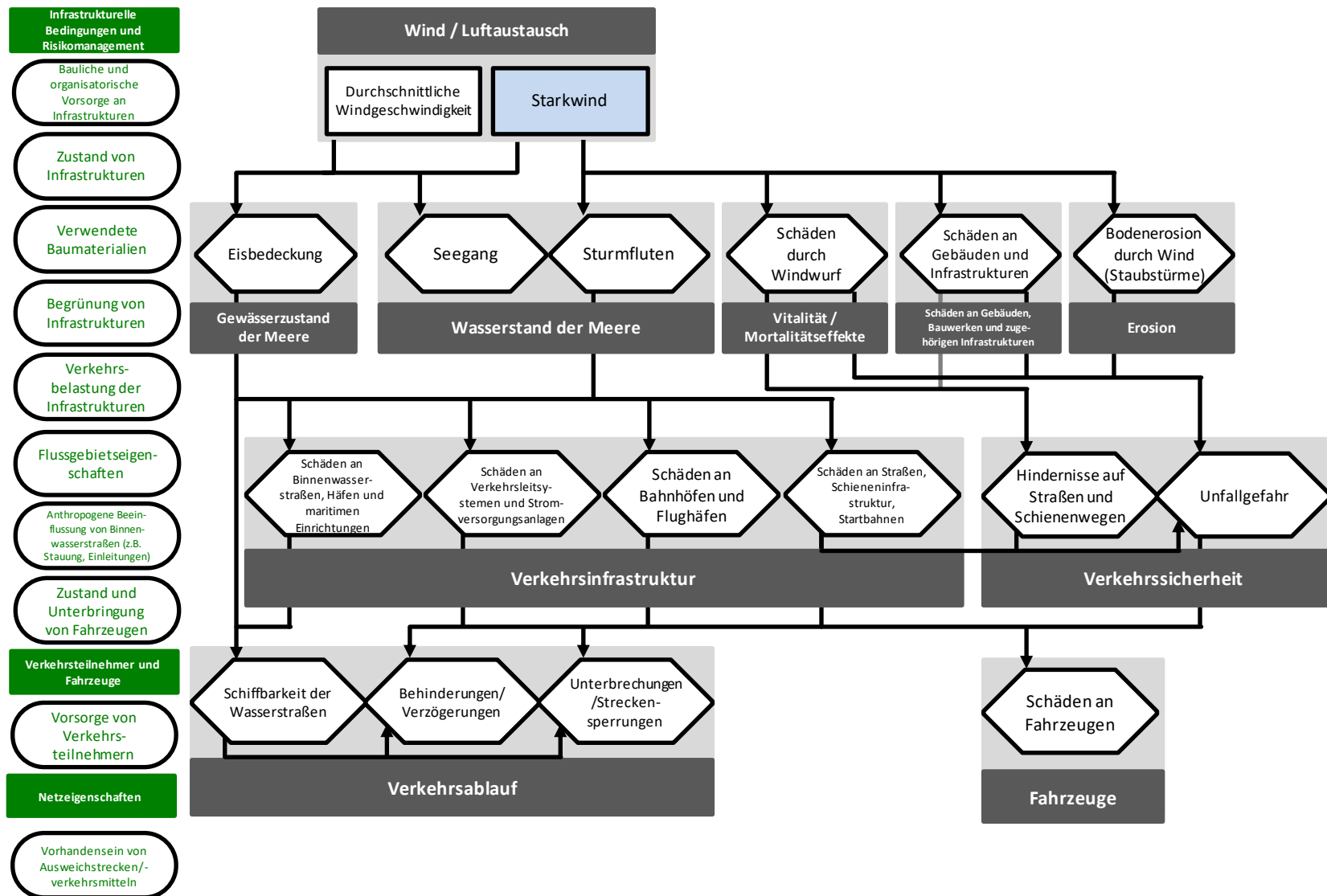


Abbildung 2-10 Allgemeines Schema der Wirkungskette „Starkwind“ aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, verändert nach Klimawirkungsketten der IMA Anpassung (UBA 2016).

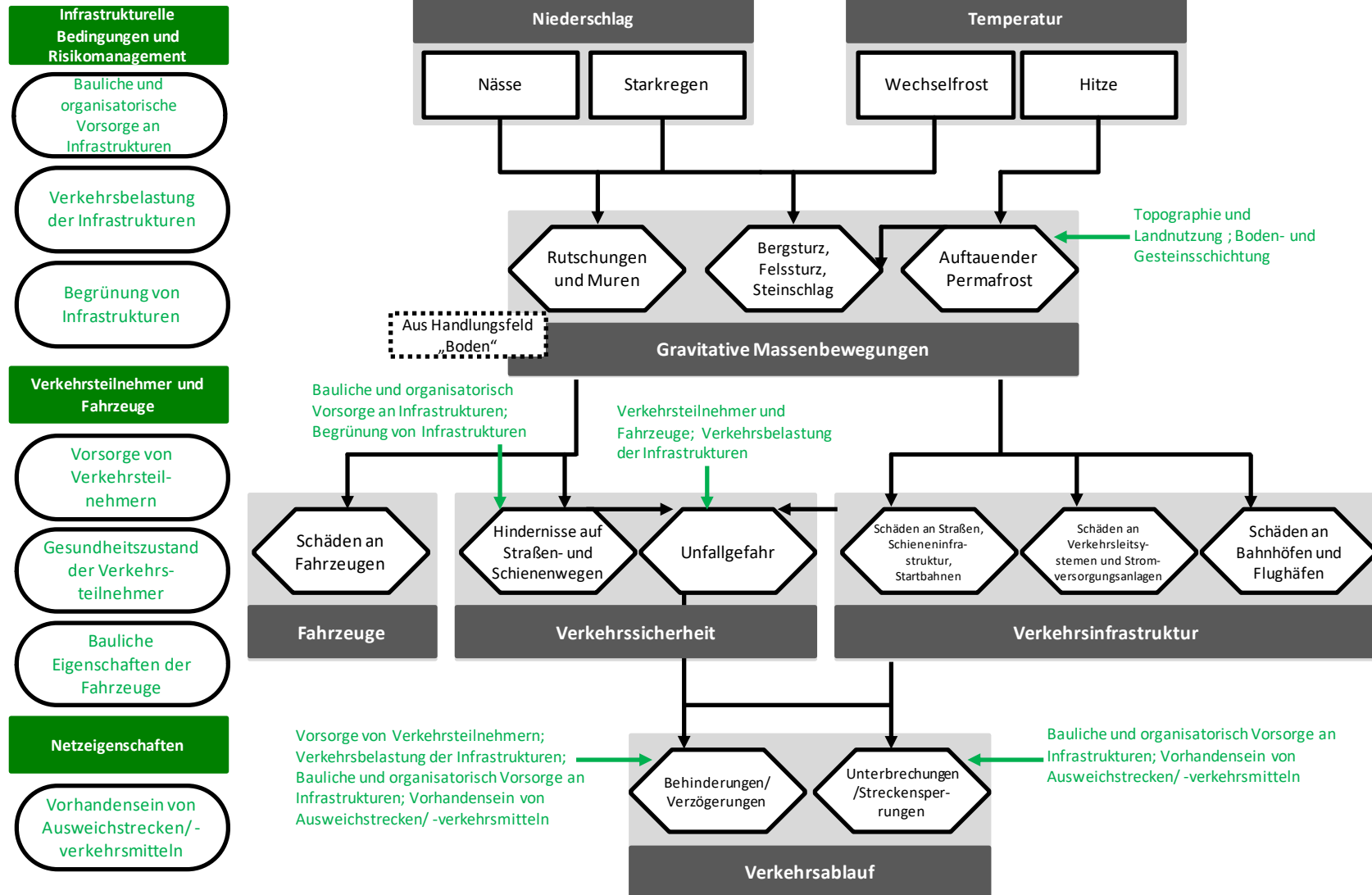


Abbildung 2-11 Allgemeines Schema der Wirkungskette „gravitative Massenbewegungen“ aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, verändert nach Klimawirkungsketten der IMA Anpassung (UBA 2016).

2.3.6 Wirkungsketten im Schwerpunktthema *Hangrutschungen*

Die für das Schwerpunktthema *Hangrutschungen* relevanten Wirkungsketten des Leitfadens werden in den beiden Handlungsfeldern „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Boden“ beschrieben. In beiden Handlungsfeldern werden jeweils die Wirkungsketten klimatischer Auslöser für gravitative Massenbewegungen dargestellt. Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ resultieren die Auswirkungen der Naturgefahr in der Bedeutung für den Verkehrsablauf. Allgemein lässt sich die Wirkungskette für gravitative Massenbewegungen auf die Verkehrsinfrastruktur von Schiene und Straße wie in Abbildung 2-11 illustriert darstellen. Entsprechende Erläuterungen zu den Wirkungsketten sind im Abschlussbericht des SP-105 *Hangrutschungen* nachzulesen (Rauthe et al. 2020).

2.4 Praktische Umsetzung der Klimawirkungsanalyse

2.4.1 Technische Umsetzung der Wirkungsketten

Um die Wirkung bestimmter klimatischer Einflüsse und Naturgefahren auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr in Deutschland bewerten zu können, müssen die für die betrachteten Wirkungsweisen erstellten Wirkungsketten (s. Abschnitt 2.3) mit Daten, Methoden und entsprechenden Modellwerkzeugen technisch umgesetzt werden. Nachfolgend sind die entsprechenden methodischen Ansätze, die für die Analyse der Klimawirkungen im BMVI-Expertenetzwerk herangezogen wurden, zusammengestellt.

SP-103 *Hochwassergefahren*

Zur Bewertung der potenziellen aktuellen und zukünftigen Gefährdung der Verkehrsträger durch Hochwasserereignisse wurden verschiedene Analysemethoden angewandt. Hochwasserstatistiken für den *Bezugszeitraum* und die Zukunftsprojektionen wurden nach dem in Abbildung 2-12 abgebildeten Schema zusammengestellt und extremwertstatistisch ausgewertet. Abbildung 2-13 zeigt, mit welchen Daten, Methoden und Modellwerkzeugen die Wirkungsweise Hochwasser Schiene/Straße (Hochwassergefahrenkarte) im Kontext der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie technisch umgesetzt wird. Die damit erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Die Modell- und Verfahrenskette einschließlich der verwendeten Ausgangsdatensätze für die technische Umsetzung der Wirkungsweise „HSW-Überschreitung“ bezüglich der Hochwasserbetroffenheit der Binnenwasserstraßen ist in Abbildung 2-14 zusammengestellt. Dieses Beispiel illustriert das Spektrum von Modellen, Methoden, Realdaten und Regelwerken, die zur technischen Umsetzung der Wirkungskette herangezogen wurden.

In Abbildung 2-15 wird das Bearbeitungsschema für die im Küstenbereich wichtige Wirkungsweise "Entwässerung an den Küsten" illustriert. Beispielhaft durchlaufen wurde das Schema für die Untersuchungen am NOK (s. Abschnitt 3.8). Abbildung 2-16 zeigt die mögliche technische Umsetzung der ebenfalls für den Küstenbereich relevanten Wirkungsweise „Sturmfluten“. Die hier vorgestellten Verfahren stellen somit eine Grundlage für eine mögliche Implementierung, z. B. innerhalb des DAS-Basisdienstes, dar.

Details und ausführliche Beschreibungen zur möglichen Umsetzung dieser der zur Bewertung von Hochwassergefahren herangezogenen Schemata sind im Schlussbericht des Schwerpunktes *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020) zusammengestellt.

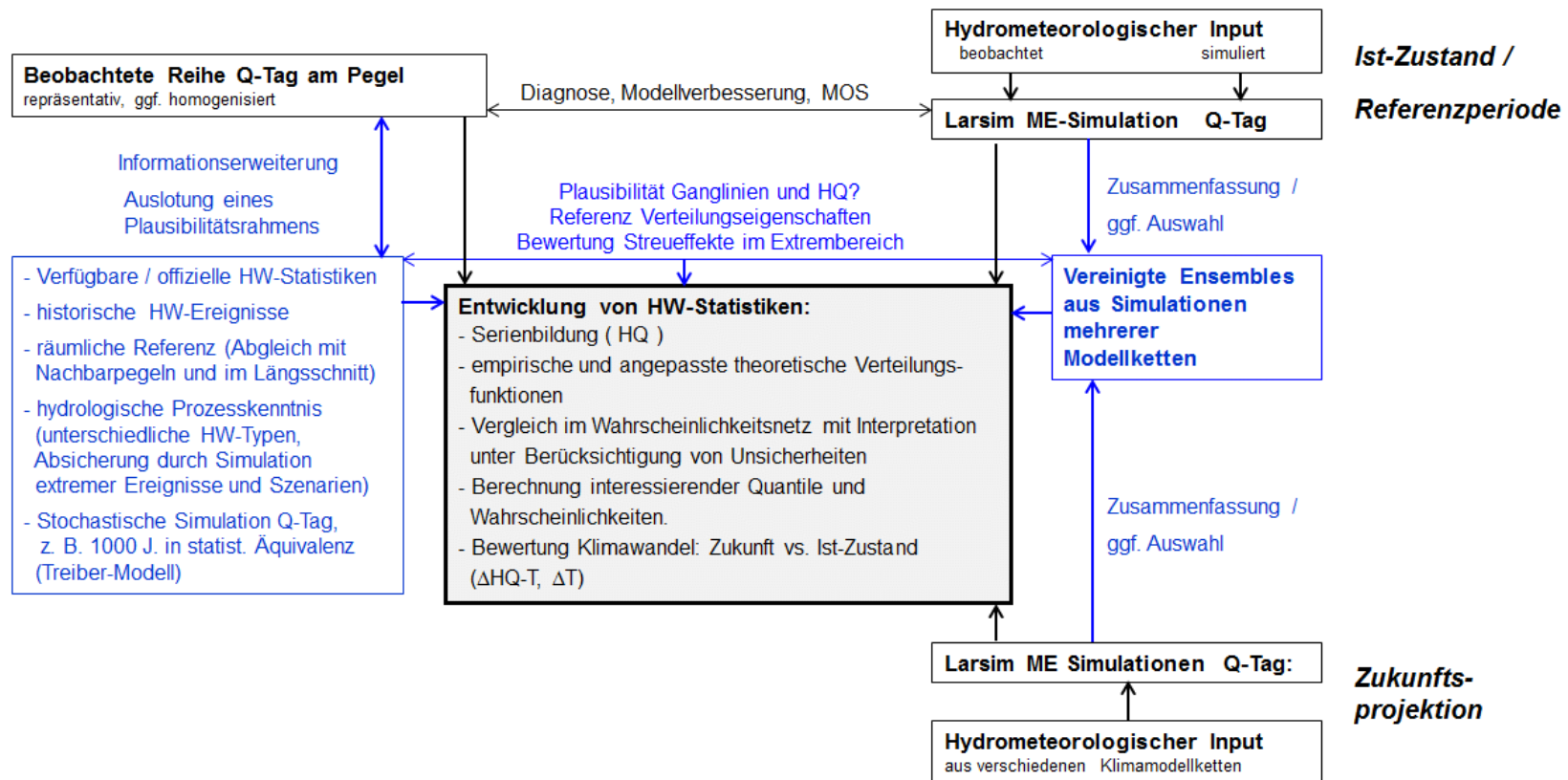


Abbildung 2-12: Schema zur Ableitung von Hochwasserstatistiken für Ist-Zustand und Zukunftsprojektionen. Q-Tag bezieht sich auf die täglichen Abflussmengen, HW auf Hochwasser und MOS bezeichnet „Model Output Statistics“ zur statistischen Nachbearbeitung des originalen Modelloutputs.

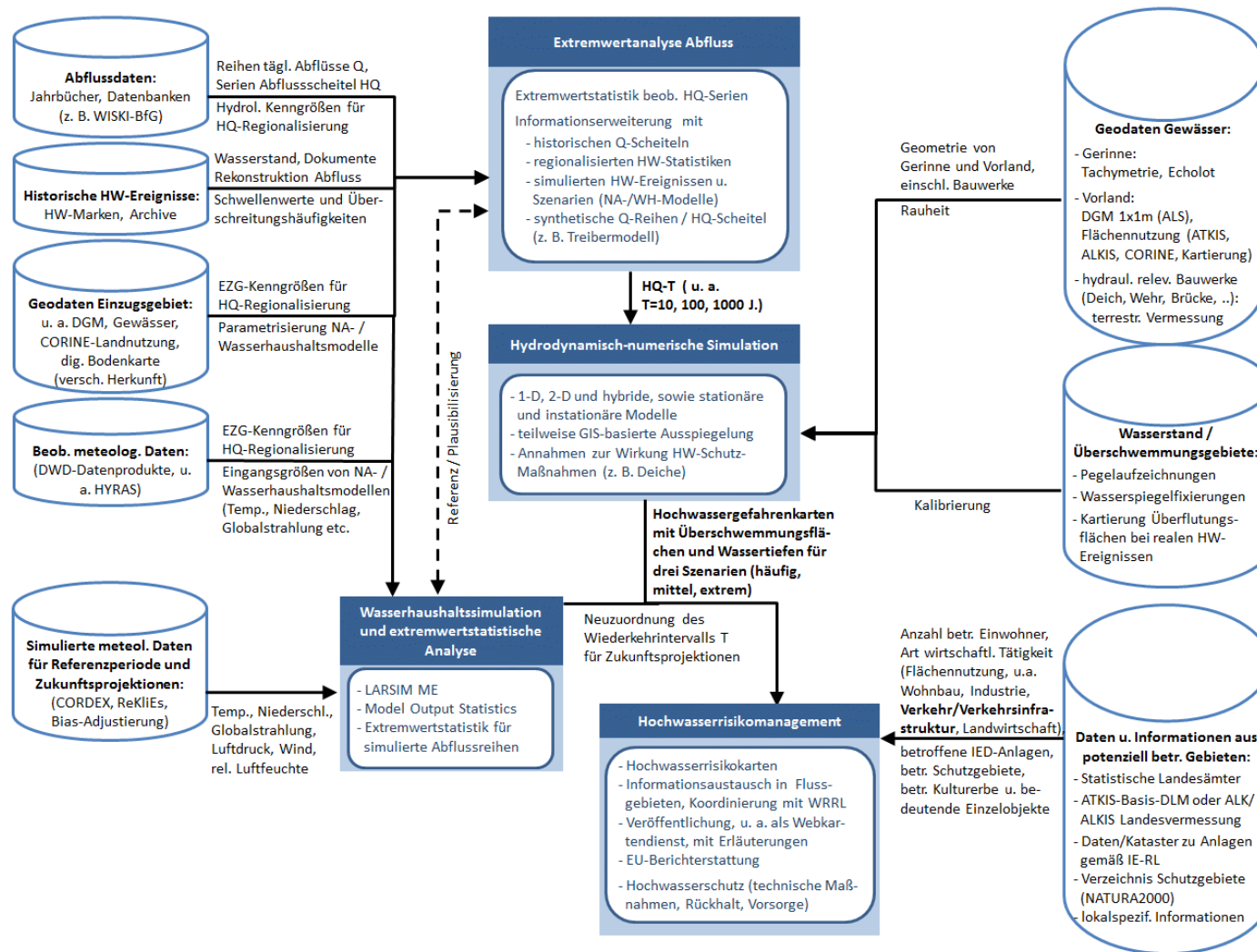


Abbildung 2-13: Schema zur technischen Umsetzung der Wirkungsweise Hochwasser Schiene/Straße (Hochwassergefahrenkarte) im Kontext der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der EU. Vergleiche auch LAWA (2018).

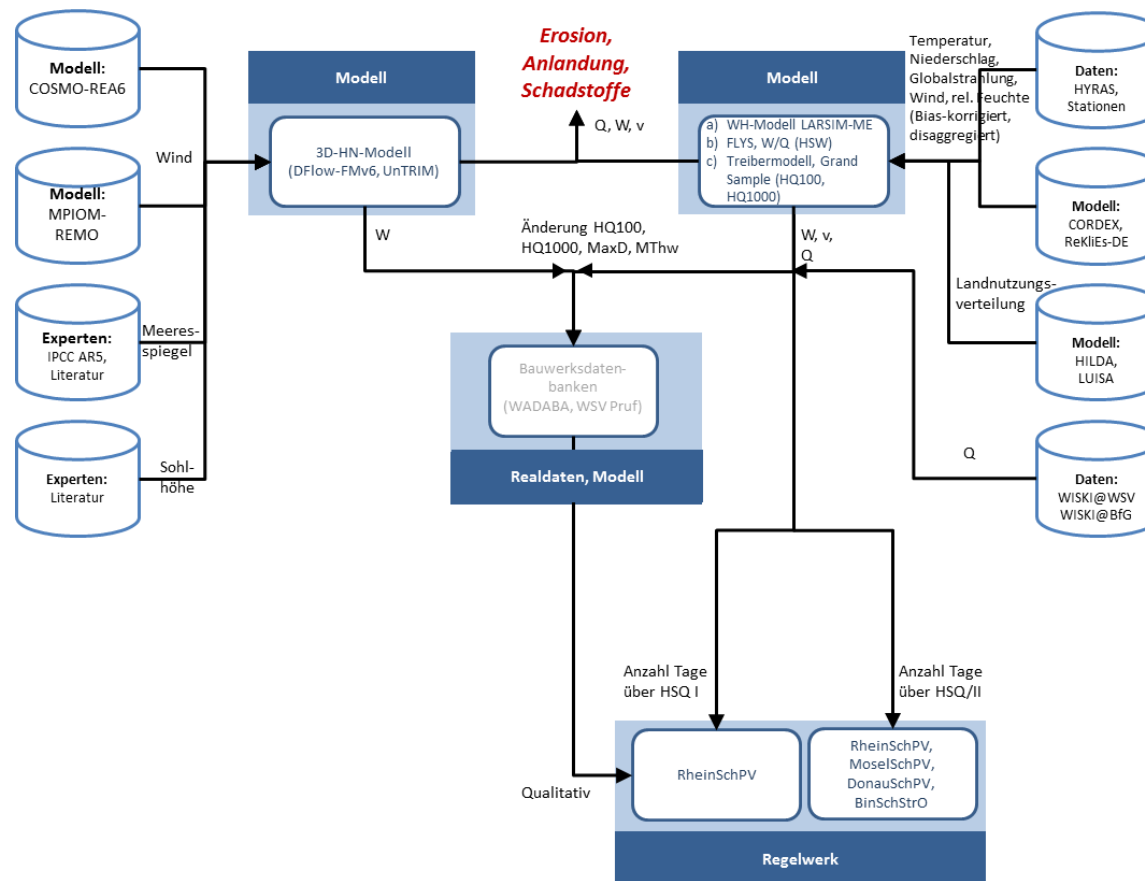


Abbildung 2-14: Schema der Modell- und Verfahrenskette zur Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

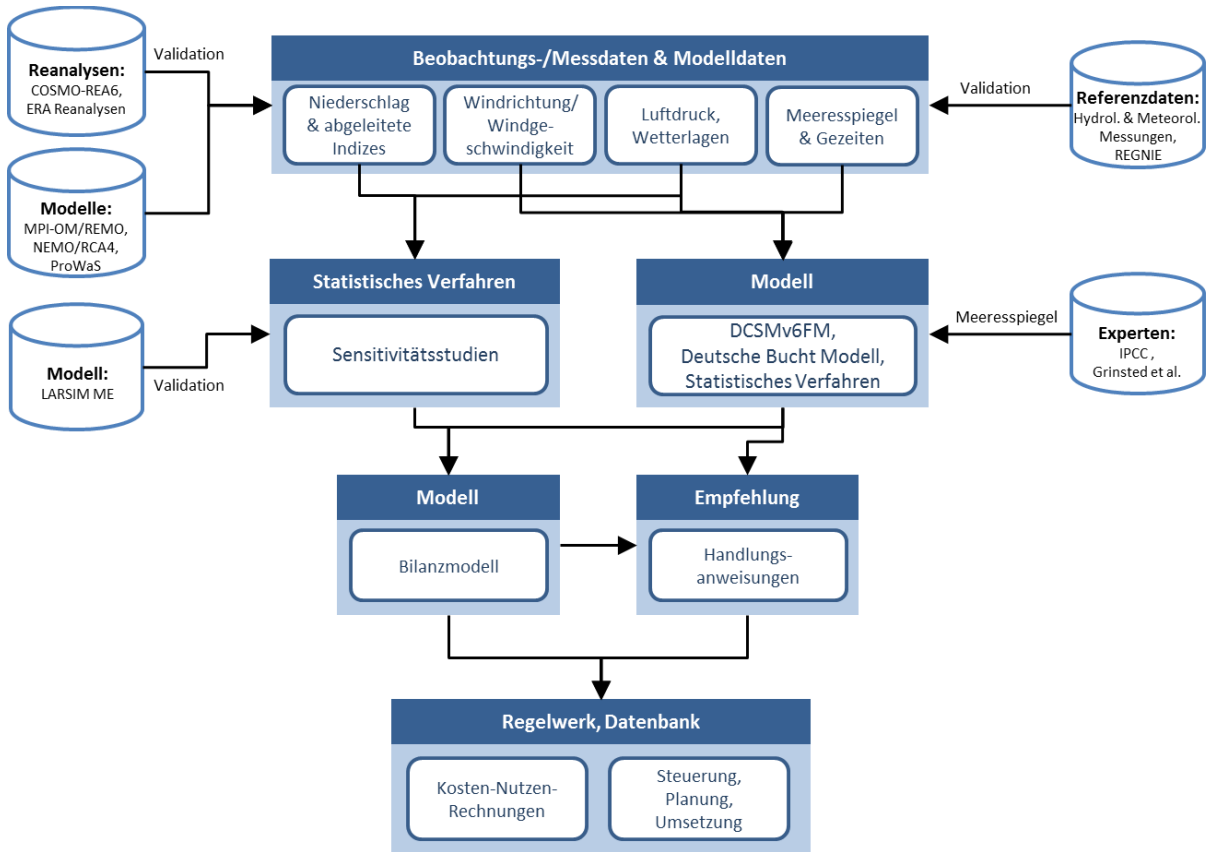


Abbildung 2-15: Mögliches Bearbeitungsschema der Wirkungsweise "Entwässerung an den Küsten".

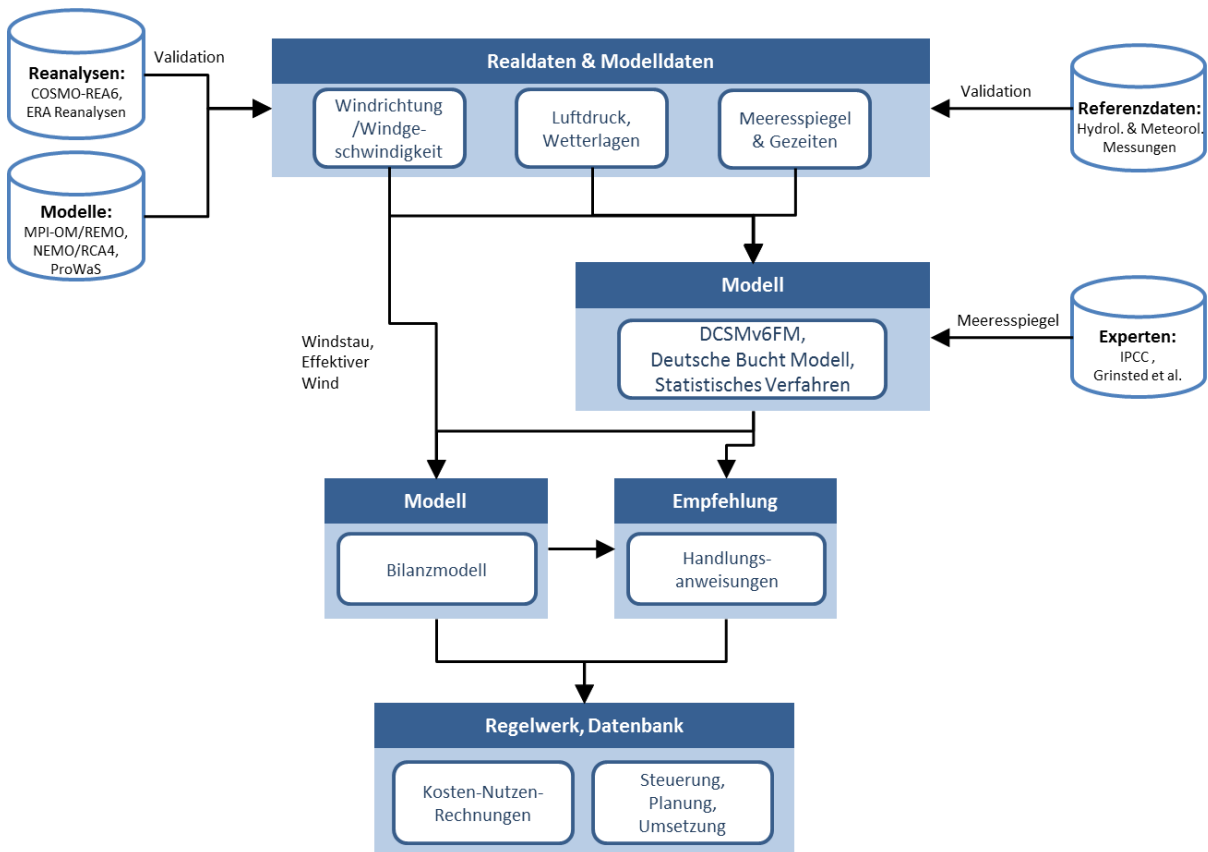


Abbildung 2-16: Mögliches Bearbeitungsschema der Wirkungsweise "Sturmflut".

SP-104 Sturmgefahren

Die Bewertung der Exposition des Verkehrssystems gegenüber Klimawirkungen durch Sturm wurde basierend auf Klimaindizes vorgenommen, die direkt aus Reanalysedatensätzen (COSMO-REA6), einem hochaufgelösten (2,8 km) COSMO-CLM-Lauf und Klimaprojektionsensembles für den Binnen- und Küstenbereich abgeleitet wurden. Da keine spezifischen Wirkungsmodelle oder Auswertemethoden zur Anwendung kamen, ist kein Schema zur technischen Umsetzung der Wirkungskette „Sturmgefahren“ erstellt worden. Details zu den verwendeten Indizes sind im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Sturmgefahren* beschrieben (Bott et al. 2020).

SP-105 Hangrutschungen

Für die mit gravitativen Massenbewegungen verbundenen Wirkungen für die Verkehrsträger Schiene und Straße sind keine spezifischen Umsetzungsschemata erstellt worden. Der verwendete ingenieurgeologische Ansatz wird im Abschnitt 3.4.2 erläutert. Die nachfolgende Einbeziehung des Klima(wandel)einflusses erfolgt über Klimaindikatoren, die aus dem Klimaprojektionsensemble für den Binnenbereich Deutschlands (Hänsel et al. 2020a) abgeleitet wurden. Die entsprechende Vorgehensweise wird in Abschnitt 3.4.3 sowie im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) beschrieben.

SP-106 Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit

Für die im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* betrachteten Wirkungsweisen wurden mehrere Schemata zur technischen Umsetzung erstellt. Für die behandelten mit der Hochwassergefährdung zusammenhängenden Aspekte wurden die gleichen Umsetzungsschemata verwendet, die bereits im Rahmen des Schwerpunktes *Hochwassergefahren* beschrieben wurden (Abbildung 2-12 bis Abbildung 2-14).

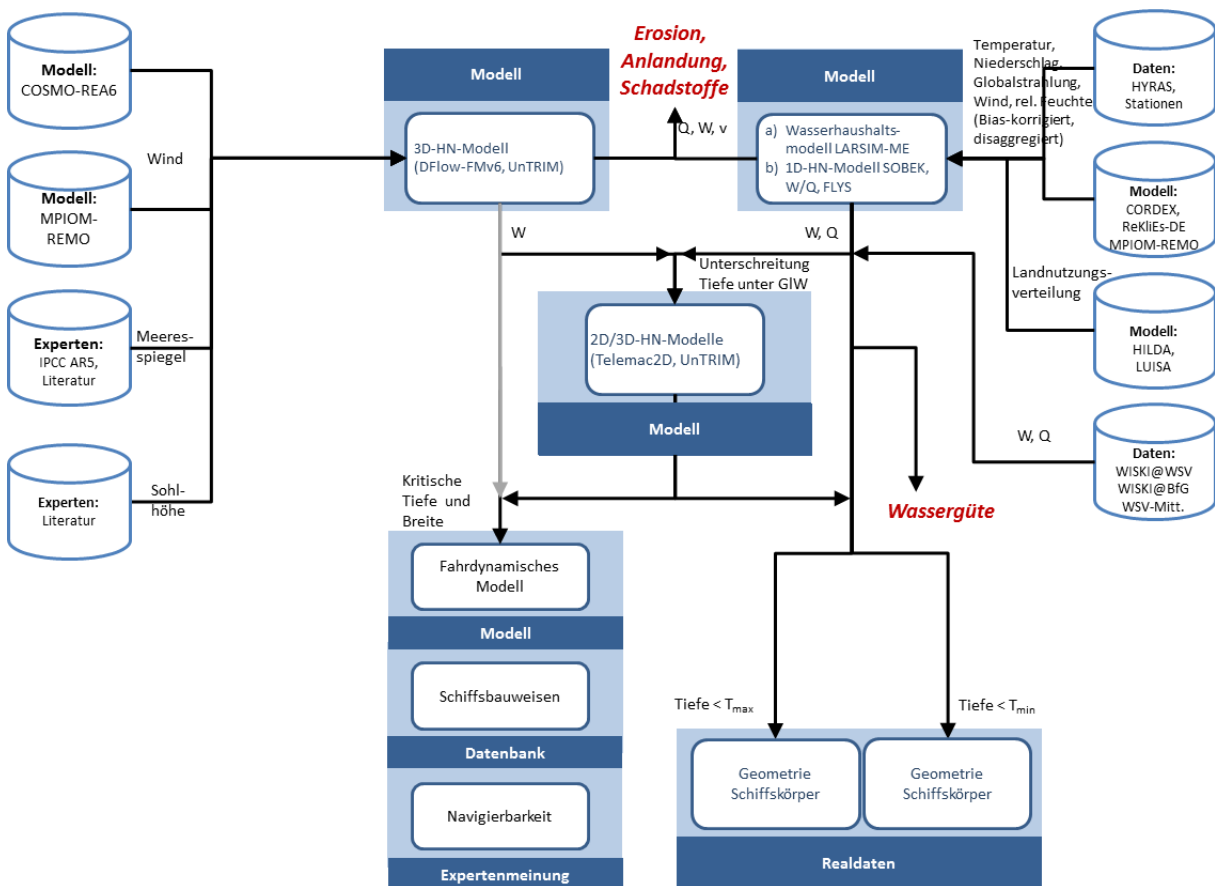


Abbildung 2-17: Schema der Modell- und Verfahrenskette zur Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung".

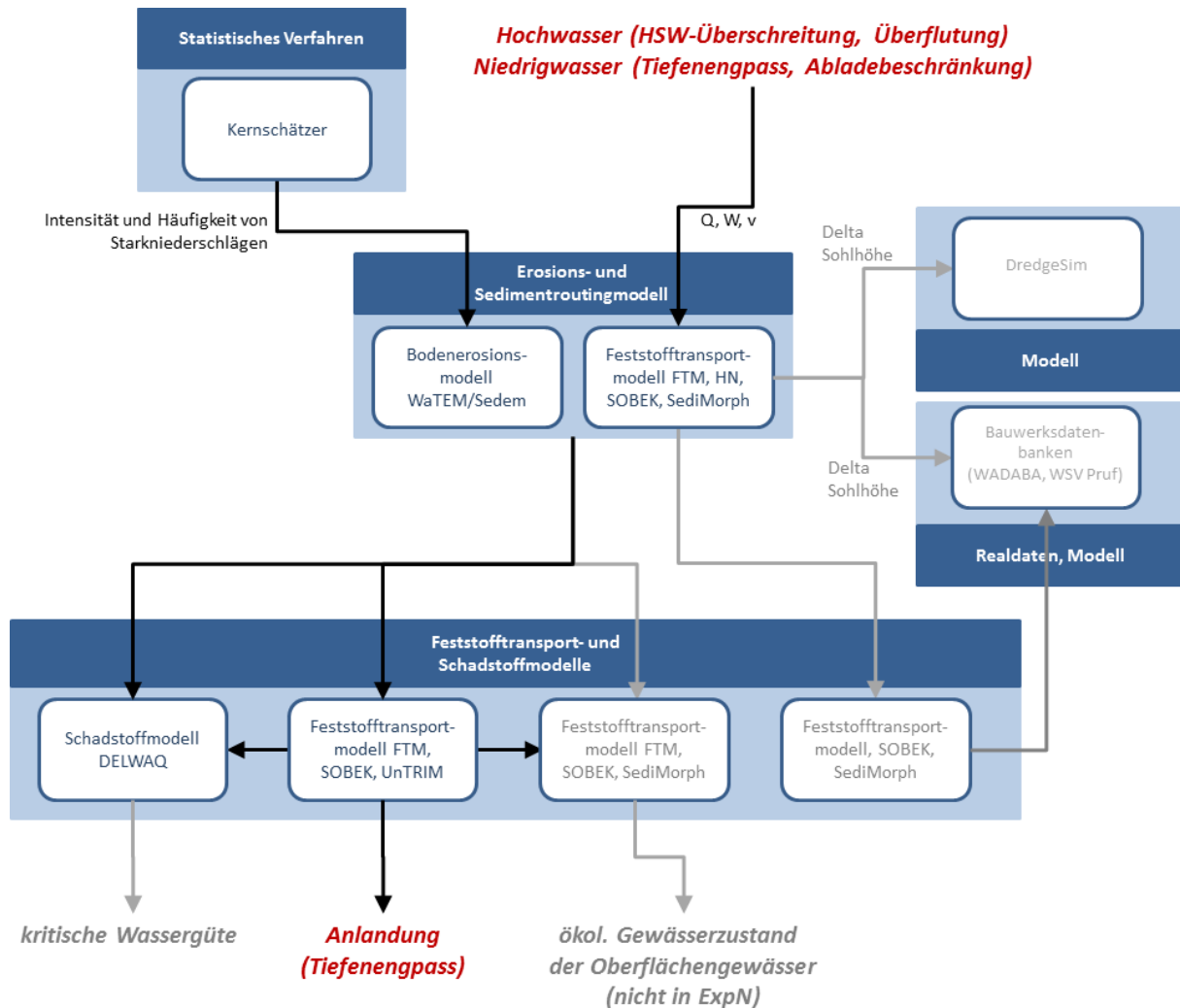


Abbildung 2-18: Schema der Modell- und Verfahrenskette zur Wirkungsebene "Erosion/Anlandung, Schadstoffe".

Mit Niedrigwassersituationen einhergehende Verkehrseinschränkungen auf den Binnenwasserstraßen gehören zu der Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" und wurden mittels des in Abbildung 2-17 gezeigten Schemas umgesetzt. Abbildung 2-18 illustriert das technische Umsetzungsschema für die Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" und Abbildung 2-19 jenes für die Wirkungsweise „Kritische Wassergüte“. Erläuterungen zu Details der technischen Umsetzung der jeweiligen Klimawirkungsanalysen finden sich im Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

2.4.2 Vereinbarungen zur Visualisierung der Analyseergebnisse mittels GIS

Mit dem Ziel, die im Themenfeld 1 erzeugten Geodaten und Kartenprodukte zu vereinheitlichen und den Datenaustausch zwischen den Behörden zu optimieren, wurde eine themenfeldumgreifende GIS-Arbeitsgruppe gegründet. In der Gruppe waren alle beteiligten Bundesoberbehörden vertreten. Ziel war Vereinbarungen zur Visualisierung der Klimawirkungsanalysen festzulegen. Außerdem erfolgten gemeinsame Beschaffungen von (verkehrsträgerspezifischen) Geodaten sowie die Klärung von Nutzungsbedingungen.

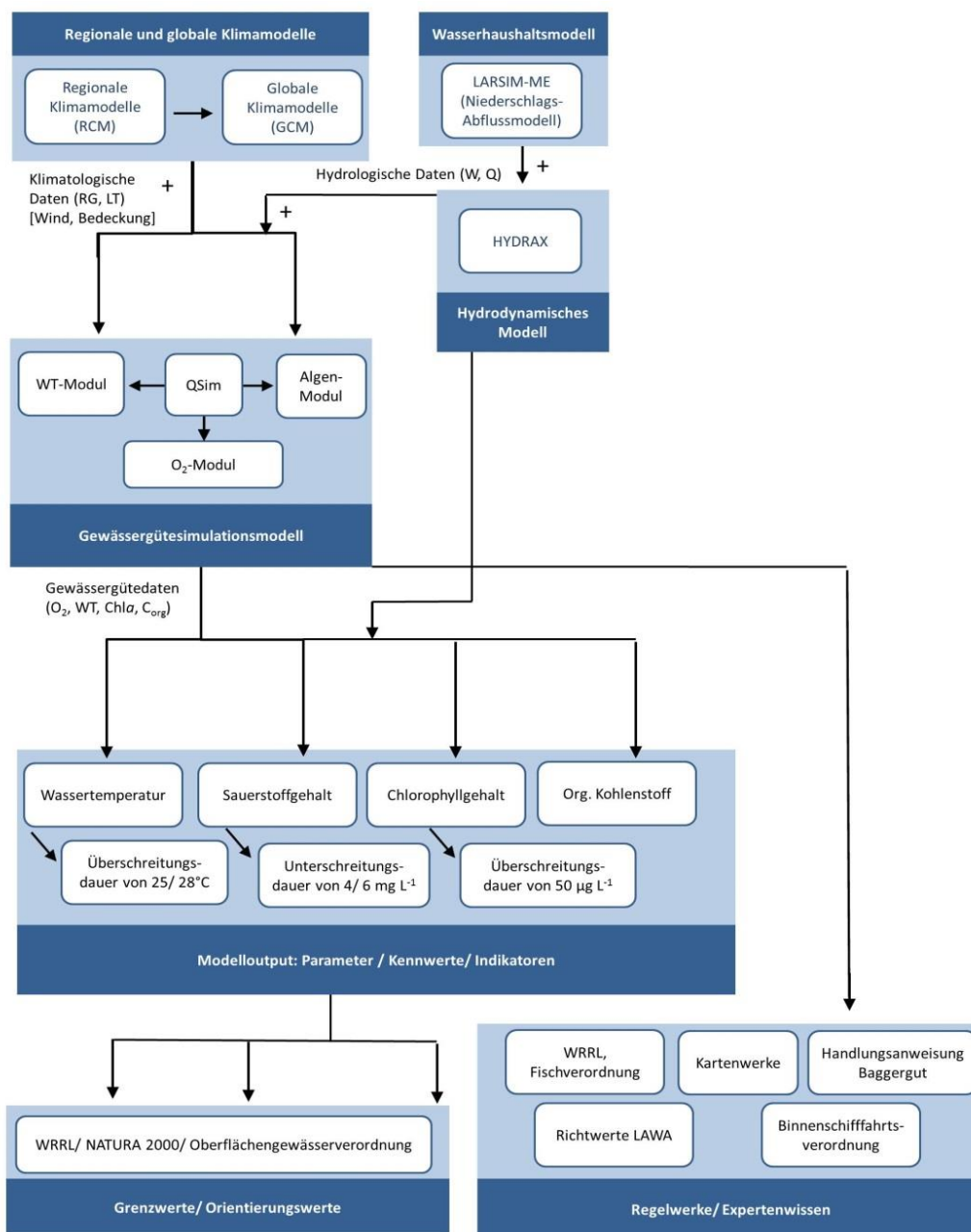


Abbildung 2-19: Schema der Modell- und Verfahrenskette „Kritische Wassergüte“ (Temperatur, Sauerstoff).

Folgende Vereinbarungen zur Visualisierung der Analyseergebnisse wurden in der GIS-Arbeitsgruppe getroffen:

- Erstellung von Kartenprodukten mit Esri ArcGIS 10.3
- Verwendung des Koordinatensystems ETRS/LCC Europe (EPSG:3034)
- Festlegung des Kartenausschnitts auf die Außengrenzen von Deutschland inkl. Seegebiete
- Festlegung einer möglichst fünfstufigen Farbskala (grün über gelb bis rot) zur Visualisierung der Exposition, Sensitivität und Kritikalität einzelner Klimawirkungen bzw. Gefährdungen für die entsprechenden Verkehrsträger
- eine Gefahrenhinweiskarte pro Verkehrsträger und Klimawirkung bzw. Gefährdung

Tabelle 2-4 gibt eine Übersicht der erstellten Produkte.

2.4.3 Übergabe von Daten, Analysen und Kartenprodukten aus SP-103 bis 106 an SP-102

Neben den in den Schwerpunktthemen SP-103 bis 106 entwickelten Grundlagen zur technischen Umsetzung der Klimawirkungsanalyse (s. Abschnitt 2.4.1) wurden von den vier gefahrenbezogenen Schwerpunktthemen eine Reihe konkreter Produkte an das integrierende Schwerpunktthema *Klimawirkungsanalyse* (SP-102) übergeben. In Tabelle 2-4 wird zusammengefasst, welches Schwerpunktthema welches Produkt in welcher Form (Daten, Auswertungen in Form von Tabellen oder Grafiken, GIS-Karten) für welche Region (deutschlandweit oder nur für bestimmte Fluss- oder Fokusgebiete) an den SP-102 übergeben hat. Zusätzlich zu den in dieser Tabelle zusammengestellten Daten, Analysen und Kartenprodukten wurden auch Anwendungsbeispiele aus den im Themenfeld 1 betrachteten Fokusgebieten in den SP-102 eingebracht. Dazu gehören beispielsweise die Ergebnisse der im Rahmen von SP-108 *Fokusgebiete Küsten* durchgeführten Fallstudie zum Nord-Ostsee-Kanal sowie Erkenntnisse aus der BBSR-Analyse zu verkehrlichen Auswirkungen einer Sturmflut. Diese Produkte können als Basis für übergreifende Analysen dienen (vgl. nachfolgende Abschnitte).

Tabelle 2-4: Übersicht der Zulieferungen aus den Schwerpunktthemen SP-103 bis 106 an das Schwerpunktthema *Klimawirkungsanalyse* (SP-102).

Lieferant	Produkt	Region	Aufbereitungsform
	Straßennetz für Bundesfernstraßen		
	Schienennetz	ganz Deutschland	GIS-Karte
	Bundeswasserstraßennetz		
SP-101/103	Diverse Niederschlags- und Starkregenindizes		GIS-fähige Daten
SP-103	Aktuelle Hochwassergefahrenkarte für drei Sturmflut- und Hochwasserszenarien („häufig“, „mittel“, „extrem“)	ganz Deutschland	GIS-Karten
SP-103	Verschnitt HWGK mit Schienen- bzw. Straßennetz zur Identifizierung betroffener Verkehrsnetze bei den drei Hochwasserszenarien		GIS-Karten
SP-103	Änderung des HQ-100 bei Flusshochwasser für <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher Szenarios</i>	Rhein & Donau, jeweils mit wichtigen Nebenflüssen	GIS-Karten bzw. Tabellen für Flussabschnitte
SP-103	Statistiken zu den veränderten Jährlichkeiten der vom heutigen HQ-100 betroffenen Schienen und Straßenanteile für <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher Szenarios</i>	Rhein	Tabellen & Tortendiagramme
SP-103/106	Anzahl der Tage mit HSW-Überschreitung für Gegenwart und für <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher Szenarios</i>	Rhein, Main & Donau	GIS-Karte für Mittelrhein (Vergangenheit), Längsschnitte
SP-106	Anzahl der Tage mit Überschreitung des hohen Schwellenwertes Q01 (Stellvertreter für HSQ) für Gegenwart und für <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher Szenarios</i>	alle Binnenschiff-fahrtsstraßen (ohne Oder und Kanäle)	GIS-Karte
SP-106	Anzahl der Tage mit Unterschreitung des niedrigen Schwellenwertes Q94.5 (Stellvertreter für GlQ bzw. RNQ)		GIS-Karte
SP-106	Anzahl der Tage mit Wassertemperaturen über hohen Schwellenwerten (25°C bzw. 28°C)	Rhein, Elbe	GIS-Karte, Längsschnitte
SP-104	Verschnitt des Digitalen Basis-Landschaftsmodells mit Schienen- bzw. Straßennetz zur Identifizierung potenziell durch Sturmwurf betroffener Streckenabschnitte	ganz Deutschland	GIS-Karte
SP-105	Hinweiskarte bezüglich gravitativer Massenbewegungen entlang des Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetzes	ganz Deutschland	GIS-Karte

2.5 Adressatengruppen der Wirkungsabschätzungen

Die Wirkungsanalysen innerhalb des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zielen auf die verkehrswirtschaftliche Praxis. Daher sollen die Aussagen ausgehend von naturwissenschaftlichen Größen und Zusammenhängen nach Möglichkeit auf Indikatoren heruntergebrochen werden, die für die Ebene der Entscheider und Praktiker relevant sind. Insgesamt sind folgende Adressatengruppen unserer Daten, Methoden und Ergebnisse zu unterscheiden, die jeweils mittelbar oder unmittelbar durch die im Themenfeld 1 adressierten Wirkungen betroffen sind.

- a) **"Nutzer" der Verkehrsinfrastruktur:** Hierzu zählen Personen und Unternehmen (Einzelfahrer, Speditionen, Verlader o. Ä.), die durch Einschränkungen oder Ausfall der Verkehrsinfrastruktur unmittelbar betroffen sind. Relevante Aspekte betreffen u. a. die *Themenfelder* "Verkehrsablauf" und "Verkehrssicherheit".
- b) **"Betreiber" der Verkehrsinfrastruktur:** Für die BWaStr sind dies die Institutionen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, deren Managementmaßnahmen (z. B. Unterhaltungsaufwand) durch Änderungen der Abflussverhältnisse, des Meeresspiegels oder der Wassergüte/Schadstoffdynamik beeinflusst werden. Für die Betreiber (z. B. DB Netz für die Schieneninfrastruktur) ist u. a. das *Themenfeld* "Verkehrsinfrastruktur" von hoher Bedeutung.
- c) **Adressatengruppe "Umwelt"** im Bereich der BWaStr. In dieser Gruppe sind Flora, Fauna und der allgemeine Zustand der Umwelt im Bereich der BWaStr subsumiert, die unter veränderten Rahmenbedingungen mehr oder weniger unter Stress geraten, bzw. die sich zum Schlechteren oder Besseren verändern könnten. Vor dem Hintergrund bestehender Richtlinien (u. a. Europäische Wasserrahmenrichtlinie, EU-WRRL) fallen diese Aspekte eigentlich ebenfalls in den Zuständigkeitsbereich der "Betreiber" (siehe b), adressieren aber darüber hinaus auch weitere Akteure im Bereich des Umweltmanagements. Sie werden daher vorerst separat ausgewiesen.
- d) **BMVI:** Übergeordnet zählt neben den operativen Einheiten der Betreiber der Verkehrsinfrastruktur auch das BMVI zur Adressatengruppe der Klimawirkungsanalysen im BMVI-Expertenetzwerk.

3 Expositionsanalyse

- Die Verkehrsinfrastruktur ist bereits heute von meteorologischen und hydrologischen/hydraulischen Einflüssen betroffen. Die Zukunftsprojektionen zeigen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine Zunahme der potenziellen Gefährdung durch Hochwasser, gravitative Massenbewegungen und Niedrigwasser. Auch der Betrieb des Nord-Ostsee-Kanals und wichtige Wassergüteparameter werden negativ beeinflusst. Für die Bewertung der zukünftigen Exposition gegenüber Stürmen liegen keine robusten Klimaänderungssignale vor.
- Einfluss des Klimaszenarios: Die Exposition des Verkehrssystems gegenüber den betrachteten Gefahren nimmt – mit gewissen Schwankungen aufgrund der natürlichen (multi-dekadischen) Variabilität – generell zum Ende des 21. Jahrhunderts zu. Die Annahme des nur durch rasche und umfassende internationale Klimaschutzbemühungen zu erreichenden *Klimaschutzszenarios* oder des *moderateren Szenarios* führt zu deutlich geringeren Anstiegen der Exposition bis hin zur Bewahrung der Status-Quo-Bedingungen.
- Flusshochwasser: Bundesweit liegen aktuell rund 2 % des Bundesfernstraßen- und etwa 1 % des Schienennetzes im Überschwemmungsbereich eines „mittleren Hochwasserszenarios“, das sich statistisch ca. alle 100 Jahre ereignet; beim „extremen“ Hochwasserszenario sind es jeweils knapp 8 % des Streckennetzes. 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 ein heute ca. alle 100 Jahre auftretendes Ereignis in Zukunft alle 20 bis 50 Jahre auftreten. Zur Bewertung der tatsächlichen Gefährdung der Schienen- und Straßenbereiche, welche u. a. von deren Höhenlage abhängt, sind weitere detailliertere Daten und Analysen erforderlich.
- 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 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.
- Niedrigwasser: Die Erkenntnisse aus 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. So kann sich die Zahl der Tage unter dem Niedrigwasserschwellenwert GIQ am Pegel Duisburg-Ruhrort in der *fernen Zukunft* verdoppeln (zentraler Schätzer für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*). Für den Fall einer extremen Schätzung (ober Bandbreite des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*) muss über neue Managementkonzepte nachgedacht werden, um die Leistungsfähigkeit des Rheins in diesem Bereich zu erhalten.
- Sturmgefährdung: Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundes schienennetzes durch bewaldetes Gebiet. Aus den Klimaprojektionsdaten ist keine klare Veränderung in der Gefährdung des Landverkehrs durch Stürme und Windböen erkennbar, weshalb die Bewertung des Anpassungsbedarfs auf der aktuellen räumlichen Differenzierung der Sturmgefährdung über Deutschland basieren kann.

- **Hangrutschungen:** Unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* ist von einer Zunahme der potentiell durch gravitative Massenbewegungen gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte auszugehen. In der *nahen Zukunft* erhöht sich der Anteil des gefährdeten Bundesfernstraßen- (von 5 % im *Bezugszeitraum*) und Bundesschienenetzes (von 6 % im *Bezugszeitraum*) laut Modell um jeweils knapp 1 Prozentpunkt und in der *fernen Zukunft* um jeweils rund 2 Prozentpunkte.
- **Wassergüte:** Kritische Wassertemperaturschwellenwerte ($> 25\text{ °C}$ bzw. $> 28\text{ °C}$) werden in der *fernen Zukunft* in Rhein und Elbe um ein Vielfaches häufiger überschritten als im *Bezugszeitraum*. Geringere Phytoplanktondichten im Spätsommer und Herbst sind möglich, eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration ist zu erwarten. In Kombination könnten sich besonders die erhöhten Wassertemperaturen erheblich auf den Stress und die Fitness von Wassertieren auswirken und die Mortalität erhöhen.
- **Seeschiffahrtstraßen** 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 in die Ästuarie. Zudem führt er zu einer Verschiebung von Brackwasser- und Trübungszone nach stromauf. Neben dem Meeresspiegelanstieg können langanhaltende niedrige Oberwasserabflusssituationen 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.
- Am **Nord-Ostsee-Kanal (NOK)** werden durch den Meeresspiegelanstieg (*Weiter-nie-bisher-Szenario*) und das häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee am Ende des Jahrhunderts verkehrlich relevante angespannte Entwässerungssituationen häufiger auftreten als heute.

3.1 Einleitung

Der Baustein Expositionsanalyse innerhalb der Klimawirkungsanalyse erlaubt die Identifikation räumlicher Schwerpunkte des Wandels. Generell wirkt sich der Klimawandel über veränderte Niederschlagsmuster und -mengen, steigende Lufttemperaturen und veränderte Strahlungswerte und Windfelder sowie den Meeresspiegelanstieg auf die Verkehrssysteme in Deutschland aus. In den Wasserstraßen sind hohe Wasserstände, niedrige Wasserstände sowie Änderungen der Sedimentflüsse und auch der Wassergüte die Folge und können zu Beeinträchtigungen des Wasserstraßenverkehrs und des -managements führen. Außerdem können Hochwasser, Sturm und gravitative Massenbewegungen den Verkehr auf Schiene und Straße beeinträchtigen. Die Beeinträchtigung beschränkt sich dabei nicht nur auf die Dauer des meteorologischen bzw. (boden-)hydrologischen Ereignisses selbst. Auch die Beseitigung von Schäden kann erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Die Schadensbilder sind vielfältig und hängen vom spezifischen Zusammenwirken von klimatischem (oder hydrologischem) Einfluss und Objekteigenschaften (Sensitivität aufgrund von Bemessung und Zustand; s. a. Kapitel 1 zur Sensitivitätsanalyse) 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.

Bei der Betrachtung der Klimawirkungen auf Wasserstraßen kommt hinzu, dass diese nicht nur Verkehrsträger sind, sondern auch Natur- und Lebensraum. Außerdem wird das Wasser von Wasserstraßen in viel-

fältiger 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 (z. B. Wassertemperatur) dargestellt. Ausführlichere Darstellungen zu den zukünftig zu erwartenden Änderungen der meteorologischen und hydrologischen/hydraulischen Einflussgrößen sind in den Schlussberichten der Schwerpunkte *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) und *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) nachzulesen.

3.2 Hochwasser

3.2.1 Grundlagen

Der Klimawandel wirkt sich über Veränderungen des Wasserhaushaltes (Binnenbereich), des Meeresspiegels (Küstenbereich) und veränderte atmosphärische Zirkulationsmuster (Binnen- und Küstenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen – Flusshochwasser und Tidehochwasser/Sturmfluten – aus. Werden gewisse Schwellenwerte überschritten, können Verkehre auf Straße, Schiene und Wasserstraße beeinträchtigt werden. Schäden an der Infrastruktur von Straße und Schiene sowie damit verbundene weitreichende Folgen für die Verkehrsströme sind möglich. 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 Brückendurchfahrts Höhen (Aspekt der „Sensitivität“ i. S. der Klimawirkungsanalyse) ausschlaggebend für die Ausweisung eines HSW (vgl. Abschnitt 4.2.3). Ferner verlieren verschiedene Wasserbauwerke jenseits gewisser Wasserstände ihre Funktion bzw. können beschädigt werden. In der Regel sind die zu berücksichtigenden Schwellenwerte für Schiene und Straße höher als für die Wasserstraße, sodass die Schifffahrt häufiger von Hochwasser betroffen ist als der landseitige Verkehr⁷.

Um Hinweise auf die derzeitige Exposition gegenüber Hochwasser zu erhalten, wurde auf die Hochwassergefahrenkarten (im Folgenden „HWGK“) der Bundesländer zurückgegriffen. Abgesehen von dem Vorteil, dass diese Karten bundesweit vorliegen, setzt das BMVI-Expertenetzwerk bewusst auf diese Grundlage, um eine mit anderen wichtigen Akteuren (u. a. den Bundesländern) kohärente Perspektive auf die Thematik „Hochwasser“ einzunehmen. Auf dieser Grundlage können Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes, die im Einflussbereich unterschiedlicher Flusshochwasser- und Sturmflutszenarien („häufig“, „mittel“, „selten/extrem“) liegen, identifiziert werden.

Hochwasser der einzige im BMVI-Expertenetzwerk intensiver untersuchter klimatische Einfluss, welcher potenziell alle drei betrachteten Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße in relevantem Umfang betreffen kann. Hintergründe und Einzelheiten zur Bewertung der Hochwassereexposition des Verkehrssystems, die über die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Analysen und Auswertung hinausgehen, finden sich in den Berichten der Schwerpunkte *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020) und *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

3.2.2 Exposition von Straße und Schiene im Binnenbereich – Hochwassergefahrenkarten

Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 zeigen exemplarisch Ausschnitte der basierend auf den HWGK der Bundesländer zusammengestellten bundesweiten Hinweiskarte Hochwasser für das mittlere und extreme Hochwasserszenario. Das „mittlere“ Szenario hat ein statistisches Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ₁₀₀

⁷ Die Häufigkeit ist hierbei nicht mit der Dauer einer Beeinträchtigung gleichzusetzen. Dabei wäre weiterhin zu berücksichtigen, dass die Infrastrukturen des landgebundenen Verkehrs im Hochwasserfall (i. d. R. in größerem Umfang als die Wasserstraßeninfrastruktur) Schaden nehmen können. Somit wären den reinen Ereignisdauern auch Wiederherstellungszeiten hinzuzurechnen. Hierzu sind jedoch keine begründeten Szenarienaussagen möglich.

bzw. HW_{100}), 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 hier 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 hierbei 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. Für eine Bewertung der Sensitivität der potenziell exponierten Streckenabschnitte wären vertiefende Untersuchungen anhand detaillierter Streckendaten erforderlich (exakte Höhen- und Wasserspiegellagen etc.), die in der aktuellen Phase des BMVI-Expertenetzwerks nicht zugänglich waren. Zudem ist die Einbeziehung von Katastropheneinsatzplänen o. ä. zu prüfen. Die Folgen von Verkehrseinschränkungen in diesen Bereichen 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-Expertenetzwerks nicht möglich⁸. Um einen Eindruck der zukünftigen Exposition zu erhalten, wurden auf Basis projizierter Hochwasserabflüsse Änderungen der mit den genannten Hochwasserszenarien verknüpften Abflüsse HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} (stellvertretend für die Hochwasserszenarien „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 Abflusswerten für HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} aus, welche im Zusammenhang mit den HWGK von der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins publiziert wurden (Brahmer et al. 2015, IKS 2014). Es wurden eigene beobachtungs-basierte extremwertstatistische und hydrologische Analysen, verschiedene hochwasserbezogene Verbesserungen des hydrologischen Modells, eine speziell auf Hochwasser bezogene Plausibilitätsprüfung der Klimamodell-daten sowie eine Bias-Adjustierung der hydrologischen Daten durchgeführt. So konnte die Kohärenz zwischen den publizierten Abflusswerten der Hochwasserszenarien und den Simulationsdaten bestmöglich gewährleistet und die aus den eigenen Simulationen abgeleiteten Hochwasserstatistiken abgesichert werden.

Im Ergebnis liegen Aussagen zu veränderten Hochwasserabflüssen und Wiederkehrintervallen eines heutigen HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000} für das *Weiter-nie-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 allorts 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 (multi-dekadischen) Variabilität im Bereich der Abflussextrême. 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 hier sowohl regional (Teileinzugsgebiete) als auch zeitlich (dekadische Variabilität) z. T. deutliche Unterschiede bestehen.

⁸ Die Erstellung der Hochwassergefahrenkarten liegt im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer und erfordert flächendeckende hoch detaillierte Daten und Modelle sowie einen deutlich erweiterten Finanz- und Zeitrahmen.

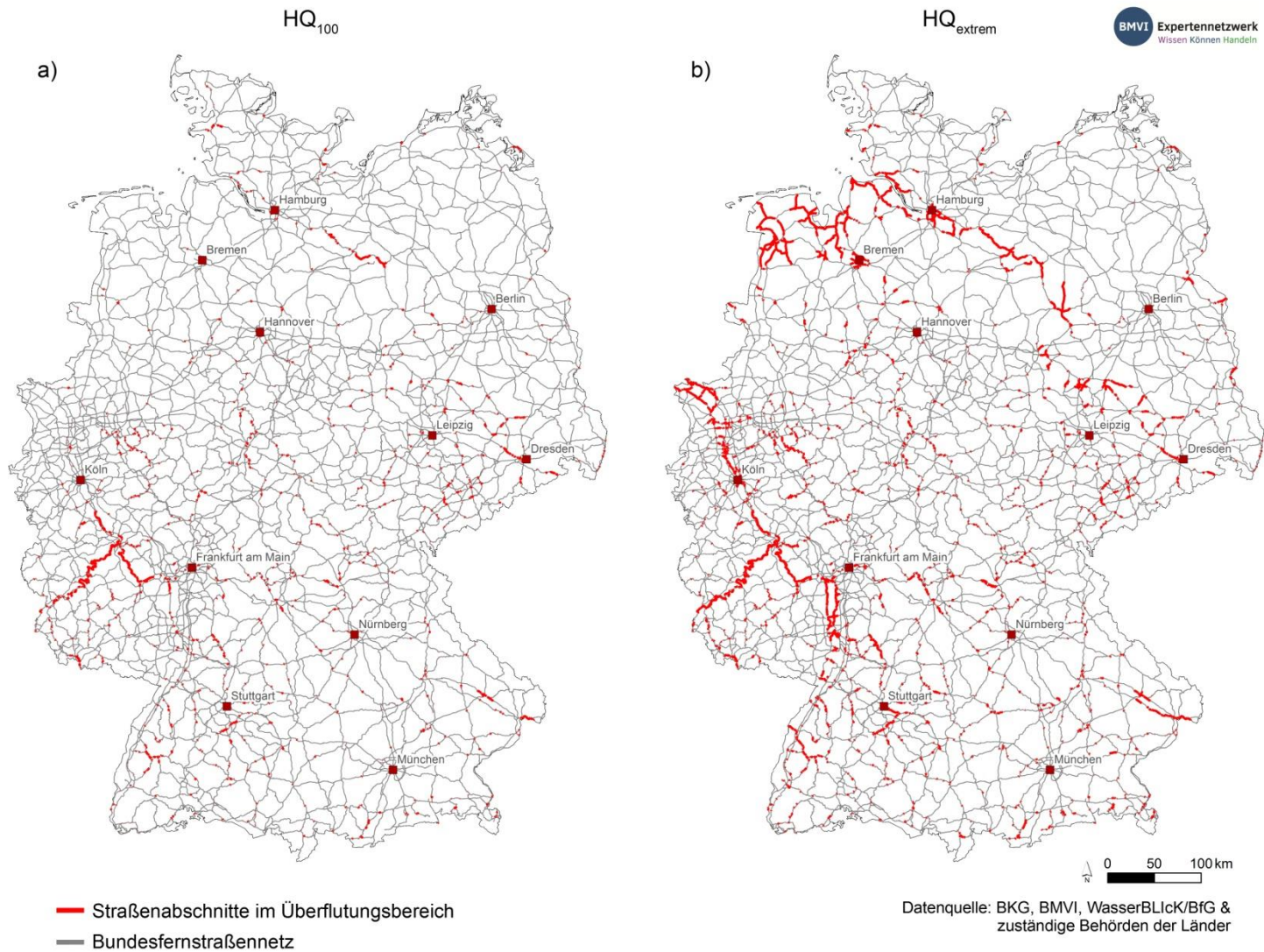


Abbildung 3-1: Abschnitte des Bundesfernstraßennetzes, die (zweidimensional gesehen) im Bereich der potenziellen Überflutungsflächen eines a) „mittleren“ bzw. b) „extremen“ Hochwasser- und Sturmflutszenarios liegen (jeweils rot hervorgehoben).

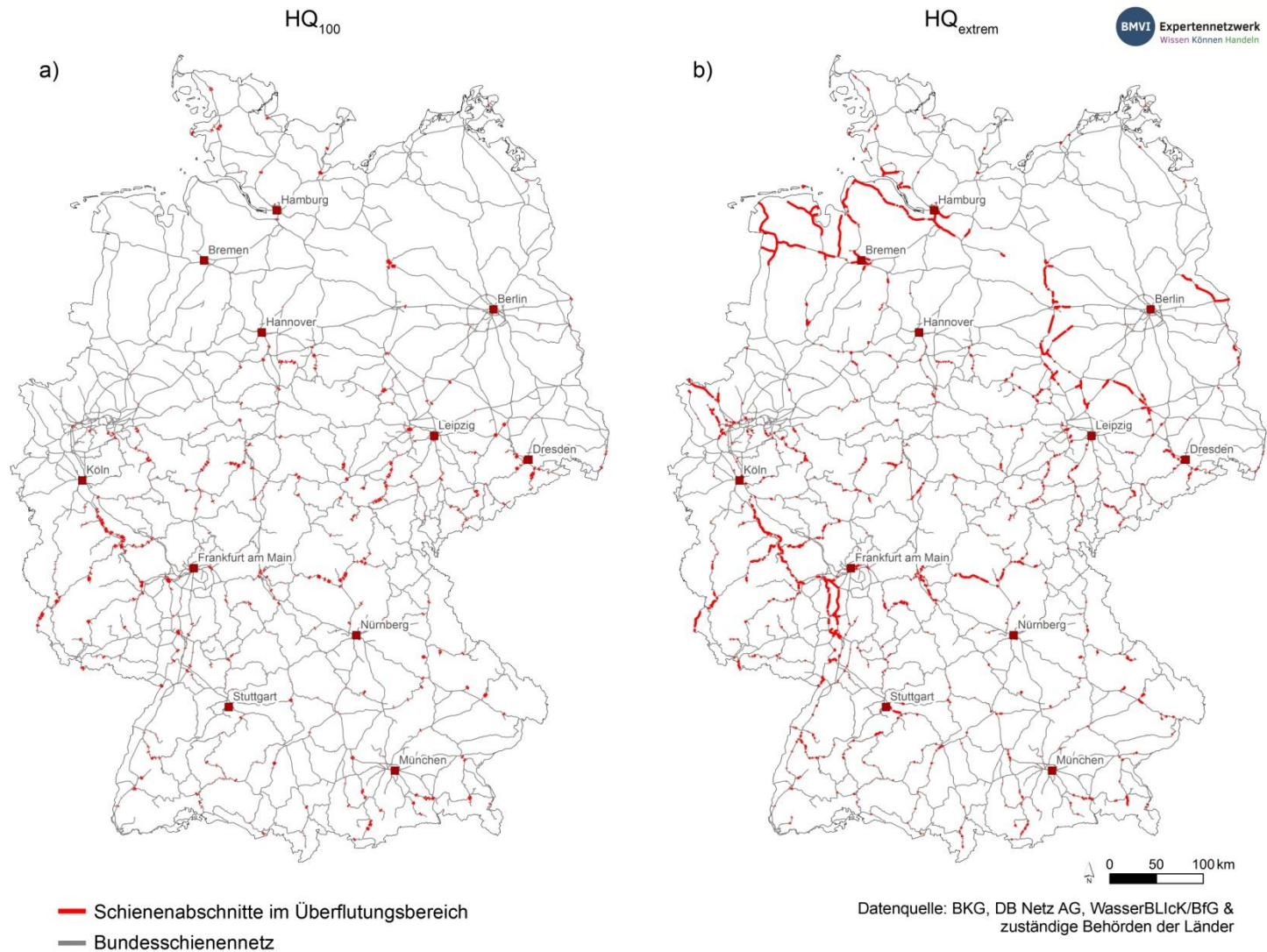


Abbildung 3-2: Abschnitte des Bundesschiennetzes, die (zweidimensional gesehen) im Bereich der potenziellen Überflutungsflächen eines a) „mittleren“ bzw. b) „extremen“ Hochwasser- und Sturmflutszenarios liegen (jeweils rot hervorgehoben).

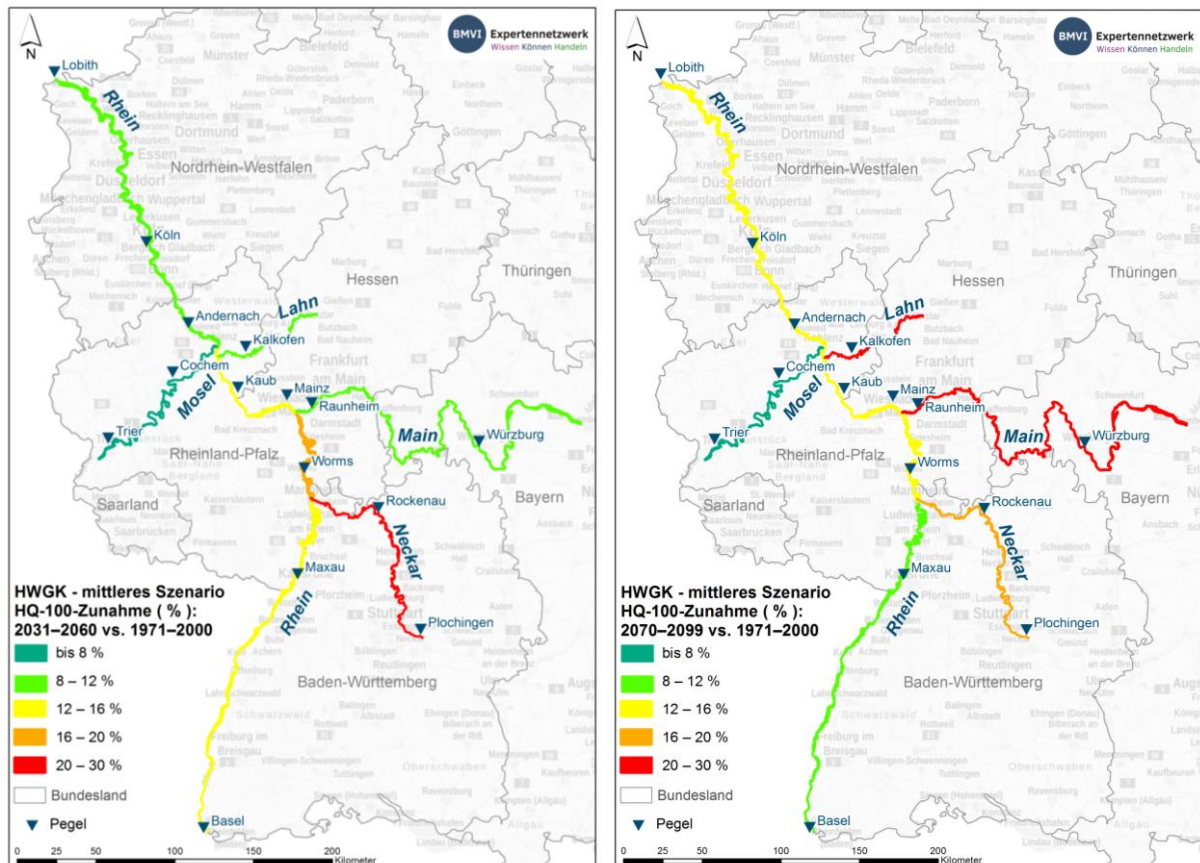


Abbildung 3-3: Relative Änderung des den Hochwassergefahrenkarten des mittleren Szenarios zugrundeliegenden Hochwasserkennwerts HQ_{100} für die Zukunftsprojektionen im Vergleich zum *Bezugszeitraum*. Links für die *nahe Zukunft*, rechts für die *ferne Zukunft*.

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 für die Analysen entlang des Rheins und seiner Nebenflüsse sind wieder an der Mosel zu verzeichnen (100 auf 50 bis 60 Jahre), während anderenorts entsprechende Hochwasserereignisse statistisch 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.

Neben den Analysen am Rhein gibt es auch entsprechende Auswertungen an der Donau. Auch hier zeigt sich, dass die Abflüsse, die heute statistisch alle 100 Jahre auftreten, in Zukunft häufiger auftreten könnten (Abbildung 3-4, unten). An den Donauegeln sowie an Altmühl, Isar und Inn ergaben sich für heutige HQ_{100} in den Zukunftsprojektionen meist Wiederkehrintervalle um 40 Jahre (unter Berücksichtigung bisher identifizierter Unsicherheiten 30 bis 55 Jahre). Für den Donauegel Achleiten wurde für die *ferne Zukunft* eine stärkere Häufung (Wiederkehrintervall 25 bis 30 Jahre) ermittelt. Eine deutlich geringere Verschärfung für *nahe* und *ferne Zukunft* wurde für die Iller ermittelt (Wiederkehrintervalle 65 bis 85 Jahre).

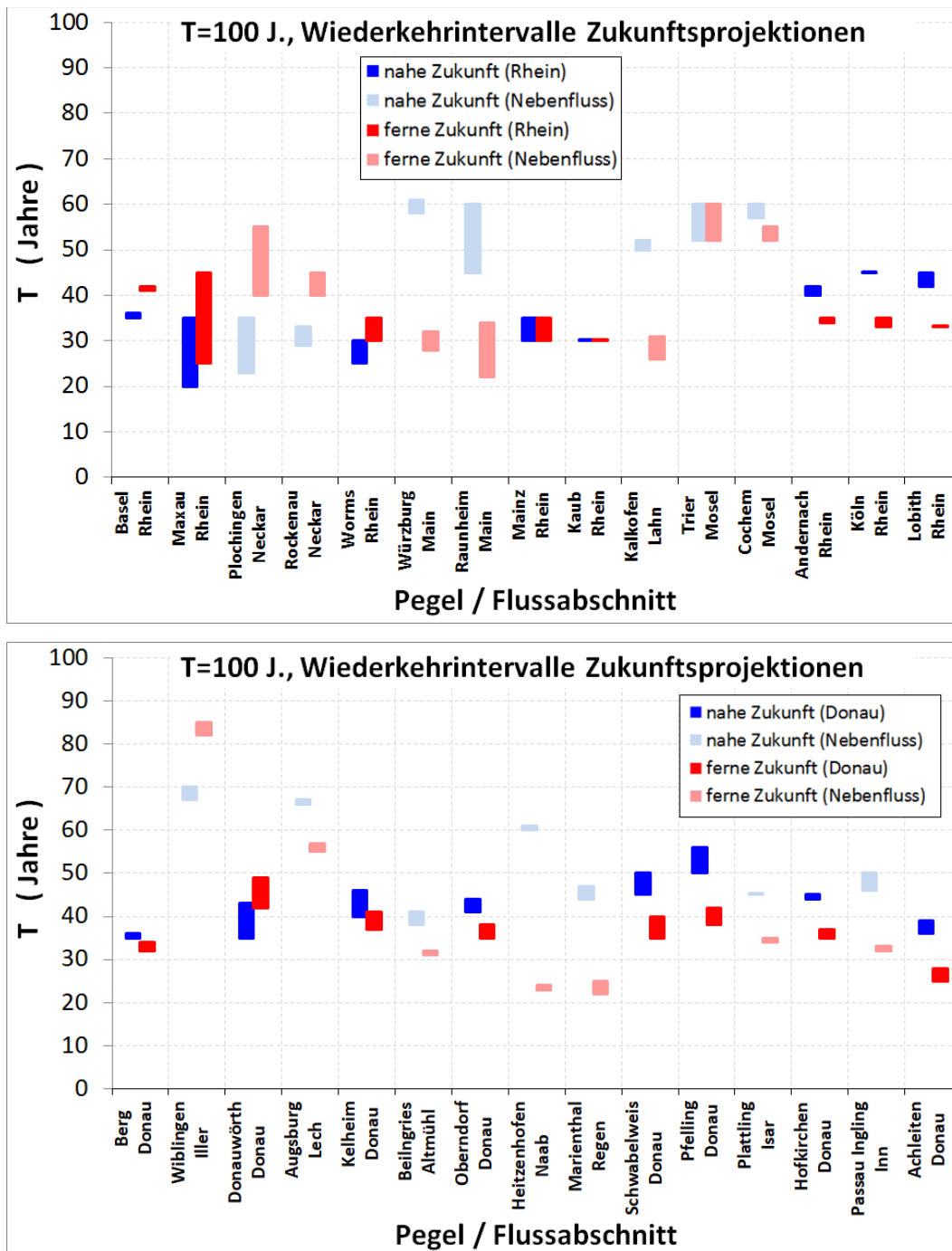


Abbildung 3-4: Neu berechnete Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels HQ_{100} (mittleres Szenario der HWGK) der Referenzperiode für die Projektionen der *nahen* und der *fernen Zukunft* an Pegeln des Rheins und wichtiger Rhein Nebenflüsse (oben) sowie für Pegel der Donau und wichtiger Donaunebenflüsse. Die Säulen stellen die Bandbreite der derzeit bestimmbaren Unsicherheiten in den Wiederkehrintervallen dar.

Die räumlich differenzierte Analyse der projizierten Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels erlaubt es, die zukünftige hochwasserbedingte Exposition der Straßen- und Schieneninfrastruktur im Bereich der heutigen Überschwemmungsflächen eines HQ_{100} überschlägig und vorläufig einzuschätzen⁹.

⁹ Es handelt sich hier um eine potenzielle Exposition 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.

Dies geschieht hier 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 HQ₁₀₀ 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 (HQ₁₀₀ → HQ₅₀ bis HQ₃₀; *nabe* und *ferne Zukunft* ähnlich). Bei der Schiene sind den Auswertungen zufolge über 80 % der heute in der Gefährdungszone eines HQ₁₀₀ liegenden Streckenabschnitte zukünftig alle 55 Jahre (*nabe Zukunft*) bzw. 35 Jahre (*ferne Zukunft*) oder häufiger exponiert.

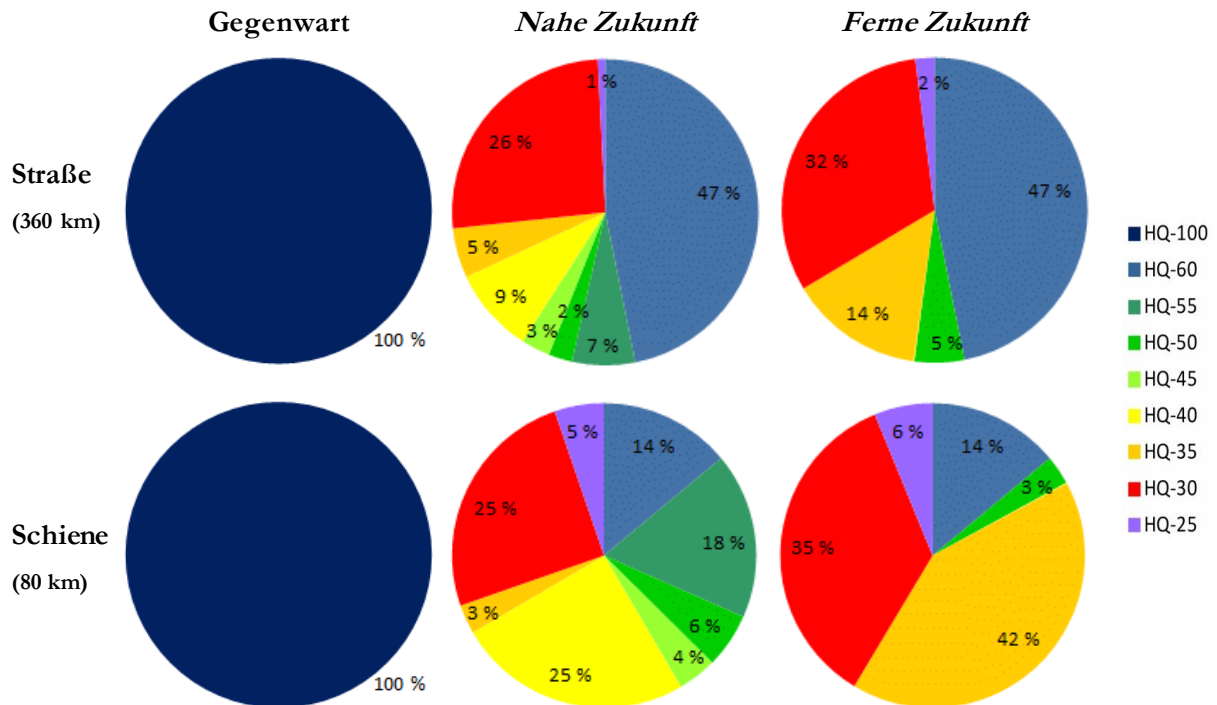


Abbildung 3-5: Geänderte Wiederkehrintervalle des mittleren Hochwasserszenarios (HQ₁₀₀) für das *Weiterwie-bisher-Szenario* für Straßen- und Schienenabschnitte am Rhein und an wichtigen Nebenflüssen. Die Zusammenstellung basiert auf den von HQ₁₀₀ betroffenen Flächen nach der aktuellen HWGK.

Wie die schon vorliegenden Auswertungen für die Donau zeigen ist auch hier über weite Strecken mit einer deutlichen Verringerung der Wiederkehrzeit beim HQ₁₀₀ zu rechnen. Die genauen Untersuchungen bzgl. der Auswirkungen auf den Straßen- und Schienenverkehr stehen noch aus und sind für die nächste Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant. Für weitere detailliertere Untersuchungen der Hochwasserexposition werden beispielsweise Informationen bezüglich der genauen Höhenlage, der Dammlage oder zur Bauweise benötigt, um die Exposition und Sensitivität gegenüber Hochwasser genauer abzuschätzen. Zudem ist die Einbeziehung von Katastropheneinsatzplänen o. ä. zu prüfen.

3.2.3 Exposition von Straße und Schiene im Küstenbereich – Sturmflut

Ein Beispiel für die verkehrliche Auswirkung einer sehr schweren Sturmflut in der Deutschen Bucht bietet die Risikoanalyse von Buthe et al. (2015) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), die unter Mitwirkung des BSH entstanden ist. Von den potenziell überflutungsgefährdeten Gebieten bei Eintritt einer solchen Sturmflut (Abbildung 2 in Buthe et al. (2015)) wurden im Rahmen der Risikoanalyse in einer vereinfachten Annahme ca. 15 % überflutet, was einer Fläche von ca. 1.350 km² entspricht. Die verkehrsbedingten Auswirkungen dieses Szenarios wurden schließlich mit dem Transportstrom-Visualisierungs-Modell (TraViMo) und dem Erreichbarkeitsmodell des BBSR bestimmt.

Insbesondere in Niedersachsen liegen längere Autobahnstrecken zwischen den Seehäfen im Bereich des potenziellen Überflutungsgebiets, ebenso überregional bedeutsame Schienenverbindungen. Somit wäre der Güterverkehr in besonderem Maße betroffen, falls diese Verbindungen aufgrund der Überflutungs- und Entwässerungsprozesse längerfristig ausfallen würden. Zudem könnten neben Straßen und Schienen wichtige Infrastrukturen wie Brücken und Hafenanlagen beschädigt werden und damit die verkehrlichen Behinderungen deutlich länger andauern als das Flutereignis selbst.

Entsprechend der Daten der Bundesverkehrswegeplanung entfallen ca. 58,6 % aller versendeten und empfangenen Güter dieser Region auf den Straßenverkehr, ca. 27,6 % auf den Seeverkehr, 10,3 % auf die Bahn und 3,6 % auf das Binnenschiff. Rund 45 % der dabei transportierten Güter sind von überregionaler Bedeutung. Hamburg und Bremen bilden dabei zentrale Knotenpunkte für den Straßen- und Schienenverkehr vom und ins europäische Ausland (Abbildung 7-11 in Buthe et al. (2015)). Für die Automobilindustrie spielen zudem noch Bremerhaven und Emden eine bedeutende Rolle. Aber auch für die Rettungs- und Transportwege zum nächsten verfügbaren Krankenhaus ergeben sich ggf. Neuausrichtungen, da sich notwendige Fahrzeiten zum nächstgelegenen Krankenhaus außerhalb potenzieller Überflutungsgebiete um bis zu 40 Minuten und mehr verlängern könnten (Abbildung 13 in Buthe et al. (2015)). Gleiches gilt für Evakuierungspläne und -routen, Notversorgungen und Katastrophenschutzmaßnahmen. Insbesondere auf die niedersächsischen Küstengebiete könnten hier größere Probleme zukommen.

3.2.4 Exposition der Bundeswasserstraßen – Höchster Schifffahrtswasserstand

Im Zuge der Expositionsanalyse wurde die mittlere jährliche Häufigkeit bzw. Gesamtdauer der Überschreitung des HSW (bzw. der zugehörigen Abflusswerte HSQ) an den Richtpegeln analysiert, welche in den Polizeiverordnungen ersichtlich sind. Damit wurde zunächst exemplarisch für den Rhein 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 2017a) hinterlegt.

Abbildung 3-6 zeigt exemplarische 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 liegen die Überschreitungshäufigkeiten 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 oberstrom (ohne Abbildung). Am Neckar und an der Mosel wurden bisher nur einzelne Abschnitte analysiert. Hier ergaben sich neun Tage pro Jahr am Neckarabschnitt mit Richtpegel Rockenau und ca. sechs Tage an den Moselabschnitten 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 *naben Zukunft*, die in solchen Fällen jedoch absolut betrachtet auf niedrigem Niveau bleiben (Zunahme max. ein Tag pro Jahr). Für die *ferne Zukunft* erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten unterstrom des Pegels Worms 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 *nabe 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 decken sich in der Tendenz mit den früheren Ergebnissen aus KLIWAS.

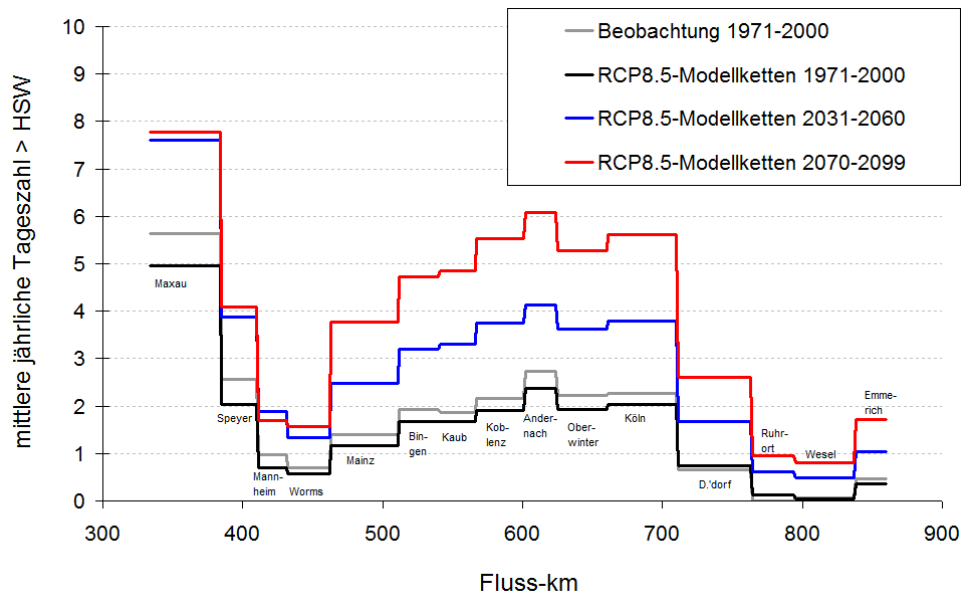


Abbildung 3-6: Längsschnitt des Rheins für die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit HSW-Überschreitung im *Bezugszeitraum* 1971–2000 (beobachtet und Modellensemble) sowie in den Zeitscheiben der *nahen* (2031–2060) und *fernen Zukunft* (2071–2100) für das *Weiterwie-bisher-Szenario*.

Der HSQ adressiert in seiner Definition viele Aspekte der "Sensitivität" (Abschnitt 4.2.3). Hierzu gehören die regionalen Strömungsverhältnisse, die Uferbeschaffenheit und Brückendurchfahrtshöhen. Der Bezug zu den streckenspezifischen Gegebenheiten ist zwar im Sinne der Klimawirkungsanalyse vorteilhaft, erschwert jedoch regionale Vergleiche hinsichtlich des rein hydrologischen Wandels. Daher wurde ergänzend für alle Bundeswasserstraßen ein einheitlicher hoher Schwellenwert definiert. Dieser Schwellenwert beschreibt den Abfluss, der im Bezugszeitraum statistisch knapp viermal im Jahr auftritt (Q01, im Mittel an 1 % der Tage eines Jahres, also 3,65 Tagen, überschritten). Dieser hohe Schwellenwert ähnelt an einigen Pegeln (z. B. Kaub) dem HSQ. Die Ergebnisse zeigen schon in der *nahen Zukunft* unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* eine Zunahme der Überschreitungshäufigkeit entlang der betrachteten Bundeswasserstraßen (Abbildung 3-7, oben). In der *fernen Zukunft* nimmt die Häufigkeit gegenüber der *nahen Zukunft* nochmals leicht zu (Abbildung 3-7, unten). Insgesamt bleiben die Überschreitungsdauern jedoch zumeist deutlich unter zwei Wochen.

3.3 Sturm

3.3.1 Grundlagen

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 Verkehrsbeteiligte dar oder führen zu zeitweisen Verkehrsunterbrechungen. Neben Bäumen auf Gleisen oder Oberleitungen führen beim Schienennetz 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.

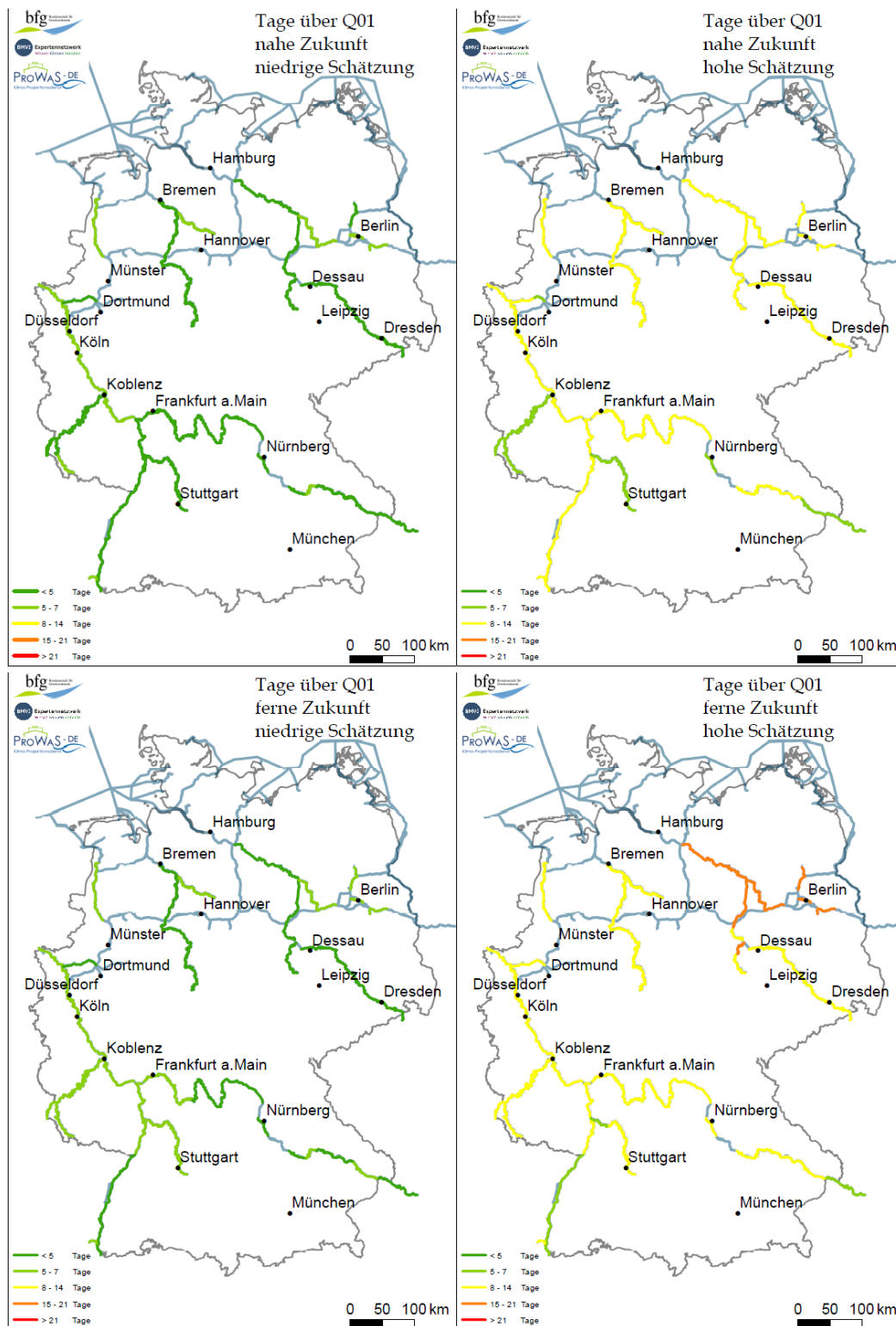


Abbildung 3-7: Expositionskarte für das Auftreten von häufigen (einmal in 100 Tagen; also statistisch etwa 3,65 mal pro Jahr) Hochwasserereignissen in der *nahen Zukunft* (oben) und der *fernen Zukunft* (unten) unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* für den niedrigen (15. Perzentil; links) und den hohen Schätzer (85. Perzentil; rechts) basierend auf einer Auswahl repräsentativer Pegel entlang der Binnenwasserstraßen.

Neben den geschilderten Gefahren durch Sturmwurf stellen – insbesondere auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen – auch direkte Einwirkungen durch starke Seitenwinde und Windböen eine Gefahr für Fahrzeuge bzw. für Verkehrsbeteiligte dar. Die nachfolgend dargestell-

ten Ergebnisse der Expositionsanalyse konzentrieren sich vorwiegend auf mit „Sturmwurf“ zusammenhängende Aspekte. Hintergrundinformationen zur Vorgehensweise und spezifischere Auswertungen sind im Schwerpunktbericht *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020) nachzulesen.

3.3.2 Exposition von Straße und Schiene

Die Exposition gegenüber Sturmwurf ergibt sich maßgeblich aus dem Vorkommen von Vegetation entlang der Bundesfernstraßen bzw. Bundesschienenwege. Grundlage für die erstellte Karte ist das bundesweite Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM). Hier wird zwischen Laub-, Nadel- und Mischwäldern differenziert (Abbildung 3-8 a 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 (Segelwirkung; Albrecht (2009)). Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die aufgrund der Vegetation gegenüber Windwurf exponierten Bundesfernstraßen- und Schienenabschnitte.

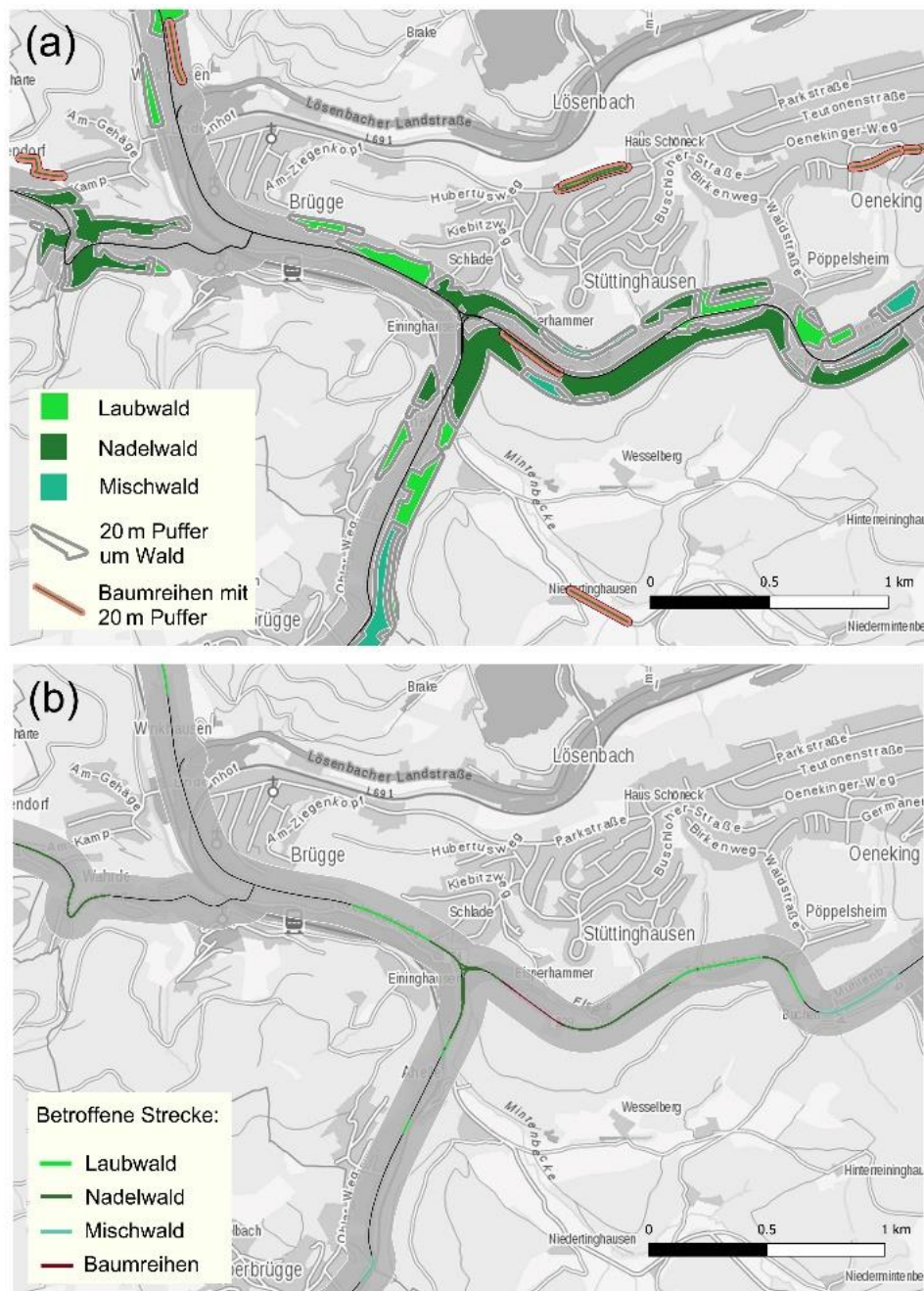
Tabelle 3-1: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m.

Potenzielle Gefährdung durch Sturmwurf Gegenwart (Exposition)				
Verkehrsträger	Straße		Schiene	
Gesamtlänge	51.150 km		34.140 km	
Strecke in der Nähe zu	[km]	[%]	[km]	[%]
▪ Laubwald	5.870	12	4.450	13
▪ Nadelwald	8.220	16	4.130	12
▪ Mischwald	5.820	11	3.430	10
▪ Bäumen (insgesamt) ¹⁰	12.660	25	7.690	23
▪ Baumreihen	6.710	13	nicht zutreffend	

Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundesschienennetzes durch bewaldetes Gebiet mit einem Abstand von ≤ 20 Metern. Außerdem sind etwa 13 % des Bundesfernstraßennetzes gegenüber Baumreihen exponiert. Bei diesen Werten kann es sich aufgrund der verwendeten bundesweit einheitlichen Datenbasis nur um eine erste Annäherung handeln.

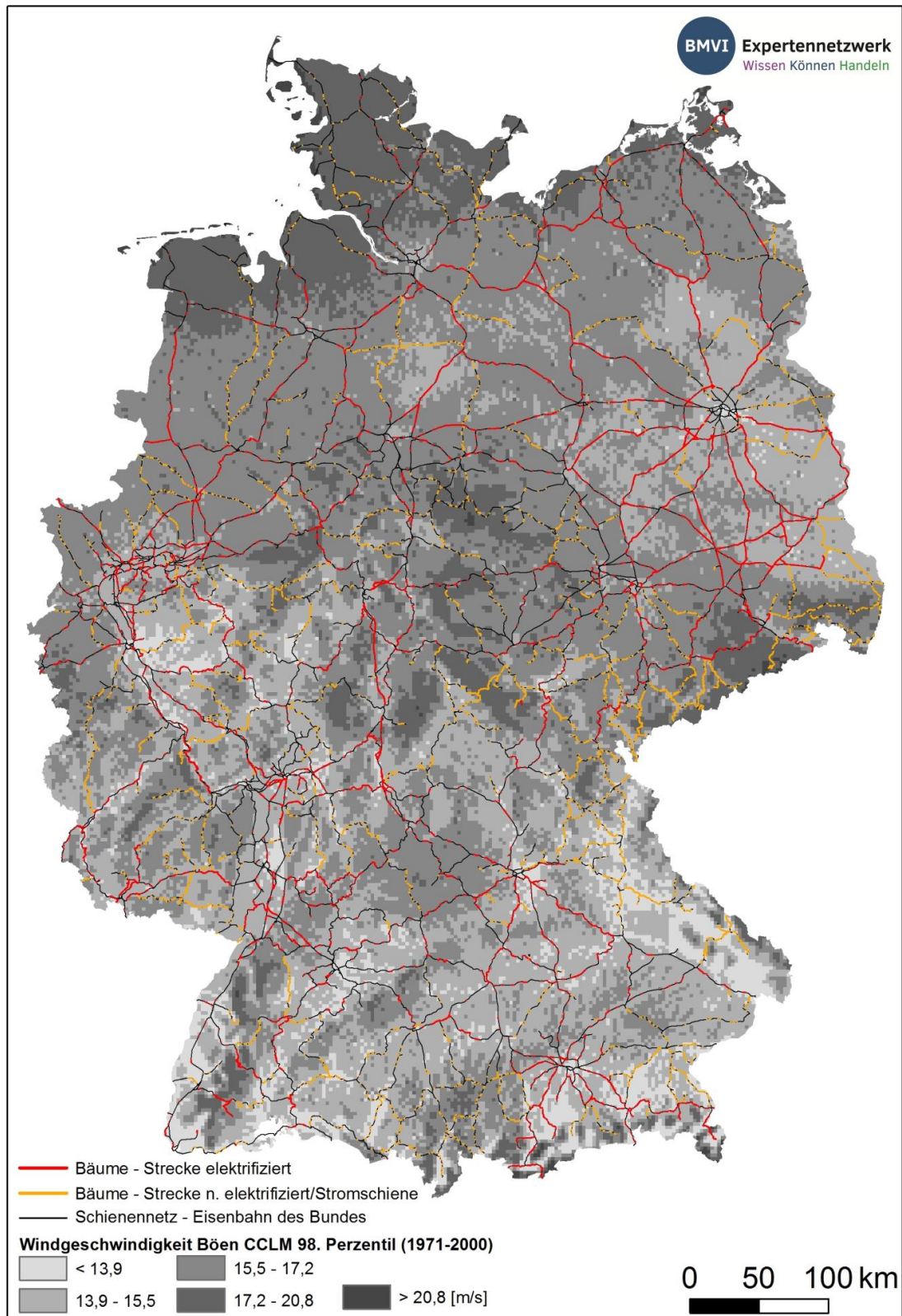
Die generierte Karte zur Expositionsanalyse bezüglich der Sturmwurfgefährdung wurde im Anschluss mit den Daten für das 98. Perzentil der Windböen für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) zusammengeführt (Abbildung 3-9). Im Vergleich zum gegenwärtigen Zustand zeigen sich in den Klimaprojektionen nur geringfügige Änderungen im Bereich von ± 5 %. Eine räumliche Differenzierung bezüglich der Änderungssignale ist nicht erkennbar, sodass auch zukünftig die größte Gefährdung durch Stürme und Windböen in den schon heute besonders gefährdeten Gebieten zu erwarten ist.

¹⁰ 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),

Abbildung 3-8: Lage bewaldeter Gebiete innerhalb eines 100 m Betrachtungsraumes um das Bundesfernstraßennetz (a) und daraus abgeleitete Exposition im Abstand von 20 m gegenüber Sturmwurf (b) an einem Fallbeispiel.



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

Abbildung 3-9: Hinweiskarte zur Exposition und Sensitivität des Bundesschienennetzes gegenüber Sturmwurf vor dem Hintergrund des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeit (Böen) einer hochaufgelösten Klimamodellsimulation mit CCLM für den *Bezugszeitraum* (1971–2000).

3.4 Gravitative Massenbewegungen

3.4.1 Grundlagen

Gravitative Massenbewegungen können den landgebundenen Verkehr 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 (Glade und Dikau 2001). 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 (Krauter et al. 2012). 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 potentielle Betroffenheiten durch gravitative Massenbewegungen wurde die Expositionsanalyse in zwei Teilschritten durchgeführt. Im Rahmen externer Forschungsprojekte wurden zunächst für das Bundesfernstraßen- (Schipek und Kallmeier 2019) und das Bundesschienennetz (EBA 2018) Hinweiskarten erstellt, welche die ingenieurgeologische Grunddisposition beinhalten. In Schipek und Kallmeier (2019) wurde zusätzlich eine Methode zur Integration von Klimaprojektionsdaten entwickelt, die im Anschluss ebenfalls auf das Modell der Schiene angewendet wurde. Neben den nachfolgend ausgeführten Untersuchungen zu allgemeinen gravitativen Massenbewegungen wurden ebenfalls prozessspezifische Modellansätze entwickelt. So liegen für die Straße auch prototypische Hinweiskarten auch für Sturz- und Fließprozesse vor. Weitere Informationen zum methodischen Vorgehen sowie zu spezifischen Ergebnissen finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020).

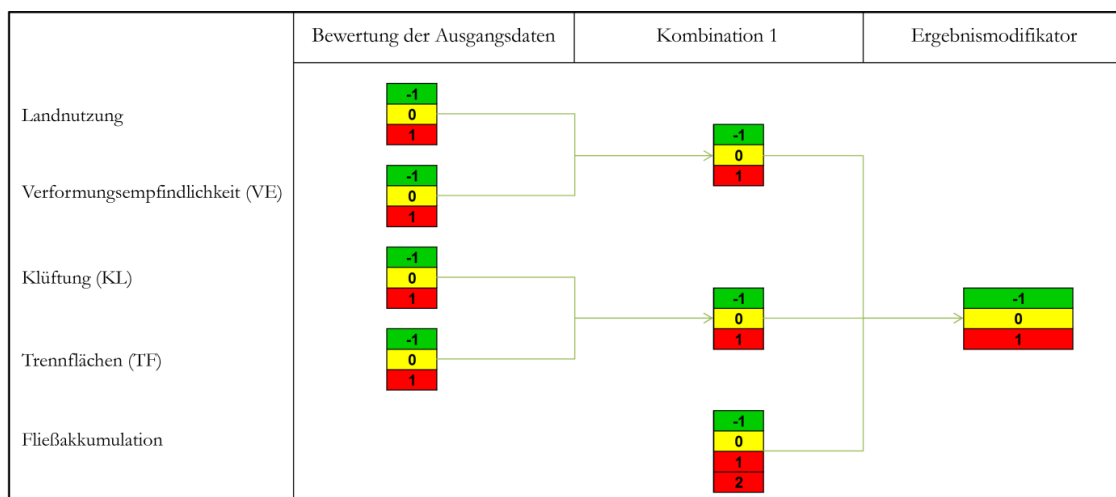
Erosionsprozesse sind primär für den Sedimenteintrag in Wasserstraßen und somit für das Wasserstraßenmanagement von Bedeutung und wurden im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* untersucht (Nilson et al. 2020).

3.4.2 Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen

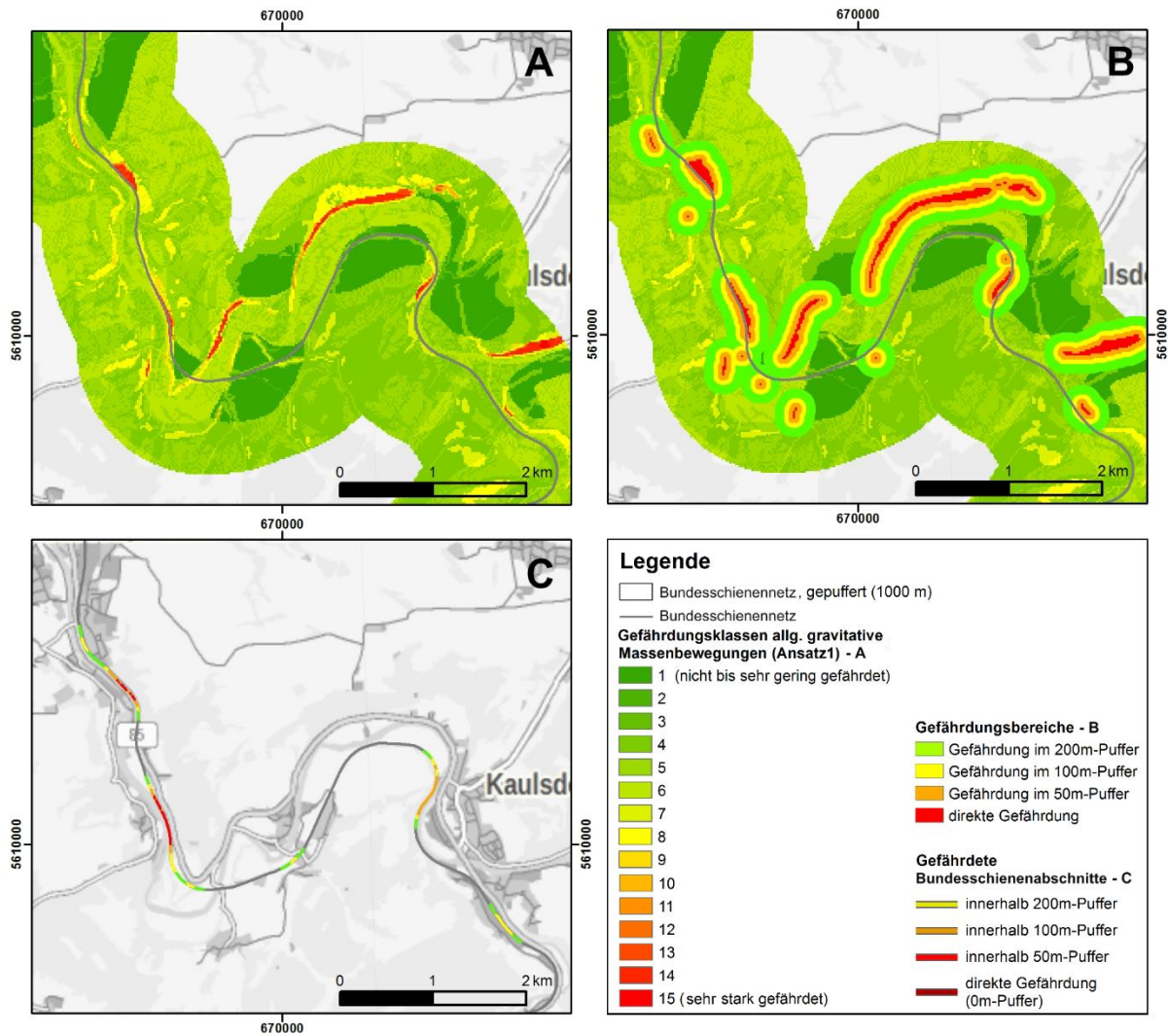
In einem ingenieurgeologischen Modellansatz wurden in einem GIS Hinweiskarten entwickelt, die neben dem Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetz die Informationsschichten zu verschiedenen Geländeeigenschaften wie Hangneigung, Fließrichtung, Fließakkumulation und Oberflächenwölbung sowie geologische Parameter wie Gesteinsklasse (GK), Verformungsempfindlichkeit (VE), Korngrößenverteilung (KG), Klüftungsfreundlichkeit (KL) und Trennflächengefüge (TF) sowie Informationen zur Landnutzung (Versiegelungsgrad, Bewuchs) umfassen. Zudem wurde ein Ereignisdatenkataster bezüglich gravitativer Massenbewegungen einbezogen, das auf Grundlage von Zuarbeiten der geologischen Dienste der Bundesländer erstellt wurde. Dieses beinhaltet derzeit insgesamt 11.658 Ereignisse. Auf dieser Datengrundlage wurden durch Verknüpfung der Gesteinsklasse (Fest- und Lockergestein, „gemischtkörnig“, „rollig“ und „bindig“) mit der Hangneigung zunächst fünf Hauptgefährdungs- und insgesamt 15 Gefährdungsklassen abgeleitet (Tabelle 3-2). Die Klassifizierung erfolgte auf Basis von Expertenwissen. Zur Spezifizierung der fünf Hauptgefährdungsklassen wurden die Parameter der Landnutzung sowie zusätzliche Substrat- und Reliefeigenschaften herangezogen (Abbildung 3-10).

Tabelle 3-2: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Ge-
steins- und der Hangneigungsklasse (Quelle: verändert nach (EBA 2018)).

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

Abbildung 3-10: Fließschema zur Berechnung der Modifikation (Spezifizierung) der Gefährdungsklassen
für allgemeine gravitative Massenbewegungen (Quelle: verändert nach (EBA 2018)).

Im letzten Analyseschritt wurde für die potenziellen Gefährdungsbereiche ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz hergestellt (Abbildung 3-11a). Um einen Überblick über die Streckenabschnitte zu erhalten, die direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m oder 200 m um stark bis sehr stark gefährdete Bereiche (Gefährdungsklasse ≥ 10) liegen, wurden entsprechende Pufferbereiche gebildet (Abbildung 3-11b). Anschließend wurde das Straßen- bzw. Schiennetz mit diesen Zonen verschnitten, um die gefährdeten Streckenabschnitte zu identifizieren (Abbildung 3-11c).



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

Abbildung 3-11: Potenzielle Gefährdung für allgemeine gravitative Massenbewegungen (A), gepufferte Gefährdungsbereiche der Klassen ≥ 10 (B) sowie die daraus resultierenden betroffenen Streckenabschnitte (C) (Quelle: verändert nach (EBA 2018)).

3.4.3 Einbeziehung eines Klimamodifikators

Zur Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf gravitative Massenbewegungen wurden Klimakenngrößen wie „Mittlerer Jahresniederschlag“, „Mittlerer Sommerniederschlag“, „Mittlerer Winterniederschlag“, „Anzahl der Starkniederschlagstage“ und „Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel“ aus Klimaprojektionsdaten abgeleitet und Änderungssignale für das *Weiter-nie-bis-her-Szenario* in der *naben* und *fernen Zukunft* (2031–2060 und 2071–2100) gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000) berechnet. Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 zeigen beispielhaft die Änderungssignale der Klimaparameter „Anzahl der Starkregentage“ bzw. „Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel“ für die *nabe* und *ferne Zukunft* unter dem *Klimaschutzszenario* (jeweils unten links) und *Weiter-nie-bis-her-Szenario* (jeweils unten rechts). Ergänzend sind die Beobachtungsdaten von HYRAS-2015 (jeweils oben links) sowie Zeitreihen der drei Klimaszenarien von 1951–2100 dargestellt (jeweils oben rechts). Insgesamt ergeben sich für die beiden gezeigten, aber auch die an dieser Stelle nicht gezeigten oben genannten Klimaparameter, erhebliche Änderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Dies trifft insbesondere für das *Weiter-nie-bis-her-Szenario* zu. Für die Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag ist, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer deutlichen Zunahme zu rechnen (*nabe Zukunft*: -0,2 % bis +36,8 %; *ferne Zukunft*: -2 % bis +63,3 %). Für das in

dieser Studie herangezogene *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit der oberen Bandbreite (85. Perzentil; entspricht einem „starken Wandel“) des Klimamodellensembles sind in der *fernen Zukunft* Zunahmen von Starkniederschlagstagen pro Jahr von mehr als +5 Tage in den Mittelgebirgen und Alpen und etwa +1 bis +2 Tage im Osten Deutschlands in der *fernen Zukunft* zu erwarten. Die Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel wird sich nach den Projektionen der Klimamodelle in Zukunft deutlich reduzieren. Hier ist, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer Abnahme von -36 % bis -11 % in der *nahen* und -65 % bis -8 % in der *fernen Zukunft* auszugehen. Für das in dieser Studie herangezogene *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit der unteren Bandbreite (15. Perzentil; entspricht einem starken Wandel) des Klimamodellensembles der Frost-Tau-Wechsel-Tage ist in der *fernen Zukunft* eine sehr deutliche Reduktion zu erwarten. Im Nordwesten und am Oberrhein wird eine Abnahme von 30-40 Tagen pro Jahr projiziert, sodass nur noch vereinzelt Frost-Tau-Wechsel-Tage in diesen Regionen auftreten würden. In den Mittelgebirgen und Alpen wäre ein Rückgang von 50 bis 75 Tagen zu erwarten.

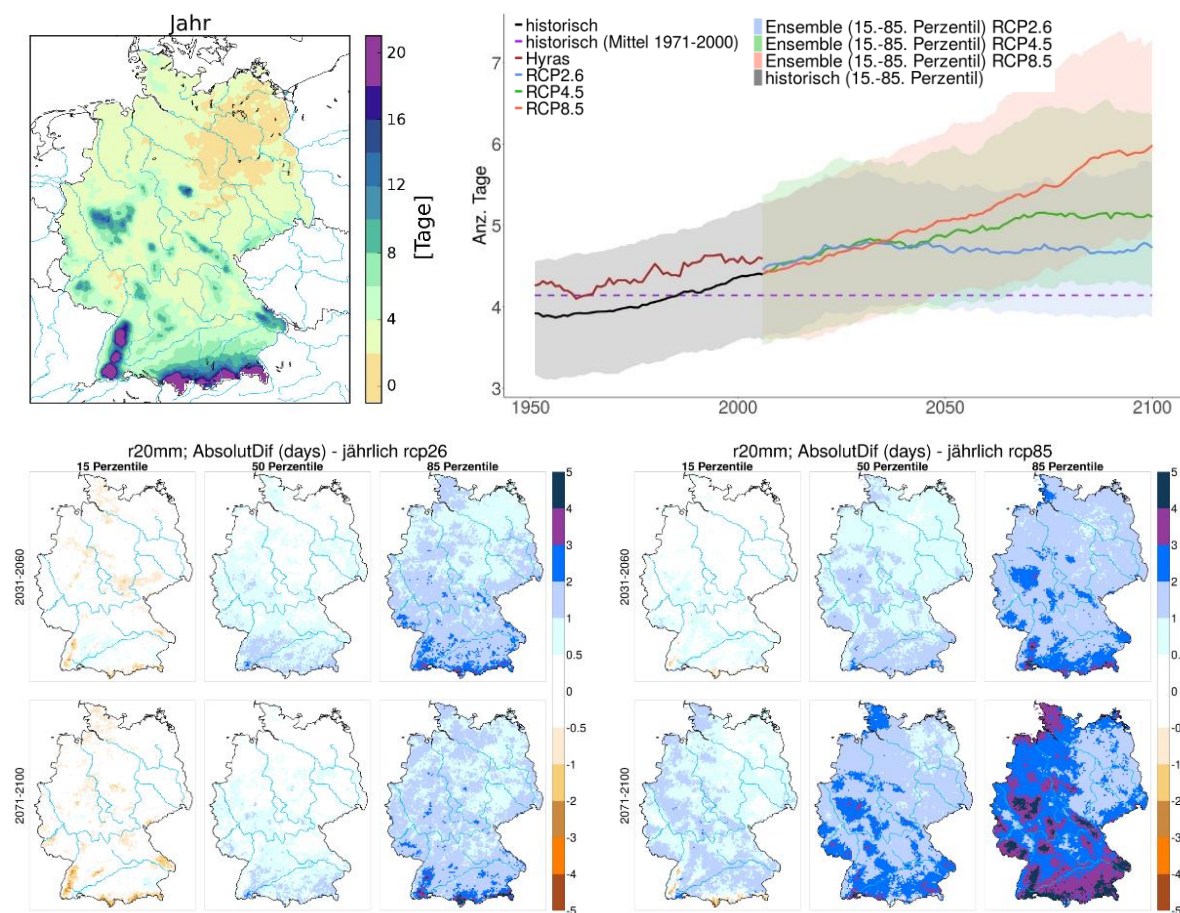


Abbildung 3-12: Deutschlandkarte der Anzahl von Tagen mit Niederschlag ≥ 20 mm (Starkniederschlagstage) auf Basis von HYRAS-2015 (1971–2000; oben links) und Zeitreihe (1951–2100; oben rechts) der Starkniederschlagstage (30-jähriges gleitendes Mittel; Flächenmittel für Deutschland) für die Beobachtungsdaten (HYRAS-2015, dunkelrot) und das Klimaprojektionsensemble unter Annahme der Szenarien *Klimaschutz* (blau), *moderat* (grün) und *Weiter-wie-bisher* (rot). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum. Die Kartendarstellungen in der unteren Reihe zeigen die absolute Änderung in Tagen für die Starkniederschlagstage in der *nahen* und *fernen Zukunft* gegenüber dem *Bezugszeitraum* für das *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; unten links) bzw. *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5; unten rechts) für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles.

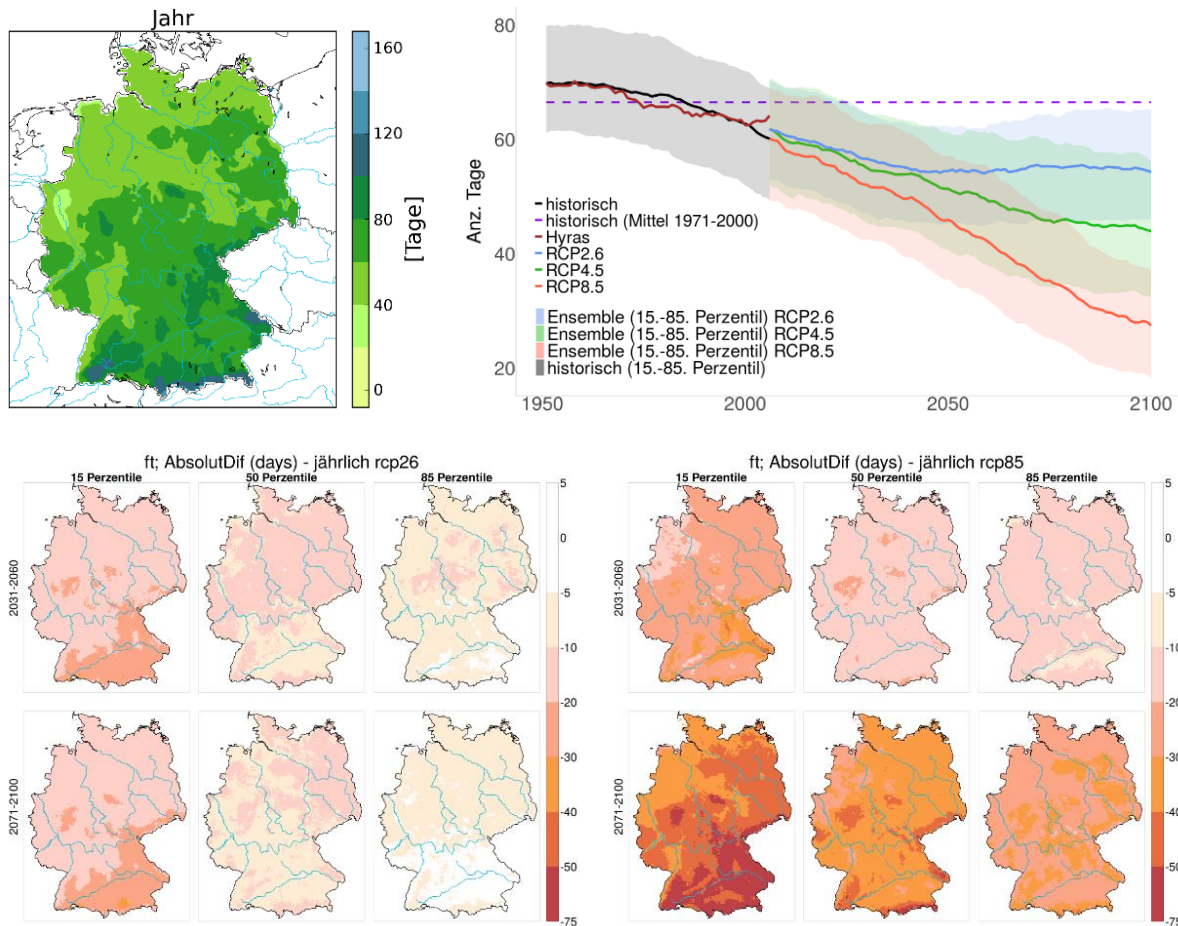


Abbildung 3-13: Wie Abbildung 3-12, jedoch für die Tage mit Frost-Tau-Wechsel.

Die erhaltenen Änderungssignale bilden die Basis für die weitere Modifikation der Klassifizierungsergebnisse des ingenieurgeologischen Ansatzes. Dabei wurde z. B. davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Anzahl von Tagen mit Starkregen oder mit Frost-Tau-Wechseln verstärkend auf die Hangrutschungsgefährdung wirken. Bei der Integration des Klimamodifikators bleibt die ingenieurgeologische Disposition der dominierende Faktor für die Bewertung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen.

Es zeigt sich, dass unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* von einer Zunahme der durch gravitative Massenbewegungen gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte auszugehen ist. In der *nahen Zukunft* (2031–2060) erhöht sich der Anteil des gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes laut Modell um jeweils knapp einen Prozentpunkt. In der *fernen Zukunft* (2071–2100) kann sich der Anteil der gefährdeten Straßen- und Schienenstrecken jeweils um rund zwei Prozentpunkte im Vergleich zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) erhöhen (Tabelle 3-3).

Aufbauend auf dem Ansatz für allgemeine Massenbewegungen wurden zusätzlich Methoden entwickelt, um prozessspezifische 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.

Tabelle 3-3: Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und -schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im *Bezugszeitraum* (1971–2000) und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (Hoher Schätzer des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*) in der *nahen* (2031–3060) und *fernen Zukunft* (2071–2100).

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

3.5 Niedrigwasser

3.5.1 Grundlagen

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 herrscht das Bestreben vor, die „economies of scale“ bestmöglich auszunutzen, d. h. mit großen Schiffskörpern möglichst viel Ladung auf einmal zu transportieren. Die Verringerung der Transportkapazität der Schiffe und eine Erhöhung der Transportzeiten hat bei gleichbleibenden „Fixkosten“ wie 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. 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.

Hintergründe und Einzelheiten zum Themenbereich Niedrigwasser, die über die in den folgenden Abschnitten dargestellten Analysen und Erkenntnisse hinausgehen, finden sich im Schlussbericht des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

3.5.2 Expositionskarten unter Nutzung von GIW und GIQ (bzw. RNW und RNQ)

Der sogenannte gleichwertige Wasserstand (GIW, an der Donau Regulierungsniedrigwasserstand RNW) ist ein wichtiger Niedrigwasserswellenwert¹¹. Er wird heute definitionsgemäß im Mittel an maximal 20 Tagen pro Jahr unterschritten. Bedeutsam sind auch der zu diesem Wasserstand führende Abfluss (GIQ bzw. RNQ) und die mit diesem Wasserstand verbundene verfügbare Wassertiefe. Der gleichwertige Abfluss (GIQ bzw. RNQ) lässt sich näherungsweise mit dem 94,5 Perzentil des Abflusses beschreiben (Schwellenwert Q94.5), der im Mittel an 20,075 Tagen pro Jahr unterschritten wird. Die Anzahl von Unterschreitungstagen dieses niedrigen Abflussschwellenwertes wurde für jede verfügbare Modellkette der Szenarien *Weiter-wie-bisher* und *Klimaschutz* berechnet. Die Auswertung der jeweiligen Ensembles erfolgte für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) sowie für die *nabe* und die *ferne Zukunft* an zahlreichen Pegeln hinsichtlich einer hohen (85. Perzentil) und einer niedrigen Schätzung (15. Perzentil).

Abbildung 3-14 zeigt exemplarisch, an wie vielen Tagen dieser heutige Niedrigwasserswellenwert in Zukunft am Niederrhein (Duisburg-Ruhrort¹²) und an der oberen Donau (Hofkirchen) unterschritten wird. Für beide Wasserstraßen zeigt sich an diesen Pegeln ab der Mitte des 21. Jahrhunderts eine deutliche Zunahme.

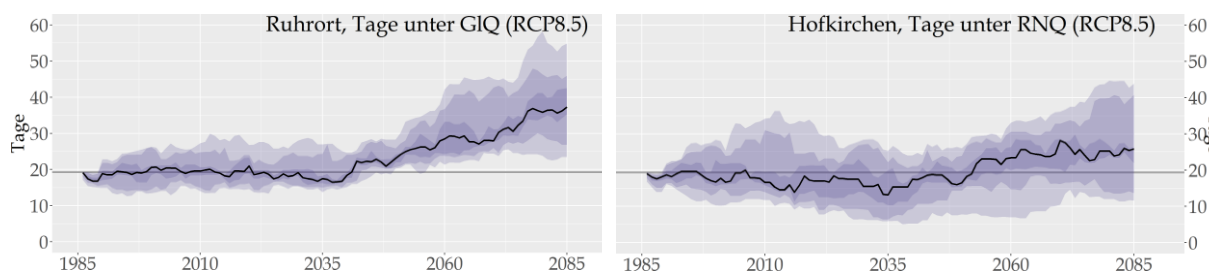


Abbildung 3-14: Mittlere Anzahl von Tagen mit Niedrigwasser unter dem Schwellenwert GIQ_{1971–2000} für die Pegel Duisburg/Ruhrort (Rhein) und Achleiten (Donau; Abfluss beim Regulierungsniedrigwasserstand RNQ_{1971–2000}). Beides unter Annahme des *Weiter-wie-bisher*-Szenarios, 30-jährig gleitende Mittelwerte.

Die vorgenannten Informationen werden im Rahmen der Expositionsanalyse auf das Netz der Bundeswasserstraßen bezogen und kartographisch umgesetzt. Dafür wurden Pegel ausgewählt, die das Abflussgeschehen von Teilstrecken des Wasserstraßennetzes – unter Berücksichtigung von maßgeblichen Zuflüssen – repräsentieren. Die je Pegel ermittelten Werte wurden auf Teilstrecken des Wasserstraßennetzes übertragen, die auch der Verflechtungsprognose des Bundesverkehrswegeplans zugrunde liegt. Die resultierenden Karten decken weite Teile des deutschen Binnenschiffahrtsstraßennetzes ab. Sie zeigen, wie sehr sich verschiedene Annahmen der Klimaszenarien von *Klimaschutz* bis *Weiter-wie-bisher* auf die Bewertung der Exposition der Schifffahrt gegenüber niedrigwasserbedingten Verkehrseinschränkungen auswirken. Außerdem wird auch die Größe der Unsicherheiten der Modellierung hinsichtlich des dargestellten Kennwertes (Tage unter heutigem GIQ bzw. RNQ (Schwellenwert Q94.5 an der Donau) abgebildet.

In der Referenzsituation (ohne Abbildung) liegt die Unterschreitungshäufigkeit des GIQ definitionsgemäß in allen betrachteten Flussabschnitten bei maximal 20 Tagen. Kanalstrecken und Küstenwasserstraßen sind in den Kartendarstellungen aufgrund geringer Sensitivität gegenüber Niedrigwasser (hydrologische Trockenheit) ausgespart (in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 in blaugrau dargestellt).

¹¹ 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. Der an der Donau verwendete Regulierungsniedrigwasserstand wird definitionsgemäß im Mittel an 345 Tagen pro Jahr überschritten.

¹² Der für die Mittelrheinverkehre relevante Pegel Kaub zeigt annähernd dasselbe Änderungssignal wie Duisburg-Ruhrort (Zunahme der Tage unter heutigem GIQ auf rd. 35 Tage (zentrale Schätzung)).

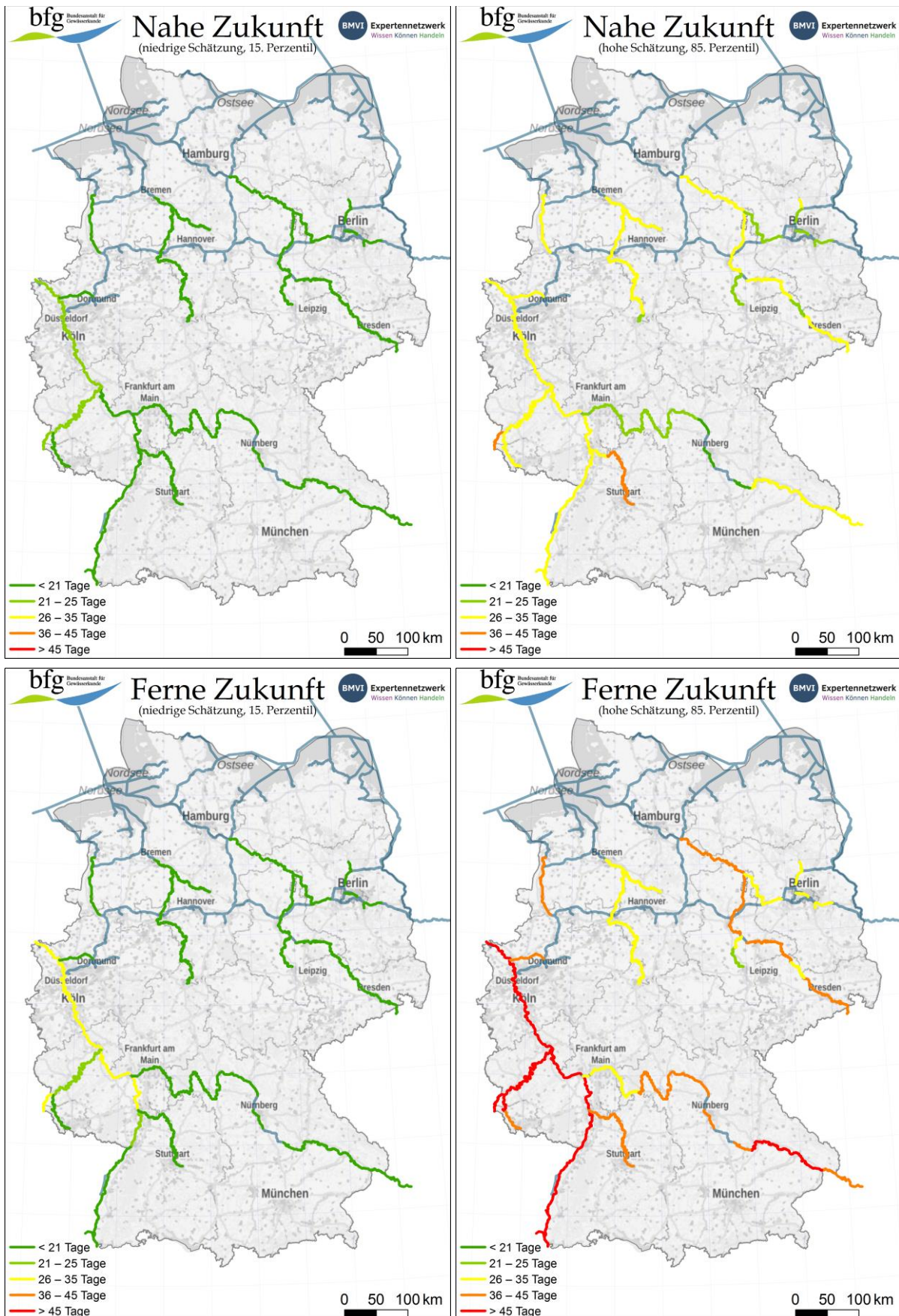


Abbildung 3-15: Expositionsanalyse Niedrigwasser in der *nahen* (oben) und *fernen Zukunft* (unten), niedrige und hohe Schätzung (links bzw. rechts) unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher*. Dargestellt ist die Anzahl an Unterschreitungstagen des heutigen Niedrigwasserschwelenswerts.

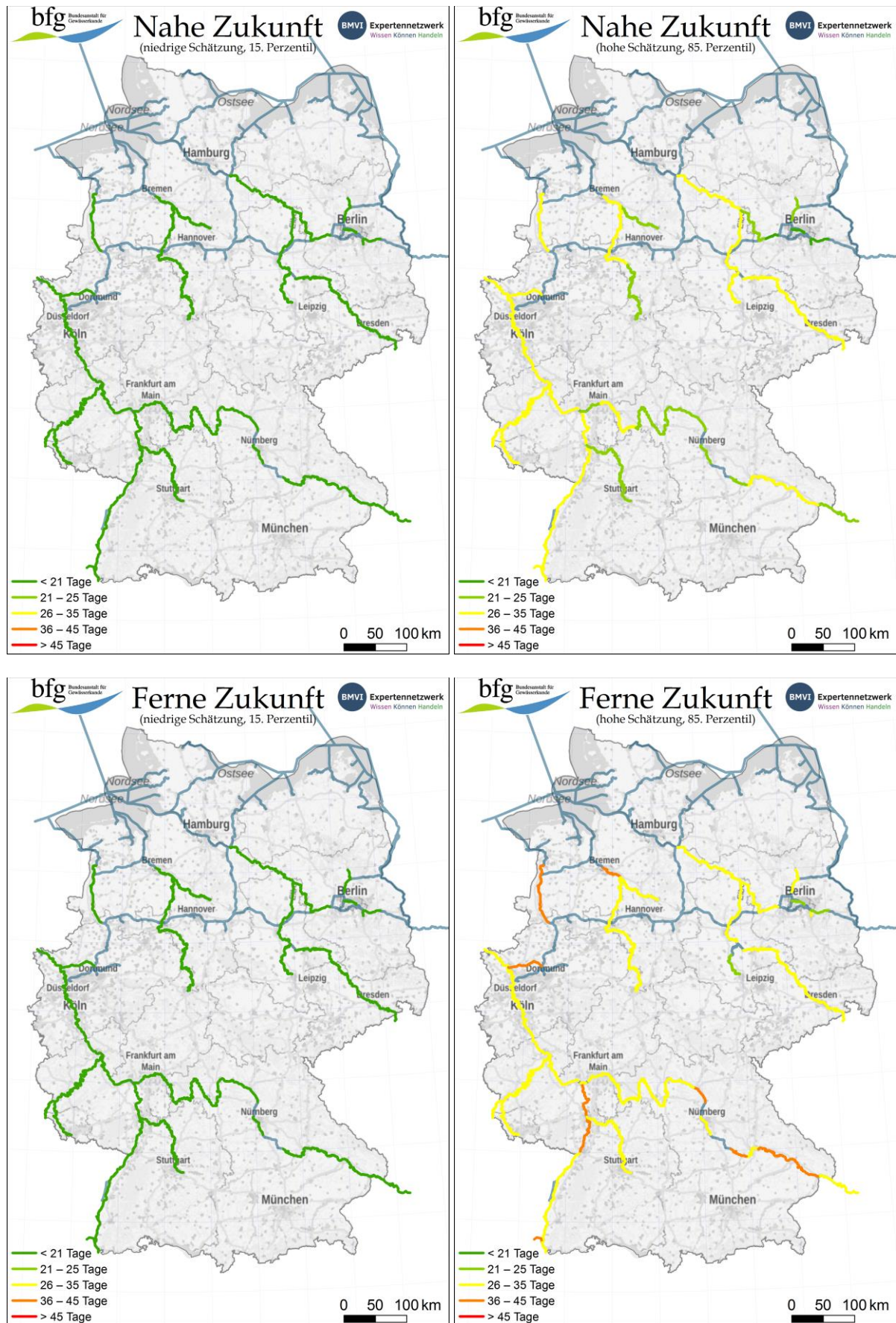


Abbildung 3-16: Wie Abbildung 3-15, jedoch unter Annahme des Klimaschutzszenarios.

Unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* zeigen die Kartendarstellungen für die *nabe Zukunft* (Abbildung 3-15, oben) Unterschreitungshäufigkeiten des heutigen GIQ im Bereich von 26 bis 35 Tagen an vielen Flussabschnitten für den hohen Schätzer und nur geringe Änderungen für den niedrigen Schätzer. In der *fernen Zukunft* (Abbildung 3-15, unten) intensivieren sich die Änderungssignale. Der Rhein wird zukünftig wahrscheinlich besonders von Niedrigwassersituationen betroffen sein. Hier sind für den hohen Schätzer im Szenario *Weiter-nie-bisher* auf der gesamten Länge anstelle von 20 mehr als 45 Unterschreitungstage des heutigen GIQ möglich. Die konsequente Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im internationalen Maßstab führt an allen Bundeswasserstraßen zu deutlich geringeren Änderungssignalen (vgl. Abbildung 3-16).

3.5.3 Wasserbauliche Analyse für den Niederrhein

Der Niederrhein ist mit einer jährlich transportierten Gütermenge von über 100 Mio. t die wichtigste Binnenschiffahrtsstraße Europas. Hier wurde eine erweiterte wasserbauliche Expositionsanalyse durchgeführt, die neben den genannten hydrologischen Veränderungen auch die daraus abgeleiteten hydraulischen Veränderungen und damit die Auswirkungen auf die Wassertiefe in der Fahrrinne und die Verfügbarkeit der Wasserstraße im Detail umfasst.

Abbildung 3-17 zeigt die berechneten Wassertiefen im Bereich der Deutzer Platte (Köln) an einer heute bereits abladerelevanten Schwelle für um bis zu 30 % reduzierte Niedrigwasserabflüsse (GIQ). Dies entspricht einer extrem trockenen Variante des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* (vgl. Abbildung 3-18, RCP8.5). Der Schwellenwert der Flächengrafik ist auf die in diesem Abschnitt des Niederrheins vorgehaltene Fahrrinntiefe von 2,50 m (Tiefe unter GIW) festgelegt.

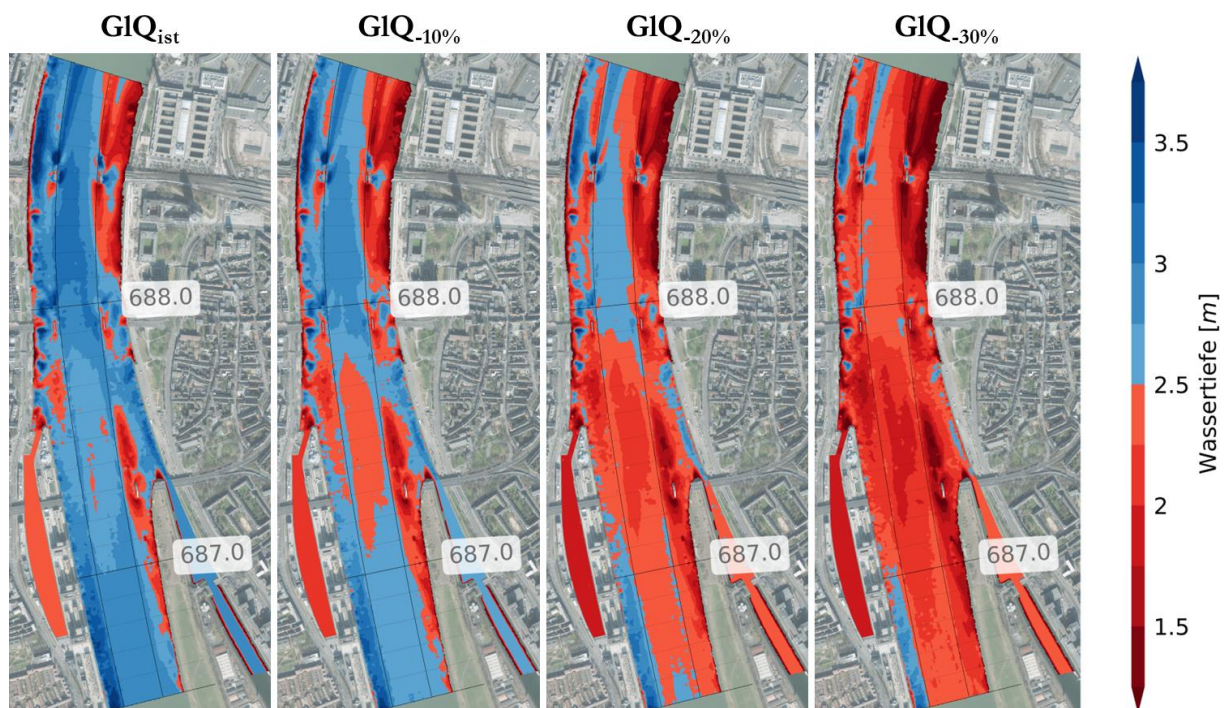


Abbildung 3-17: Berechnete Wassertiefen im Bereich der Deutzer Platte (Köln) für einen Abfluss, der dem GIQ_{2012} (links) entspricht, sowie einen in drei Schritten um jeweils 10 % reduzierten GIQ_{2012} bis zum Erreichen des Extremszenarios von -30 % (vgl. Abbildung 3-18, RCP8.5). Die Strichelung zeigt die Fahrrinne (längs) und die Hektometer-Einteilung (quer). Hintergrund: Luftbild, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Die Auswertung zeigt deutlich, dass im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse die Tiefeneinschränkungen in der Fahrrinne zunehmen und bereits bei einer Reduktion des Abflusses 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 um 10 % entstehen neue Einschränkungen.

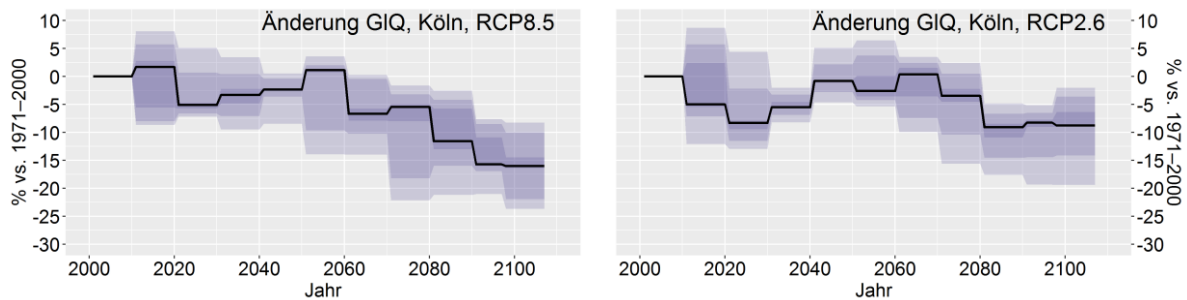


Abbildung 3-18: Änderung des für das Wasserstraßenmanagement wichtigen gleichwertigen Abflusses (GIQ) am Pegel Köln unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (links) und des *Klimaschutzszenarios* (rechts). In der WSV-Praxis wird dieser Kennwert ca. alle 10 Jahre auf Basis vieljähriger Daten (hier: 30 Jahre)¹³ neu ermittelt. Dieses Vorgehen wurde hier 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.

Entwickeln sich die Abflüsse in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entsprechend Abbildung 3-18 noch stärker nach unten, verschärfen sich die Tiefeneinschränkungen voraussichtlich weiter und die Managementkonzepte müssen an der Wasserstraße „Niederrhein“ langfristig neu gedacht werden.

3.6 Wassergüte

3.6.1 Grundlagen

Wasserstraßen sind nicht nur Verkehrsträger, sondern auch Natur- und Lebensraum. Außerdem wird das Wasser von Wasserstraßen in vielfältiger Weise genutzt (z. B. als Kühlwasser). Für das Wasserstraßenmanagement und somit die WSV sind daher neben der Wassermenge auch Parameter und Prozesse der Gewässergüte relevant. Dies betrifft z. B. Überschreitungshäufigkeiten von prozesstechnisch oder gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten – auch im Hinblick auf die Vorgaben der EU-WRRL. Nach dieser Richtlinie¹⁴ müssen alle Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet größer 10 ha den „guten ökologischen Zustand“¹⁵ bzw. das „gute ökologische Potenzial“¹⁶ 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 Wassertemperatur mit ein, welche u.a. für die Nutzung des Fließgewässers als Kühlwasser relevant ist. Zusätzlich wird die Sauerstoffkonzentration in die Betrachtungen integriert, da diese das Wohlbefinden bzw. den „Stress“ der Fauna mitbestimmt. Auch der Algengehalt¹⁷, welcher für das Sedimentmanagement der WSV von Bedeutung ist, wird in die Analysen mit

¹³ Die GIQ-Festlegung erfolgt realiter zwischenzeitlich auf Basis einer 100 Jahre umfassenden Zeitreihe (ZKR 2014). Diesem Vorgehen kann hier nicht gefolgt werden, da sich der Klimawandel innerhalb von 100-Jahren in der Beobachtung zu einem großen Teil vollzogen hat bzw. sich lt. den Zukunftsprojektionen vollziehen wird. Die Untersuchung des Phänomens "Klimawandel" erfordert die vergleichende Analyse von kürzeren Zeiträumen. Gemäß den Konventionen der WMO werden hier 30 Jahre gewählt.

¹⁴ Umgesetzt in deutsches Recht durch die Oberflächengewässerverordnung (OGewV).

¹⁵ Bewirtschaftungsziel der EU-WRRL für natürliche Gewässer im Hinblick auf die Fischfauna, das Makrozoobenthos, die Makrophyten und das Phytoplankton bzw. Phytobenthos.

¹⁶ Bewirtschaftungsziel der EU-WRRL, das für erheblich veränderte und künstliche Gewässer gilt.

¹⁷ Phytoplankton approximiert durch den Gehalt Pigment Chlorophyll-a.

eingeschlossen. Alle vorgestellten Auswertungen beziehen sich auf eine Auswahl von fünf Zukunftsprojektionen unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* und beschränken sich auf die Wasserstraßen Rhein und Elbe¹⁸.

3.6.2 Änderung der Gewässertemperatur

In der Elbe und im Rhein wird die Anzahl an Tagen mit kritischen Wassertemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen. Abbildung 3-19 zeigt dies exemplarisch in Form eines Längsschnittes für den ökologisch relevanten Schwellenwert von 25 °C in der Elbe.

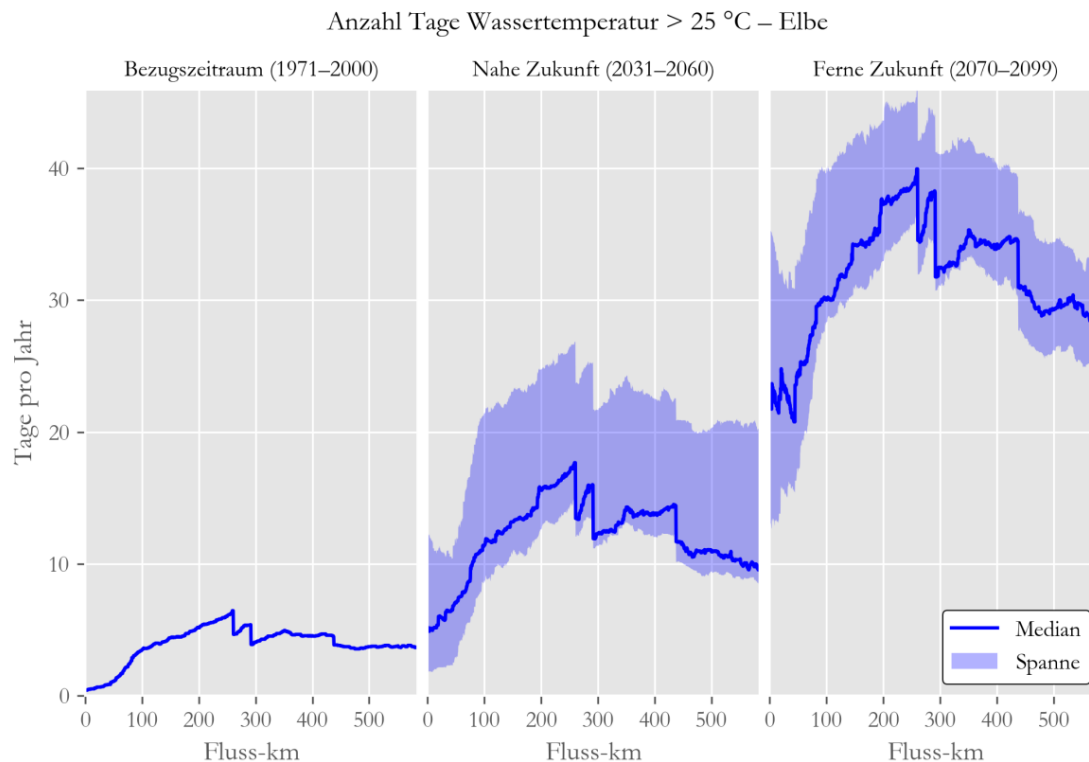


Abbildung 3-19: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 °C in der Binnenelbe für den *Bezugszeitraum* (Modellrealisation auf Basis von Beobachtungsdaten) sowie die *nahe* und die *ferne Zukunft*. Für die *Zukunftszeiträume* sind der Ensemblemedian und die Spannweite (Minimum und Maximum) der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* dargestellt.

Abbildung 3-20 setzt die heutige und zukünftige Exposition gegenüber hohen Wassertemperaturen (ebenfalls Anzahl Tage > 25 °C) kartographisch für Rhein und Elbe um. Waren es im *Bezugszeitraum* in der Elbe noch 3 bis 6 Überschreitungstage, so ist in der *fernen Zukunft* an Elbe und Rhein mit mehr als 30 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 werden sich auch der Sauerstoffgehalt und die Konzentrationen des Phytoplanktons (freischwebende Algen) verändern. Vor allem in den Spätsommer- und Herbstmonaten können die Phytoplanktondichten in der Elbe zurückgehen. Die Gründe 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 die verringerten Algendichten (als Sauerstoffproduzent),

¹⁸ Der Aufbau eines Analysesystems für weitere Wasserstraßen ist im Rahmen des DAS-Basisdienstes "Klima und Wasser" vorgesehen (Modulwassergüte@BfG).

wie auch die höheren Temperaturen (geringere Löslichkeit des Sauerstoffs) kann es insbesondere in der *fernen Zukunft* zu einer Verringerung der Sauerstoffkonzentrationen kommen. Kritisch niedrige Werte werden aber voraussichtlich noch nicht erreicht. 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. Weitergehende Informationen zu diesem Thema sind im Schwerpunktbericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) nachzulesen.

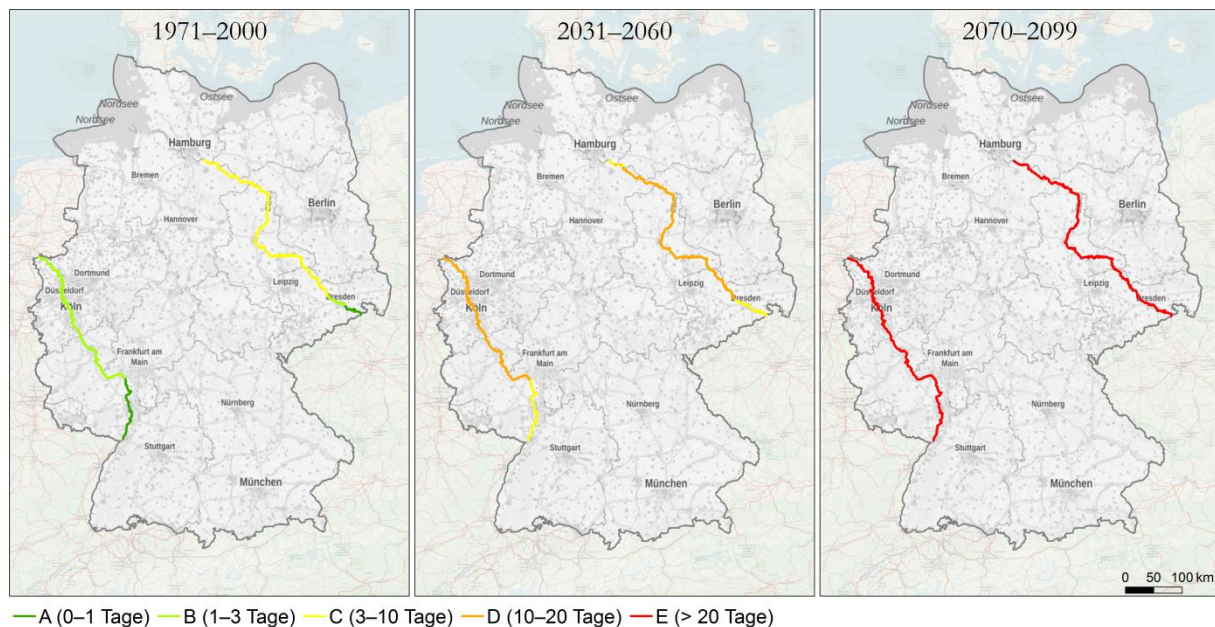


Abbildung 3-20: Mittlere Anzahl von Tagen mit Wassertemperatur über 25 °C an Elbe und Rhein, simuliert auf Basis von fünf Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* für den *Bezugszeitraum* (links) sowie die *nahe* (Mitte) und die *ferne Zukunft* (rechts).

3.7 Klimawirkungen auf Seeschiffahrtsstraßen

Auf die Seeschiffahrtsstraßen wirkt sich der Klimawandel über den beschleunigten Meeresspiegelanstieg, Änderungen im Abflussgeschehen im Binnenbereich und Änderungen von Windrichtung und -stärke aus (Abbildung 3-21). Einen dominanten Einfluss auf die Nutzung und Unterhaltung der Wasserstraßen haben dabei der Meeresspiegelanstieg und die damit einhergehenden Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und den Ästuaren. 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, auf die gegebenenfalls mit erhöhten Baggemengen 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. 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.

Neben dem Meeresspiegelanstieg spielen auch Änderungen im Abfluss eine Rolle. Die Verlängerung und Intensivierung von Niedrigwasserperioden im Binnenbereich (s. Abschnitt 3.5) 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 ist die Vorhersage des Abflussgeschehens auf längeren Zeitskalen (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.

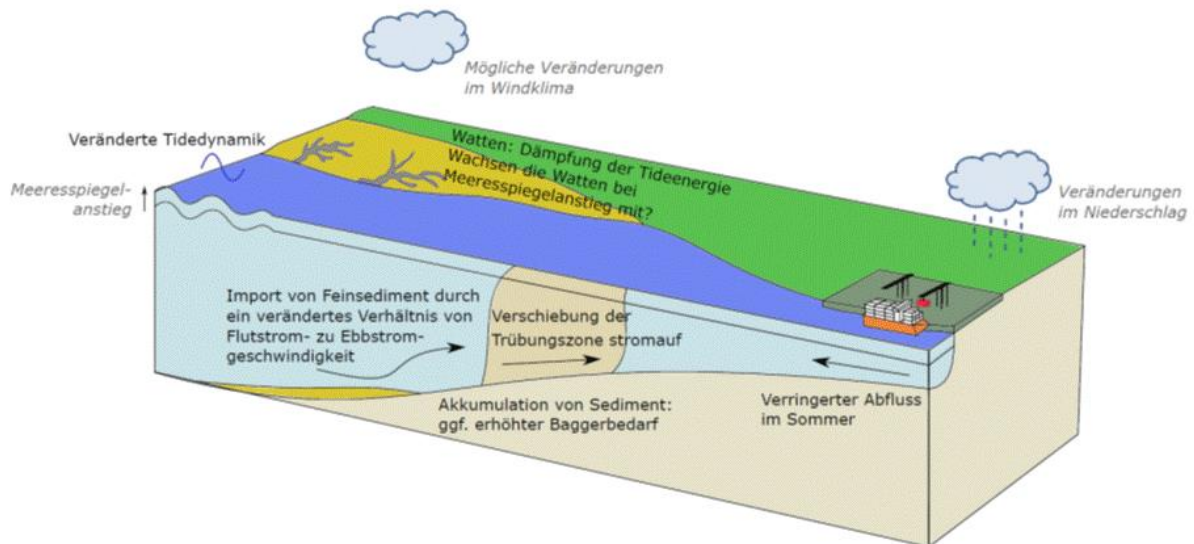


Abbildung 3-21: Schematische Darstellung der Klimawirkungen auf Seeschiffahrtsstraßen im Ästuar. Die Eingangsgrößen für die Simulationen im Ästuarbereich sind als grauer Text gesetzt.

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. 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 3.8 behandelt.

3.8 Klimawirkungen auf den Nord-Ostsee-Kanal

Als Fallstudie für den Küstenbereich wurde im BMVI-Expertennetzwerk die Resilienz des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) gegenüber den zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen (insbesondere Meeresspiegelanstieg und Änderungen in der Binnenhydrologie) untersucht (Fallstudiengebiet siehe Abbildung 3-22). Der NOK ist eine der meistbefahrenen künstlichen Wasserstraßen für seegehende Schiffe weltweit. Jährlich werden ungefähr 100 Mio. t 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.



Abbildung 3-22: Lage des Fallstudiengebietes NOK.

Die Bewirtschaftung des NOK erfolgt mit Bezug auf einen Kanalwasserstand, der möglichst konstant auf mittlerem Meeresspiegelniveau 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 Wasserbauwerke hängt mit dem Wasserstand zusammen. Die Regulierung des (Kanal-)Wasserstandes erfolgt im Regelfall, d. h. für Wasserstände bis 5,25 m PNP (Pegelnullpunkt), 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 hier 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 so 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. Gleichzeitig ist mit Veränderungen der Binnenhydrologie zu rechnen. 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 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 Richtungsaussage, 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 hier nicht.

Abbildung 3-23 zeigt die mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der Wasserstand im Kanal in mindestens einer Stunde den Wert von 5,40 m PNP überschreitet. Dabei liegen der Wasserstandssimulation im NOK folgende Annahmen zu Grunde:

- Zufluss aus dem Einzugsgebiet entsprechend der meteorologischen Änderungssignale für die Klimaszenarien *Klimaschutz* und *Weiter-wie bisher* in der *nahen* und *fernen Zukunft*.
- Entwässerung in Brunsbüttel über 16 Schütze (ohne Umläufe) und in Kiel-Holtenau über das Siel (Details im BfG-Bericht von Ebner von Eschenbach und Hohenrainer (2019)).
- Schrittweise Erhöhung der Wasserstände um bis zu 170 cm in der Nordsee (Übertragung des Wasserstandes von Cuxhaven nach Brunsbüttel) und Ostsee (Beobachtungsdaten aus Kiel-Holtenau).

Das Schleusungswasser an den Standorten Brunsbüttel und Kiel-Holtenau wurde modellextern vorgegeben und anhand konstanter Kammerfüllungszahlen ermittelt (Ebner von Eschenbach und Hohenrainer 2019).

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aufgeführt:

1. In der Simulation des *Bezugszeitraums* ist die mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP in mindestens einer Stunde überschritten wird, gleich Null. Dies entspricht weitgehend der Beobachtung: In dem mit Daten verfügbaren Zeitraum von 1977–2000 (24 Jahre) wurden 5 Tage registriert, an denen der Wasserstand über 5,40 m PNP lag (Häufigkeit 0,2).
2. Es zeigte sich eine Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen mit Wasserständen über 5,40 m PNP bei steigenden Außenwasserständen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 170 cm wird ein Kanalwasserstand von 5,40 m PNP im Mittel in 85 % der Tage eines Jahres überschritten (300 Tage). Im Hinblick auf die Gewährleistung der Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal ist rechtzeitig eine Anpassungsstrategie zu entwickeln.
3. Die im Rahmen der Klimaszenarien berücksichtigte Änderung des Zuflusses zum NOK hat einen geringeren Einfluss auf kritische Bewirtschaftungssituationen als die in den Szenariorechnungen untersuchte Änderung des Meeresspiegels.

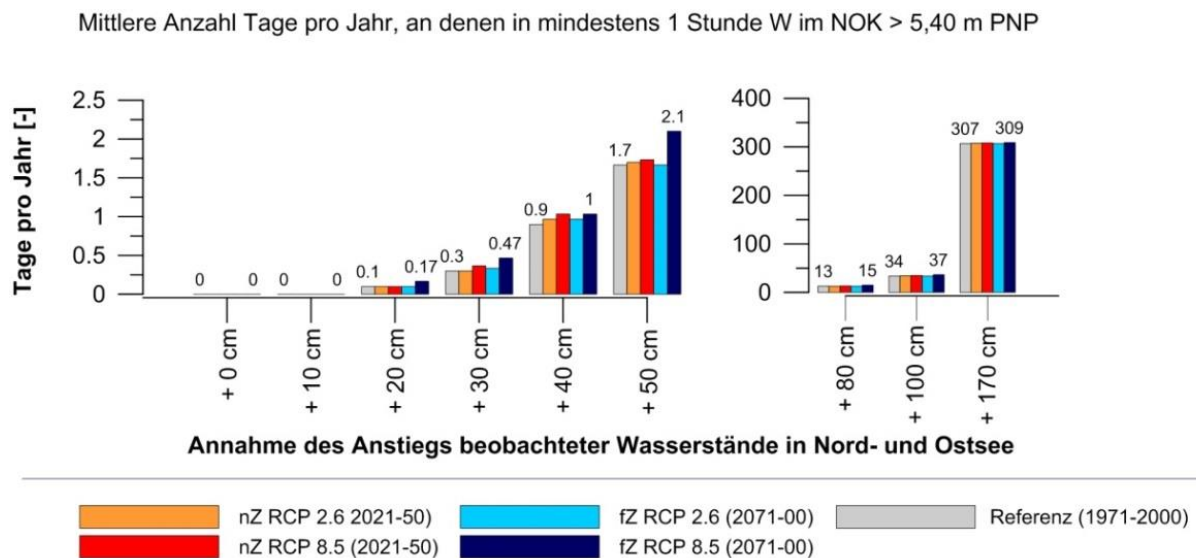


Abbildung 3-23: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird. Ergebnisse der Szenariorechnungen (nZ = *nabe Zukunft*, hier 2021–2050; fZ = *ferne Zukunft*) mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen (Ebner von Eschenbach und Hohenrainer 2019, Schade et al. 2020).

Ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm würde das Entwässerungspotenzial bis zum Ende des Jahrhunderts um 40 % verringern (blaue Linie in Abbildung 3-24). Berücksichtigt man ferner die aktuelle Landsenkung im südwestlichen Schleswig-Holstein (gelbe und orange Linie in Abbildung 3-24) und höhere Niederschläge, so reduziert sich das Entwässerungspotenzial noch deutlich stärker. Eine weitere Reduzierung kann durch erhöhte Meeresspiegelanstiegsraten aufgrund eines höheren Beitrages der Kryosphäre verursacht werden. Für Hamburg wurden beispielsweise bis zu 174 cm Meeresspiegelanstieg bis 2100 projiziert (aus Grinsted et al. (2015), lila und grüne Linie in Abbildung 3-24). 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 (z. B. Installation eines Pumpwerks).

Während es in der Praxis möglich ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung, wenn zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser mit erhöhten Wasserständen auftreten. Tabelle 3-4 zeigt die Anzahl von Ereignissen mit 1 bis 6 aufeinanderfolgenden Niedrigwassern mit erhöhten Wasserständen für 30-Jahres-Perioden (BSH-Ansatz). Unter den getroffenen Szenariannahmen ist ein rapider Anstieg an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern (sogenannten Kettentiden) zu verzeichnen, der insbesondere für die Fälle mit 5 und 6 aufeinanderfolgenden Kettentiden statistisch hochsignifikant ist (d. h. auf dem 99 % Niveau). Während demnach aktuell im Durchschnitt etwa 17 einzelne Niedrigwasser¹⁹ oberhalb des definierten Schwellwertes für den Kanalwasserstand pro Jahr beobachtet werden, wird sich diese Zahl in Zukunft durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen.

Mit Hilfe des beschriebenen Modellsystems konnten Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOKs identifiziert und mögliche zukünftige Änderungen in deren Auftreten abgeleitet werden. Diese Analysen liefern einen wichtigen Beitrag zur Anpassungsstrategie des Bundes an den Klimawandel (Bundesregierung 2015). 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 entgegen wirken 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. Der Neubau und Ersatz von Schleusen, die einen ungestörten Schiffsverkehr im NOK ermöglichen sollen, werden anhand der aktuellen Erkenntnisse zum beschleunigten Meeresspiegelanstieg geplant. Die WSV wird hier die neuen prognostizierten Zahlen von 1,74 m (siehe Grinsted et al. (2015)) anstelle der bisher im *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2012* (MELUR SH 2012) berücksichtigten 0,50 m beachten. In diesem Prozess wird auch die Schleuse in Kiel-Holtenau derart geplant, dass eine nachträgliche Anpassung der Konstruktion anhand aktueller Werte des Meeresspiegelanstiegs möglich sein wird. Dies stellt im Gegenzug auch eine Optimierung des Ressourcenverbrauchs anhand des tatsächlichen Bedarfs sicher. So wurden beispielsweise die Konstruktionspläne zum Bau der Schleusentore anhand des Optimierungsprozesses verändert und angepasst. Hintergründe und Einzelheiten zu den Auswirkungen des Klimawandel auf den NOK finden sich im Bericht des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020).

¹⁹ Siehe Tabelle 3-4, entspricht 516 Ereignissen im 30-Jahres-Zeitraum 1981–2010.

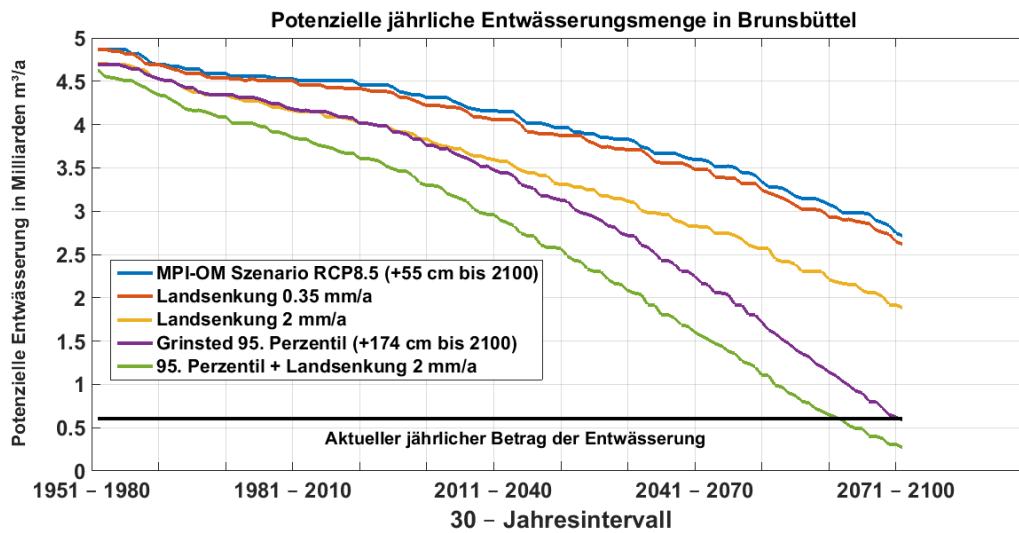


Abbildung 3-24: 30-jähriges gleitendes Mittel des jährlichen Entwässerungspotenzials des NOK in Brunsbüttel in Mrd. m³/Jahr unter Annahme des *Weiter-wie-bis-her-Szenarios* RCP8.5 ohne/mit Einbezug der Effekte durch Landsenkung (blaue, gelbe und orange Linie) und einer Abschätzung der zusätzlichen Gletscherschmelze der Polargebiete (lila und grüne Linie). Die schwarze Linie zeigt den aktuellen jährlichen Betrag der entwässert werden muss (600 Mio. m³/Jahr).

Tabelle 3-4: Anzahl der Ereignisse von Tideniedrigwassern (NW) am Pegel Brunsbüttel pro 30-Jahres-Periode, die höher sind als der Betriebswasserstand im NOK, dargestellt für 1 bis 6 aufeinanderfolgende NW für verschiedene Zeiträume bis Ende des Jahrhunderts aus dem MPI-OM/REMO RCP8.5 Lauf.

NW Ereignis	1951–1980	1981–2010	2011–2040	2041–2070	2071–2100
N=1	347	516	564	965	1752
N=2	89	136	185	329	702
N=3	31	54	73	165	377
N=4	8	17	24	63	167
N=5	2	4	11	33	90
N=6	1	0	3	15	45

4 Sensitivitätsanalyse

- Für die Sensitivitätsanalyse werden Informationen zu sensitivitätsbestimmenden Eigenschaften des Verkehrs bzw. der Verkehrsinfrastruktur benötigt. Flächendeckende Analysen scheitern deshalb häufig an der Datenlage. Besonders für die Betrachtung objektspezifischer Sensitivitäten liegen bisher kaum geeignete Informationen flächendeckend vor.
- Die Höhenlage von Straßen- und Schienenwegen sowie die Position bzw. Lage der Elektronik an Schienenwegen zählen zu den sensitivitätsbestimmenden Eigenschaften des landgebundenen Verkehrs gegenüber Hochwasser, die nicht flächendeckend für die Analyse zur Verfügung standen.
- Das elektrifizierte Bundesschienennetz ist besonders sensitiv gegenüber Sturmwurf und -bruch.
- Im Bereich der Wasserstraße zeigen sich für etliche betrachtete Klimawirkungen freifließende Abschnitte sensitiver gegenüber klimatischen Einflüssen als staugeregelte oder Kanalstrecken.

4.1 Einleitung

Für die Sensitivitätsanalyse sind Informationen zu spezifischen Eigenschaften eines Streckenabschnitts oder Bauwerks notwendig, die die Anfälligkeit gegenüber den klimatischen Einflüssen bzw. Naturgefahren beschreiben. In den in Abschnitt 2.3 dargestellten Wirkungsketten sind verschiedenste sensitivitätsbestimmende Systemeigenschaften genannt. Über die gesamte Verkehrsinfrastruktur betrachtet sind diese Systemeigenschaften unterschiedlich variabel. Je nach Betrachtungsebene (Netz, Streckenabschnitt, Objektebene) ist die Kenntnis der sensitivitätsbestimmenden Eigenschaften darüber hinaus in unterschiedlichem Detailgrad erforderlich. Informationen zur gebietspezifischen Sensitivität sind häufiger flächendeckend vorhanden als zur streckenbezogenen Sensitivität. Daten zur objektspezifischen Sensitivität sind in der Regel in geringerem Umfang zugänglich bzw. nutzbar. Wo Daten zur Sensitivität fehlen oder auch Unsicherheit bezüglich der sensitivitätsbestimmenden Eigenschaften bestehen, können Informationen auch aus dokumentierten Schadensereignissen abgeleitet werden.

Spezifische, flächendeckende und strukturierte Informationen zu Schäden durch bestimmte Naturgefahren oder Auskünfte zu Objekteigenschaften für die Sensitivitätsbewertung genannten lagen den Bearbeiterinnen und Bearbeitern des BMVI-Expertenetzwerks leider nicht vor. Daher erfolgt eine bundesweite Sensitivitätsanalyse in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks nur exemplarisch für ausgewählte Sensitivitätsindikatoren und Klimawirkungen, für welche entsprechende Datengrundlagen zusammengetragen werden konnten.

4.2 Exemplarische Sensitivitätsbetrachtungen

4.2.1 Sensitivität von Schiene und Straße gegenüber *Sturmgefahren*

Beim Schienennetz sind elektrifizierte Strecken (in der Nähe von Bäumen) besonders gefährdet für Sturmwurf und -bruch. Diese machen insgesamt rund 12 % des Gesamtnetzes aus (Tabelle 4-1). Damit ist etwa die Hälfte der Schienenstrecken, welche durch bewaldetes Gebiet führen (23 % des Gesamtnetzes; siehe Tabelle 3-1) elektrifiziert und somit durch die potenzielle Beschädigung von Oberleitungen besonders anfällig gegenüber Sturmwurf. Beschädigte Oberleitungen bedeuten einen erhöhten Instandsetzungsaufwand gegenüber der reinen Beräumung der Strecken von umgestürzten Bäumen.

Tabelle 4-1: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesschienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m (Exposition) an elektrifizierten Bahnstrecken (Sensitivität).

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
▪ Laubwald	2.490	7
▪ Nadelwald	2.000	6
▪ Mischwald	1.870	6
▪ Bäumen (insgesamt)*	4.130	12

* Entlang der beiden Seiten der Bahnstrecke können unterschiedliche Waldformen auftreten, weshalb die Gesamtstreckenlänge der bewaldeten Strecke etwas kleiner ist als die Summe der Strecken in der Nähe zu Laub-, Nadel- und Mischwald

Während Sturmwurf vor allem für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevant ist, betrifft der Themenkomplex „Seitenwind“ vor allem die Verkehrsbeteiligte. Besonders exponiert ist der Verkehr in diesem Zusammenhang auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. Sowohl Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (wie z. B. Lkw) als auch Motorradfahrer sind auf solchen Brücken besonders gefährdet. Um Personen- und/oder Sachschäden bei resultierenden Unfällen zu vermeiden, sind viele Brücken bereits mit Windschutz- und Windwarneinrichtungen ausgestattet, was zur Verringerung der Sensitivität beiträgt.

4.2.2 Sensitivität von Schiene und Straße gegenüber Hochwasser

Wo und wie intensiv Straße und Schiene bzw. deren Infrastruktur in Deutschland durch aktuelle und zukünftige Hochwasser- oder Starkregenereignisse betroffen sein könnten, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die Eigenschaften der Infrastruktur können die potenzielle Betroffenheit mindern oder intensivieren und beeinflussen somit die Sensitivität des jeweiligen Verkehrsträgers.

Die exakte Dammhöhe und Lage der Gleise sowie die Position bzw. Lage der Elektronik sind bei der Schiene entscheidende Faktoren, die bei einem Überschwemmungsereignis eine wichtige Rolle spielen. In Verbindung mit Pegelständen lassen sich genauere Aussagen darüber treffen, inwieweit ein Schienenkörper bei einem Hochwasserereignis betroffen ist. Mittels 3-D-Gleislagedaten soll dieser Aspekt in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks näher untersucht werden, ebenso wie das Vorhandensein von Hochwasserschutzmaßnahmen, die sich ebenfalls auf die Sensitivität der Schiene bei einem Flusshochwasser auswirken. Unzureichend bemessene Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässe von Fließgewässern bergen bei Starkregenereignissen ein erhebliches Sicherheitsrisiko und können potenziell betriebliche Einschränkungen während und nach extremen Niederschlagsereignissen hervorrufen.

Detaillierte Aussagen zu weiteren Faktoren, die die Sensitivität des Bahnkörpers in Hinblick auf Hochwasser und Starkregen beeinflussen, lassen sich aus tiefergehenden Auswertungen von Schadensfällen ableiten. Entsprechende Arbeiten sind in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant.

Die Sensitivität der Straße wurde in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks nicht weiter untersucht, gleicht aber in vielen Aspekten grundsätzlich der oben beschriebenen Sensitivitäten bei der Schiene. Detaillierte Betrachtungen zu dieser Thematik sind für die zweite Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant.

4.2.3 Wasserstraßenspezifische Sensitivitätsbewertung

Die Sensitivität des Abflussgeschehens und der verfügbaren Wassertiefe an den Binnenschiffahrtsstraßen gegenüber hydrometeorologischen und hydrologischen Veränderungen ist insbesondere in den frei fließenden Abschnitten hoch (rote Farbe in Abbildung 4-1). Hier gelten die stark vom Klimawandel beeinflussten

Gesetzmäßigkeiten des Einzugsgebietes Wasserhaushalts. In staugeregelten Bereichen (gelbe Strecken in Abbildung 4-1) und in viel stärkerem Maße an Kanalstrecken (grüne Strecken in Abbildung 4-1) ist die Steuerung durch den Menschen ein bedeutender Faktor. Die Sensitivität des Verkehrssystems gegenüber klimatischen Einflüssen ist hier geringer. Vor dem Blickwinkel von Gewässergütespekten können umgekehrt staugeregelte Strecken wegen der niedrigeren Fließgeschwindigkeiten eine höhere Sensitivität aufweisen.

Hinsichtlich der Sensitivität der Wasserstraße gegenüber Hochwasser finden sich verschiedene Aspekte der Verkehrssicherheit oder auch des Schutzes ufernaher Bebauung in der Ableitung des HSW wieder. Lokale Strömungsverhältnisse, beispielsweise Querströmungen, Brückendurchfahrtshöhen oder die Uferbeschaffenheit gehen in den HSW ein. Abbildung 4-2 zeigt eine Übersicht von Pegeln, für die HSW definiert ist.

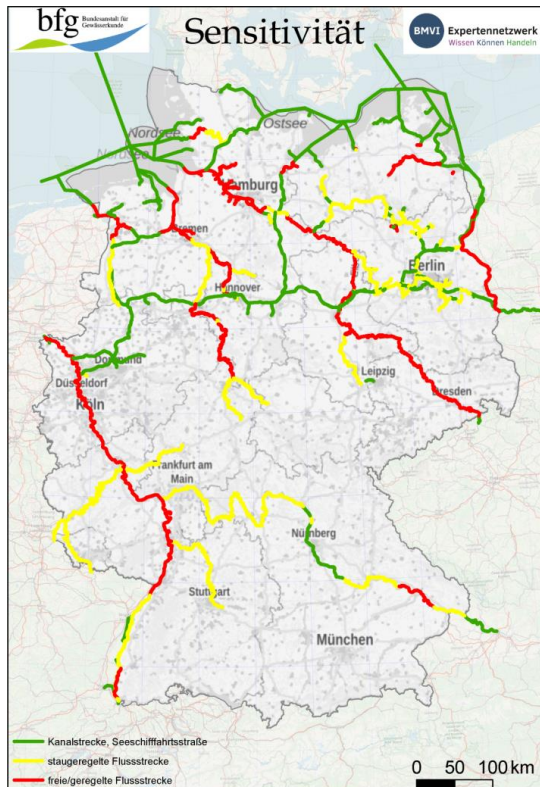


Abbildung 4-1: Sensitivitätsanalyse Wasserstraße auf Grundlage des Wasserstraßentyps. Datenquelle: WSV/BfG (BfG 2017)

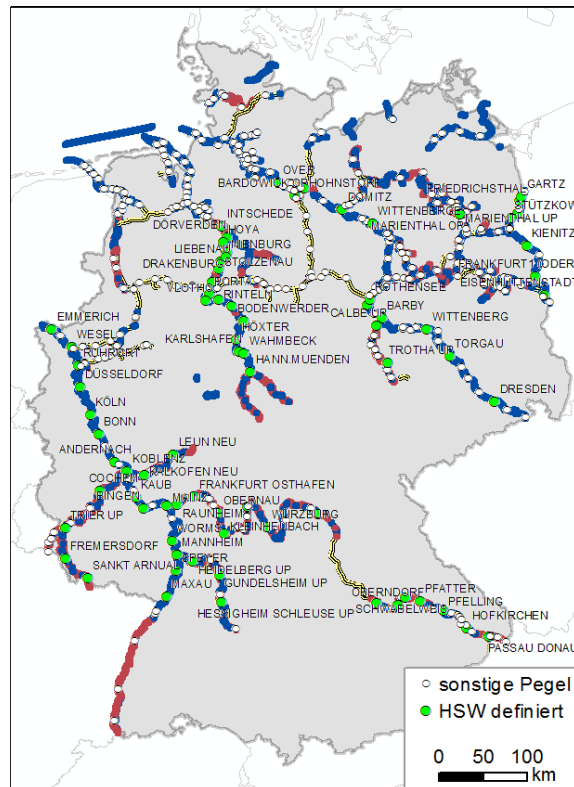


Abbildung 4-2: Übersicht der Pegel des Elektronischen Wasserstraßeninformationssystems (ELWIS), an denen HSW definiert ist.

5 Kritikalitätsanalyse

- Die wirtschaftliche Bedeutung einer möglicherweise klimawandelbedingt eingeschränkten Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur hängt u. a. vom Verkehrsaufkommen ab.
- Die Bewertung der Kritikalität von Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes erfolgt anhand eines indikatorenbasierten Bewertungsansatzes. Erste Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse werden am Beispiel ausgewählter Indikatoren wie dem durchschnittlichen werktäglichen Verkehr (DTVw) vorgestellt. Für die Jahre 2015 und 2030 zeigt das Beispiel des DTVw, dass vor allem Bundesautobahnen in und zwischen Metropolregionen eine hohe bis sehr hohe verkehrliche Relevanz aufweisen.
- Für den Schienengüterverkehr weisen Strecken in den Korridoren der Transeuropäische Netze – Verkehr (TEN-V) hohe Zugzahlen auf. Unterbrechungen auf wichtigen Schienenwegen ziehen erhebliche volkswirtschaftliche Folgeschäden nach sich. So hat beispielsweise die Streckensperre bei Rastatt im Jahr 2017 Kosten in Höhe von 2 Mrd. € ausgelöst.
- 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 ‚schwach‘ belasteten Abschnitten eine hohe Bedeutung für die regionale Wirtschaft haben können. Ferner sind ökologische Funktionen bei der Bewertung der Kritikalität der Wasserstraßen zu berücksichtigen.

5.1 Einleitung und methodische Grundlagen

Bei der Bewertung der Kritikalität von Teilen des Verkehrsnetzes geht es um die Beschreibung des Wertes bzw. der Bedeutung von Verkehrsachsen vor dem Hintergrund eines möglichen funktionellen Versagens bzw. einer Einschränkung. Diese Bewertung ist neben der Expositions- und der Sensitivitätsanalyse ein Teil der Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertennetzwerks. Es werden jedoch bestehende Daten verwendet, die im Grundsatz unabhängig von der Thematik „Klimawandel und Wetterextreme“ generiert wurden. Nähere Beschreibungen zum Analysebaustein Kritikalitätsanalyse finden sich im Abschnitt 2.2.5.

Das hier verwendete Datenmaterial stammt überwiegend aus dem Bundesverkehrswegeplan (BMVI 2015b). Die sogenannte Verkehrsverflechtungsprognose erlaubt z. B. eine Bewertung der aktuellen (Bezugsjahr 2010/2015) und zukünftigen (Prognosejahr 2030) Verkehrsbelastung. Die Kritikalitätsbewertung der Netze von Straße, Schiene und Wasserstraße erfolgt klimawirkungsübergreifend, d. h. es ist nicht entscheidend, ob eine Verkehrseinschränkung durch Hochwasser, Sturm, Hangrutschung oder Niedrigwasser verursacht ist. Unterschiede ergeben sich jedoch für die einzelnen Verkehrsträger aufgrund deren Netzstrukturen und unterschiedlichen Funktionen im Verkehrssystem (und Umweltsystem).

Die Bewertung der Kritikalität kann aus verschiedenen Blickwinkeln vorgenommen werden. Kenngrößen zur Bewertung der Kritikalität können beispielsweise Fahrzeugzahlen, Anzahl beförderter Personen, nicht vorhandene Redundanzen, beförderte Gütermengen (gewichts- oder volumenbezogen) oder der Wert beförderter Güter sein. Die Wasserstraße hat neben der verkehrlichen Bedeutung auch hohe wasserwirtschaftliche und ökologische Relevanz, so dass hier weitere Faktoren in die Kritikalitätsbetrachtung einfließen können (z. B. Wasserentnahmen, Schutzstatus; s. a. Abschnitt 2.2.5). Je nach Fragestellung und Verkehrsträger sind unterschiedliche Kennwerte sinnvoll und notwendig.

5.2 Verkehrsträger Straße

5.2.1 Einleitung und Grundlagen

Verkehrsdaten und Informationen über das Straßennetz sind essentieller Bestandteil straßenbezogener Klimawirkungsanalysen auf Basis des im Abschnitt 2.2 beschriebenen methodischen Rahmens der Klimawirkungsanalyse. Hinsichtlich der Analysen für den Verkehrsträger Straße sind insbesondere Straßennetzmodelle von grundlegender Bedeutung. In den laufenden Forschungsarbeiten werden mit dem Netzmodell der Bundesfernstraßen (NEMOBFStr) und dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra) zwei unterschiedliche Straßennetzmodelle berücksichtigt. Beide Modelle unterscheiden sich in ihrer Netzgeometrie und in ihrem Informationsumfang, weshalb ihre Eigenschaften im Folgenden kurz erläutert werden.

Das NEMOBFStr bildet den jeweils aktuellen Stand des Autobahn-, Bundes- und Landesstraßennetzes ab und enthält darüber hinaus die wichtigsten Kreis- und Gemeindestraßen sowie in unterschiedlicher Tiefe das Umlandnetz. Es beinhaltet zusätzlich alle gemäß dem aktuellen Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen²⁰ festgelegten Neu- und Ausbauprojekten. Die Streckenverläufe werden anhand von Kanten und Knoten dargestellt. Die einzelnen Netzelemente des NEMOBFStr sowie der reale Verlauf des Bundesfernstraßennetzes werden relativ genau abgebildet, können aber hinsichtlich ihrer Digitalisierung (Geometrie) Abweichungen aufweisen. Im NEMOBFStr ist eine Vielzahl von streckenbezogenen Attributen hinterlegt, anhand derer beispielsweise der jeweilige Querschnittszustand eines Streckenabschnittes detailliert abgelesen werden kann. Das NEMOBFStr findet im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) Verwendung.

Im BISStra werden primär die historisch und aktuell als Bundesfernstraßen klassifizierten Abschnitte des Straßennetzes vorgehalten. Es handelt sich hier ebenfalls um ein Knoten-Kanten-Modell. Verglichen mit dem NEMOBFStr wird der Bestand der Bundesfernstraßen anhand von Netzknoten und Nullpunkten (den Knoten im Modell) sowie Sektoren (den Kanten im Modell, nach Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) in Abschnitte und Äste aufgeteilt) lagegetreuer abgebildet. Das BISStra ist gegenüber dem geometrieorientierten NEMOBFStr ein eher objektorientiertes Modell. So können z. B. einem Sektor im BISStra mehrere Geometrien zugeordnet werden. Dabei werden z. B. Streckenabschnitte mit Richtungstrennung im BISStra anhand von Haupt- und Nebenachsen erfasst, anhand derer die Hin- und Rückrichtungen von Strecken dargestellt werden. Verkehrsknoten mit großer räumlicher Ausdehnung werden mit Hilfe von Ästen detailliert abgebildet.

Die einzelnen Teilschritte der Klimawirkungsanalyse stellen bestimmte Anforderungen an die Eigenschaften eines Straßennetzmodells. Bei der Ermittlung potenziell exponierter Streckenabschnitte ist insbesondere eine möglichst hohe räumliche Lagegenauigkeit ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Straßennetzmodells. Da das BISStra den Streckenverlauf von Bundesfernstraßen lagegetreuer abbildet als das NEMOBFStr (s. o.), wurde im Rahmen eines externen Forschungsprojekts (SSP Consult 2019) eine Angleichung der Netzgeometrie des NEMOBFStr an die des BISStra vorgenommen. Ziel des Forschungsprojekts war es, die räumliche Lage der Kanten des NEMOBFStr an den Abschnitten des BISStra-Netzes lagegenau auszurichten, so dass die Geometrien beider Straßennetzmodelle räumlich möglichst exakt übereinstimmen.

Die Angleichung der Netzgeometrien sah im Fall von richtungstrennten Haupt- und Nebenachsen die Ermittlung der jeweiligen geometrischen Mittelachse vor. Zusammen mit den übrigen Hauptachsen ohne Richtungstrennung wurde auf den so erzeugten Mittelachsen mit Hilfe eines Algorithmus die Lage der Stützpunktfolge jeder NEMOBFStr-Kante bestimmt. Die im Ergebnis ermittelten Koordinaten konnten im Anschluss genutzt werden, um die Kanten des NEMOBFStr als lageangepasste Polylinien zu erzeugen. Eine abschließende Lageverortung der Netzknoten des NEMOBFStr an den entsprechenden Anfangs- bzw. Endpunkten sowie die Verknüpfung des nachgeordneten Netzes komplettierten die Angleichung der

²⁰ Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen, als Anlage zum Sechsten Gesetz zur Änderung des Fernstraßenausbaugesetzes (6. FStrAbÄndG) vom 23. Dezember 2016

Netzgeometrie des NEMOBFStran die des BISStra. Die erzielten Ergebnisse wurden im Hinblick auf mögliche Netzlücken, die aufgrund von Abweichungen im Netzaufbau des BISStra entstanden sein können, untersucht. Eine abschließende Plausibilisierung stellte dabei sicher, dass Lücken automatisiert geschlossen und ggf. manuell angepasst wurden.

Die erfolgte Netzangleichung ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer integrierten Klimawirkungsanalyse (s. Kapitel 6). Sie ermöglicht es, das NEMOBFStr sowohl der Kritikalitäts- als auch der Expositionsanalyse zugrunde zu legen. So wurden die in Kapitel 3 dargestellten Expositionsanalysen bereits auf Basis des lageangepassten NEMOBFStr durchgeführt. Durch die erfolgte Netzangleichung soll künftig vor allem die Verknüpfung beider Teilanalysen erleichtert werden. Der Kritikalitätsanalyse liegt das NEMOBFStr deshalb zugrunde, weil es vielfältige Anwendungspotenziale für verkehrliche Betrachtungen bietet.

5.2.2 Indikatorenbasierter Bewertungsansatz

Die Kritikalitätsanalyse für den Verkehrsträger Straße wird derzeit im Rahmen eines externen Forschungsprojekts durchgeführt (Ingenieurgruppe IVV 2019). Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, einen indikatorenbasierten Bewertungsansatz zu entwickeln, anhand dessen sich die Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes abschätzen lässt. Die diesbezüglichen Forschungsarbeiten basieren insbesondere auf Verkehrsdaten, die dem Bereich der BVWP zugeordnet werden können. Die Kritikalitätsanalyse bezieht sich auf die Jahre 2015 (Gegenwart) und 2030 (nahe Zukunft). Das laufende Forschungsprojekt umfasst verschiedene Arbeitspakete. Im Rahmen von Arbeitspaket 1 erfolgt die Entwicklung und Klassifikation von Kritikalitätsindikatoren.

Für die Kritikalitätsanalyse kann der durchschnittliche werktägliche Verkehr (DTVw) als ein wesentlicher Indikator gelten. Der DTVw lässt sich nach unterschiedlichen Verkehrsarten und Fahrtweiten differenzieren. Zu den Indikatoren, die aus einer Modellsimulation des DTVw abgeleitet werden können, zählen z. B. der schwere Lkw-Verkehr mit $\geq 3,5$ t zulässigem Gesamtgewicht (DTVw(SV)) und der durchschnittliche werktägliche Fernverkehr. Neben diesen beispielhaften, auf Verkehrsmengen bezogenen Indikatoren sollen weitere Indikatoren in die Kritikalitätsanalyse einfließen. Als Beispiel seien diesbezüglich die Verbindungsfunktionsstufen (VFS) genannt, die dem raumordnerischen Ansatz in der BVWP entsprechen. Die für die Kritikalitätsindikatoren ermittelten Werte sollen je Netzmasche ausgewiesen werden. Die Maschenbildung im Bundesautobahnnetz wird über Autobahnkreuze und -dreiecke sowie Anschlussstellen vorgenommen. Bei den Bundesstraßen ergeben sich die betrachteten Netzmaschen aus den Schnittpunkten mit Bundesfernstraßen sowie dem Wechsel von außer- nach innerorts.

Arbeitspaket 1 sieht neben der Auswahl geeigneter Indikatoren auch deren Klassifizierung vor. Für Indikatoren, die sich auf Verkehrsmengen beziehen, werden dazu verkehrliche Relevanzklassen gebildet, die differenziert nach Bundesautobahnen und Bundesstraßen von geringer bis zu sehr hoher verkehrlicher Relevanz reichen. Abbildung 5-1 veranschaulicht diese Art der Klassifizierung am Beispiel des DTVw. Die sich daraus für den DTVw auf Bundesautobahnen ergebenden Klassengrenzen sind in Tabelle 5-1 beispielhaft zusammengefasst. Für die weiteren, aus dem DTVw abgeleiteten Indikatoren sind die ermittelten Klassengrenzen den Kartenlegenden der dazugehörigen Abbildungen zu entnehmen (s. u.). Demgegenüber werden die Verbindungsfunktionsstufen in den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) definiert und in ihrer Bedeutung klassifiziert (FGSV 2008). Die Umsetzung dieser Definitionen erfolgte für das Bundesfernstraßennetz mit den als realisiert unterstellten Straßenprojekten des Bedarfsplanes für die Bundesfernstraßen in den Realisierungsstufen des Vordringlichen Bedarfs (VB) und des Weiteren Bedarfs mit Planungsrecht (WB*) über Netzsimulationen, deren Ergebnisse in bilateralen Bund-Ländergesprächen abgestimmt wurden.

5.2.3 Erste Ergebnisse

Im Folgenden werden erste Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 des externen Forschungsprojekts (Ingenieurgruppe IVV 2019) am Beispiel ausgewählter Indikatoren vorgestellt. Die streckenbezogenen Mengen des Kfz- und des schweren Lkw-Verkehrs (Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3) bieten einen ersten Anhaltspunkt über die Betroffenheit einzelner Streckenabschnitte gegenüber potenziellen Streckennetzstörungen. Durch die Berücksichtigung der Fernverkehrsbelastung (Abbildung 5.4) lassen sich zudem erste Rückschlüsse auf die großräumige Bedeutung eines Streckenabschnittes ziehen. Allerdings lässt dieser Indikator auch Interpretationen im Hinblick auf die Flexibilität in der Routenwahl zu. Da weitausgreifende Fahrten im engmaschigen Bundesfernstraßennetz vielfach Alternativrouten finden, kann vermutet werden, dass bei höheren Fahrtweiten mögliche Engpässe durch geänderte Routenwahl weiträumig umfahren werden können. Über die Zuordnung der Verbindungsfunktionsstufen zum Bundesfernstraßennetz lassen sich weitere Erkenntnisse über die raumordnerische Bedeutung eines Straßenzuges gewinnen (Abbildung 5-5). So werden die Verbindungen zwischen Metropolregionen als kontinentale Verbindungsfunktionsstufen (VFS 0) und zwischen Metropolregionen und Oberzentren sowie zwischen Oberzentren als großräumige Verbindungsfunktionsstufen (VFS 1) bezeichnet. Diese Strecken haben kontinentale und/oder großräumige Bedeutung im Sinne einer Versorgungs- und Austauschfunktion und sollten daher auch in der Kritikalitätsanalyse Beachtung finden.

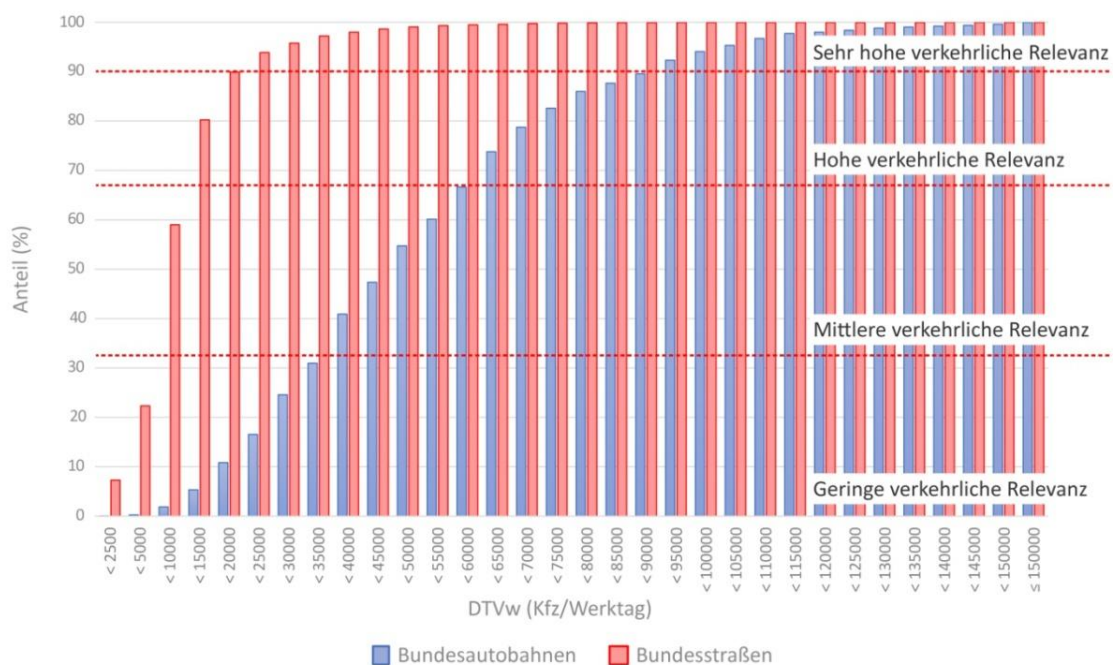


Abbildung 5-1: Kumulative Häufigkeitsverteilung des Indikators durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTVw) zur Ermittlung der Klassengrenzen differenziert nach Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV (2019)).

Tabelle 5-1: Einteilung des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen in verkehrliche Relevanzklassen (Quelle: verändert nach Ingenieurgruppe IVV (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

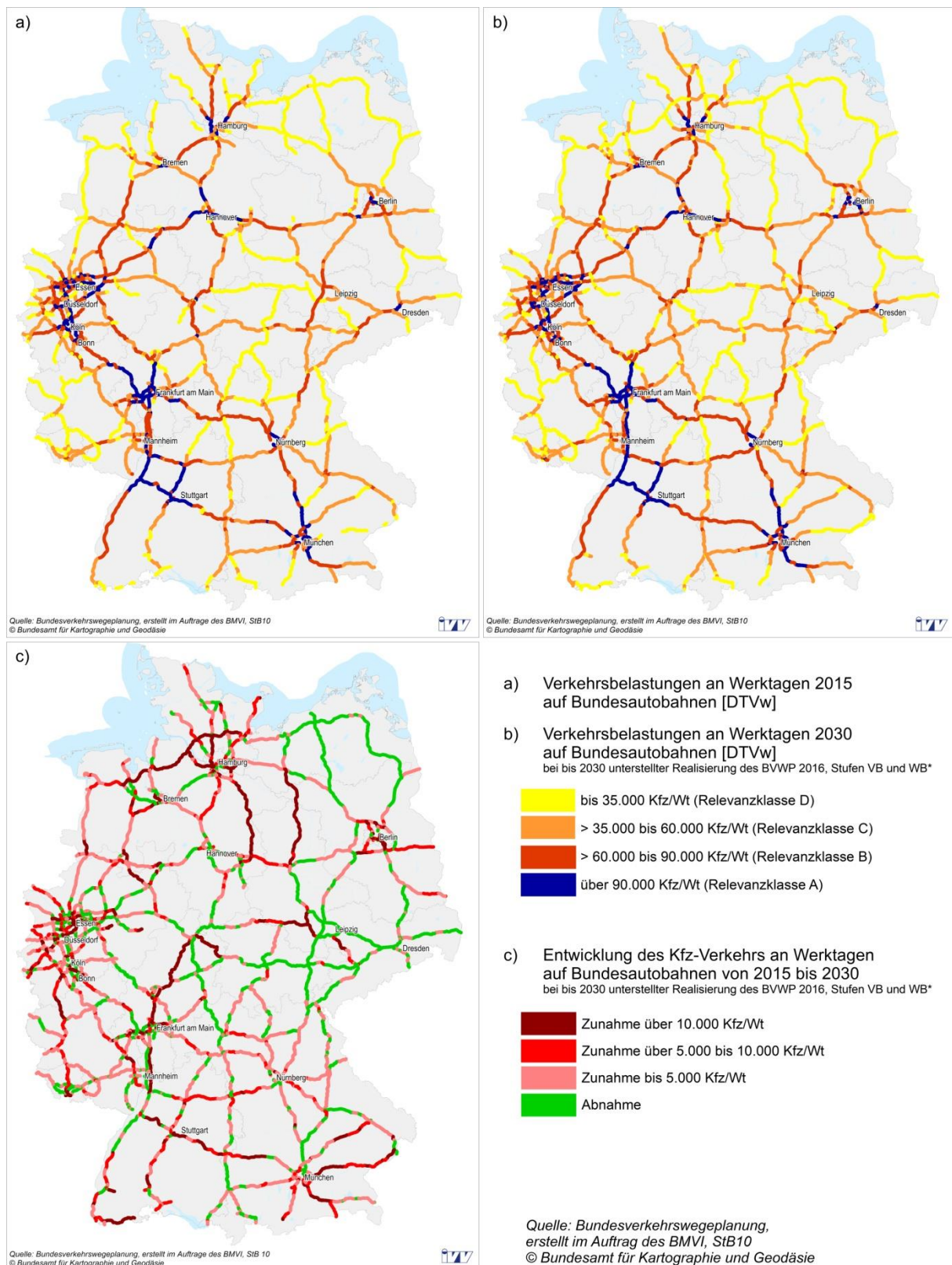


Abbildung 5-2: Kartographische Darstellung des durchschnittlichen werktäglichen Verkehrs (DTVw) auf Bundesautobahnen als Grundlage für die Entwicklung einer indikatorenbasierten Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz (Quelle: Ingenieurgruppe IVV (2019)).

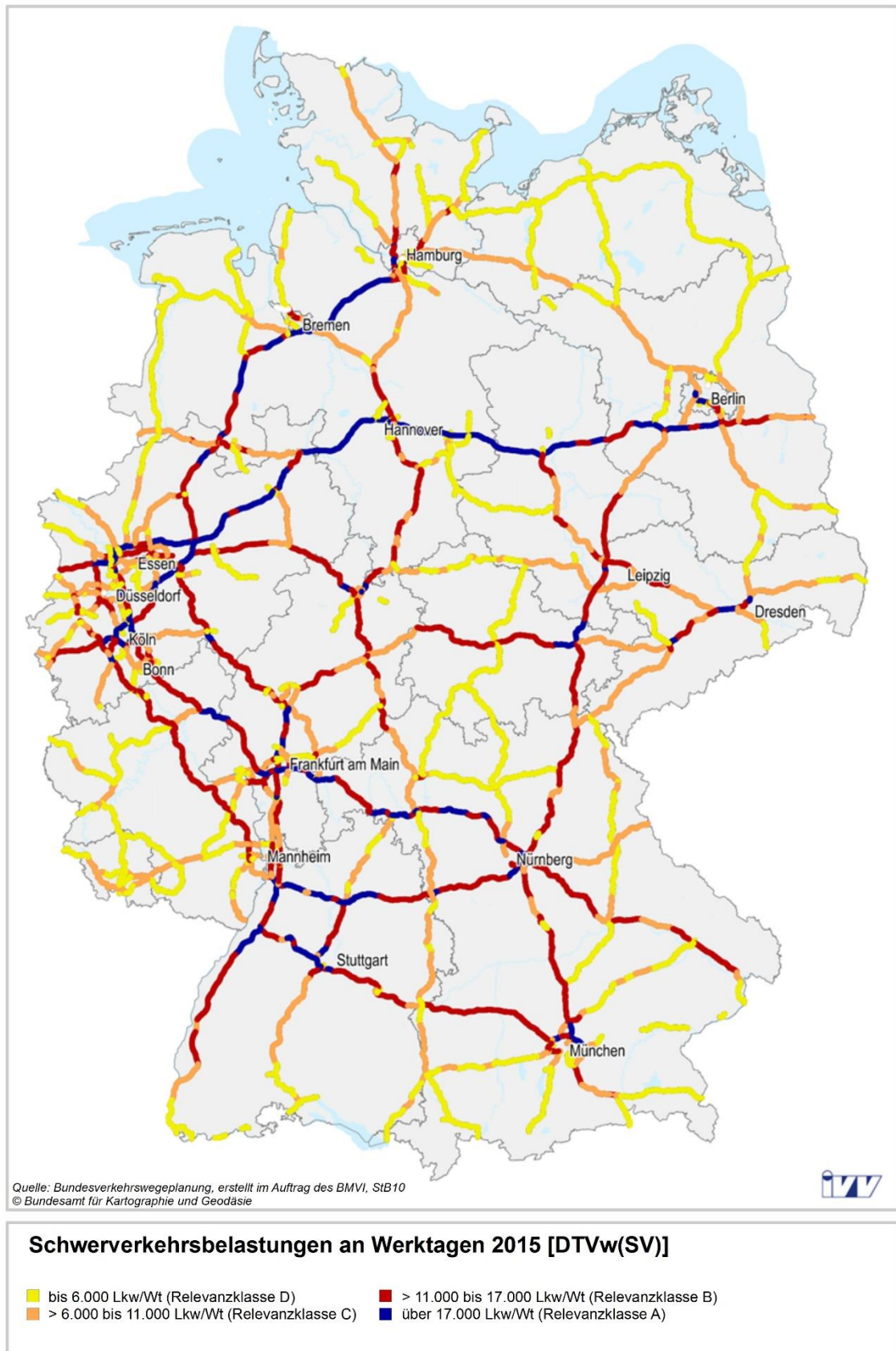


Abbildung 5-3: Kartographische Darstellung des durchschnittlichen werktäglichen Schwerverkehrs (DTVw(SV), $\geq 3,5$ t zGG) auf Bundesautobahnen als Grundlage für die Entwicklung einer indikatorenbasierten Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz (Quelle: Ingenieurgruppe IVV (2019)).

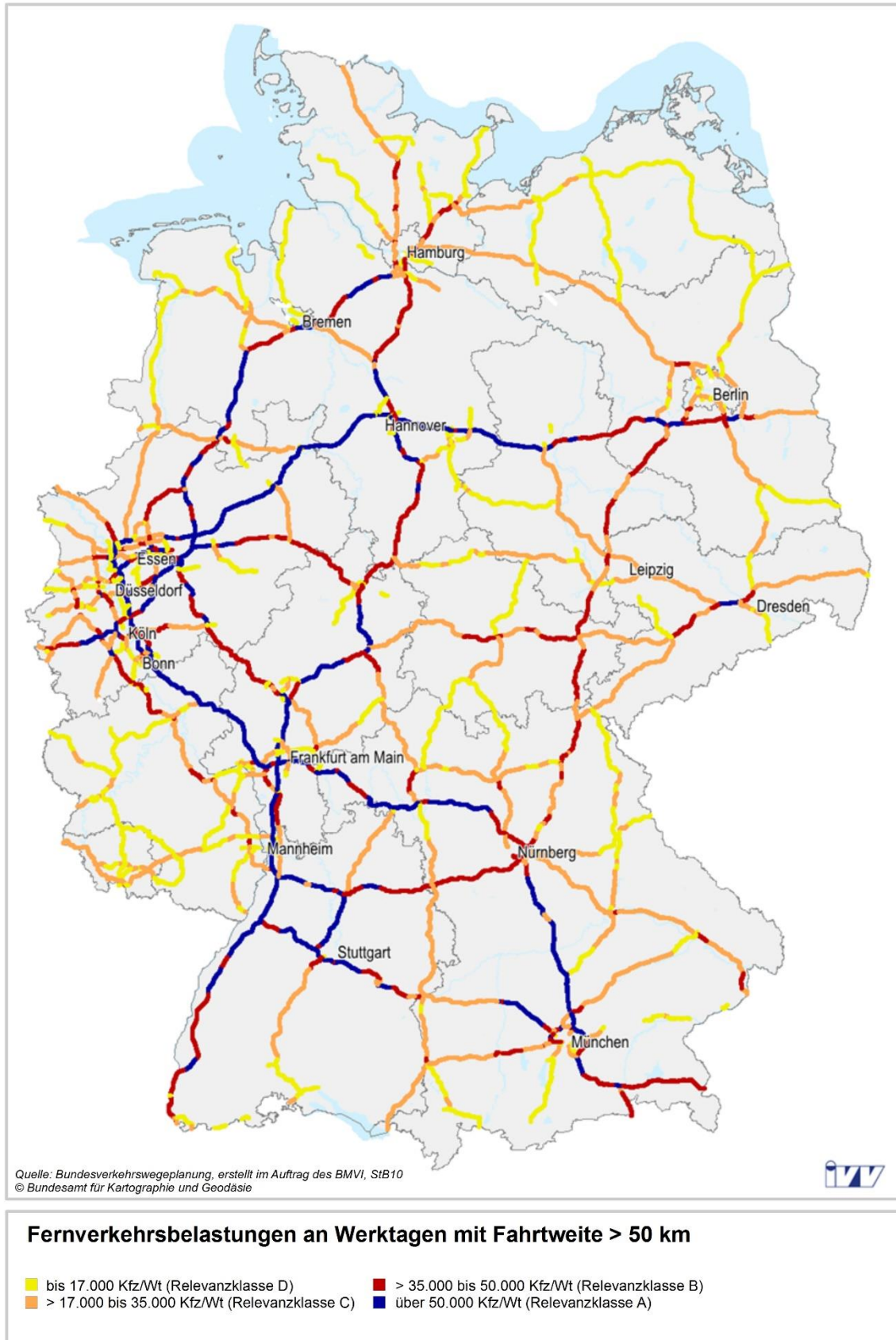


Abbildung 5-4: Kartographische Darstellung des durchschnittlichen werktäglichen Fernverkehrs (Fahrtweite > 50 km) auf Bundesautobahnen für das Jahr 2015 als Grundlage für die Entwicklung einer indikatorbasierten Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz (Quelle: Ingenieurgruppe IVV (2019)).

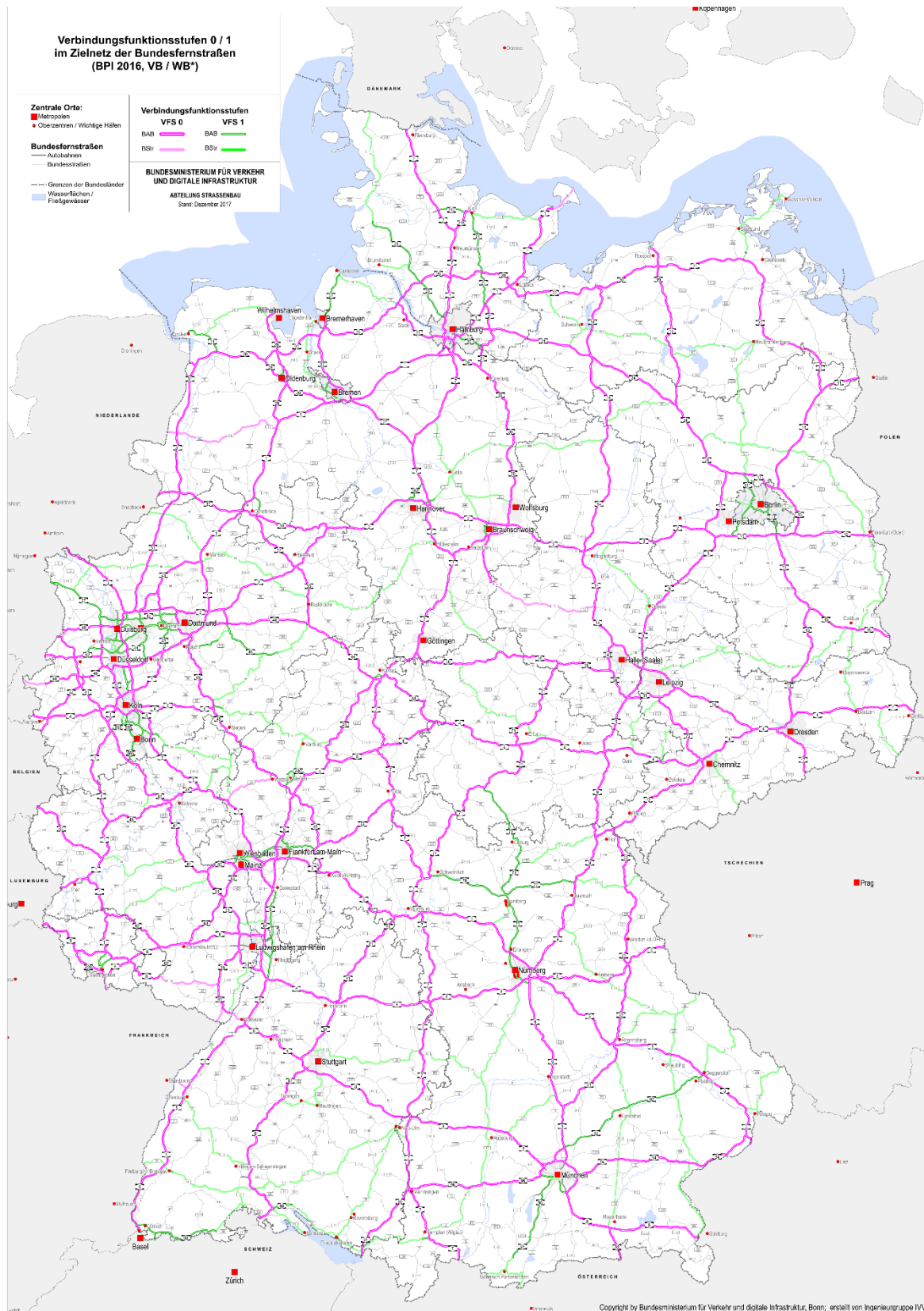


Abbildung 5-5: Kartographische Darstellung der Verbindungsfunktionsstufen im Bundesfernstraßennetz (Zielnetz) als Grundlage für die Entwicklung einer indikatorenbasierten Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz. Lila: Verbindungsfunktionsstufe 0 (VFS 0), grün: Verbindungsfunktionsstufe 1 (VFS 1) (Quelle: BMVI, Ingenieurgruppe IVV (2019)).

In Abbildung 5-2, Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 sind die auf den jeweiligen Indikator bezogenen Verkehrsbelastungen für alle Außerortsstraßen des Bundesfernstraßennetzes wiedergegeben. Auf die Aussagen zu Verkehrsbelastungen auf innerörtlichen Straßenabschnitten wird aufgrund des deutschlandweiten Planungsmaßstabes verzichtet. Es liegen für die Innenstädte nicht alle für eine vollständige Simulation notwendigen Informationen vor, so dass die Analysen auf außerörtliche Straßen beschränkt bleiben. Hinsichtlich der für das Jahr 2030 erfolgenden Auswertungen gilt schließlich zu berücksichtigen, dass die Realisierung der im Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen beschriebene Ausgestaltung des zukünftigen Straßennetzes zwar beschlossen ist, aber noch nicht als vollzogen angesehen werden kann.

5.2.4 Ausblick

Die hier dargestellten Auswertungen stellen einen ersten Schritt in der Entwicklung der Kritikalitätsanalyse dar. Sie beziehen sich auf das Arbeitspaket 1 des laufenden Forschungsprojekts (Ingenieurgruppe IVV 2019). Das Arbeitsprogramm sieht darüber hinaus die Bearbeitung von drei weiteren Arbeitspaketen vor. Im Rahmen von Arbeitspaket 2 soll ein Bewertungsansatz entwickelt werden, der auf den in Arbeitspaket 1 ausgewählten Indikatoren basiert. Anhand des Bewertungsansatzes sollen die einzelnen Indikatoren in geeigneter Weise auf Basis eines einheitlichen Klassifikationssystems miteinander kombiniert werden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Bedeutung eines Indikators ist eine Gewichtung der Indikatoren angedacht. Bei der Kombination von Indikatoren und deren Gewichtung sollen verschiedene Möglichkeiten berücksichtigt und hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Bewertungsergebnis geprüft werden. Für die GIS-basiert durchzuführende Kritikalitätsanalyse ist in Arbeitspaket 3 die Bereitstellung einer Kartensammlung vorgesehen. Um den Bewertungsansatz hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit zu prüfen, sollen die Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse im Rahmen von Arbeitspaket 4 mit ausgewählten Fallstudien verglichen werden. Die Entwicklung der Kritikalitätsanalyse erfolgt in enger Abstimmung zwischen den beteiligten Akteuren. In Arbeitssitzungen findet ein fachlicher Austausch zu geeigneten Indikatoren und dem Bewertungsansatz statt. Die Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz sollen in die 2. Förderphase des BMVI-Expertennetzwerks einfließen.

5.3 Verkehrsträger Schiene

Der Eisenbahnverkehr lässt sich in drei große Bereiche unterteilen, den Schienengüterverkehr (SGV), den Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und den Schienenpersonennahverkehr (SPNV). Zur Bewertung der Kritikalität wurde der Indikator Anzahl der Züge pro Tag herangezogen (siehe Abbildung 5-6 für den Gesamtverkehr). Die Kritikalität der Schiene wird somit in dieser ersten Projektphase besonders 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 , $30 \leq 60$, $60 \leq 120$ und > 120 . Hiervon abweichend können auch Strecken mit geringem Verkehrsaufkommen eine hohe Kritikalität aufweisen, wenn diese Abschnitte zur Versorgung bestimmter Einrichtungen dienen, welche auf andere Weise nicht logistisch bedient werden können.

Im Schienengüterverkehr (Abbildung 5-7) weisen besonders die TEN-V-Korridore²¹ 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.

²¹ Transeuropäische Netze – Verkehr (TEN-V); in Englisch: TEN-Transport bzw. TEN-T https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en

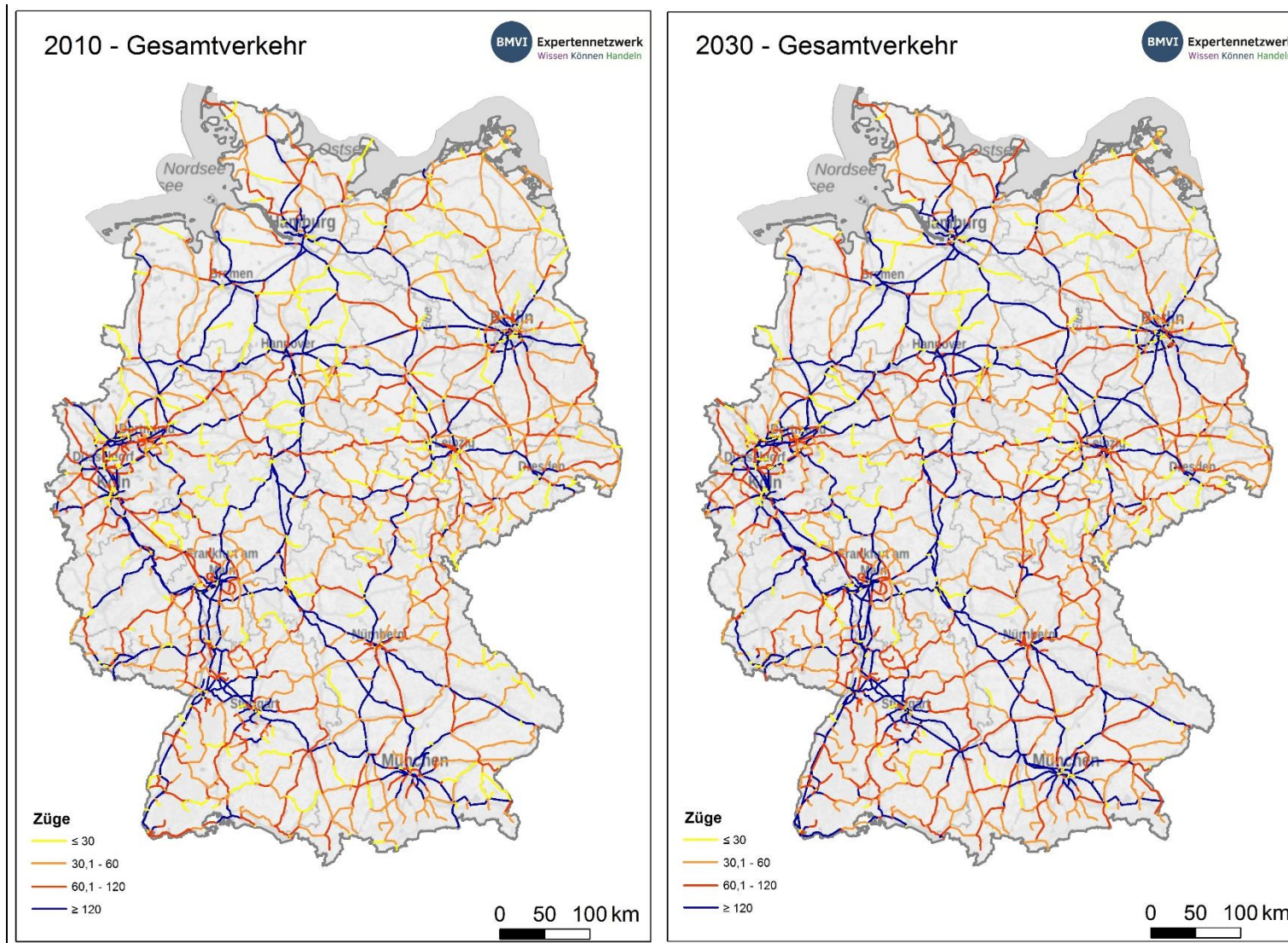


Abbildung 5-6: Anzahl aller Züge (Gesamtverkehr) als Indikator für die Kritikalitätsbewertung der Schiene für das Referenzjahr 2010 (links) und das Prognosejahr 2030 (rechts; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015b)).

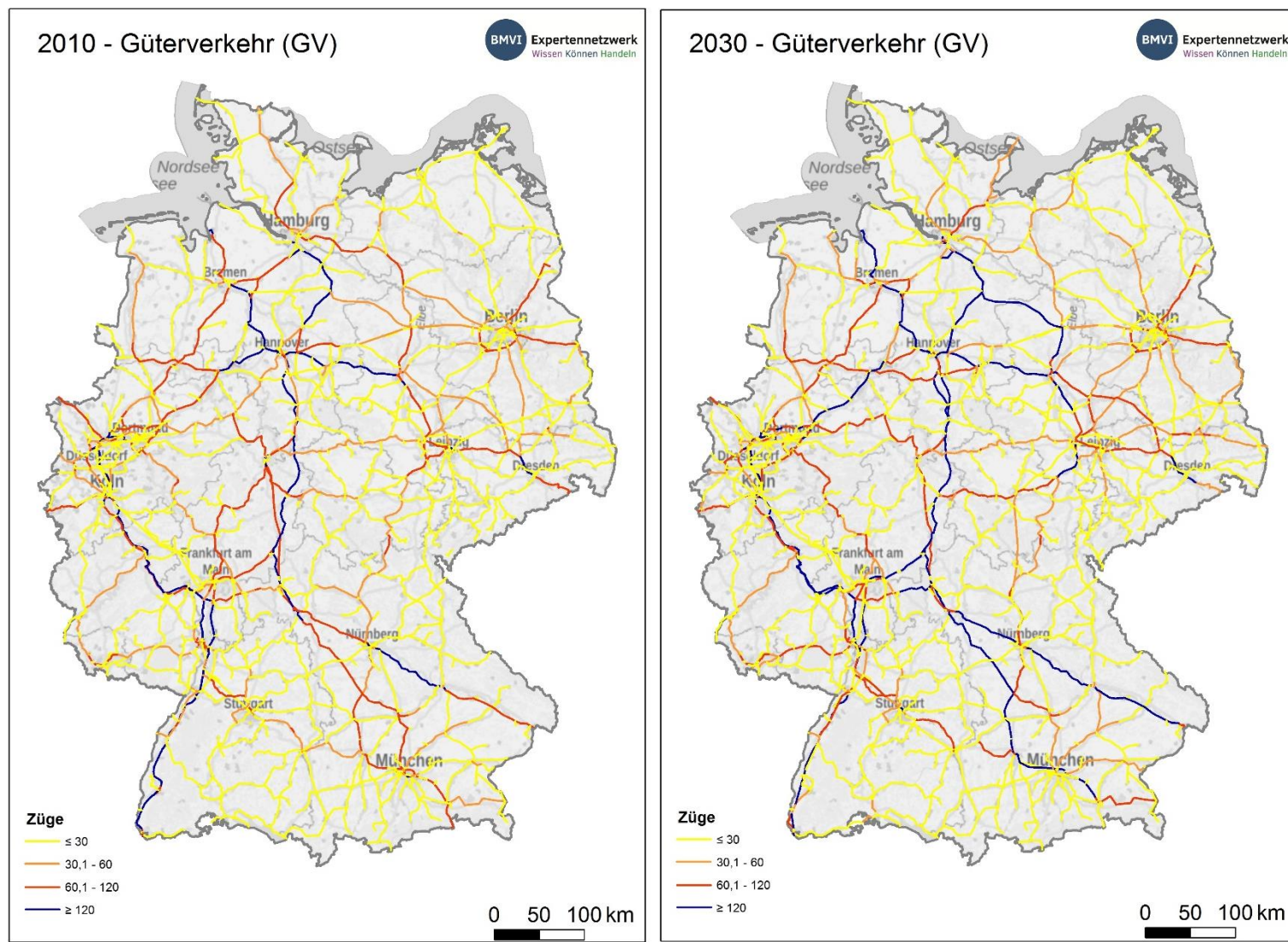


Abbildung 5-7: Anzahl der Güterverkehrszüge als Indikator für die Kritikalitätsbewertung der Schiene für das Referenzjahr 2010 (links) und das Prognosejahr 2030 (rechts; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015b)).

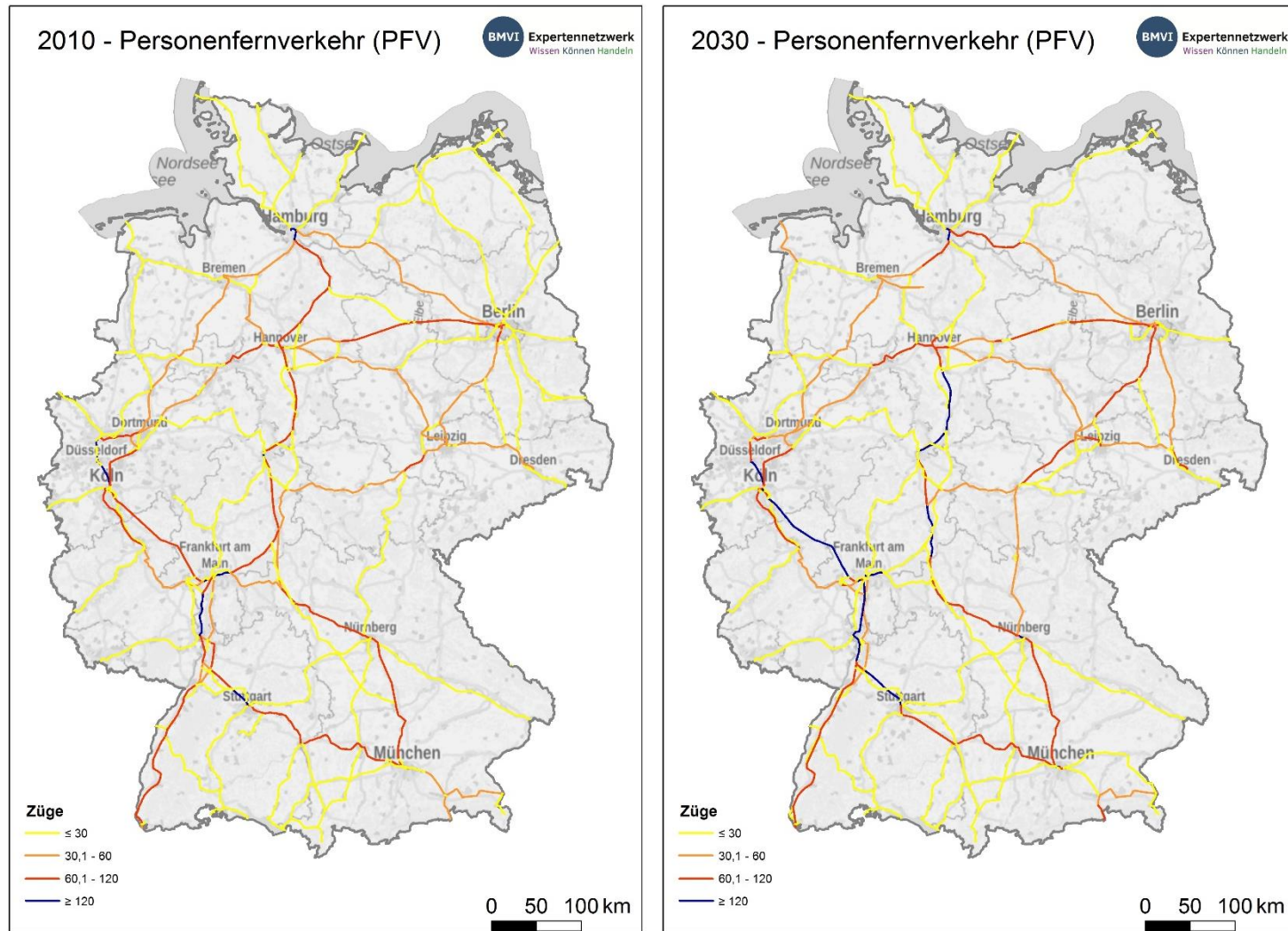


Abbildung 5-8: Anzahl der Personenfernverkehrszüge für die Kritikalitätsbewertung der Schiene für das Referenzjahr 2010 (links) und das Prognosejahr 2030 (rechts; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015b)).

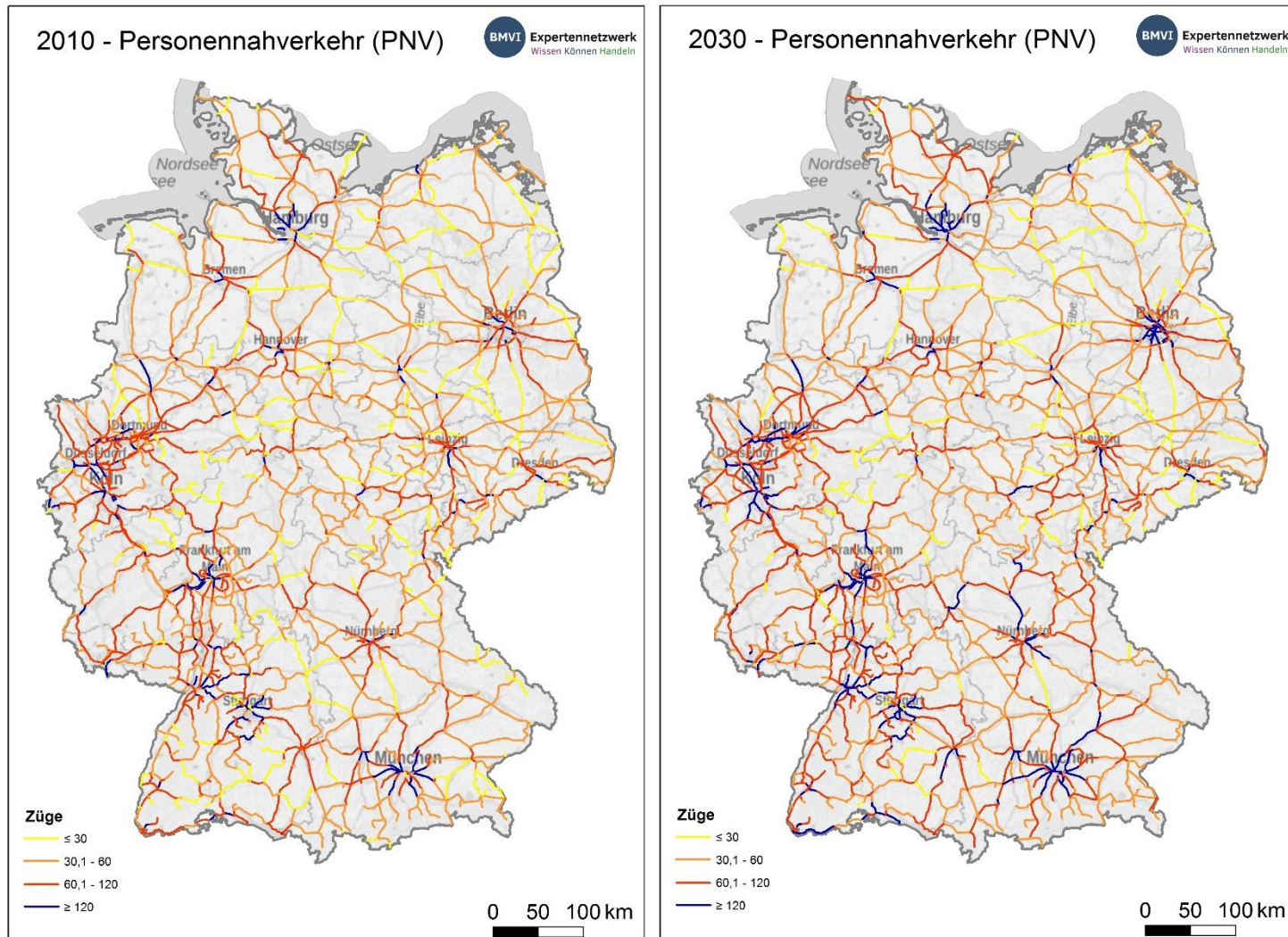


Abbildung 5-9: Anzahl der Personennahverkehrszüge als Indikator für die Kritikalitätsbewertung der Schiene für das Referenzjahr 2010 (links) und das Prognosejahr 2030 (rechts; Datengrundlage: Netzumlegung BVWP (BMVI 2015b)).

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 (Abbildung 5-8) verkehren besonders viele Züge zwischen den großen Ballungsräumen. Hierzu zählen besonders 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 Züge pro Tag auf einzelnen Streckenabschnitten gerechnet. Der Schienenpersonennahverkehr (Abbildung 5-9) 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 Verkehrsaufkommen und auch für die Zukunft (für das Jahr 2030) wird weiterhin ein hohes Verkehrsaufkommen prognostiziert.

5.4 Verkehrsträger Wasserstraße

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, da die „weiße Flotte“, d. h. der Fährverkehr, der Bootstourismus und die Freizeitschiffahrt an mehreren Orten wirtschaftlich relevant sind. Es werden jedoch u. a. geringe Wassertiefen benötigt, wodurch die Anfälligkeit gegenüber den Folgen des Klimawandels bzgl. Niedrigwassersituationen geringer ist als bei der Güterschiffahrt. Mitunter ergeben sich bei der Fahrgastschiffahrt hochwasserbedingte Einschränkungen.
- (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 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 umfängliche ökonomische Bewertung der Ressource „Wasser“ z. B. für die Versorgung der Bevölkerung und der Industrie ist nicht Gegenstand des BMVI-Expertenetzwerks.

Die in Abbildung 5-10 dargestellte Kartenserie offenbart zunächst, dass die verkehrliche Bedeutung der verschiedenen Wasserstraßenabschnitte räumlich stark differiert. Die besondere Bedeutung des Seeverkehrs sowie des Rheins als wichtigste Binnenschiffahrtsstraße tritt in dieser Ansicht deutlich hervor. Anzumerken ist, dass Wasserstraßentransporte auch auf ‚schwach‘ belasteten Abschnitten (gelb dargestellt; gewichtsbezogener Indikator) eine hohe Bedeutung haben können. Dies trifft dann zu, wenn z. B. die Abmessungen spezieller Güter keinen landgebundenen Transport, sondern nur den Wasserstraßentransport zulassen (z. B. Projektladung auf der Elbe oder auch Sonder-/Schwertransporte auf der Donau). 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.

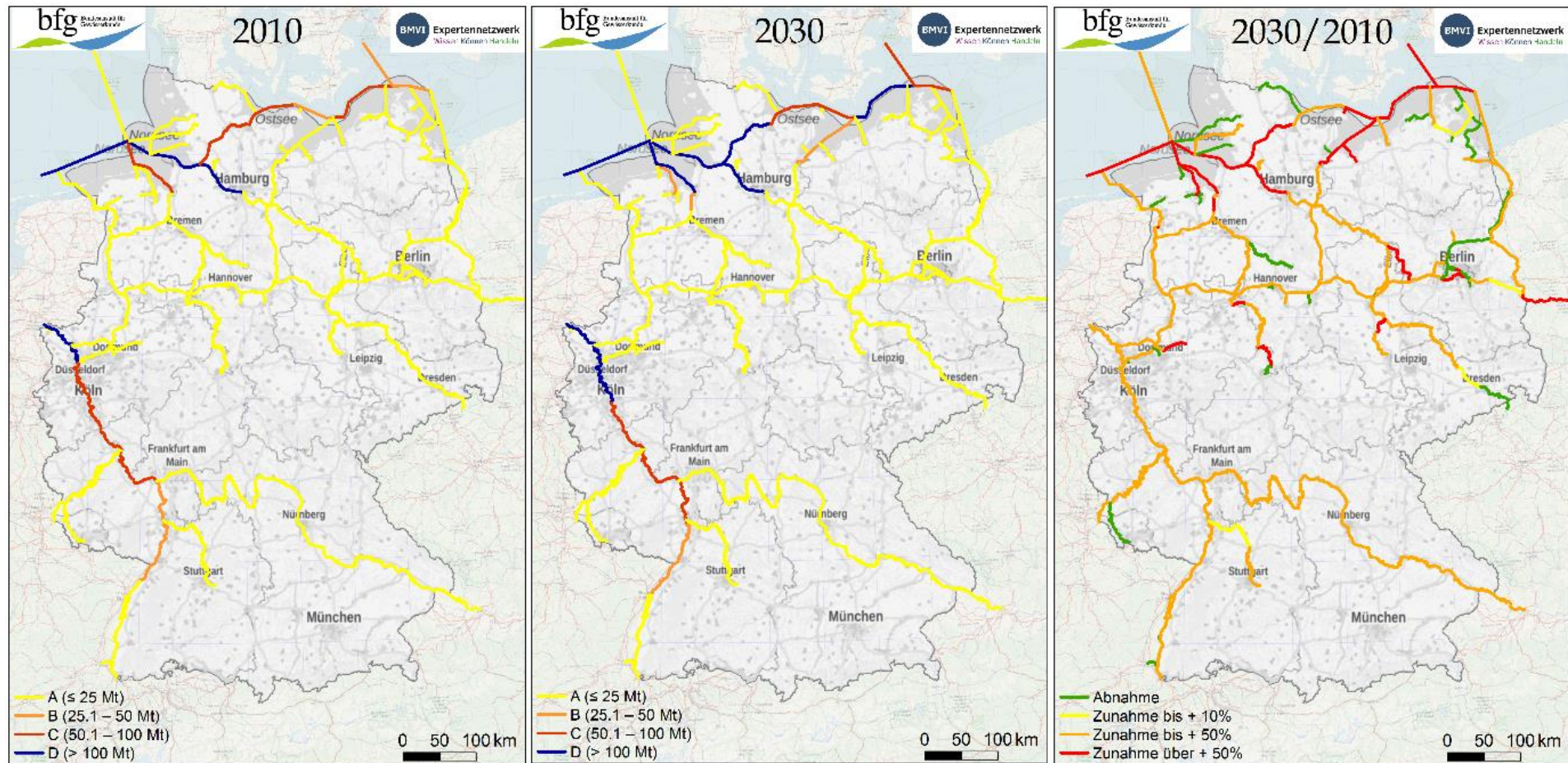


Abbildung 5-10: Bewertung der Kritikalität unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte in verkehrlicher Sicht (Güteraufkommen in Mio. t pro Jahr) für das Referenzjahr 2010 (links), das Prognosejahr 2030 (Mitte) sowie Änderung zwischen beiden Jahren (rechts). Datengrundlage: PlanGIS/BVWP (BMVI 2015b).

Auch aus ökologischer Perspektive sind klimawandelbedingte Veränderungen an unterschiedlichen Wasserstraßenabschnitten unterschiedlich bedeutsam. Abbildung 5-11 definiert die Kritikalität anhand der Bewertung des „Ökologischen Zustands“ oder „Ökologischen Potenzials“ gemäß EG-WRRL. 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.

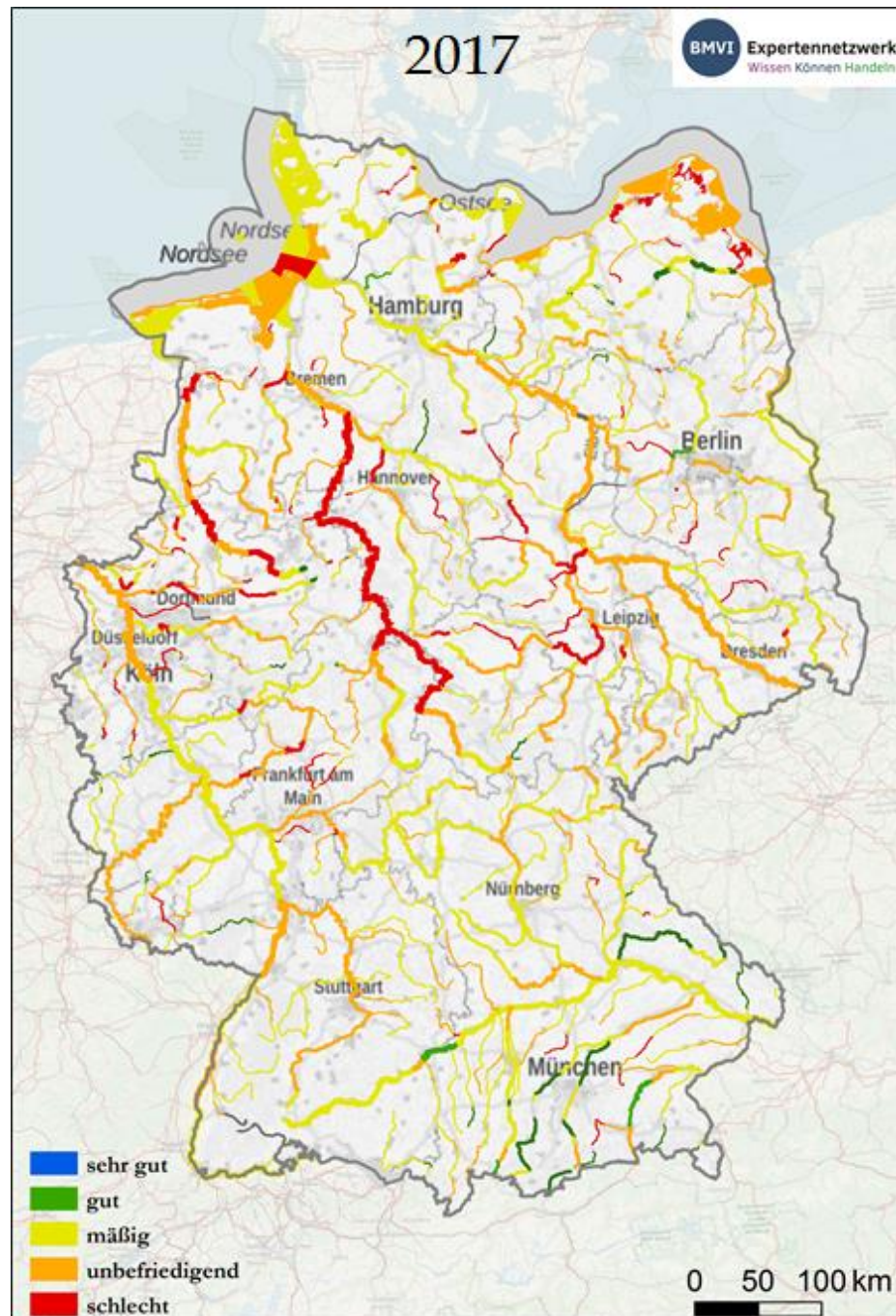


Abbildung 5-11: „Kritikalität“ unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte aus ökologischer Sicht. Bezug auf die Bewertung nach ökologischem Zustand bzw. ökologischem Potenzial. Datengrundlage: Berichtsportal WasserBLick/ BfG, 2. WWRL-Bewirtschaftungsplan, Stand: 30.04.2017.

6 Integrierte Klimawirkungsanalyse – Erste Ansätze

- Die Integration der drei Analyseschritte zur Exposition, Sensitivität und Kritikalität in eine gemeinsame Bewertungsmethodik ermöglicht die Identifizierung von besonders betroffenen Bereichen in den Verkehrsnetzen von Straße, Schiene und Wasserstraße und unterstützt damit die Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen bei den Verkehrsinfrastrukturbetreibern.
- Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit bundesweiter Informationen zur Bewertung der Sensitivität von Streckenabschnitten ist in der 1. Forschungsphase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019) eine vollständige Klimawirkungsanalyse, welche die jeweils vorhandenen Kartenprodukte zu einer Gesamtbewertung integriert nur in wenigen Fällen möglich.
- Die Integrierte Klimawirkungsanalyse wird hier am Beispiel der Wirkungskette „Tiefenengpass, Abladebeschränkung“ demonstriert. Weitere integrierende Analysen werden in der 2. Forschungsphase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) folgen.

6.1 Einleitung

Die in den Kapiteln 3 bis 5 dargestellten Analyseschritte und die mit Abschluss der 1. Forschungsphase des BMVI-Expertennetzwerks zur Verfügung stehenden Kartenprodukte bilden bereits eine gute Grundlage für die Bewertung der Gefährdung des Bundesverkehrssystems im Rahmen der aktuellen und zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen und deren direkten und indirekten Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr. Die Integration der drei Analyseschritte zur Exposition, Sensitivität und Kritikalität in eine gemeinsame Bewertungsmethodik ermöglicht, Bereiche in den Verkehrsnetzen von Straße, Schiene und Wasserstraße zu identifizieren, die bezüglich aller drei Analysen als besonders betroffen zu bezeichnen sind. Solche Bereiche im Verkehrssystem, die sowohl aufgrund ihrer räumlichen Lage durch die zukünftigen Klimaänderungen besonders stark betroffen sind, als auch aufgrund ihrer Eigenschaften besonders sensitiv gegenüber den betrachteten Einwirkungen reagieren, haben offensichtlich höhere Anpassungserfordernisse als weniger stark betroffene Bereiche. Kommt dann noch eine hohe verkehrliche (oder auch ökologische) Bedeutung der betroffenen Streckenabschnitte hinzu, so nimmt der Anpassungs- und somit Handlungsdruck weiter zu, um die Zuverlässigkeit des Verkehrssystems auch unter zukünftigen Klimabedingungen zu sichern. Eine solche integrierende Bewertung kann also die Identifizierung und Priorisierung des Anpassungsbedarfs in der Praxis unterstützen.

6.2 Exemplarische Umsetzung der Integration

Die Umsetzung einer solchen Integration setzt eine vergleichbare Klassifizierung der Kartenprodukte der drei Analyseschritte voraus, um diese miteinander „verschneiden“ zu können. Entsprechende methodische Arbeiten und Abstimmungen sind in der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks noch zu führen. Ein erstes Beispiel für eine mögliche Integration der drei Analyselayer unter Nutzung eines GIS gibt die in Abbildung 6-1 dargestellte Klimawirkungsbewertung für die Wirkungskette „Tiefenengpass, Abladebeschränkung“. Zur Illustration einer möglichen Vorgehensweise bei der Integration der verschiedenen Analyselayer wurde dabei für die Expositionsanalyse die hohe Schätzung (85. Perzentil) des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* verwendet. Natürlich sind entsprechende Analysen und Bewertungen auch für andere Klimaszenarien sowie für den niedrigen Schätzer (15. Perzentil) oder den Median des betrachteten Ensembles möglich.

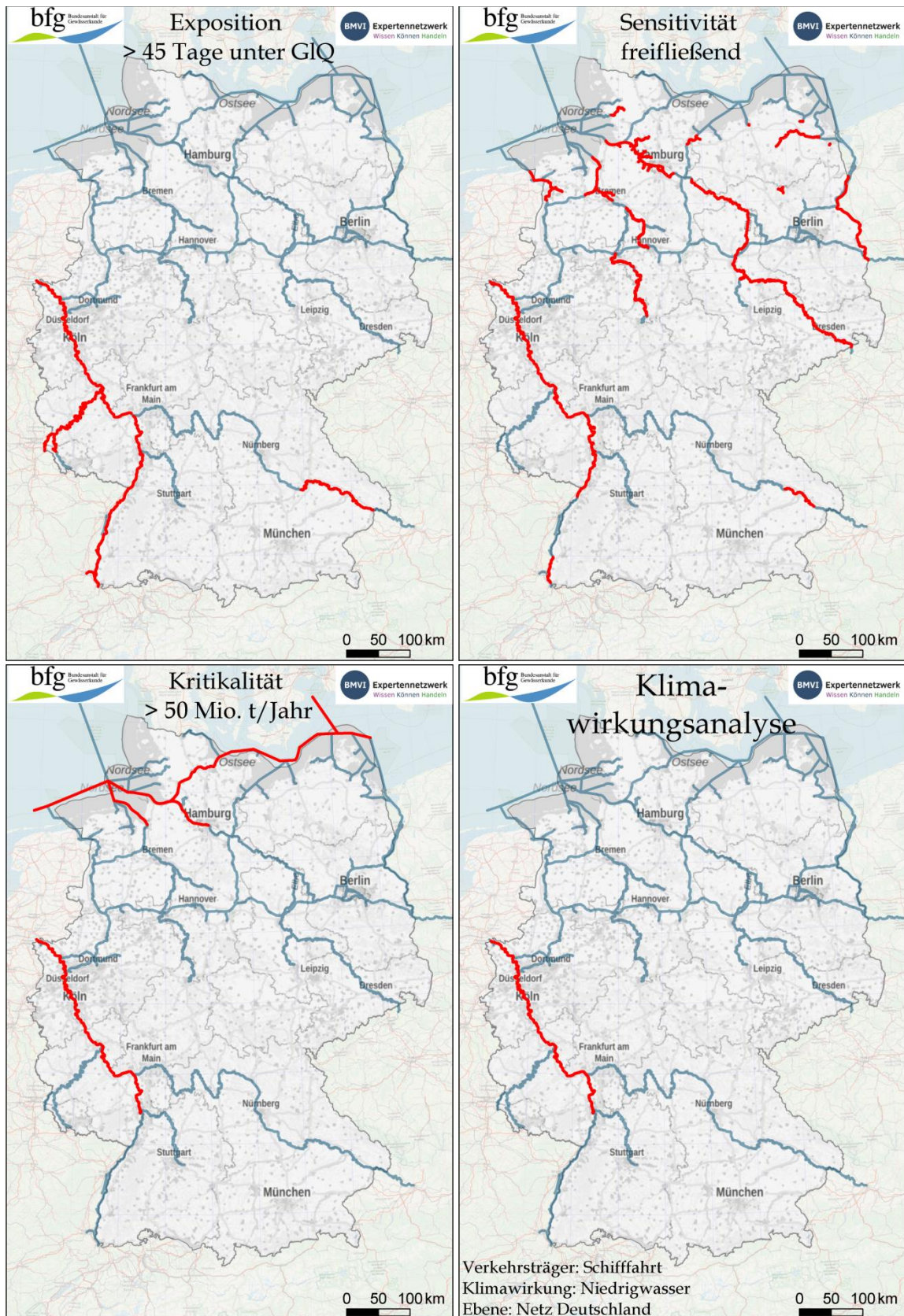


Abbildung 6-1: Ansatz einer integrierten Klimawirkungsbewertung für die Wasserstraße am Beispiel der Wirkungskette „Tiefenengpass, Abladebeschränkung“ mit den Teilschritten Expositionsanalyse (oben links), Sensitivitätsanalyse (oben rechts), Kritikalitätsanalyse (unten links) sowie Integrierung aller drei Schritte in die Klimawirkungsanalyse (unten rechts). Rot markiert sind jeweils die Bereiche des Bundeswasserstraßennetzes, die als „besonders gefährdet bzw. betroffen“ klassifiziert wurden. Das entsprechende Klassifizierungskriterium ist jeweils als Abbildungsüberschrift angegeben.

Für das Beispiel in Abbildung 6-1 zeigt sich, dass die Exposition gegenüber Abladebeschränkungen infolge einer projizierten Verschärfung von Niedrigwassersituationen an Rhein und Donau am höchsten ist. Beide Bereiche sind zumindest teilweise frei fließend, so dass sich hier auch eine hohe Sensitivität gegenüber den festgestellten Zunahmen ergibt. Der Mittel- und Niederrhein zeigt ferner hinsichtlich der transportierten Gütermenge die höchste Kritikalität und ist somit als prioritär für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen für den Verkehrsträger Wasserstraße anzusehen, wenn Tiefenengpässe und Abladebeschränkungen im Fokus der Betrachtungen stehen. Wenn die jeweiligen Analyseschritte unter Nutzung anderer Indikatoren technisch umgesetzt werden oder andere Klassifikationsverfahren und Schwellenwerte für die Festlegung besonders gefährdeter Bereiche gewählt werden, so ändert sich potenziell das Ergebnis der Gesamtanalyse. So könnten bei einer Definition der "Kritikalität" mit Bezug auf Sondertransporte (Projektladung, Schwertransporte), auf kleinere Gütermengen oder Container (statt Gewicht >50 Mio. t) oder ökologische Funktionen auch Abschnitte anderer Wasserstraßen als Prioritätsgebiete für die Anpassungsdiskussion hervortreten.

6.3 Weiteres Vorgehen

Weitere Möglichkeiten der Integration der verschiedenen Analyseebenen der Klimawirkungsanalyse für die drei betrachteten Verkehrsträger und die mannigfaltigen betrachteten klimatisch beeinflussten Naturgefahren bestehen potenziell in der Integration a) über verschiedene Gefährdungen hinweg, die einen Verkehrsträger betreffen, b) über verschiedene Verkehrsträger hinweg, die durch die gleiche Naturgefahr betroffen sind und c) über alle Verkehrsträger und betrachteten Klimawirkungen hinweg. Dabei ist zu beachten, dass die Kritikalität für viele der einen Verkehrsträger betreffenden Klimawirkungen jeweils durch den gleichen Indikatorenansatz beschrieben wird, während die Expositions- und zum Teil auch die Sensitivitätskarten stark von der betrachteten Klimawirkung abhängen. Für die genaue methodische Ausgestaltung und Umsetzung solcher integrativen Analysen ist jeweils zu klären, wer sich welchen Nutzen von derartigen integrierenden Auswertungen verspricht. Daher sind bei einer zukünftigen integrierten Darstellung von Klimawirkungen die Klassifizierungskriterien und die Art der Integration mit den potenziellen Anwendern solcher Informationen abzustimmen.

Die vorangegangenen Abschnitte illustrieren exemplarisch wie eine geodatengestützte Klimawirkungsanalyse bei einer räumlichen Priorisierung helfen kann. Es liegt auf der Hand, dass weitere Differenzierungen im Zuge einer Entscheidungsfindung möglich und nötig sind. So ist nicht für jede Entscheidung eine bundesweite verkehrsbezogene Sicht die Richtige. Eine Priorisierung kann sich auch im regionalen Kontext z. B. eines Wasserstraßengebietes als sinnvoll erweisen. Je nach Bezug (Netz, Strecke, Objektebene) ist eine andere Variante zu Bestimmung der "Sensitivität" zu bevorzugen. Auch muss je nach Fragestellung ein anderes Zielsystem für die Bestimmung der "Kritikalität" gewählt werden. Hier sei auf die Überlegungen in den Abschnitten 2.2.4 und 2.2.5 verwiesen.

Wesentlicher Schlüssel zur Durchführung derartiger Analysen ist die Datenverfügbarkeit. Dabei mangelt es beispielsweise im Falle der Wasserstraße nur teilweise an den Informationsschichten zum klimatischen Einfluss bzw. der relevanten Klimawirkung und der veränderten Exposition. Schwieriger ist die Datenlage hinsichtlich netzweiter und angemessen attributierter Daten zur Sensitivität. Hier ist die Erfassung und Strukturierung entsprechender Metadaten (Bemessung, Zustand, Sicherheitsrelevanz von Bauwerken etc.) anzuraten.

Die Wahl der Informationsschicht "Kritikalität" hängt vom anvisierten Zielsystem ab. Je nach Fokus beispielsweise auf Güter- oder Personentransport sind unterschiedliche Indikatoren heranzuziehen. Gleichzeitig werden dadurch u. U. unterschiedliche Regionen als besonders bedeutsam eingestuft. Die Entscheidung über die Wichtung der Kriterien ist nicht Aufgabe des BMVI-Expertenetzwerks und muss an anderer Stelle getroffen werden.

7 Fazit und Ausblick

- Das Konzept der Klimawirkungsanalyse schafft einen praktikablen und transparenten Rahmen zur netzweiten und verkehrsträgerübergreifenden Bewertung und Priorisierung des Anpassungsbedarfs des Bundesverkehrssystems an veränderte zukünftige Klimabedingungen. Es leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Schaffung einer klimaresilienten und auch in Zukunft verlässlichen Verkehrsinfrastruktur.
- Die erzielten Erkenntnisse, erarbeiteten Methoden und zusammengestellten Datensätze sowie Kartenprodukte sind neben dem Geschäftsbereich des BMVI sowohl für die Geschäftsfelder anderer Ressorts als auch für die Bundesländer relevant. Mit seiner Forschungsarbeit liefert das Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks somit einen wichtigen Input zum DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ und stellt damit Grundlagen für die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie zur Verfügung.
- Das BMVI-Expertenetzwerk kann als Forschungsnetzwerk zwar prototypische Datensätze zur Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Gefährdung des Verkehrssystems liefern, kann jedoch keinen Klimadienst ersetzen, der die für Planungsprozesse notwendigen Datenprodukte dauerhaft in aktueller und allgemein zugänglicher Form verfügbar macht.
- Das geschaffene 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 auf Objekt- und Streckenebene.

7.1 Erkenntnisse

Die drei Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße zeigen in Bezug auf den Klimawandel und extreme Witterungsbedingungen wesentliche Unterschiede. Diese bestehen unter anderem

- a) in einer unterschiedlichen Exposition gegenüber Naturgefahren (Niedrigwasser primär für Binnenschiffahrtsstraßen, gravitative Massenbewegungen primär für Straße und Schiene, Extremwellen nur für die Seeschifffahrt, HSW-Überschreitung für Fahrgastschifffahrt, Extremhochwasser für Schiene und Straße),
- b) in einer unterschiedlichen Ausgangslage bzgl. des Wissensstandes und der technischen Möglichkeiten zur Simulation klimawandelbedingter Veränderungen bei den beteiligten Bundesoberbehörden (z. B. langjährige Forschungserfahrung bei der Wasserstraße, zu Beginn des BMVI-Expertenetzwerks keine Erfahrung bei der Schiene; viele Klimaprojektionen im Binnenland, wenige im maritimen Bereich),
- c) in der unterschiedlichen Netzstruktur (hohe Redundanz bei der Straße, mittlere Redundanz bei der Schiene, keine nennenswerte Redundanz bei der Binnenschiffahrtsstraße) und
- d) in einer unterschiedlichen Transportnachfrage (Personen- und Güterverkehr auf der Schiene/Straße, Güterverkehr auf der Wasserstraße, Kreuzfahrten auf der Wasserstraße) und Güterstruktur (Massengüter auf der Wasserstraße, hochwertige Güter auf der Straße).

In der zurückliegenden Phase des BMVI-Expertenetzwerks wurde erstmalig ein integrierender, gemeinsamer Ansatz zur Abschätzung von Klimawirkungen für Schiene, Straße und Wasserstraße gewählt, um die genannten Unterschiede soweit zu überbrücken, dass kohärente Entscheidungen und Planungen bzgl. einer

Anpassung des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur möglich werden. Das komplexe Thema "Klimawandel" wird durch das gewählte Konzept zwingend mit einem einheitlichen Schema erfasst. Dabei werden die klassischen Ansätze der Klimafolgenmodellierung erweitert. Zusätzlich zur Information darüber, welche Änderungen beispielsweise bzgl. ausgewählter Temperatur- oder Wasserstandsindikatoren zu erwarten sind (wie sich also die *Exposition* infolge eines *klimatischen Einflusses* ändert), sollen soweit vorhanden auch Informationen über die erwarteten Schäden (*Sensitivität*) und über die Bedeutung des betroffenen Objekts, der betroffenen Strecke oder der betroffenen Region bzw. dort auftretende Einschränkungen (*Kritikalität*, z. B. aus verkehrlicher Sicht) einbezogen werden.

Die Forschungsarbeiten der 1. Phase haben gezeigt, dass die Kenntnisse zu den zukünftigen Änderungen der *Exposition* zwar unsicher, jedoch weitgehend vorhanden sind. Hier können Aussagen darüber getroffen werden, ob die *Exposition* des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen bzw. Naturgefahren in den nächsten Dekaden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts überhaupt zunimmt und entsprechende Anpassungsmaßnahmen erwogen werden müssen. Teilweise können auch die Geschwindigkeit und Intensität des Wandels abgeschätzt werden. Mit dem Datenfundus der BVWP liegen zudem strecken- und verkehrsträgerdifferenzierte Informationen darüber vor, welche Streckenabschnitte aus verkehrlicher Sicht heute oder in Zukunft (derzeit 2030) besonders bedeutend sind (Kritikalitätsbewertung anhand der Verkehrsbelastung). Es fehlt jedoch – mit wenigen Ausnahmen – an strukturierten, digital verfügbaren und damit für netzweite Analysen verwertbaren Informationen zur Sensitivität der Strecken und Objekte. Gedacht ist hier z. B. an Daten zur genauen Höhe von Bahn- oder Straßendämmen. Diese Daten wären notwendig, um über einen Verschnitt mit Wasserspiegellagen bei extremen Abflusssituationen Ausfallzeiten infolge hochwasserbedingter Streckensperrungen ableiten zu können. Ferner kann nicht ohne weiteres ausgewertet werden, auf welche Werte (Hochwasserabflüsse, Starkregensmengen etc.) die zahlreichen Infrastrukturbauwerke (Entwässerungsanlagen, Schleusen) bemessen sind bzw. ab wann sie mit welcher Folge ihre Funktion einbüßen. Hier spielen außerdem Zustandsinformationen eine wichtige Rolle. Derzeit kann nur in Einzelfällen (z. B. lokale Detailstudien) oder sehr pauschal eine Aussage zu den zu erwartenden Verkehrseinschränkungen oder -ausfällen oder Schäden an der Infrastruktur getroffen werden.

Tabelle 7-1 fasst den Sachstand zur Bearbeitung von unterschiedlichen Klimawirkungsanalysen mit Bezug auf die „Netz-Ebene“ und das Zielsystem „Verkehr“ zusammen.²² In der Tabelle wird farblich unterschieden zwischen Komponenten, die wegen fehlender Wirkungszusammenhänge nicht bearbeitet werden müssen („nicht nötig“), und Komponenten, die derzeit mangels strukturierter Daten nicht bearbeitet werden können („nicht durchgeführt“ weil z. B. Daten nicht verfügbar sind). Komponenten, zu denen grundsätzlich verwertbare Daten vorliegen, sind grün oder gelb eingefärbt. Gelb deutet dabei auf eine eingeschränkte Aussagekraft hin. Die ersten Spalten geben Aufschluss darüber, zu welchen klimatischen Einflüssen (Spalte 1) das BMVI-Expertennetzwerk relevante Daten zusammenstellen konnte, die eine Aussage zur *Exposition* auf Netzebene ermöglichen (Spalte 2). Hierzu gehören Datenprodukte der "klassischen" Klimafolgenbewertung (Indikatoren zu extremen Lufttemperaturen, Abflüssen etc.) sowie weitere Daten, die z. B. Aufschluss über die Lage von Infrastrukturelementen (Strecken) in Überflutungsgebieten (Hochwasserexposition) oder in der Nähe von Bäumen (*Exposition* gegenüber Sturmwurf) geben. Ferner ist wiedergegeben (Spalte 3), für welche klimatischen Einflüsse Änderungen projiziert werden, so dass eine Anpassung an den Klimawandel besonders relevant ist. Dies ist für alle betrachteten klimatischen Einflüsse der Fall mit Ausnahme der Themen "Starkregen" und "Windböen". Hier sind die vorliegenden Daten und Modelle noch nicht ausreichend detailliert, um zu belastbaren Aussagen auf relevanten Zeitskalen (Stunden) zu kommen. Auch zeigen die Projektionen zumindest hinsichtlich der relevanten Starkwindindikatoren keine klare Änderungsrichtung.

²² Der Überblick ist nicht vollständig. Klimawirkungen wie z. B. die "Kritische Wassergüte" spielen eher in anderen Zielsystemen, z. B. im Zielsystem "Ökologie", eine Rolle und sind hier nicht dargestellt.

Tabelle 7-1: Matrix zum aktuellen Bearbeitungsstand verschiedener Klimawirkungsanalysen mit Bezug auf die „Netz-Ebene“ und das Zielsystem „Verkehr“. Komponenten, die wegen fehlender Wirkungszusammenhänge nicht bearbeitet werden müssen („nicht nötig“) sind grau und solche, die derzeit mangels strukturierter Daten nicht bearbeitet werden können (z. B. aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit) sind rot hinterlegt. Komponenten, zu denen grundsätzlich verwertbare Daten vorliegen, sind grün oder gelb eingefärbt, wobei gelb auf eine eingeschränkte Aussagekraft hindeutet.

Klimatische Einflüsse, vorgelagerte Wirkungen	Expositionsanalyse	Belastbares Änderungssignal projiziert	Sensitivitätsanalyse			Kritikalitätsanalyse			Klimawirkungsanalyse		
			Schiene	Straße	Wasserstraße	Schiene	Straße	Wasserstraße	Schiene	Straße	Wasserstraße
Hitze	Karte zum klimatischen Einfluss	ja	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt ²³	nicht nötig	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	nicht nötig	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht nötig
Hohe Niederschläge	Karten, Werkzeug	Nein	nicht durchgeführt	teilweise durchgeführt ²⁴	nicht nötig	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	nicht nötig	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht nötig
Hochwasser (Flüsse)	Karten ¹ , Pegel	ja	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	Gütermenge	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt
HSW-Überschreitung (Flüsse)	Längsschnitte, Karten ¹	ja	nicht nötig	nicht nötig	Uferbeschaffenheit, Brücken...	nicht nötig	nicht nötig	Gütermenge	nicht nötig	nicht nötig	nicht realisiert
Extremniedrigwasser (Flüsse)	Pegel (Q << GIQ)	ja	nicht nötig	nicht nötig	Schiffstyp, Fließtyp	nicht nötig	nicht nötig	Gütermenge	nicht nötig	nicht nötig	nicht realisiert
Niedrigwasser (Flüsse)	Karte ¹ (GIQ)	ja	nicht nötig	nicht nötig	Schiffstyp, Fließtyp	nicht nötig	nicht nötig	Gütermenge	nicht nötig	nicht nötig	ja
Hoch- und Niedrigwasser (Küste)	Pegel	ja	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	— (NOK)	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	Gütermenge	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht realisiert
Windböen	Karten	Nein	Elektrifizierung	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	Gütermenge	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht nötig
Gravitative Massenbewegungen	Karten, Modellsätze	Nein	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht nötig	Zugzahlen	Fahrzeugzahlen	nicht nötig	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht nötig

1: annähernd bundesweit

²³ Hinweis: Forschungsprojekt zu Materialanpassung von Asphalten an extreme Temperaturen im Rahmen von SP-107 (vgl. Norpoth et al., 2020)

²⁴ Höhenlage von Straßen und Durchlässe in Blue-Spot-Analyse für Nordrhein-Westfalen berücksichtigt

Die gelb eingefärbten Bereiche in der Spalte "Exposition" zeigen, dass die verfügbaren Daten zwar grundsätzlich vorhanden sind, teilweise jedoch noch nicht den Anforderungen für eine Analyse auf Netzebene genügen. So konnten die Auswertungen zu den HSW-Überschreitungen zwar exemplarisch in geeignete Karten umgesetzt werden (Nilson und Helms 2017b), jedoch fehlt noch die Anwendung auf das Binnenwasserstraßennetz und die Zukunft. Auch die Auswertungen zu den Extremniedrigwassern im Binnenbereich (Abflussschwellenwerte deutlich unter GIQ) und Hoch- sowie Niedrigwassern im Küstenbereich sind noch exemplarisch geblieben. Für die Klimawirkung „gravitative Massenbewegungen“ liegen hingegen erste bundesweite Modellansätze zur Klima-Integration vor, jedoch ist der Einfluss des Klimawandels wenig belastbar. Der Grund hierfür liegt in der Verwendung von vorläufigen Schwellenwerten zu klimatischen Auslösern von gravitativen Massenbewegungen (z. B. für Anzahl Tage mit Starkregen > 20 mm). Diese Schwellenwerte werden in Phase 2 des BMVI-Expertennetzwerks verfeinert (siehe (Lohrengel et al. 2020)).

Besonders große Informationsdefizite bestehen im Bereich der *Sensitivität* (Spalten 4 bis 6 in Tabelle 7-1). Hier fehlen z. B. netzweite Informationen zur Anfälligkeit von Straßen²⁵ und Gleisanlagen gegenüber Hitze, Angaben zur Dimensionierung von Entwässerungseinrichtungen, Höhenangaben von Straßen- und Bahndämmen sowie konkrete Angaben zu verkehrskritischen Windgeschwindigkeiten in exponierten Lagen (Brücken, Häfen, auf See). Einzelne netzweite Sensitivitätsaspekte können für die Wasserstraße erfasst werden. Hierzu gehört z. B. die Identifikation von frei fließenden Streckenabschnitten, die im Vergleich zu staugeregelten oder kanalisierten Strecken sensitiver gegenüber Änderungen des Wasserdargebotes (Hochwasser, Niedrigwasser) sind. Ein bezüglich gravitativer Massenbewegungen wichtiger Faktor für die Betroffenheit von Straße und Schiene ist das Vorhandensein von Sicherungsbauwerken. Zwar liegen den beiden Verkehrsträgern Informationen zu Hangsicherungen bundesweit vor, da diese jedoch derzeit nicht georeferenziert sind, können sie noch nicht in die vorliegenden Modellansätze integriert werden.

Relativ gut ist die Datenlage bzgl. der Komponente *Kritikalität* (Spalten 7 bis 9 in Tabelle 7-1). Hier kann auf relativ detaillierte Verkehrszahlen (transportierte Mengen, Güter, Personen etc.) der BVWP sowie deren Netzumlegung zurückgegriffen werden. In den in diesem Bericht angesprochenen Analysen wurde mit der mengenmäßigen Verkehrsbelastung ein sehr einfacher Indikator gewählt, der Raum für weitere Diskussionen bietet. Die Herausforderung besteht in einer adäquaten Einordnung der Wertigkeit unterschiedlicher Streckenabschnitte. So kann z. B. ein Straßenabschnitt im Netzvergleich verkehrlich unbedeutend sein, im regionalen Kontext jedoch eine unverzichtbare Rolle spielen. Analoge Überlegungen können auch für Schiene und Wasserstraße angestellt werden.

In der Zusammenschau (Spalten 10 bis 12 in Tabelle 7-1) zeigt sich, dass einige Klimawirkungsanalysen nicht durchgeführt werden konnten (rote Zellen), da vor allem Daten zur Abschätzung der Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur fehlen bzw. nicht für eine netzweite Analyse in geeigneter Form aufbereitet waren. Andere Klimawirkungsanalysen konnten im Rahmen der aktuellen Phase des BMVI-Expertennetzwerks zwar vorbereitet, jedoch noch nicht netzweit umgesetzt werden (gelb eingefärbte Zellen). Bei wieder anderen (Starkregen, Windböen) fehlt es derzeit noch an Modellen mit ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung. Exemplarisch durchgeführt wurde eine netzweite Klimawirkungsanalyse zum Thema Niedrigwasser/Binnenschifffahrt (Nilson et al. 2020).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der begonnene Weg einer über alle Verkehrsträger und Klimawirkungszusammenhänge kohärenten Klimawirkungsbewertung zukunftsweisend ist. Dies ist nicht nur das einhellige Votum der Bearbeiter, sondern auch der Infrastrukturbetreiber und -nutzer, die z. B. im Rahmen von Nutzerworkshops einbezogen wurden. Auch im ressortübergreifenden Kontext des DAS-Behördennetzwerks sind die Analysen des BMVI-Expertennetzwerks richtungsweisend.

²⁵ Hinweis: Forschungsprojekt zu Materialanpassung von Asphalten an extreme Temperaturen im Rahmen von SP-107 Anpassungsoptionen (Norpoth et al. 2020)

Der anzustrebende Transfer der Ergebnisse in ein nachhaltiges Datenangebot, das dauerhaft gepflegt wird und verfügbar ist, liegt außerhalb des Auftrags eines Forschungsprogrammes und ist durch den neu etablierten DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ zu leisten. Auftrag des BMVI-Expertennetzwerks ist die weitere Beseitigung bestehender Wissens- und Datendefizite. So werden die im Themenfeld 1 zusammenarbeitenden Partner in der folgenden Phase identifizierte Lücken gezielt schließen. Schwerpunkte sind dabei u. a. klimatische Einflüsse, die auf sehr viel kleineren Zeit- und Raumskalen große Schäden verursachen können (z. B. Starkregen/Sturzfluten), sowie weitere Anstrengungen, die Geodaten der Verkehrsinfrastruktur mit auswertbaren Attributen zur Sensitivität zu versehen. Auch hier ist eine enge Zusammenarbeit mit den Infrastruktur- und Verkehrsplanern und -betreibern gefordert.

7.2 Arbeitsprogramm ab 2020

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 Schwerpunktthemen (SPT) bearbeitet (Abbildung 7-1). 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. Die Schwerpunktthemen orientieren sich nicht mehr (wie die Schwerpunkte in der ersten Phase) an den einzelnen Naturgefahren, sondern nehmen die Komponenten der Klimawirkungsanalyse in den Fokus. Durch diese Bündelung soll die einheitliche verkehrsträger- und gefahrenübergreifende Bearbeitung noch verstärkt 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 und Anpassung*“ bewertet die Kritikalität von klimawandel- und extremwetterbedingten Ausfällen bzw. Funktionseinschränkungen und untersucht Maßnahmen zur Minderung negativer Klimawandelwirkungen auf den Verkehr.
- „SPT-104 *Integrierte Klimawirkungsbewertung & Nutzerdialog*“ integriert die Ergebnisse von SPT-101 bis 103 in eine verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsbewertung und stellt im Dialog mit den Betreibern der Verkehrsinfrastruktur Produkte, die zur Erhöhung der Klimaresilienz des Verkehrssystems dienen können, bereit.

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

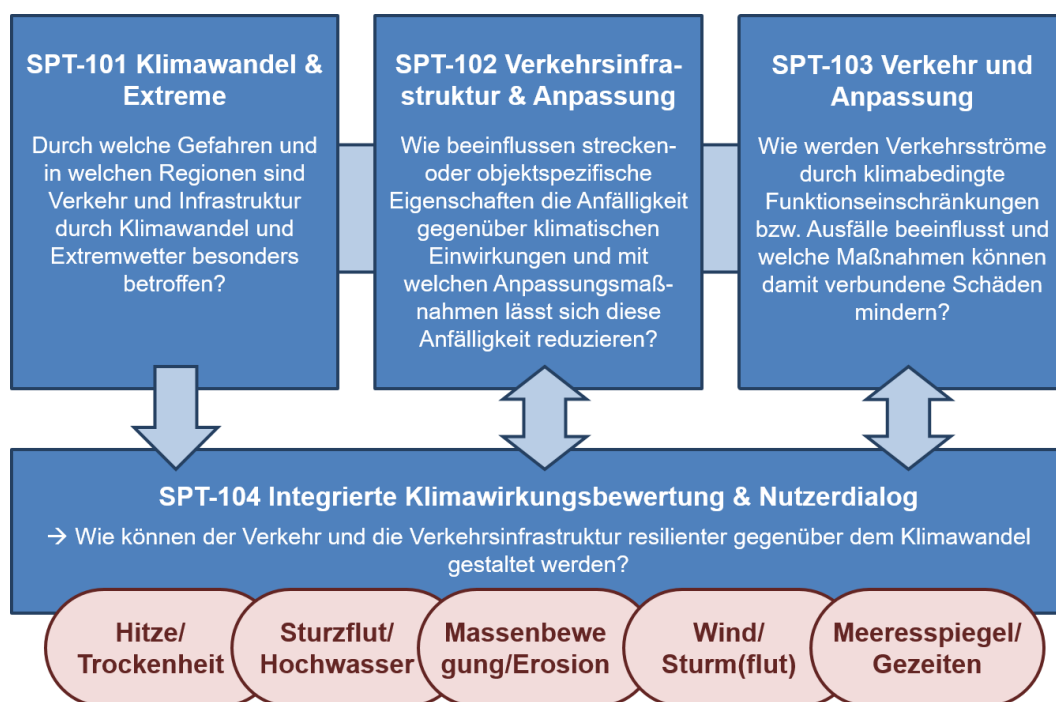


Abbildung 7-1: Organisationsstruktur, Schwerpunktthemen und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase (2020–2025).

8 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. <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2015/1626/>
- BfG (2017) VerkNet-BWaStr: Verkehrsnetz der Bundeswasserstraßen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde i.A. der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (Ed.). WSV - Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. https://www.wsv.de/service/karten_geoinformationen/verknet_bwastr/index.html
- BMI (2009) Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Bundesministerium des Innern (BMI), Berlin. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.html>
- BMVI (2015a) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.kiwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html
- BMVI (2015b) Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen. Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße, Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-gesamtplan.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. DOI:10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- Brahmer G, Brinkmann M, Busch N, Creusot R, Diezig R, Friese R, Hammer M, Lammersen R, Mehlig B, Plonka B, Schmid-Breton A, Schulte-Wülver-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, Rauhe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf
- Bundesregierung (2015) Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Stand: 16.11.2015. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf (letzter Zugriff: 14.10.2019)
- 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. Climate Change. 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. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>
- Buthe B, Jakubowski P und Pütz T (2015) Verkehrliche Auswirkungen einer Sturmflut - Transportströme und Erreichbarkeiten, BBSR, Bonn.

- DESTATIS (2019) Güterverkehr - Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung>
- EBA (2018) 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
- Ebner von Eschenbach A-D und Hohenrainer J (2019) Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- FGSV (2008) Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN), Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, FGSV 121, FGSV Verlag, Köln.
- Glade T und Dikau R (2001) Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 145(6), 42-53. <https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade&Dikau2001.pdf>
- 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. In: (DWD) DW (Ed.).
- 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. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.01
- Hänsel S, Nilson E, Patzwahl R, Forbriger M und Klose M (2020b) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- 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
- Ingenieurgruppe IVV (2019) Kritikalitätsanalyse, Beschreibung des indikatorenbasierten Bewertungsansatzes, Zwischenstand. Bericht zum Zwischenstand des Forschungsprojektes Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz, Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG, Aachen (unveröffentlicht).
- 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
- 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: 109, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Krauter E, Kumerics C, Feuerbach J und Lauterbach M (2012) Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft S 75, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/531/file/S75b.pdf>
- LAWA (2018) Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten beschlossen auf der 156. LAWA-Vollversammlung 27./28. September 2018 in Weimar. Bund/Länder-

- Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz, Weimar.
- Lefebvre C, Bissolli P, Hafer M und Roček M (2018) Sturmtief FABIENNE bringt am 23. September 2018 Sturm und Regen. Deutscher Wetterdienst (DWD).
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-Experten Netzwerks. DOI:10.5675/ExpNLAf2020.2020.06
- MELURSH (2012) Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012.
<https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/Downloads/Generalplan.html> (letzter Zugriff: 14.10.2019)
- Nilson E und Helms M (2017a) Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten "Hochwasser" für die Binnenschiffahrtsstraßen im Kontext der Klimafolgenanalyse, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Nilson E und Helms M (2017b) Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten "Hochwasser" für die Binnenschiffahrtsstraßen im Kontext der Klimafolgenanalyse.
- Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Hauer G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Experten Netzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- 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-Experten Netzwerks. DOI:10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- PIEVC (2008) Adapting to climate change, Canada's first national engineering vulnerability assessment of public infrastructure, Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee (PIEVC).
https://pievc.ca/sites/default/files/adapting_to_climate_change_report_final.pdf
- Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, 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-Experten Netzwerks. DOI:10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- 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 Fokusbereiche Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Experten Netzwerks. DOI:10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- 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).
- 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 Ästuarie. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. DOI:10.5675/Kliwas_36/2014_3.02
- SSP Consult BIG (2019) Lagegenaue Angleichung der Geometrie des Netzmodells der Bundesfernstraßen (NEMOBFStra) an die Netzgeometrie des Bundesinformationssystem StraÙe (BISStra), SSP Consult, Beratende Ingenieure GmbH, Stuttgart.
- UBA (2016) Klimawirkungsketten, Umweltbundesamt (UBA).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf

Umweltbundesamt (2017) Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung, Umweltbundesamt, UBA.

ZKR (2011) Merkblatt Inland AIS, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR). https://www.ccr-zkr.org/files/documents/workshops/wrshp181011/Leaflet_Inland_AIS_de.pdf

ZKR (2014) Angenommene Beschlüsse der Herbstsitzung, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR). https://www.ccr-zkr.org/files/documents/resolutions/ccr2014_II_d.pdf

9 Abkürzungsverzeichnis

AdSVIS	A daptation der S traßenverkehrs i nfrast r uktur an den Klimawandel – Forschungsprogramm zur Anpassung der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel
Basis-DLM	D igitale Basis- L andschafts m odell
BASt	B undesanstalt für S traßenwesen
BAW	B undesanstalt für W asserbau
BfG	B undesanstalt für G ewässerkunde
BISStra	B undes i nformationssystem S traße
BMVI	B undes m inisterium für V erkehr und digitale I nfrast r uktur
BSH	B undesamt für S eeschiffahrt und H ydrographie
BVWP	B undesverkehrs w egeplan
BWaStr	B undes w asser s traße
CCLM	C OSMO- C LM
CLM	<i>C</i> limate <i>L</i> imited- <i>a</i> rea <i>M</i> odel – von der CLM-Community betriebenes regionales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell hervorgegangen ist
COSMO	<i>C</i> onsortium for <i>S</i> mall <i>S</i> cale <i>M</i> odelling – Konsortium für kleinskalige Modellierung
COSMO-REA6	<i>C</i> OSMO <i>R</i> egional <i>R</i> eanalysis – regionale Reanalyse erstellt mit dem COSMO-Modell
DAS	D eutsche A npassungs s trategie an den Klimawandel
DB	D eutsche B ahn
DTVw	d urchschnittlicher w erktäglicher V erkehr
DTVw(SV)	d urchschnittlicher w erktäglicher S chwer v erkehr
DWD	D eutscher W etter d ienst
DZSF	D eutsches Z entrum für S chienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
EBA	E isenbahn- B undes a mt
EU-WRRL	E uropäische W asserrahmen r ichtlinie
GIS	G eoinformationssystem
GIZ	D eutsche G esellschaft für I nternationale Z usammenarbeit
GIQ	g leichwertiger A bl f luss
GIW	g leichwertiger W asser s tand
HQ	h öchster D urch f luss (Gewässer)
HQ ₁₀₀	100-jährliches Hochwasserereignis
HSW	h öchster S chiff f ahrt w asser s tand
HSQ	H SW zugehöriger A bl f luss w ert
HWGK	H och w ass e r g efahren k arte
HYRAS	H ydrologische R asterdatensätze verschiedener hydrometeorologischer Größen für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete
IKSR	I nternationale K ommission zum S chutz des R heins
IMA-A	I nter m inisterielle A rbeits g ruppe A npassung an den Klimawandel
IPCC	<i>I</i> nter g overnmental <i>P</i> anel on <i>C</i> limate <i>C</i> hange – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat

Kfz	K raft f ahrzeug
KLIWAS	Auswirkungen des K limawandels auf W asserstraßen und S chifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (Projekt des BMVI)
KWVA 2021	K limawirkungs- und V ulnerabilitäts a nalyse des Bundes, deren Veröffentlichung für 2021 vorgesehen ist
Lkw	L ast k raft w agen
MPI-OM	O zeanmodell des M ax- P lanck- I nstitutes für Meteorologie in Hamburg
NEMO	<i>Nucleus for European Modelling of the Ocean</i> – von einem europäischen Konsortium von Forschungsinstituten entwickeltes regionales Ozeanmodell
NEMOBFSr	N etzmodell der B undes f ern s traßen
NOK	N ord- O stsee- K anal
NQ	niedrigster D urch f luss (Gewässer)
OGewV	O berflächengewässerverordnung
PIEVC	P ublic I nfrastructure E ngineering V ulnerability C ommittee
PNP	P egeln u ll p unkt
Q	Abfluss
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> – Emissionsszenarien (Repräsentative Konzentrationspfade) des 5. IPCC Sachstandsberichts
REMO	R egional M odell – in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell
RIVA	R isikoanalyse wichtiger V erkehrs a chsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels – Forschungsprojekt im Rahmen des AdSVIS Forschungsprogramms
RNQ	A bfluss beim R egulierungsniedrigwasserstand
SGV	S chienen g üter v erkehr
SP	Forschungs- S chwer p unkt der 1. Förderphase im BMVI-Expertenetzwerk
SPFV	S chienen p ersonen f ern v erkehr
SPNV	S chienen p ersonen n ah v erkehr
SPT	S chwer p unkt t hema der zweiten Förderphase im BMVI-Expertenetzwerk
TEN-V	t ranseuropäische V erkehrs n etze
UBA	U mwelt b undes a mt
WSV	W asserstraßen- und S chifffahrts v erwaltung des Bundes

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

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