

Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser

Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

M. Rauthe, C. Brendel, M. Helms, A.-F. Lohrengel, L. Meine, E. Nilson, M. Norpoth, C. Rasquin, E. Rudolph, N. H. Schade, T. Deutschländer, M. Forbriger, C. Fleischer, A. Ganske, C. Herrmann, J. Kirsten, J. Möller, R. Seiffert



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

Zitiervorschlag

Rauthe M, Brendel C, Helms., Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N H, Deutschländer T, Forbriger M, Fleischer C, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J, Seiffert R. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. 136 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04

Impressum

Digitale Publikationsreihe des Themenfeldes 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertenetzwerk „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 Expertenetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ gefördert.

Internet: www.bmvi-expertennetzwerk.de

Autoren:

Deutscher Wetterdienst:

Dr. Monika Rauthe, Christoph Brendel, Dr. Thomas Deutschländer

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:

Dr. Nils H. Schade, Dr. Anette Ganske, Jens Möller

Bundesanstalt für Gewässerkunde:

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

Bundesanstalt für Wasserbau:

Caroline Rasquin, Dr. Elisabeth Rudolph, Dr. Rita Seiffert

Bundesanstalt für Straßenwesen

Anne-Farina Lohrengel, Lennart Meine, Jens Kirsten

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung/ Eisenbahn-Bundesamt

Maike Norpoth, Markus Forbriger, Carina Herrmann

Redaktionsschluss: April 2020

Titelbild: Foto: Hochwasser am Autobahnkreuz Deggendorf Mai/Juni 2013, Quelle: DLR

DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04

Inhalt

1	Kernaussagen.....	1
2	Hintergrund & Ziele.....	2
3	Grundlagen & Methoden.....	6
3.1	Gemeinsame Festlegungen im Expertennetzwerks-Themenfeld1.....	6
3.2	Starkniederschlag.....	8
3.2.1	Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes).....	9
3.2.2	Kerndichteschätzung.....	10
3.2.3	Grundlagen für Dimensionierung von Bauwerken (KOSTRA-DWD).....	12
3.3	Flusshochwasser.....	13
3.3.1	Erhebung relevanter Information.....	14
3.3.2	Methoden zur hydrologischen Analyse von Flusshochwasser.....	15
3.4	Hochwasser Küste.....	20
3.4.1	Entwässerungsproblematik.....	20
3.4.2	Sturmfluten.....	21
3.4.3	Meeresspiegelanstieg.....	23
3.5	Umsetzung der Klimawirkungsanalyse im Schwerpunktthema <i>Hochwassergefahren</i>	24
3.5.1	Grundlagen zur Klimawirkungsanalyse (IMA Leitfaden).....	24
3.5.2	Wirkungspfad Hochwasser Wasserstraße.....	25
3.5.3	Wirkungspfade Hochwasser Straße und Schiene.....	32
3.5.4	Wirkungspfad Entwässerung an den Küsten.....	40
3.5.5	Wirkungspfad Sturmflut.....	43
4	Ergebnisse der Arbeitsschwerpunkte.....	46
4.1	Starkniederschlag.....	46
4.1.1	Indizes & Kernschätzer.....	46
4.1.2	Blue-Spot-Analyse.....	58
4.1.3	Gleisentwässerung.....	62
4.2	Flusshochwasser.....	67
4.2.1	Hydrologische Analysen und Simulationen – Vorarbeiten.....	68
4.2.2	Hochwasser Wasserstraße.....	73
4.2.3	Hochwasser Straße und Schiene.....	77
4.3	Hochwasser Küste.....	92
4.3.1	Entwässerungsproblematik.....	92
4.3.2	Sturmflut.....	96
4.4	Übersicht der Ergebnisse aus SP-103 für Klimawirkungsanalyse.....	101
5	Fazit & Ausblick.....	102
5.1	Wesentlicher Erkenntnisgewinn.....	102
5.2	Offene Forschungsfragen.....	104

5.3	Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase	106
6	Literatur	109
7	Abkürzungsverzeichnis	118
8	Anhang.....	122
8.1	Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe	122
8.2	Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME	123
8.3	Serien jährlicher Häufigkeiten der HSW-Überschreitung.....	126
8.4	Übersicht über die Hochwassergefahrenkarten ausgewählter Bundesländer.....	127
8.5	Hochwasserstatistiken aus beobachteten Abflussreihen für ausgewählte Pegel.....	128
8.6	Hochwasserstatistiken aus simulierten Abflussreihen für ausgewählte Pegel.....	130

1 Kernaussagen

- Die Niederschlagssummen nehmen im Mittel voraussichtlich leicht zu – insbesondere im Winter und Frühjahr, während im Sommer zukünftig auch Niederschlagsabnahmen möglich sind. Es ist zukünftig mit häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen zu rechnen, von denen besonders seltene Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zunehmen als weniger extreme Ereignisse.
- Der Abfluss der großen Flüsse ändert sich im Jahresmittel vielerorts kaum, da eine winterliche Abflusszunahme durch eine sommerliche Abnahme kompensiert wird.
- Bestehende Tendenzen zu starken Winterregen verstärken sich in einigen Flussregionen. Flussabschnitte, die schon heute durch winterliche Hochwasserereignisse geprägt sind, erwarten daher eine zunehmende Gefährdung durch Hochwasserereignisse.
- Die Zukunftsprojektionen zeigen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine Zunahme von Gefährdungen an Rhein, Donau und deren größeren Nebenflüssen durch Hochwasser.
 - Dabei ist mit Zunahmen mittlerer jährlicher Überschreitungsdauern des Höchsten Schifffahrtswasserstands (HSW) zu rechnen. Diese bleiben jedoch i. d. R. unter zwei Wochen, am gesamten Rhein und weiteren Flussabschnitten auch unter einer Woche. Im Vergleich mit Niedrigwasserphasen führen Hochwasserereignisse damit im Mittel nur zu untergeordnet relevanten Unterbrechungsdauern für die Schifffahrt. Einzeljahre mit Überschreitungsdauern von mehr als einem Monat bleiben insbesondere am Rhein selten.
 - Zudem ist im *Weiter-wie-bisher-Szenario* in den Einzugsgebieten von Rhein und Donau eine allgemeine, jedoch regional und phasenweise differenzierte Zunahme extremer Flusshochwasserereignisse zu erwarten. Am Rhein und an der Donau erhöhen sich bspw. die 100-jährlichen Abflussscheitel (HQ₁₀₀) um 10 bis 25 %. Gleichzeitig verkürzen sich die Wiederkehrintervalle des HQ₁₀₀ an Rhein und Donau verbreitet auf etwa 30 bis 50 Jahre.
- Projektionen zur Entwicklung des globalen Meeresspiegels erreichen Ende des 21. Jahrhunderts für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* oftmals einen Anstieg von über einem Meter. Die Entwicklung des Meeresspiegels ist aufgrund der derzeit kaum abschätzbaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Im Küstenbereich sind Watten grundsätzlich in der Lage, bei einem Meeresspiegelanstieg aufzuwachsen. Jedoch wird bei einem stark beschleunigten Meeresspiegelanstieg ein Verlust an Wattfläche erwartet, da die natürliche morphologische Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers durch das Sedimentdargebot begrenzt wird. Veränderungen von Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie Tidehub sind innerhalb der Deutschen Bucht räumlich und zeitlich heterogen.
- Das erwartete häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee geht potenziell mit einem häufigeren Auftreten angespannter Entwässerungssituationen am Nord-Ostsee-Kanal einher. Auch der Betrieb des Kanals wird dadurch negativ beeinflusst, was sich mit dem zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zusätzlich verschärft.
- Ein Baustein der verkehrsträgerübergreifenden Integrationsarbeit ist das Konzept einer gemeinsamen Klimawirkungsanalyse. Auf dieser Grundlage wurde in der aktuellen Phase die heutige und zukünftig potenziell veränderte Exposition von Schiene, Straße und Wasserstraße gegenüber ausgewählten klimatischen Einflüssen und Natureinflüssen untersucht.
- 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. Der potenzielle Überschwemmungsbereich des „extremen“ Hochwasserszenarios umfasst knapp 8 % des Bundesfernstraßennetzes und ca. 8 % des Schienennetzes. Exemplarische Untersuchungen an Rhein und Donau und deren Nebenflüssen deuten darauf hin, dass sich das Wiederkehrintervall extremer Hochwasserereignisse in Zukunft verkürzt. Die potenzielle Betroffenheit der Bundesfernstraßen- und Schieneninfrastruktur durch Flusshochwasser nimmt somit zu.

2 Hintergrund & Ziele

Hochwassersituationen können auf verschiedene Weise die Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes beeinträchtigen. Überflutungsbedingte Sperrungen von Schiene und Straße können zum Beispiel auf Grund von lokalen Starkregenereignissen oder durch über die Ufer tretendes Wasser bei Flusshochwasser oder Sturmfluten auftreten. Von einer Sturzflut spricht man, wenn innerhalb von wenigen Stunden nach einem Starkregenereignis enorme Wassermengen über ein Gebiet hereinbrechen. Es ist dann mehr Wasser vorhanden als von den weiter abwärts gelegenen Flussläufen oder Abwasser- und Entwässerungssystemen aufgenommen werden kann. Dadurch fließt das ablaufende Wasser mit hoher Geschwindigkeit abwärts und sammelt sich inklusive des mitgerissenen Materials in tiefer liegenden Gebieten. Aufgrund der Seltenheit von Sturzfluten und der sehr starken Abhängigkeit von lokalen Gegebenheiten wie Bebauung, Entwässerungssystemen, Gewässerführung etc. sind für diesen Hochwasseraspekt detaillierte Untersuchungen aufgrund fehlender Datenbasis jedoch kaum möglich. Sperrungen der Binnenwasserstraßen werden durch Überschreitung des sogenannten höchsten schiffbaren Wasserstandes ausgelöst. Neben zeitweiligen Sperrungen können auch Schäden an der Verkehrsinfrastruktur verursacht werden, die nachhaltige und weitreichende Folgen für die Verkehrsströme in Mitteleuropa haben.

Prägnantes Beispiel war das Hochwasser an Elbe und Donau im Mai/Juni 2013 (BfG 2014, DWD 2013); siehe auch Titelbild des vorliegenden Berichts). Die Folgen der Überflutungen z. B. in der Region Niederbayern waren die Sperrung der Donau für den Schiffsverkehr für mehr als zwei Wochen und die Sperrung der Bundesautobahnen A92 und A3 für drei bzw. elf Tage. Des Weiteren traten Schäden am Straßenbelag sowie diverse Schäden an Brücken und Strecken des Schienenverkehrs auf. In dieser Zeit hatten die Niederschläge teilweise das Zwei- bis Dreifache der mittleren Niederschläge im Mai überschritten und das zusammen mit einer hohen Bodenfeuchtesättigung, wodurch die Niederschlagsmengen nur in geringerem Umfang vom Boden aufgenommen wurden. In Deggendorf an der Donau führte ein Deichbruch an der Isarmündung zur Flutung des Polders Steinkirchen-Fischerdorf.

Zu den zentralen Anliegen von Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks ("Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen"; im folgenden ExpN-TF1) gehört es, zu einer integrierten Sicht auf Gefährdungen des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur zu kommen, die sich durch den Klimawandel und extreme Witterungsbedingungen ergeben könnten. Es ist Ziel, verkehrsträgerspezifische Expositionen, die mit unterschiedlichen Daten und Methoden untersucht werden, vergleichbar zu machen. Neben spezifischen Gefährdungsabschätzungen in unterschiedlichen Regionen, zu unterschiedlichen Zeithorizonten und bei unterschiedlichen Verkehrsträgern sollen insbesondere verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalysen erprobt werden. Auch über das BMVI-Expertennetzwerk hinausgehend gibt es Bemühungen, die Klimafolgenforschung in unterschiedlichen Sektoren und Ressorts einheitlicher zu gestalten. Die Interministerielle Arbeitsgruppe – Anpassung an den Klimawandel (IMA-A) – hat einen Leitfaden vorgelegt (Buth et al. 2017), der die Kohärenz von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen auch im ressortübergreifenden Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) verbessert.

Wesentliche Bedingung für eine regionale, zeitliche, interinstitutionelle, intermodale und ressortübergreifende Integration heterogener Klimafolgeninformationen erfordert ein klar definiertes und abgestimmtes Auswertungsschema, das in der Klimawirkungsanalyse zusammengeführt wird. Dabei ist aber darauf hinzuweisen, dass die Betrachtungen – dem begrenzten Umfang des Forschungsprogramms und begrenzter technischer Ressourcen geschuldet – teilweise exemplarisch bleiben müssen (hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Abdeckung) und derzeit nur eine Auswahl relevanter Wirkungszusammenhänge untersucht werden kann.

Die Partner im ExpN-TF1 sowie im Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung haben möglichst einheitliche Informationen zu den folgenden gemeinsamen Komponenten von Klimawirkungsanalyse bzw. Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse zusammengetragen:

- a) **Wirkungsweisen:** Hierbei handelt es sich um Analysen der im Themenfeld 1 untersuchten Wirkungszusammenhänge im Klima- und Verkehrssystem. Die Analysen gliedern sich in eine beschreibende Systemanalyse und eine Skizzierung der im ExpN-TF1 eingesetzten technischen Implementierung in Form von Modellen und statistischen Methoden. In diesem Bericht werden die folgenden Wirkungsweisen dargestellt:
 - a. Wirkungsweise **Hochwasser Wasserstraße** (HSW-Überschreitung) (Abschnitt 3.5.2)
 - b. Wirkungsweise **Hochwasser Straße u. Schiene** (Hochwassergefahrenkarte) (Abschnitt 3.5.3)
 - c. Wirkungsweise **Entwässerung an den Küsten** (Abschnitt 3.5.4)
 - d. Wirkungsweise **Sturmflut** (Abschnitt 1.)
- b) Informationen für die **Referenzsituation:** Diese dienen z. B. dazu, die Bedingungen der Gegenwart bzw. der jüngeren Vergangenheit in Deutschland zu beschreiben. So können Regionen identifiziert werden, die in Bezug auf die genannten Wirkungsweisen potenziell in besonderem Maße von Änderungen klimatischer Einflüsse betroffen sind. Klimatische Einflüsse sind dabei nach der Terminologie der DAS unmittelbar durch meteorologische Größen und Indikatoren darstellbar. Klimawirkungen beziehen weitere Systemkompartimente ein und werden z. B. durch hydrologische oder verkehrswasserwirtschaftliche Größen und Indikatoren ausgedrückt.
- c) Informationen für die **Szenariensituation:** Hierbei handelt es sich um Modifikationen der Referenzinformationen, die abgewandelte Randbedingungen berücksichtigen, die sich v. a. unter Annahme ausgewählter Klimaszenarien ergeben. Die Wirkungsweisen per se sind dieselben wie die der Referenzsituation.
- d) Informationen zur spezifischen **Sensitivität** des Verkehrs oder der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen oder indirekten Klimawirkungen: Hierbei sind strecken-, netz-, bauwerks- oder nutzerbezogene Blickwinkel möglich.
- e) Informationen zur Bedeutung eines Streckenabschnitts bzw. einer Transportrelation. Hierbei können neben verschiedenen verkehrlichen Aspekten (Gütermenge- und -werte, Fahrzeugzahlen) auch weitere Aspekte (z. B. ökologische Indikatoren) herangezogen werden. Diese Art der Wertigkeitsbetrachtung wird nach Terminologie des BMVI-Expertenetzwerks mit dem Begriff "**Kritikalität**" belegt. Diese Begriff ist nicht mit dem der "kritischen Infrastrukturen" zu verwechseln, der im Bereich der Katastrophenvorsorge definiert ist (BMI 2009).

Die Arbeiten des Schwerpunktes *Hochwassergefahren* (SP-103) im Rahmen von Themenfeld 1 der Phase 1 des BMVI-Expertenetzwerks (2016–2019) verfolgten im Wesentlichen neben dem zuvor beschrieben übergeordneten Aspekt vier konkrete Arbeitsschwerpunkte:

1. Der Niederschlag ist eine der wichtigsten Eingangsgrößen für alle anschließenden hydrologischen Modellierungen. Dazu wurden die gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklungen insbesondere im Bereich Starkniederschlag mit verschiedenen Methoden analysiert.
2. Die zukünftige Schiffbarkeit der Wasserstraßen bei veränderten Überschreitungshäufigkeiten der höchsten schiffbaren Wasserstände ist zu quantifizieren. Dabei wurden die bewährten Methoden des Programms KLIWAS, das sich in den Jahren 2009–2013 mit der Thematik Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland befasst hat, weiterentwickelt bzw. aktualisiert.
3. Für die Verkehrsträger Straße und Schiene spielen die Überflutungen durch Hochwasser die entscheidende Rolle. Als Grundlage dient hierbei die von den Bundesländern akquirierte Hochwasser-

gefahrenkarten (HWGK), die mit dem Straßen- und Schienennetz verschnitten wurden, um Hinweise auf HW-gefährdete Bereiche der Verkehrsnetze zu erhalten (Nilson et al. 2017b). Mithilfe extremwertstatistischer Methoden wurden die den HWGK zugrundeliegenden Hochwasserstatistiken in Bezug auf den Istzustand und auf Zukunftsprojektionen bewertet. Ggf. wurden geänderte Wiederkehrintervalle ermittelt.

4. Durch die Gezeiten kommt es an der Nordseeküste bzw. in den Ästuaren zweimal täglich zu einem Hochwasser, welches jedoch auf die Infrastruktur und den Verkehr keinen Einfluss hat, weil die Deiche, Deckwerke und Schutzanlagen auf die permanent schwankenden Wasserstände ausgelegt sind. Kritisch wird es, wenn es durch Umweltfaktoren bzw. deren Überlagerung zu Abweichungen vom Normalzustand kommt, was wiederum Auswirkungen auf die Schifffahrt und den Betrieb von Anlagen hat. Wichtige Faktoren sind dabei Wind, Meeresspiegelanstieg und topografische Veränderungen, die näher für die Thematik Hochwasser Küste untersucht wurden.

Zwischen den einzelnen Schwerpunkten im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks bestand z. T. intensiver Austausch. Abbildung 2-1 zeigt eine schematische Darstellung der Verknüpfung bzw. Datenflüsse des Schwerpunkts *Hochwassergefahren* und den weiteren Schwerpunkten innerhalb des Themenfeldes 1. Für diesen Schwerpunkt essentielle Datengrundlagen wurden in den Schwerpunkten *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020), *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) und *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) erstellt. Hierzu zählen Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung für die Ermittlung zukünftiger Abflusswerte (*Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*), die Bereitstellung von klimatologischen Indizes zur Beschreibung der zukünftigen Änderung von hochwasserrelevanten Größen wie Niederschlag und Temperatur (*Szenarienbildung*) sowie Indizes mit denen sich die Entwässerungsproblematik und Sturmfluten an der Küste beschreiben lassen (*Fokusgebiete Küsten*).

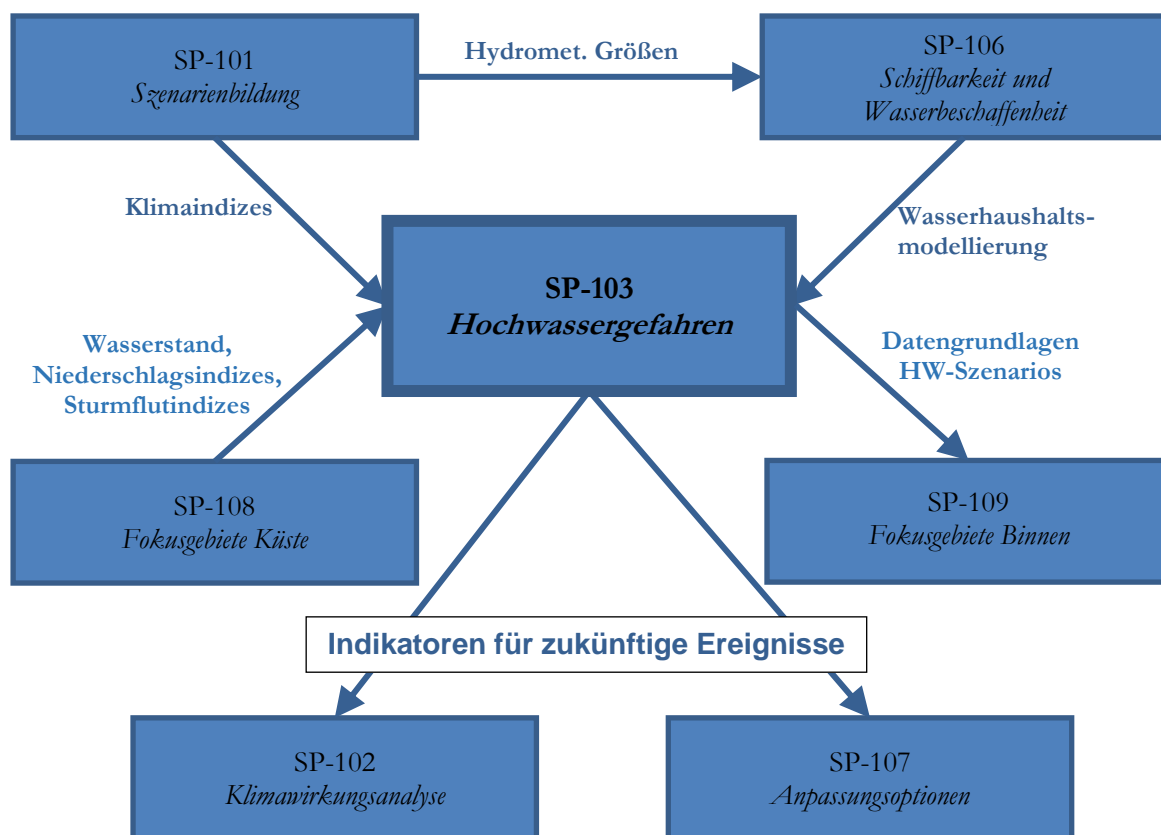


Abbildung 2-1: Verknüpfungsschema der Schwerpunkte in TF1 aus Sicht der *Hochwassergefahren* (Schwerpunkte zu denen kein direkter Austausch bestand, sind nicht in der Abbildung enthalten).

Datengrundlagen, Methoden und Ergebnisse, die in diesem Schwerpunkt erstellt und entwickelt wurden fanden ebenfalls Verwendung in weiteren Schwerpunkten wie dem *Fokusgebiete Binnen* (Hänsel et al. 2020c) mit Analysen zu Überschreitungsdauern von hohen Abflüssen zur Generierung von spezifischen Hochwasserszenarien am Mittelrhein. Des Weiteren wurden hochwasserspezifische Produkte an den integrierenden Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) übergeben sowie Datengrundlagen für den Schwerpunkt *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) geschaffen.

Der vorliegende Bericht zum Bereich "Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser" gliedert sich wie folgt: Grundlagen und Methoden für die oben vier genannten Hauptziele werden in (Kapitel 1) dargestellt. Dieses Kapitel wird in Abschnitt 3.5 mit einer Darstellung der betrachteten Wirkungszusammenhänge und der im Schwerpunkt vorgenommenen technischen Umsetzung (was der "Operationalisierung" im DAS-Kontext entspricht) abgerundet. Ergebnisse der Arbeitsschwerpunkte finden sich in Kapitel 1. Hierbei wird in Abschnitt 4.4 zusammenfassend darlegt, welche Ergebnisse des Schwerpunkts *Hochwassergefahren* für die *Klimawirkungsanalyse* bereitgestellt werden. Ein Fazit zum erzielten Sachstand und ein Ausblick auf die weiteren Arbeiten schließen den Bericht ab (Kapitel 1).

3 Grundlagen & Methoden

Grundsätzlich ist eine Unterscheidung notwendig zwischen großflächigen Überschwemmungsereignissen bedingt durch Flusshochwasser infolge großräumiger und länger andauernder Niederschlagsereignisse und/oder Schneeschmelzereignisse einerseits, und andererseits kurzzeitigen Starkniederschlägen, die zu lokalen Überschwemmungen führen. Deshalb ist es erforderlich verschiedene Daten und Methoden zur Beschreibung der Exposition gegenüber Hochwasser heranzuziehen. Sie sind als Grundlage und Werkzeuge für die Wirkungspfade für die einzelnen Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße gedacht. Aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten sind zusätzlich noch die Betrachtungen im Binnen- und Küstenbereich zu differenzieren. Im folgenden Abschnitt (3.1) werden zunächst gemeinsame im ExpN-TF1 getroffene Festlegungen zu den verwendeten Klimaszenarien, definierten Auswertezwischenräumen und Ergebnisbandbreiten für die Auswertung der Klimaprojektionsdaten erläutert. Anschließend werden notwendige Grundlagen und Methoden für die in diesem Bericht zusammengestellten Ergebnisse zu Starkniederschlag (Abschnitt 3.2), Flusshochwasser (Abschnitt 3.3) sowie Hochwasser an der Küste (Abschnitt 3.4) beschrieben. Die Umsetzung der Klimawirkungswirkungsanalyse für den Bereich Hochwasser wird in Abschnitt 3.5 dargestellt.

3.1 Gemeinsame Festlegungen im Expertennetzwerks-Themenfeld1

Die Anzeichen und Auswirkungen des Klimawandels treten regional, zeitlich und je nach betrachtetem Kennwert in unterschiedlicher Stärke und Ausprägung in Erscheinung. Im BMVI-Expertennetzwerk werden verschiedene meteorologische Größen (Temperatur, Niederschlag), hydrologische Größen (Abfluss, auch Wassertemperaturen) sowie ozeanografische Größen (Meeresspiegel, Tidekennwerte) betrachtet. Ausgewertet werden sowohl gemessene als auch simulierte Zeitreihen. Lange Messreihen erlauben es bereits heute, stattfindende Veränderungen zu identifizieren und zu bewerten. Um Aussagen über den zukünftigen Klimawandel in Deutschland zu erhalten, werden außerdem Projektionen aus Modellen betrachtet.

Den Projektionen liegen verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zugrunde. Diese beinhalten nicht nur die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen, sondern auch weitere Faktoren wie die Entwicklung der Aerosolkonzentration und die anthropogen verursachte Änderung der Landnutzung (Moss et al. 2008). Die hier verwendete Szenariengeneration der Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) stellt mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaantrieb im Jahr 2100 dar. Im BMVI-Expertennetzwerk stehen drei Pfade im Fokus, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. Nachfolgend werden diese Pfade als *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaantrieb von $2,6 \text{ W/m}^2$ in 2100), *Moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaantrieb von $4,5 \text{ W/m}^2$ in 2100) und *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5.; Klimaantrieb von $8,5 \text{ W/m}^2$ in 2100) bezeichnet. Bei Vergleichen zwischen den unterschiedlichen Szenarien sind die Klimaänderungssignale zumeist im *Klimaschutzszenario* deutlich weniger ausgeprägt als im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dies ist durch den geringeren Klimaantrieb zu erklären. Systematische Vergleiche zwischen den Szenarien und den mit ihnen verbundenen Bandbreiten an Klimaänderungssignalen werden durch die unterschiedliche Anzahl der pro Szenario vorhandenen Klimamodellsimulationen erschwert.

Für die Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden relevante Klimakenngrößen genutzt und beobachtete Änderungen dieser Klimakenngrößen der jeweils zu erwartenden Entwicklung gegenübergestellt. Die Bewertung der jüngsten Klimaentwicklung basiert dabei auf im BMVI-Expertennetzwerk neu- bzw. weiterentwickelten Referenzdatensätzen (siehe *Auswerterahmen*, Hänsel et al. (2020a)) für den Beobachtungszeitraum (1951–2015, sofern kein anderer Zeitraum genannt wird). Die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland wird mittels regionaler Klimaprojektionen von EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain) (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014) und ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) (Hübener et al. 2017) bewertet. Diese werden durch die internationale und nationale Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt und verfeinern die

aktuellen globalen Klimasimulationen (Taylor et al. 2012) räumlich. Die regionalen Klimaprojektionen wurden im BMVI-Expertenetzwerk bezüglich systematischer Modellfehler adjustiert und für die nachfolgende Verwendung in Klimawirkungsmodellen optimiert (siehe *Auswerterahmen*, Hänsel et al. (2020a) und Schlussbericht des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung*, Brien et al. (2020)). Im Küstenbereich werden aufgrund der besonderen Anforderungen gekoppelte Ozean-Atmosphären-Modelle zur Auswertung von Klimaänderungssignalen verwendet. Dabei spielt die physikalische Konsistenz von meteorologischen und ozeanischen Parametern eine wichtige Rolle.

Alle Daten und damit auch die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse 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 sowie der Erfassung und Verarbeitung von Beobachtungsdaten. Um den Unsicherheiten – insbesondere den mit den Zukunftssimulationen verbundenen – Ausdruck zu verleihen, werden – soweit möglich – Ergebnisbandbreiten angegeben, die jeweils dem 15. und dem 85. Perzentil des Simulationsensembles entsprechen und somit 70 % aller vorliegenden Modellergebnisse beinhalten. Des Weiteren wird der Median (50. Perzentil) des Klimamodellensembles in der Regel mit dargestellt. Als Auswerteziträume werden – falls nicht anders gekennzeichnet – der *Bezugszeitraum* (1971–2000), die *nabe Zukunft* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) herangezogen und miteinander verglichen.

Räumlich erfolgen die Auswertungen für Deutschland sowie angrenzende Regionen der Flusseinzugsgebiete (Hydrologische Rasterdatensätze (HYRAS) -Gebiet) und Teile der Nord- und Ostsee. Des Weiteren werden regional differenzierte Untersuchungen des Klimawandels basierend auf der in Abbildung 3-1 gezeigten Einteilung Deutschlands in sieben räumlich zusammenhängende Klimaregionen, die im TRY-Projekt (test reference years) definiert wurden (Krähenmann et al. 2018). Die Einteilung der Klimaregionen ist durch die unterschiedlichen klimatischen Gegebenheiten über Deutschland motiviert. Bei der Gebietseinteilung wurden neben der großen Nord-Süd Ausdehnung auch verschiedene Wetterscheiden wie der Schwarzwald oder der Thüringer Wald, sowie die Küstennähe in den nördlichen Landesteilen und die nach Süden hin komplexer werdende Topografie berücksichtigt.

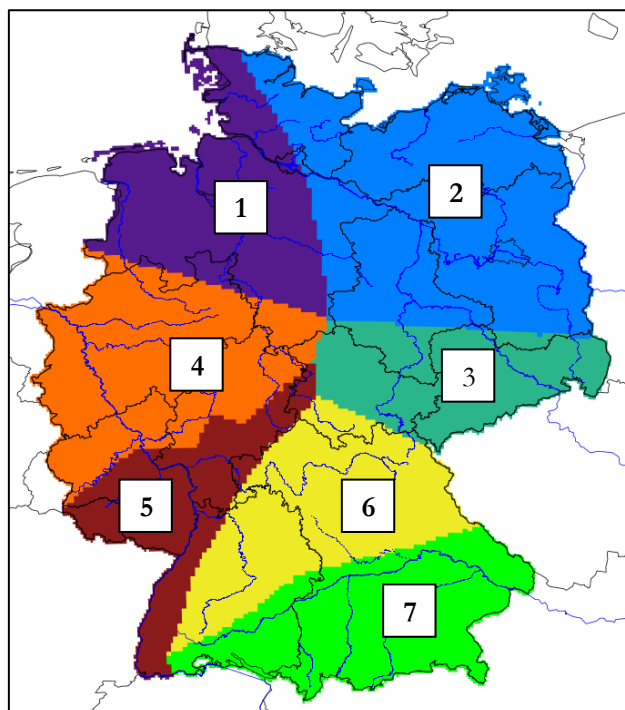


Abbildung 3-1: Die Einteilung von Deutschland in sieben Klimaregionen: 1) Nordseeküste, 2) Ostseeküste, 3) Ostdeutschland, 4) Westdeutschland, 5) Südwestdeutschland, 6) Süddeutschland und 7) Alpenvorland.

3.2 Starkniederschlag

Im Gegensatz zur Temperatur ist der Niederschlag zeitlich und räumlich deutlich variabler und die Veränderungen durch den Klimawandel können sich regional stark unterscheiden (Martel et al. 2018). So ist z. B. für Europa mit einer Zunahme (Abnahme) des mittleren jährlichen Niederschlags über Nordeuropa (Südeuropa) zu rechnen (Jacob et al. 2014). Global deuten Studien darauf hin, dass es in einem wärmeren Klima wahrscheinlich zu einer Veränderung und Intensivierung des Wasserkreislaufes kommt (Huntington 2006). Hiermit verbunden ist nicht zwingend eine Änderung der mittleren Niederschlagsverhältnisse, aber eine Zunahme in Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen, wie Starkniederschlägen sowie ausgedehnten Perioden mit trockener und feuchter Witterung mit entsprechend negativen sozioökonomischen Folgen (Heinrich und Gobiet 2012, Westra et al. 2013, Westra et al. 2014).

Starkregengefährdung kann sich sowohl durch ein häufigeres Auftreten bekannter Extremniederschläge als auch durch die höhere Intensität jedes dieser Ereignisse ausdrücken. Diese kurzfristigen extremen Niederschlagsereignisse erhöhen die Wahrscheinlichkeit u. a. für Sturzfluten und Aquaplaning. Aufgrund der Seltenheit der Ereignisse sind aber klimatologische Aussagen und auch die Ursache-Wirkungsanalyse im Kontext des Klimawandels äußerst schwierig. Statistisch robuster sind hingegen Aussagen zur Änderung von Niederschlägen mit längeren Andauern, da hier eine breitere Datenbasis vorliegt. Stellt sich hierbei eine Zunahme heraus, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für vermehrte Flusshochwässer.

Allgemein ist Starkniederschlag unabhängig eines zeitlichen Bezugs definiert als eine Niederschlagssumme die über dem normalen statistischen Mittel basierend auf einer ausreichend großen Stichprobe beruht. In der Praxis wird Starkniederschlag oft als selten auftretender Niederschlag mit zerstörerischer Wirkung (z. B. Überflutungen) bezeichnet¹. Es gibt feste Definitionen hierfür, die aber abhängig von der jeweiligen Fragestellung sind. Im Bereich Wettervorhersage hat zum Beispiel der Deutsche Wetterdienst (DWD) die Warnkriterien für Starkniederschlag auf Niederschlag von 25 mm in einer Stunde und 35 mm in 6 Stunden festgelegt². In der Klimaforschung wird hingegen meist der Tagesniederschlag betrachtet, da mit den aktuellen Möglichkeiten der Klimamodellierung genauere Informationen mit höherer zeitlicher Auflösung meist nicht vorhanden sind. Hierbei werden dann wieder Schwellenwerte definiert, bei deren Überschreitung man von Starkniederschlag spricht. Für die Festlegung dieser Schwellenwerte gibt es unterschiedliche Ansätze. Einige Wissenschaftler definieren einen festen Schwellenwert (z. B. 30 mm, 50,8 mm oder 101,6 mm pro Tag), welcher mehr oder weniger willkürlich festgelegt wird (z. B. Groisman et al. (1999)). Neben solchen absoluten Schwellenwerten gibt es auch die Möglichkeit relative Schwellenwerte zu verwenden um Starkniederschlag abzugrenzen. So werden beispielsweise die größten 5 % der Tagesniederschläge einer Periode (z. B. 30 Jahre) zur Identifikation von Starkniederschlag herangezogen. Eine ähnliche Definition ist die der Wiederkehrrate. Hierbei richtet sich der Schwellenwert nach einer Tagesniederschlagsmenge, welche nur in bestimmten Abständen verzeichnet wird, z. B. einmal in 5 Jahren. Alle vorher genannten Definitionen basieren nur auf den gemessenen Daten. Es gibt aber auch statistische Ansätze, bei der zuerst die statistische Verteilungsfunktion des Niederschlags bestimmt wird und dann die größten 5 % dieser Verteilungsfunktion als Starkniederschlag definiert werden.

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks werden derzeit zwei unterschiedliche Ansätze zur Identifizierung von Starkniederschlägen und deren zukünftige Änderungen herangezogen:

- Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes) (Abschnitt 3.2.1)
- Kerndichteschätzung zur Bestimmung der Änderung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten eines (relativen) Schwellenwertes (Abschnitt 3.2.2)

¹ <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572>

² DWD: Warnkriterien für Unwetterwarnungen des DWD: http://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html

Daneben spielt bei der Planung von Bauwerken die Starkniederschlagsauswertung KOSTRA-DWD (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung – Auswertung DWD) eine wichtige Rolle (Abschnitt 3.2.3). In der derzeit gültigen Fassung KOSTRA-DWD-2010R (Junghänel et al. 2017) werden diese Daten neben der Planung von wasserwirtschaftlich Einrichtungen auch für die Dimensionierung von Entwässerungssystemen u. a. für Straßen und Schienen (siehe auch Abschnitt 4.1.3) häufig herangezogen. Mehr Informationen in Bezug auf meteorologische Grundlagen und Methoden finden sich im Schlussbericht *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) und im *Auswerterahmen* (Hänsel et al. 2020a).

3.2.1 Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes)

Sowohl die gegitterten (gerasterten) Stationsdaten (HYRAS-Daten, (Rauthe et al. 2013, Razafimaharo et al. 2020)) als auch die Klimasimulationsdaten haben eine zeitliche Auflösung auf Tagesbasis (Brienen et al. (2020) und Referenzen darin). Um die derzeitige und zukünftige Exposition abzuschätzen sind Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes) ein gebräuchlicher und praktikabler Ansatz. Ausgewertet werden Jahreswerte, hydrologische Halbjahre (November-April; Mai-Oktober) sowie meteorologische Jahreszeiten. Bei Bedarf werden auch Monatswerte untersucht. Für den Bereich Hochwasser wurden dabei, die in Tabelle 3-1 aufgeführten Kennwerte näher untersucht. Für eine vollständige Liste der Kennwerte siehe auch gemeinsamer *Auswerterahmen* (Hänsel et al. 2020a).

Tabelle 3-1: Kenntage für Niederschlagsgrößen, die in diesem Schwerpunkt betrachtet wurden.

Bezeichnung	Definition	Einheit
Starkniederschlagstage	Anzahl an Tagen mit ≥ 20 mm Niederschlag	[Tage]
Niederschlagsmenge an Starkniederschlagstagen	Mittlerer Niederschlag an Tagen mit ≥ 20 mm Niederschlag	[mm]
Mittlerer Niederschlag	Niederschlagssumme die im Durchschnitt in einem definierten Zeitabschnitt (z. B. Jahr) fällt	[mm]
Maximale 1- Tagesniederschlagssumme	Höchste Niederschlagssumme, die an einem Tag in einem zuvor definierten Zeitraum gefallen ist (z. B. 30 Jahre)	[mm]
Maximale 5- Tagesniederschlagssumme	Höchste Niederschlagssumme, die an fünf aufeinander folgenden Tagen in einem zuvor definierten Zeitraum gefallen ist (z. B. 30 Jahre)	[mm]
Anteil der Niederschlagssumme von sehr feuchten Tagen	Anteil der Niederschlagssumme am Gesamtniederschlag von Tagen mit Niederschlägen oberhalb des 95. Perzentils (abgeleitet aus dem <i>Bezugszeitraum</i>)	[%]
Anteil der Niederschlagssumme von extrem feuchten Tagen	Anteil der Niederschlagssumme am Gesamtniederschlag von Tagen mit Niederschlägen oberhalb des 99. Perzentils (abgeleitet aus dem <i>Bezugszeitraum</i>)	[%]
Dauerregen	Ereignisse mit einer Niederschlagssumme ≥ 40 mm in 72 Stunden	[Anzahl Ereignisse]
Maximale Niederschlagsperiode	Längste Periode mit > 1 mm Niederschlägen in einem zuvor definierten Zeitraum gefallen ist (z. B. 30 Jahre)	[Dauer Tage]
Vorfeuchte	API (Antecedent Precipitation Index, zeitlich gewichtete Niederschlagsmenge von x Tagen) nach Schröter et al. (2015) bzw. Köhler und Linsley (1951)	[mm]

Es ist des Weiteren möglich auch kombinierte Indizes zu beachten, wenn dies durch die Anwender als sinnvoll erachtet wird. Beispielsweise den kombinierten Index nach Schröter et al. (2015) aus dem dreitägigen Ereignisniederschlag und der 30-Tage Vorfeuchte. Beide Parameter lassen sich direkt aus dem gefallen Niederschlag ableiten und führen im Rahmen von Ereignisanalysen im Bereich *Fokusgebiete Küsten* zu guten Ergebnissen (Ganske und Schade 2017, Schade 2017). Zusätzlich kann an der Küste noch der Windstau/Wasserstand mitberücksichtigt werden, da bei fehlender Möglichkeit der Entwässerung in die See auch ein geregelter Abfluss aus den von Überflutung bedrohten Gebieten problematisch werden kann.

3.2.2 Kerndichteschätzung

Generell lassen sich extremwertstatische Untersuchungen über parametrische und nicht-parametrische Verfahren durchführen. Parametrische Verfahren setzen eine zuvor definierte theoretische Verteilungsfunktion voraus, deren Verteilungsparameter über die gegebene Stichprobe abgeschätzt werden können. Betrachtet man nur die extremsten Werte einer Stichprobe, so lässt sich auch auf unterschiedliche Extremwertverteilungen zurückgreifen, deren Randbereiche deutlich besser der Häufigkeitsverteilung der extremsten Werte einer Stichprobe entsprechen. Da extreme Ereignisse mit zunehmender Extremität per se immer seltener auftreten, werden für aussagekräftige Abschätzungen einer extremwertstatistischen Auswertung längere Zeitreihen als statistisch robuste Datengrundlage benötigt. Des Weiteren ist bei der Anpassung der Verteilungsparameter auf statistische Ausreißer zu achten, da diese einen erheblichen Einfluss auf das spätere Ergebnis haben können. Nicht-parametrische Verfahren haben im Gegensatz dazu den Vorteil, dass sie vollständig auf eine vorgegebene theoretische Verteilungsfunktion verzichten. Ein nicht-parametrisches Verfahren generiert seine Modellstruktur empirisch aus der vorliegenden Stichprobe. Zusätzlich ist diese Methode unempfindlich gegenüber statistischen Ausreißern.

Zur Abschätzung des Verhaltens von Extremen unterschiedlicher Klimaparameter in Klimaprojektionsdaten wurde mit der sogenannten Kerndichteschätzung ein nicht-parametrisches Schätzverfahren verwendet, das beim DWD bereits im Projekt „Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderungen des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten“ angewendet wurde (Dalelane und Deutschländer 2013, Deutschländer und Dalelane 2012). Häufig wird die Kerndichteschätzung zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsdichten verwendet, wenn beispielsweise ein Histogramm nicht ausreichend exakt die zugrundeliegende Verteilung einer Stichprobe bestimmt und eine stetige Dichtefunktion benötigt wird. Für die im BMVI-Expertennetzwerk durchgeführten Arbeiten wurde die Kerndichteschätzung, wie bereits in Deutschländer und Dalelane (2012), in der Form eines Glättungsverfahrens für Datenzeitreihen verwendet.

Die mit der Kerndichteschätzung untersuchten Zeitreihen basieren dabei auf den Klimaprojektionsdaten von EURO-CORDEX und ReKliEs-De. Über zuvor definierten Schwellenwerte werden jedoch neue Zeitreihen generiert, für die nur noch Tage berücksichtigt werden an denen der Schwellenwert erreicht oder überschritten wurde. Zu beachten ist, dass zur Bestimmung der Schwellenwerte nur der historische Klimalauf (*Bezugszeitraum* abhängig vom Klimamodell 1951–2005 bzw. 1971–2005) der jeweiligen Klimasimulation herangezogen wird und keine Informationen der zukünftigen Klimaprojektion mit einbezogen werden.

Abbildung 3-2 zeigen diese Vorgehensweise für einen Gitterpunkt im Rhein-Main-Gebiet beispielhaft für die Niederschlagszeitreihe der regionalen Klimamodellsimulation des RACMO22E (Regional Atmospheric Climate Model – vom niederländischen und dem dänischen Wetterdienst entwickeltes regionales Klimamodell, angetrieben durch Globalmodellldaten des HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model - Earth System)). Während in Abbildung 3-2a noch die vollständige Niederschlagszeitreihe zu sehen ist, zeigt Abbildung 3-2b für dieselbe Zeitreihe die Daten nach Kappung (rote Linie) durch den zuvor definierten Schwellenwert. In der Niederschlagszeitreihe ergeben sich nun größere Lücken, die durch Tage verursacht werden, deren Niederschlagssummen unter dem Schwellenwert liegen. In der Extremwertstatistik wird diese Vorgehensweise auch als Peaks-over-threshold Ansatz bezeichnet. Je höher der Schwellenwert ist, desto größer werden die Lücken zwischen den einzelnen Ereignissen.

Damit nähert man sich der statistischen Unabhängigkeit der selektierten extremen Ereignisse an, die als Bedingung für das zugrundeliegende mathematische Modell des Poisson-Punktprozesses vorliegen sollte. Hierbei handelt es sich um einen stochastischen Zählprozess, dessen Intensität λ durch die Kerndichteschätzung über die zeitlich veränderliche Wahrscheinlichkeit P der Überschreitung eines Schwellenwertes u zu jedem Zeitpunkt t aus dem entsprechenden Wert der Zeitreihe x_t , geschätzt wird.

$$\lambda_u(t) = P(x_t - u \geq 0)$$

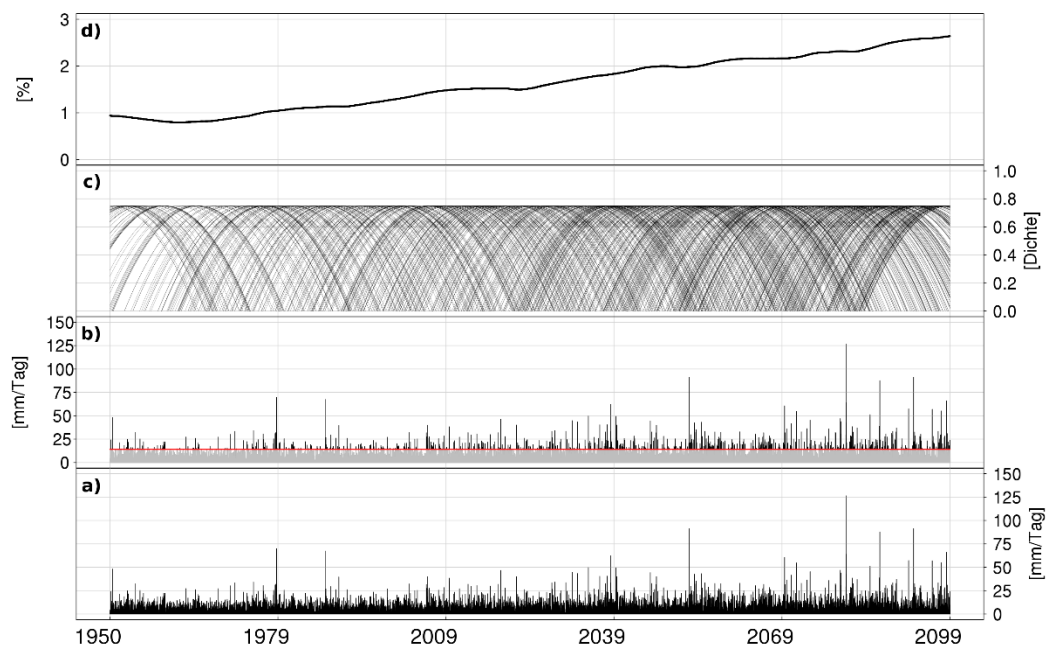


Abbildung 3-2: Prozess der Kerndichteschätzung am Beispiel des Regionalmodells KNMI-RACMO22E (angetrieben über das ESM: MOHC-HadGEM2-ES) mit dem *Weiter-wie-bisber-Szenario* für einen Gitterpunkt im Rhein-Main-Gebiet. a) Tägliche Niederschlagssummen, b) tägliche Niederschlagssummen ab dem 99 % Quantil (schwarz), c) die Dichte der einzelnen Kernfunktionen für Tage an denen der Schwellenwert überschritten wurde und d) die tägliche Auftretswahrscheinlichkeit in Prozent von Schwellenwertüberschreitungen des 99 % Quantils aus aufsummierten Kernfunktionen.

Insgesamt wurden für die durchgeführten Auswertungen drei Schwellenwerte definiert, die in Tabelle 3-2 (linke Spalte) aufgelistet sind. Es handelt sich dabei um relative Schwellenwerte, die über Quantile der Verteilung des Datenkollektivs der Zeitreihe bestimmt wurden. Die Festlegung des Schwellenwertes über eine relative statt einer absoluten Kennzahl zieht einige Konsequenzen nach sich. So kann die absolute Größe des relativen Schwellenwertes je nach Region sehr stark variieren. Verwendet man dagegen einen absoluten Schwellenwert, so kann dies dazu führen, dass in einigen Regionen sehr viele Ereignisse als extrem klassifiziert werden, die an diesem Standort aber eher die Regel als die Ausnahme sind und somit in der regionalen Klimatologie kein seltenes, extremes Ereignis darstellen. In anderen Regionen kann die Verwendung desselben Schwellenwertes dazu führen, dass nur sehr wenige Ereignisse als extrem eingestuft werden und man eine zu kleine Stichprobe für eine robuste extremwertstatistische Auswertung erhält. Aus diesem Grund ist bei der Verwendung eines absoluten Schwellenwertes eine Stichprobengröße, die für alle Regionen statistisch sinnvoll ist, nicht praktikabel.

Tabelle 3-2: Quantile, Auftrittshäufigkeit pro Jahr, Wiederkehrperiode der Schwellenwertüberschreitung sowie die zugehörige Bandweite der Kerndichteschätzung.

Schwellenwert	Auftrittshäufigkeit pro Jahr	Wiederkehrperiode	Bandweite Kerndichteschätzung
90 % Quantil	36,5 Tage	10 Tage	3500 Tage
99 % Quantil	3,65 Tage	100 Tage	5500 Tage
99,9 % Quantil	0,365 Tage	1000 Tage	8500 Tage

Die beiden mittleren Spalten in Tabelle 3-2 zeigen wie häufig die definierten Extremereignisse pro Jahr auftreten bzw. wie sich die zugehörige Wiederkehrperiode darstellt, wenn alle Tage – auch ohne Niederschlag – berücksichtigt werden. Die extremsten Ereignisse, die mittels der Kerndichteschätzung bisher untersucht wurden, weisen tägliche Niederschlagssummen auf, die gleich oder größer dem 99 % Quantil der Verteilung des Datenkollektivs sind. Diese Ereignisse treten im Mittel an 3,65 Tagen pro Jahr auf bzw. besitzen eine Wiederkehrperiode von 100 Tagen. Extremere Ereignisse, wie sie beispielsweise den Unwetterwarnkriterien des DWD entsprechen, wurden bisher nicht mittels der Kerndichteschätzung untersucht.

Nach Bestimmung des Schwellenwerts und Kappung der Niederschlagszeitreihe erfolgt die Kerndichteschätzung über

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_i^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_i^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Hierbei wird für eine gegebene Stichprobe n , die sich aus dem historischen Klimalauf und dem Projektionslauf der Klimamodellsimulation zusammensetzt, auf jede Schwellenwertüberschreitung x die Kernfunktion K angewendet. Die Bandweite h gibt dabei die Stärke der Glättung über die Anzahl der mit zu berücksichtigenden Nachbardatenpunkte vor (siehe Tabelle 3-2 rechte Spalte). Nach Anwendung der Kernfunktion auf eine Schwellenwertüberschreitung erhält man eine zeitlich gewichtete Funktion für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Schwellenwertüberschreitung (Abbildung 3-2c). Die einzelnen Kerne werden anschließend aufsummiert und ergeben die Wahrscheinlichkeit für eine Schwellenwertüberschreitung für den gesamten betrachteten Zeitraum (Abbildung 3-2d). Als Kernfunktion wird der sogenannte Epanechnikov-Kern verwendet:

$$K(x) = \frac{3}{4}(1 - x^2) \forall \text{ mit } |x| \leq 1$$

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kernfunktion selbst eine eher untergeordnete Bedeutung für das spätere Ergebnis hat (Deutschländer und Dalelane 2012). Eine andere Kernfunktion, die zu ähnlichen Ergebnissen führen würde, wäre beispielsweise der Gaußkern.

3.2.3 Grundlagen für Dimensionierung von Bauwerken (KOSTRA-DWD)

Angaben über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagshöhen werden u. a. für die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen – angefangen von Stadtentwässerungssystemen, Entwässerungen an Straßen und Schienen bis hin zu Talsperren – benötigt. Daher wurden zum Starkniederschlagsgeschehen in Deutschland umfangreiche, zwischen Hydrometeorologen und Wasserwirtschaftlern koordinierte Starkniederschlagsregionalisierungen (Analysestarts in den Jahren 1987, 1990, 2000 und 2010) vorgenommen. Da mit diesen statistischen Untersuchungen sowohl Ausweitungen in der Datenbasis als auch Verbesserungen entsprechend dem jüngsten Stand der Wissenschaft in den Berechnungs- und Regionalisierungsverfahren verbunden waren, ersetzen die aus den vier Projekten resultierenden KOSTRA-DWD-Werte die Mitte des vorigen Jahrhunderts von Reinhold publizierte "Regenspenden in Deutschland" (Reinhold 1940).

Den Normen DIN 4049-1:1992-12 (Hydrologie; Grundbegriffe) und DIN 4049-3:1994-10 (Hydrologie; Begriffe zur quantitativen Hydrologie) folgend, wird bei KOSTRA-DWD unter dem Begriff Starkniederschlag der Niederschlag (advektiv als Dauerniederschlag oder konvektiv als Schauer) verstanden, der im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe Niederschlagsintensität hat und daher selten auftritt. Es geht vorrangig um Starkniederschlag als Bemessungsniederschlag, das heißt um die Niederschlagshöhe eines bestimmten Niederschlagsereignisses, das der wasserwirtschaftlichen und baulichen Planung zugrunde gelegt wird. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Definitionen sowohl für die Dauer als auch für die Häufigkeit oder Seltenheit von Niederschlag. Dabei gilt, dass die Dauerstufe D (angegeben in Minuten oder Stunden) ein ausgewählter Zeitabschnitt mit Niederschlag (einschließlich Unterbrechungen) ist, unabhängig von Beginn und Ende des natürlichen Niederschlagsereignisses. Um auszudrücken, wie selten ein bestimmter Starkniederschlag auftritt, sind verschiedene Begriffe gebräuchlich, z. B. Quantil, Überschreitungshäufigkeit

sowie Jährlichkeit, Wiederkehrzeit, Wiederkehrintervall. Die Jährlichkeit (das Reziproke der Überschreitungshäufigkeit) bzw. das Wiederkehrintervall T (angegeben in Jahren) ist die mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet. Ein Quantil definiert einen bestimmten Teil einer Datenmenge und legt fest, wie viele Werte einer Verteilung über (oder unter) einer bestimmten Grenze liegen.

Die derzeitige Version KOSTRA-DWD-2010R (Gegenwart) sind die für Deutschland geltenden amtlichen Bemessungsniederschläge und beruhen auf der Datengrundlage 1951–2010 (Junghänel et al. 2017). Dabei werden die Dauerstufen: 5 Min – 72 h und Wiederkehrzeiten: 1 a – 100 a bedient. Sie basieren auf direkter Auswertung von zeitlich hochaufgelösten Stationszeitreihen für Dauerstufen <12 h und auf den regionalisierten Niederschlägen HYRAS-PRE (Vorläufer von HYRAS-PRE für Deutschland) für Dauerstufen ≥ 24 h.

Aufgrund der Notwendigkeit hochaufgelöster Daten ist es derzeit nicht möglich im Sinne von KOSTRA eine Aussage zur Veränderung in der Zukunft zu machen, da die Klimamodelle mit Tageswerten eine solche Information in der Regel nicht liefern können. Deshalb ist für die im Expertennetzwerk angestrebte Wirkungsanalyse nur eine Aussage zum Istzustand möglich. Für Dauerstufen ≥ 24 h sind über definierte Indizes (siehe Abschnitt 3.2.1) auch Aussagen für die Zukunft möglich unter der Voraussetzung, dass die dafür notwendige Bias-Korrektur sich auch für tägliche Daten als robust erweist.

3.3 Flusshochwasser

Wie zu Beginn des Kapitels 1 festgestellt, haben Hochwasserereignisse an großen Flüssen eine andere Charakteristik als lokale Überschwemmungen infolge von Starkregen. Daraus ergeben sich andere Anforderungen an Datengrundlagen sowie andere Ansätze der modellhaften Abbildung der dominierenden hydrologischen Prozesse und der Auswertung beobachteter und simulierter hydrologischer Information für das Hochwasserrisikomanagement.

Während lokale Hochwasserereignisse v. a. durch die Intensität und Dauer (Stunden) eines lokalen Starkregenereignisses sowie durch die örtlichen Geländeeigenschaften geprägt werden, ändert sich im Übergang zu größeren Raumskalen die Gewichtung der dominierenden hydrologischen Prozesseigenschaften. Neben den landschaftlich vorherrschenden Abflussbildungseigenschaften und dem von der Jahreszeit und der (mehrwöchigen) hydrologischen Vorgeschichte abhängigen Einzugsgebietszustand (Vorfeuchte, Schneedecke) bestimmen die raumzeitliche Verteilung großräumiger und anhaltender (mehrtägiger) Niederschlagsereignisse sowie der Ablauf von Hochwasserwellen im Gewässernetz die Ausprägung bedeutender Hochwasserereignisse in der Flussgebietskala. Dabei spielt besonders auch die Überlagerung von Hochwasserwellen aus Teileinzugsgebieten eine wesentliche Rolle.

Auch das Risiko für die Verkehrsinfrastruktur unterscheidet sich bei den angesprochenen Hochwassertypen deutlich. Während lokale Hochwasserereignisse infolge von Starkregen eine hohe Intensität, aber eine kurze Dauer haben, können sich bei Flusshochwasser Unterbrechungen von Verkehrswegen mit einer mehrtägigen Dauer ergeben. Dies gilt hinsichtlich der direkten Hochwassereinwirkung insbesondere für die Wasserstraße, jedoch auch für Schiene und Straße. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass sich Hochwasserschäden nicht nur abhängig von erreichten Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten, sondern auch von der Dauer der Hochwassereinwirkung ergeben können (z. B. Deichversagen mit entsprechenden Hochwasserschäden im Deichhinterland).

Infolge von hochwasserbedingten Schäden an der Verkehrsinfrastruktur können sich schließlich recht dauerhafte Einschränkungen der Verkehrsflüsse ergeben. Diese enden mit dem Abklingen einer Hochwasserphase nicht abrupt, sondern bleiben bestehen bis betroffene Bauwerke instandgesetzt werden. Bei Hochwasserereignissen großer Flüsse haben solche Schäden häufig nicht nur lokale, sondern auch überregionale und verkehrsträgerübergreifende Auswirkungen, insbesondere, wenn sie an neuralgischen Stellen bzw. Leitlinien der Verkehrsnetze oder infolge großräumiger Überflutungen auftreten. Diese Erörterung zeigt, dass neben den Scheitelabflüssen und korrespondierenden Wasserständen von Hochwasserereignissen, auf die

sich auch die HWGK der Bundesländer beziehen, auch die Hochwasserdauer einen wesentlichen Aspekt bei der Beurteilung von verkehrsbezogenen Hochwasserrisiken infolge von Flusshochwasser darstellt, insbesondere für die Wasserstraße, aber auch für Schiene und Straße.

Ziel des vorliegenden Beitrags zum Flusshochwasser ist eine großräumige Synopse zur Thematik Hochwasser, weitere Aspekte des Hochwasserrisikos infolge von Flusshochwasser werden mit lokalerem Bezug (Bereich Mittelrhein) im Schlussbericht des ExpN-TF1 *Fokusgebiete Binnen* betrachtet (Hänsel et al. 2020c). Die Aussagen dieses Beitrags beziehen sich dabei einerseits auf die gegenwärtige Hochwassersituation, wie sie aus langjährig beobachteten Abflussreihen abgeleitet werden kann. Andererseits werden Zukunftsprojektionen untersucht, die aus Simulationen (Ensembles von Klimamodellen, Wasserhaushaltsmodell) berechnet werden. Damit kann ein Vergleich zwischen der gegenwärtigen Hochwassersituation einerseits und der infolge des Klimawandels zukünftig zu erwartenden Situation andererseits vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang erfolgen Analysen zur Entwicklung verkehrsbezogener Hochwasserexposition im vorliegenden Bericht vor allem unter zwei Aspekten: Zum einen in Bezug auf die Überschreitungshäufigkeiten bzw. -dauern des HSW an den Bundeswasserstraße (Abschnitt 3.5.2 und 4.2.2) und zum anderen in Bezug auf extreme Hochwässer und damit auf die aktuell vorliegenden Hochwasserstatistiken und HWGK (Abschnitt 3.5.3 und 4.2.3).

3.3.1 Erhebung relevanter Information

Um die Exposition gegenüber Hochwasser für Verkehrsströme und -infrastrukturen untersuchen und bewerten zu können waren verkehrsbezogene und hydrologische Informationen zu erheben und zusammenzuführen. Für die Bundeswasserstraßen wird bei Überschreiten des Höchsten Schifffahrtswasserstands (HSW bzw. HSW-II) die Schifffahrt eingestellt (vgl. Abschnitt 3.5.2.1). Daher wurden die aus Schifffahrtspolizeiverordnungen, Binnenschifffahrtsverordnungen und dem elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes angegebenen Werte des HSW sowie die zugehörigen Richtpegel und Gewässerstrecken zusammengestellt. Für die landgebundenen Verkehrsträger Straße und Schiene stellt sich hingegen die Schwierigkeit, dass flächendeckende Informationen dazu, welcher Streckenabschnitt ab welchem Pegelstand hochwasserbedingt gesperrt wird, bisher nicht in strukturierter und damit nutzbarer Form vorliegen. Dazu wären entweder sehr hochauflösende Geländeinformationen oder eine Auswertung aller Katastropheneinsatzpläne in Deutschland erforderlich. Beides war dem Expertennetzwerk nicht zugänglich bzw. aus Ressourcengründen zusätzlich zur eigentlichen Forschungsagenda nicht großräumig zu erstellen.

Um den Anteil von Streckenabschnitten im Überflutungsbereich von Flusshochwassern bestimmen zu können und damit zumindest indirekt Hinweise auf potenzielle Belastungen der Verkehrsinfrastruktur zu erhalten, wurde auf die HWGK der Bundesländer zurückgegriffen. Diese stellen Überflutungsflächen bei Flusshochwasser für abgestufte Auftrittshäufigkeiten dar, wobei häufige, mittlere und seltene bzw. extreme Hochwasserszenarien unterschieden werden (siehe Abschnitt 3.5.3 und 4.2.3). Abgesehen von dem Vorzug, dass diese Karten bundesweit vorliegen, wurde im BMVI-Expertennetzwerk bewusst auf diese Grundlage gesetzt, um eine mit anderen wichtigen Akteuren (u. a. den Bundesländern) kohärente Perspektive auf die Thematik "Hochwasser" einzunehmen. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) hat daher in Abstimmung mit den zuständigen Landesbehörden die Freigabe der im Portal WasserBLICK³ zur Meldung an die EU dokumentierten HWGK erwirkt und die zusammengeführten Karten zur Nutzung im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks GIS-basiert bereitgestellt (Nilson et al. 2017b). Die HWGK können mit den Karten der Verkehrsnetze der Straße und Schiene verschnitten werden, um betroffene Streckenabschnitte des Netzes bundesweit zu identifizieren und zu bewerten (siehe Abschnitt 3.5.3 und 4.2.3). Dabei ist anzumerken, dass weder für die Straße noch für die Schiene die genaue Höhe des Streckenverlaufs (z. B. Damm-lage ja/nein) vorliegt.

³ <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>

Zur fachgerechten und länderübergreifenden Interpretation der HWGK wurden zudem aktuell gültige Hochwasserstatistiken von Pegeln an interessierenden Gewässerabschnitten des Rheins, der Donau, der Elbe, der Weser, der Ems und jeweils wichtiger Nebenflüsse dieser Hauptströme erhoben (Quellen: u. a. Brahmer et al. (2015), Gewässerkundlicher Dienst (GKD) Bayern (LfU 2019)⁴, LUBW (2019)⁵, Hatz et al. (2018)). Dabei handelt es sich um Kenngrößen der Hochwasserscheitel mit statistischen Wiederkehrintervallen zwischen zwei und bis zu tausend Jahren). Um diese Abflussstatistiken anhand eigener Analysen nachvollziehen und bewerten zu können, wurden zudem tägliche Abflusszeitreihen der o. g. Pegel aus Datenbanken erhoben, z. B. aus dem Informationssystem WISKI der BfG (Datenbanksystem für Gewässerdaten "Wasserwirtschaftliches Informationssystem Kister⁶") oder aus online verfügbaren Archiven der Bundesländer (z. B. GKD Bayern (LfU 2019)⁴). Neben systematischen Beobachtungsreihen wurden z. T. auch dokumentierte historische Extremhochwasserscheitel hinzugezogen (Quellen: GKD Bayern (LfU 2019)⁴, Informationsplattform Undine der BfG⁶, historische Jahrbücher). Weitere Angaben zu den Kriterien für die Erhebung von Abflussreihen finden sich im Abschnitt 3.3.2. Für die Richtpegel des HSW wurden zudem aktuelle Abflusskurven (Wasserstand-Abfluss-Beziehungen) zusammengestellt, falls diese vorlagen. Damit können die Analysen zur Überschreitungshäufigkeit des aktuell gültigen HSW auf den entsprechenden Abflussschwellenwert HSQ sowie auf langjährige Abflussreihen bezogen werden, auch wenn sich die jeweilige Gewässermorphologie über die Zeit verändert hat.

Da die Aussagen zur Hochwasserexposition sich nicht nur auf den Istzustand bzw. die beobachtete Vergangenheit beziehen sollen, sondern im Vergleich auch auf Zukunftsprojektionen, wird eine Wasserhaushaltssimulation mit dem Modell LARSIM-ME benötigt (siehe Anhang 8.2). Die für das vorliegende Modell benötigten Daten und Informationen (verteilte hydrologisch relevante Gebietseigenschaften, wasserwirtschaftliche Maßnahmen) sind in Wolf-Schumann et al. (2013) dokumentiert. Als Modelleingang wurden bei Referenzsimulationen für die beobachtete Vergangenheit bei den meisten meteorologischen Größen (Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung) die täglich aufgelösten HYRAS-Rasterdatensätze (Rauthe et al. 2013, Razafimaharo et al. 2020) verwendet, bei den Größen Luftdruck und Windgeschwindigkeit hingegen aus Reanalysedaten (COSMO-REA6) abgeleitete klimatologische Werte (Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung, Datenaufbereitung: BfG). Bei Wasserhaushaltssimulationen auf Grundlage von mit Klimamodellen simulierten meteorologischen Größen (für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 und für verschiedene Zukunftszeiträume, Datenaufbereitung DWD) wurden diese anhand der vorgenannten meteorologischen Datensätze bias-adjustiert (Hänsel et al. 2020a).

3.3.2 Methoden zur hydrologischen Analyse von Flusshochwasser

Hydrologische Untersuchungen zu Gefährdungen infolge von Flusshochwasser erfordern aufeinander abgestimmte Arbeitsschritte mit der Anwendung verschiedener hydrologischer Verfahren und Modelle. Diese werden hierbei zunächst einzeln angesprochen. In den Abschnitten 3.5.2.3 und 3.5.3.3 werden Konzepte für ihren gemeinsamen Einsatz dargestellt, die einerseits zur Ableitung der Hinweiskarten bzw. Längsschnitte bzgl. der HSW-Überschreitungshäufigkeit in Gegenwart und Zukunft dienen, sowie andererseits zur Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit der den HWGK zugrundeliegenden Hochwasserscheitelabflüsse in Gegenwart und Zukunft verwendet werden.

Kriterien bei der Erhebung von beobachteten Abflusszeitreihen von Pegeln:

Ein grundlegender erster Schritt bei der Entwicklung zuverlässiger Hochwasserstatistiken ist die Erhebung von Abflusszeitreihen geeigneter Pegel unter Beachtung verschiedener Kriterien. Die Pegel sollten dabei unterschiedliche Hochwassercharakteristiken von Flussabschnitten hinreichend differenziert repräsentieren. In der hier interessierenden hydrologischen Skala größerer Flusseinzugsgebiete sind Reihen täglicher

⁴ <https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/abfluss>

⁵ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/pages/selector/index.xhtml>

⁶ Undine.bafg.de

Abflusswerte geeignet, da sie über lange Zeiträume vorliegen und an den Hauptströmen (z. B. Rhein, Donau, Elbe) die Abflussdynamik der Hochwasserereignisse hinreichend genau erfassen. Zudem liegt auch den in der vorliegenden Untersuchung simulierten Abflussreihen (s. u.) ein täglicher Zeitschritt zugrunde. Je kleiner das Flussgebiet ist, desto größer werden jedoch i. d. R. die Unterschiede zwischen Moment- und Tagesmittelwerten der Hochwasserscheitel, was bei der Interpretation von Hochwasserstatistiken für Teileinzugsgebiete mit bis zu einigen tausend km² Größe (z. B. für den Pegel Heitzenhofen am Naab mit ca. 5.500 km²) zu berücksichtigen ist. Des Weiteren sollten die beobachteten Abflussreihen einen hinreichend langen Zeitraum (mindestens 30 Jahre, besser mehr) umfassen und dabei möglichst repräsentativ für den Istzustand der Hochwassersituation sein. Für flussgebietsbezogen vergleichbare Hochwasserstatistiken sind zudem einheitliche Reihenlängen anzustreben. Bei der Wahl einer Reihenlänge besonders zu beachten ist eine hinreichende Anzahl seltener Extremereignisse, um durch Einzelereignisse verzerrte und im Extrembereich unsichere bzw. nichtzutreffende Statistiken zu vermeiden. Ggf. sind auch dokumentierte historische Extremereignisse vor Beginn der systematischen Beobachtungsreihe hinzuzuziehen (s. u.).

Konsistenzprüfung und ggf. -bereinigung für beobachtete Abflussreihen:

Für zuverlässige Hochwasserstatistiken ist zudem die Konsistenz von Abflussdaten zu beachten. Inkonsistenzen treten infolge von Schwierigkeiten oder Mängeln bei der Messung oder Dokumentation des Abflusses auf, v. a. bzgl. der Entwicklung der Abflusskurven (Wasserstand-Abfluss-Beziehungen) von Pegeln. Inkonsistenzen nehmen meist zu, je weiter die Abflussdaten aus der Vergangenheit stammen. Eine grundlegende Prüfung oder Überarbeitung von Abflussreihen und -kurven über den derzeitigen Status quo hinaus war im zeitlichen Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks nicht möglich. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Abflusskurven vieler wichtiger Flusspegel, gerade auch im Hochwasserbereich, in jüngster Vergangenheit intensiv analysiert und überarbeitet wurden (siehe u. a. Helms et al. (2016), Fröhlings et al. (2012), Bayerisches Landesamt für Umwelt (2018)^{7,8}, Hydrotec 2013^{9,10}). Zum Einsatz kamen hierbei u. a. Bilanzrechnungen zwischen Pegeln oder Pegelgruppen, Diagnosen gegenüber direkten Abflussmessungen und gegenüber von Oberstrom gerouteten Abflussganglinien sowie hydrodynamisch-numerische Simulationen. Basierend darauf erfolgten ggf. begründete Modifikationen der Abflusskurven in der Gegenwart und der Vergangenheit.

Homogenitätsanalyse und ggf. Homogenisierung für beobachtete Abflussreihen:

Ein weiteres Problem bei der Analyse langfristiger Abflussreihen, das von dem der Inkonsistenzen zu trennen ist, resultiert aus Inhomogenitäten, die sich aus systematischen, meist anthropogen bedingten Änderungen der Abflussbedingungen im Einzugsgebiet oder im Gewässer ergeben (Inbetriebnahme von Talsperren, Gewässerausbau, Errichtung oder Brüche von Deichen etc.). Hinweise auf Inhomogenitäten geben Stationaritätsanalysen (z. B. Trend- oder Sprunganalysen) für Hochwasserkenngrößen (s. u.), deren Ergebnisse durch bekannte Entwicklungen im Einzugsgebiet/Gewässer zu interpretieren sind. Eine Homogenisierung kann durch Simulation täglicher Abflüsse unter einheitlichen Bedingungen des Istzustands (u. a. heutige Talsperrenwirkung im Rahmen von LARSIM-ME, Wellenablauf unter heutigen Bedingungen bzw. ohne Deichbruch) erfolgen. Beispiele sind der Bezug der Hochwasserstatistiken des Rheins auf verschiedene Ausbauzustände (Brahmer et al. 2015) oder die Homogenisierung der Hochwasserabflüsse der Elbe hinsichtlich der Talsperrensteuerung im Einzugsgebiet und der Annahme standfester Deiche am deutschen Elbelauf (Hatz et al. 2018, Helms et al. 2008, Helms et al. 2016). Bei nicht hinreichender (historischer) Datengrundlage zur Homogenisierung ist der Bezug der Hochwasserstatistik auf einen kürzeren Zeitraum zu erwägen. Dies kann auch bei deutlicher Klimaänderung in der Vergangenheit sinnvoll sein (z. B. hinsichtlich der bis

⁷ https://www.lfu.bayern.de/wasser/wasserstand_abfluss/index.htm

⁸ https://www.lfu.bayern.de/wasser/wasserstand_abfluss/abflusskurven_pegel_im_extrembereich/index.htm

⁹ https://www.hydrotec.de/ueberpruefung-der-pegelschluesselkurven-in-bayern-mit-hydro_as-2d/

¹⁰ <https://www.hydrotec.de/pegelabflusskurven-hessen/>

in das 19. Jh. ausgeprägten Kleinen Eiszeit). Diese Ausführungen zeigen, dass häufig eine Abwägung zwischen den Erfordernissen der Repräsentanz (s. o.), der Konsistenz und der Homogenität der für die Hochwasserstatistik genutzten, beobachteten Abflussreihe erforderlich ist.

Dauerlinie, Quantile und Überschreitungshäufigkeiten:

Die Dauerlinie beschreibt die Verteilung der Abflüsse einer täglichen Zeitreihe (Diagramm Abfluss vs. Überschreitungstage pro Jahr). Sie kann sich auf Einzeljahre oder als mittlere Dauerlinie auf längere Zeiträume beziehen. Aus Dauerlinien können Abflusswerte (Quantile) interessierender Überschreitungshäufigkeiten ermittelt werden oder umgekehrt, Überschreitungshäufigkeiten interessierender Abflusswerte, z. B. des HSQ, der dem HSW eines Standortes entspricht.

Bildung von Serien von Hochwasserkenngößen und deren extremwertstatistische Analyse:

Liegen konsistente und homogene, tägliche (bzw. feiner aufgelöste) Abflussreihen vor, können aus diesen Serien unabhängiger Hochwasserkenngößen (in Bezug auf HWGK: Hochwasserscheitelwerte) gebildet werden. Die Unabhängigkeit von zwei Scheiteln wird dabei nach LAWA (1997) angenommen. Dabei werden Serien jährlich maximaler Abflussscheitel HQ gebildet, die auch Stationaritätsanalysen erlauben. Als Alternative sind partielle Serien denkbar, die bei den hierbei interessierenden Jährlichkeiten grundsätzlich ähnliche Ergebnisse ihrer Wahrscheinlichkeitsanalyse erwarten lassen (DWA 2012).

An die HQ-Serien werden über geeignete Parameterschätzverfahren theoretische Verteilungsfunktionen angepasst, im Wahrscheinlichkeitsnetz gegenüber empirischen Wahrscheinlichkeiten (plotting positions) der Serie diagnostiziert und ausgewählt. Dabei wurde in der vorliegenden Arbeit aus den folgenden Verteilungsfunktionen ausgewählt: Allgemeine Extremwertverteilung, 2- und 3-parametrische Log-Normalverteilung, Gumbelverteilung, Weibullverteilung, Log-Weibullverteilung, Pearson III-Verteilung, Log-Pearson III-Verteilung, Gamma-Verteilung und Log-Gamma-Verteilung. Als Schätzverfahren wurden die Momentenmethode, die L-Momentenmethode und die Maximum-Likelihood-Methode angewandt. Aus einer ausgewählten Verteilungsfunktion können Quantile der Hochwasserkenngöße HQ-T für interessierende statische Wiederkehrintervalle (Jährlichkeiten T) berechnet werden, auch für solche, die die Länge der analysierten Serie überschreiten (Extrapolation).

Informationserweiterungen zur hydrologischen Bewertung extremer Hochwasserabflusswerte:

Auch bei Beachtung der o. g. Voraussetzungen (Konsistenz, Homogenität, Unabhängigkeit, Repräsentanz) ist mit Unsicherheiten von Hochwasserstatistiken, v. a. im Extrembereich, zu rechnen. Um diese einzugrenzen, sind je nach Gegebenheiten verschiedene Informationserweiterungen zu erwägen (DWA 2012):

- **Zeitliche Informationserweiterung:** extreme und damit seltene Hochwasserereignisse treten u. U. im Zeitraum der systematischen Beobachtungsreihe nicht bzw. nicht in repräsentativer Anzahl und Größe auf, während ihr Auftreten sowie auch Nichtauftreten bzgl. eines Abflussschwellenwerts in einem historischen Zeitraum vor Beginn der systematischen Beobachtungsreihe bekannt ist. Daher kann es sinnvoll bzw. sogar notwendig sein, solche Ereignisse zu rekonstruieren (und dabei ggf. zu homogenisieren), um sie anschließend in der extremwertstatistischen Analyse zu berücksichtigen. Für diese Einbeziehung gibt es verschiedene Methoden. In der vorliegenden Studie war es in einigen Fällen (Pegel an der Mosel und an der Donau) notwendig, dokumentierte historische Hochwasserabflussscheitel über plotting positions unter Berücksichtigung des systematischen und des historischen Beobachtungszeitraums in die Analyse einzubeziehen.
- **Räumliche Informationserweiterung:** sind in einer Region oder an einem Gewässer eines Pegels auch an benachbarten und vergleichbaren Pegeln Abflussreihen oder bereits Hochwasserstatistiken verfügbar, die ggf. sogar weiter zurückreichen und besser abgesichert sind, ist ein räumlicher Abgleich mit diesen sinnvoll. Dies kann u. a. mit Längsschnittanalysen an einem Gewässer oder in einem Gewässernetz erfolgen. In der vorliegenden Arbeit wurde auch bei der Analyse von Änderungen der HQ-

T zwischen simulierten Abflussreihen für den *Bezugszeitraum* und für Zukunftsprojektionen auf ein räumlich plausibles Gesamtbild geachtet.

- **Kausale Informationserweiterung:** Prozesse der Hochwasserentstehung werden in die hochwasserstatistische Analyse einbezogen, womit deren Ergebnisse interpretiert und plausibilisiert werden. Eine Möglichkeit dazu besteht in der hierbei interessierenden Flussgebietsskala in der kontinuierlichen Wasserhaushaltssimulation mit dem Modell LARSIM-ME. In der hier vorliegenden Arbeit werden umfangreiche Ensembles simulierter Abflussreihen analysiert, in denen auch seltene Extremereignisse auftreten. Die Größenordnung dieser simulierten Abflussscheitel kann extrapolierten Verteilungsfunktionen gegenübergestellt werden, um eine gegenseitige Plausibilisierung zu erreichen. Denkbar ist diese Plausibilisierung auch anhand von Wasserhaushaltssimulationen mit variierten Randbedingungen und Eingangsdaten zur Auslotung möglicher Extremabflüsse. Eine weitere Möglichkeit ist die stochastische Generierung synthetischer täglicher Abflussreihen, welche der zu analysierenden Abflussreihe gleichen, jedoch einen beliebigen Zeitraum abdecken z. B. mit dem Modell nach Treiber (1975). Seltene Extremabflussscheitel und ihre Häufigkeit in der synthetischen Reihe können ebenfalls zur Plausibilisierung extrapolierte Verteilungsfunktionen für die Ausgangsreihe beitragen. Bisher in der vorliegenden Arbeit nicht angewandt wurde eine ggf. besser begründete, saisonal differenzierte Hochwasserstatistik, sie stellt eine Option weiterführender Untersuchungen dar.

Im Rahmen der hier vorliegenden, großräumig angelegten Studie ist auch die Einbeziehung der für viele Pegel bereits vorliegenden Hochwasserstatistiken (siehe Abschnitt 3.3.1) als eine Informationserweiterung aufzufassen, da ihnen regionale und lokale Informationen zugrunde liegen können, die in der hier vorliegenden, synoptischen Studie nicht immer in der vollen Tiefe erfasst werden konnten. Andererseits bietet die eingenommene synoptische Sicht auch umgekehrt eine Informationserweiterung für lokal oder regional entwickelte Hochwasserstatistiken und deren Einordnung bzw. Plausibilitätsbewertung im großräumigen und länderübergreifenden Gesamtbild.

Wasserhaushaltssimulation mit dem Modell LARSIM-ME:

Die bis hierhin angesprochenen Verfahren und daraus ableitbaren Aussagen beziehen sich auf beobachtete Abflussreihen der Vergangenheit. Um entsprechende Aussagen zu meteorologischen Zukunftsprojektionen und anderen verkehrsrelevanten Hochwasserszenarien treffen zu können, bedarf es einer Wasserhaushaltssimulation täglicher Abflussreihen, wofür das Modell LARSIM-ME (für einen Überblick siehe Abschnitt 8.2) eingesetzt wurde. LARSIM-ME ist eine für die großen Flussgebiete Deutschlands (mit internationalen Einzugsgebietsanteilen) entwickelte Variante des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Bremicker 2000). Die Simulation, einschließlich anthropogener Einflüsse (z. B. durch Talsperren), erfolgt mit täglichem Zeitschritt und räumlich verteilt in einem Raster (Zellengröße 5 km x 5 km, entsprechend zu den meteorologischen Rasterdaten von HYRAS bzw. von im ExpN-TF1 bereitgestellten Klimaprojektionsdaten). Durch die räumlich verteilte Modellstruktur können tägliche Abflussreihen an einer Vielzahl von Flusstandorten simuliert werden. LARSIM-ME liegt als sparsam kalibrierte, regionalisierte Modellvariante vor und liefert damit begründete und überregional vergleichbare Modellaussagen.

Im BMVI-Expertennetzwerk wurde eine umfassende Diagnose und Weiterentwicklung des Modells vorgenommen. Dabei wurde eine Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers vorgenommen, ein besser begründeter Verdunstungsansatz (Penman-Monteith) eingeführt und das Schneemodul erweitert und rekaliibriert. Zudem wurden weitere Talsperren berücksichtigt. Von besonderer Relevanz für (großskalige) Flusshochwasserereignisse im Hinblick auf die Überlagerung von Hochwasserwellen aus Teileinzugsgebieten waren schließlich verbesserte Kalibrierungen für den Wellenablauf im Gewässernetz. Weitere Details zu LARSIM-ME und zu seiner Weiterentwicklung finden sich in Wolf-Schumann et al. (2013) und im Schlussbericht des ExpN-TF1 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020). Eine detailliertere Dokumentation ist zudem zeitnah in einem BfG-Bericht vorgesehen.

Trotz der erreichten, deutlichen Modellverbesserung treten bei Simulationen im Hochwasserbereich weiterhin Modellfehler bzw. -unsicherheiten auf. Diese erschweren vergleichende Modellaussagen (unter anderem in Bezug auf Hochwasserstatistiken für Zukunftsprojektionen und für einen *Bezugszeitraum* bzw. für den Istzustand) sowie insbesondere schwellenwertbezogene Aussagen (z. B. zur Überschreitungshäufigkeit des HSQ). Für präzisierte Modellaussagen wurden daher Model Output Statistics (MOS) für die mit LARSIM-ME simulierte Abflussreihen entwickelt, sofern sich diese gegenüber beobachteten Abflussreihen am jeweiligen Pegel identifizieren ließen und als vorteilhaft erwiesen. Dafür kam ein univariates quantile mapping zur Anwendung (siehe auch *Auswertrahmen*, Hänsel et al. (2020a)), mit dem die simulierten Abflusswerte ggf. bias-adjustiert und damit gemäß eines identifizierten funktionalen Zusammenhangs jeweils auf die beobachteten Abflusswerte der gleichen Unterschreitungshäufigkeiten in einer Referenzperiode (hier 1971–2015) bezogen wurden. Im extremen Hochwasserbereich wurden dabei nur lineare Beziehungen zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten zugelassen, um eine robuste und zuverlässige Extrapolation der Bias-Adjustierung zu gewährleisten.

Berechnung der Wasserstandsdynamik:

Auswirkungen der Abflussdynamik bei Flusshochwasser, u. a. auf die Verkehrsinfrastruktur, ergeben sich im Gewässer und im Vorland insbesondere auch aus dem Wasserstand. Dabei können Wasserstände aus Abflüssen je nach angestrebter Aussage und zweckmäßigem Aufwand auf drei Wegen ermittelt werden:

- **Abflusskurven:** an Pegeln mit verfügbarer und aktueller Abflusskurve können für interessierende Abflusswerte (z. B. HQ-T) entsprechende Wasserstände ermittelt werden oder umgekehrt (z. B. HSQ aus HSW). Die Wasserstände beziehen sich meist zunächst auf einen Pegelnullpunkt, können mit diesem jedoch auch in Höhen über Normalnull umgerechnet werden. Zu beachten ist, dass sich Abflusskurven langfristig erheblich verändern können (siehe z. B. Helms et al. (2016)). Für Aussagen zum Istzustand eines Gewässers ist die aktuell gültige Abflusskurve heranzuziehen, auch wenn zur Berechnung von Abflusskenngrößen Abflussreihen vor ihrem Gültigkeitszeitraum verwendet wurden. Teilweise werden (Referenz-)Wasserstände von Richtpegeln auch auf Gewässerabschnitte bezogen, wenn ihnen bekannte Auswirkungen zugeordnet werden können (z. B. in Bezug auf den HSW).
- **Web-basierter Fachdienst FLYS (BfG 2013):** hiermit kann für stationäre Abflusswerte der jeweils zugehörige Wasserstand an beliebigen Standorten eines Fließgewässers ermittelt werden. Dabei umfasst FLYS die Flüsse Rhein, Neckar, Main, Lahn, Mosel, Saar, Donau, Weser, Werra, Fulda, Elbe, Saale, Havel und Oder. FLYS ist kein hydraulisches Modell, sondern ein Instrument zur Verarbeitung (Interpolation) verfügbarer Modellergebnisse vor dem Hintergrund gemessener geodätischer, hydrologischer und morphologischer Daten.
- **Hydrodynamisch-numerische (HN-)Modelle:** sie liefern die umfassendsten Aussagen zur raumzeitlich verteilten Dynamik des Wasserstands, sowie auch der Strömungsverhältnisse in Fließgewässern. Mit ihnen können auch variable Bedingungen im Fließgewässersystem (z. B. im Hinblick auf wasserbauliche Anlagen) und vielfältige Ereignisseigenschaften (z. B. mit der Überlagerung von Hochwasserwellen an Nebenflusseinmündungen) berücksichtigt werden. Mit unterschiedlich stark vereinfachenden Annahmen wird zwischen stationären und instationären, sowie zwischen ein- und zweidimensionalen (1-D- und 2-D-) HN-Modellen unterschieden. Bei Fließgewässern mit vorwiegend gleichmäßigen Querschnitten und homogenem Vorland ist die Anwendung relativ einfacher 1-D-HN-Modelle gerechtfertigt, bei denen der Strömungsvorgang nur in der Hauptfließrichtung berechnet wird. Sie finden daher nach wie vor in der Praxis weite Verbreitung. Verläuft eine Hochwasserwelle, wie in größeren Fließgewässern, ausreichend langsam, kann z. B. für Wasserspiegellagenberechnung im Gewässerbett oder in einem Ausuferungsbereich begrenzter Ausdehnung eine weitere Vereinfachung zu (quasi-)stationären HN-Modellen gerechtfertigt sein. Instationäre 2-D-HN-Modelle mit hohem Datenbedarf und Rechenaufwand sind dagegen erforderlich, um den Ablauf von Hochwasserwellen in Gewässern mit ausgedehnten Überflutungsflächen (mit Geschwindigkeitsgradienten auch quer zur Hauptfließrichtung) und unter Berücksichtigung von Retentionsprozessen adäquat zu simulieren.

Insgesamt kommen für Analysen zum Thema Flusshochwasser je nach angestrebter Aussage, Betrachtungsskala, Datengrundlage und möglichem Rechenaufwand sowie je nach Ereignis- und Gewässereigenschaften alle angesprochenen Methoden in Betracht. Wasserstände von (Richt-)Pegeln, wie z. B. der HSW, stellen für die ihnen zuordenbaren Gewässerabschnitte eine beobachtbare, kompakte und damit leicht kommunizierbare Referenzinformation dar. Detailliertere Aussagen zur räumlichen Verteilung der Wasserstände entlang des Gewässers, auch für Strecken ohne Bezugspegel mit verfügbarer Abflusskurve, erfordern die Hinzuziehung von FLYS oder von HN-Modellen. Für synoptische Untersuchungen zur Identifikation hochwassergefährdeter Räume eignen sich FLYS und stationäre 1-D-HN-Modelle, wobei FLYS den Istzustand des Gewässers erfasst, HN-Modelle jedoch auch an veränderliche Bedingungen im Gewässer und Vorland angepasst werden können. Je komplexer die Eigenschaften des Gewässersystems (z. B. mit ausgedehnten Überflutungsflächen) und des betrachteten Hochwasserereignisses (z. B. hinsichtlich raumzeitlicher Überlagerungseigenschaften) und je detaillierter die angestrebte Modellaussage ist, desto stärker ergibt sich die Notwendigkeit auf instationäre 2-D-HN-Modelle überzugehen. Dies ist bei der Erstellung von HWGK größerer Flussläufe besonders in Bezug auf die mittleren und extremen Hochwasserszenarien der Fall. Die Erstellung und Weiterentwicklung der HWGK ist ein deutschlandweit seit vielen Jahren laufender Vorgang im Auftrag der Bundesländer, in dem kontinuierlich oder aber auch nur anlassbezogen weitere Verbesserungen umgesetzt werden. Vielerorts finden sich aktuell noch vereinfachte Lösungen (horizontale Ausspiegelung des Wasserstands statt HN-Simulation; Simulation ohne Schutzeinrichtungen statt regelbasierter Simulation ihres Versagens). Aufgrund der Vielfalt von hydraulischen Gewässersituationen und Lösungsansätzen kann hierbei deutschlandweit keine Aussage zu allgemein bevorzugten Verfahren getroffen werden. Vor diesem Hintergrund wurden die bestehenden HWGK im Zeitrahmen des Schwerpunkts *Hochwassergefahren* in ihrer Flächenausdehnung nicht neu ermittelt, sondern nur ihre Auftretenswahrscheinlichkeiten im länderübergreifenden Gesamtbild bzgl. des Istzustands und analysierter Zukunftsprojektionen bewertet und ggf. angepasst.

3.4 Hochwasser Küste

Hochwasser an der Küste ist aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik im Vergleich zum Flusshochwasser gesondert zu betrachten. Neben der Intensität und Dauer eines lokalen Niederschlagsereignisses sowie den örtlichen Geländeeigenschaften und den dominierenden hydrologischen Prozesseigenschaften (siehe Abschnitt 3.2) spielt der Außenwasserstand eine gewichtige Rolle für die Entwässerung und damit mögliche Probleme in der Verkehrsanbindung des Hinterlands, sollte die Entwässerung versagen (Abschnitt 3.4.1). Dabei wird das Wasser aus dem Binnenland entweder über das Gefälle oder über Pumpen ins Meer geleitet. Ist der Außenwasserstand zu hoch, kann nicht mehr entwässert werden. Tritt zeitgleich auch noch eine Sturmflut auf (Abschnitt 3.4.2), verstärken sich die Probleme, da zusätzliche Wassermassen Richtung Küste bewegt werden. Schließlich muss der Meeresspiegelanstieg berücksichtigt werden, der im Vergleich zu einer zeitlich begrenzten Sturmflut eine dauerhafte Verringerung der Entwässerungsleistung bewirkt (Abschnitt 3.4.3).

3.4.1 Entwässerungsproblematik

Außergewöhnliche Niederschlagsereignisse können ebenfalls zu Hochwasser in der Küstenzone führen. Dies betrifft nicht nur Starkregenereignisse (siehe Abschnitt 3.2), sondern vor allem ungünstige Situationen für die Entwässerung bei langanhaltenden, aber nicht extremen Niederschlägen. So wurde im Rahmen des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* versucht, derartige Situationen anhand zweier Indizes nach Schröter et al. (2015) zu beschreiben: (1) Dem dreitägigen Ereignisniederschlag und (2) der 30-Tage-Vorfeuchte. Erste Ergebnisse aus Untersuchungen in Schleswig-Holstein (Schade 2017) haben bereits gezeigt, dass die beiden Indizes, bestimmt aus den REGNIE (regionalisierte Niederschlagshöhen) Niederschlagsdaten des DWD (Rauthe et al. 2013), auch regionale Hochwasserereignisse beschreiben können.

Für die Untersuchungen in der Fokusregion Nord-Ostsee-Kanal (NOK) wurden die Indizes über einen Prädiktorenansatz genutzt (Abbildung 3-3, Prädiktoren-Set 2). Die Prädiktoren, also in diesem Fall die Niederschlagsindizes, stammen dabei direkt aus dem Output (regionaler) Klimamodelle und lassen mit Hilfe statistischer Analysen auf beobachtete und zukünftige Veränderungen schließen.

Da das Einzugsgebiet des NOK nur zu ca. 40 % durch Pegel überwacht ist, war eine Validierung des Zuflusses auf Basis von Beobachtungen nicht möglich. Hierfür wurden stattdessen die von der BfG im Rahmen eines Auftrags der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) berechneten Zuflüsse „Q“ (Prädiktoren-Set 1) verwendet. Für die Gegenwart zeigten sich dabei im hydrologischen Winter die besten Übereinstimmungen zwischen Vorfeuchteindex und durch die BfG berechneten Zuflüssen (siehe Abschnitt 4.3.1, Abbildung 4-35). Für weitere Einzugsgebiete an der Küste sind für Phase 2 des BMVI-Expertenetzwerks analoge Untersuchungen mit gekoppelten Modellen, welche an der Küste verwendet werden, geplant. Diese Modelle bieten die einzige Möglichkeit, physikalisch konsistente Untersuchungen von Niederschlag und Außenwasserstand durchzuführen. Gerade diese ungünstige Kombination aus „Wasser von außen“ und „Wasser von Innen“ könnte vermehrt zu angespannten Situationen der Binnenentwässerung führen, insbesondere bei steigendem Meeresspiegel (Abschnitt 3.4.3).

Eine Ermittlung kombinierter Auftretenswahrscheinlichkeiten von erhöhten Zuflussmengen und erhöhten seeseitigen Wasserständen soll in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks weitere Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen liefern, z. B. auch in wieweit es zu Problemen für die kanalfahrenden Schiffe führen kann. Schließlich sollen mit Hilfe von Wetterlagenanalysen (Prädiktoren-Set 3) Zusammenhänge zwischen kritischen Wasserständen und der vorherrschenden atmosphärischen Zirkulation erfasst und untersucht werden (wie z. B. Sturmweatherlagen mit erhöhten Niederschlägen im Binnenland und erhöhten seeseitigen Wasserständen).

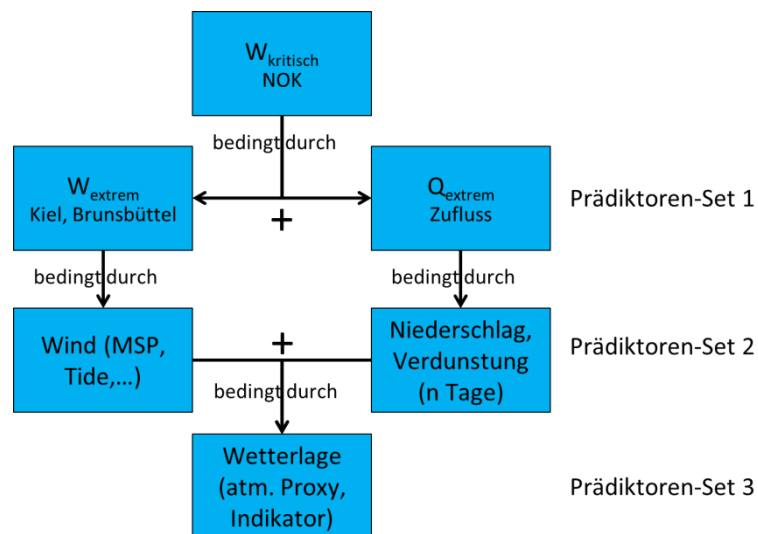


Abbildung 3-3: Prädiktoren-Ansatz zur Bestimmung des Zuflusses in den NOK. „W“ bezeichnet den Wasserstand (sowohl im NOK selbst, als auch den Außenwasserstand in Kiel & Brunsbüttel) und „Q“ den Zufluss in den NOK.

3.4.2 Sturmfluten

Ziehen Stürme über die südliche Nordsee, so hängt es von der Zuggeschwindigkeit der Stürme, ihrer Stärke und der vorherrschenden Windrichtung ab, ob es zu Sturmfluten an den Küsten der Deutschen Bucht kommt, siehe z. B. Gerber et al. (2016). Laut Definition des BSH liegt an der deutschen Nordseeküste eine Sturmflut vor, wenn das mittlere Tidehochwasser um mindestens 1,5 m überschritten wird. Dabei spielt für die Sicherheit des Küstenschutzes nicht nur die absolute Höhe des Sturmflutwasserstands eine Rolle, sondern auch die Andauer. In der Vergangenheit wurden auch sogenannte Kettentiden beobachtet, bei denen

bis zu drei Tidehochwasser über Sturmflutniveau erhöht waren. In diesen Fällen waren die Wasserstände auch in der Ebbphase stark erhöht, so dass der Wasserstand während des Tideniedrigwassers nur gering abfiel und z. T. höher war als das Tidehochwasser bei geringen Windgeschwindigkeiten. Der Windstau kann eine schlechtere Entwässerung zu Folge haben oder diese sogar verhindern. Tritt ein höherer Wasserstand länger als im Normalfall auf, kann es passieren, dass die Entwässerung durch das natürliche Gefälle nicht mehr gegeben ist und im Ernstfall das Binnenwasser mit Pumpen geschöpft werden muss. Je nach Windrichtung, Windstärke und Ort kann es zu einer Gefährdung der Uferbauwerke durch hohen Seegang kommen.

An der Ostsee spielen die Tiden für ein Sturmhochwasser keine große Rolle, da der Tidenhub nur rund 30 cm beträgt. Laut Definition des BSH liegt an der deutschen Ostseeküste ein Sturmhochwasser vor, wenn der mittlere Wasserstand um 1 m überschritten wird. Hierbei spielt auch die Vorfüllung der Ostsee eine Rolle, die z. B. bei der letzten Sturmflut am 4./5. Januar 2017 rund 40 cm betrug. Sturmhochwasser an den deutschen Ostseeküsten entstehen, wenn starke Ostwinde das Wasser an die Küste drücken. Deshalb wurden in der Vergangenheit die höchsten Sturmhochwasser nach einer Kette von Ereignissen beobachtet: Bei langandauernden Westwinden floss vermehrt Wasser aus der Nordsee in die Ostsee und erhöhte dort die Vorfüllung. Zusätzlich wurde das Wasser durch die Westwinde in die östliche Ostsee geschoben. Durch das nachfolgende Drehen der Windrichtung auf nördliche bis östliche Winde wurde das Wasser aus der östlichen in die westliche Ostsee zurückgetrieben und staute sich an den westlichen Ostseeküsten. Das bisher höchste, dokumentierte Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste trat bei der Sturmflut von 1872 auf. Im KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen)-Projekt MUSTOK (Modellgestützte Untersuchung zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste) (Jensen 2009) wurden extreme Sturmfluten in der westlichen Ostsee simuliert. Dabei blieb für viele Orte hinsichtlich der erreichten Wasserstände das Sturmhochwasser von 1872 unübertroffen.

Neben den Sturmhochwassern/Sturmfluten sind auch die Sturmniedrigwasser/Sturmebben an den Küsten der Nord- und Ostsee für die Schifffahrt problematisch, da durch das starke Absinken des Wasserstands z. B. manche Häfen nicht angefahren werden können.

Einen Überblick über Studien zu möglichen zukünftigen Änderungen der Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Sturmfluten in der Nordsee bietet der NOSCCA (North Sea Region Climate Change Assessment)-Report (Quante und Colijn 2016). Aktuelle Studien zeigen über der Nordsee keine gravierenden Änderungen der Windgeschwindigkeiten bis 2100 (z. B. Ganske et al. (2016)). Es ist allenfalls ein leichter positiver Trend in der südöstlichen Nordsee zu erkennen, der aber bei den meisten Ergebnissen der Klimamodelle meist kleiner ist als die jährliche und dekadische Variabilität. Bei den Windrichtungen zeigen viele Klimamodellergebnisse einen leichten Anstieg der Häufigkeiten von westlichen Windrichtungen. Auch dieser Anstieg ist insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten in der gleichen Größenordnung wie die dekadische Variabilität. Für die Höhe der Sturmfluten wurde nur in manchen Studien ein leichter Anstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nachgewiesen, der aber wieder in der gleichen Größenordnung ist wie die dekadische Variabilität. Mögliche zukünftige Änderungen der Wasserstände und Sturmfluten in der Ostsee werden im Report „Assessment of Climate Change for the Baltic Sea basin“ (BACC) (The BACC II Author Team 2015) beschrieben.

Die Frage, ob an den Nordseeküsten höhere Sturmfluten als bisher auflaufen können, wurde einerseits bereits im KFKI-Projekt MUSE (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste) (Jensen et al. 2006) untersucht. Durch die Untersuchung von physikalisch möglichen Wetterlagen bzw. Windfeldern wurde mit diesem Projekt gezeigt, dass es im extremen Fall möglich ist, dass die bislang aufgetretene höchste Sturmflut (1976 mit z. B. NHN +5,10 m in Cuxhaven) um maximal 1,5 Meter überschritten würde. Der heutige Küstenschutz ist jedoch bereits hoch genug, so dass für diese Wasserstände keine zusätzlichen Küstenschutzmaßnahmen erforderlich sind. Im BMBF-Projekt EXTREMENESS (Oktober 2016 bis September 2019) wurden Sturmfluten untersucht, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potenziell mit extremen Konsequenzen verbunden

sind. Dazu wurden zunächst aus einer Vielzahl existierender Beobachtungsdaten, Reanalysen und Szenarierechnungen extreme Sturmflutereignisse und zugehörige meteorologische Bedingungen identifiziert. Anschließend wurde mit Hilfe von Modellstudien untersucht, inwieweit die Stärksten dieser Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten führen könnten. Dabei wurden z. B. Effekte des Meeresspiegelanstiegs oder die Tatsache, dass der zeitliche Ablauf eines Sturms unabhängig von der Tidephase ist, berücksichtigt. Die Ergebnisse aus EXTREMENESS sind in die Arbeiten des BMVI-Expertenetzwerks eingeflossen (s. Abschnitt 4.3.2).

3.4.3 Meeresspiegelanstieg

Neben der Gefährdung durch Sturmfluten werden die Küsten durch den steigenden Meeresspiegel beeinflusst. Der Anstieg der Mittelwasserlage führt zu einem generell höheren Gefährdungspotenzial. Wird dieses mit den zuvor angesprochenen Komponenten Wind und Tidegeschehen überlagert, können deutlich kritischere Situationen als heute entstehen. Der Anstieg des Meeresspiegels ist heute schon sichtbar und wird beschleunigt zunehmen. Nach neusten Erkenntnissen, die neben der thermischen Ausdehnung des Wassers auch das Abschmelzen der Polkappen sowie des Eisschildes auf Grönland berücksichtigen, kann es zu einem Meeresspiegelanstieg von deutlich über einem Meter bis zum Ende des Jahrhunderts kommen, siehe z. B. Grinsted et al. (2015). Diese aktuellen Erkenntnisse für den Meeresspiegelanstieg müssen in die Planung und den Bau neuer Infrastruktur einfließen. Untersuchungen analog zur oben beschriebenen Risikoanalyse des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) könnten dabei sehr hilfreich sein, um potenziell gefährdete Gebiete zu erfassen und bewerten zu können.

Dabei hat der Meeresspiegelanstieg nicht nur direkte Auswirkungen auf die Bemessungshöhen der Küstenschutzbauwerke, sondern auch indirekte, die teils gravierend sein können. So führt beispielsweise ein höherer Meeresspiegel zu nichtlinearen Effekten, die den Wasserstand bei Sturmflut noch zusätzlich erhöhen. In KLIWAS (BMVI 2015a), einem Vorgängerprojekt zum BMVI-Expertenetzwerk, wurde auch die Auswirkung eines Anstiegs des Meeresspiegels (hier um 1 m) auf die signifikante Wellenhöhe in Küstennähe untersucht. Die größere Wassertiefe führt zu späterem Brechen der Wellen und dadurch höherem Wellenaufbau an der Küste, es zeigte sich für die Deutsche Bucht eine Erhöhung der Wellenhöhen um etwa 20-40 cm, lokal bis zu einem Meter. Dieser Effekt kann bei Sturmfluten zu erhöhten Deichbemessungshöhen führen, die den Meeresspiegelanstieg weit übersteigen. So zeigen Arns et al. (2017) in ihrer Studie, dass die nichtlinearen Effekte und erhöhter Wellenaufbau die Bemessungshöhen an der deutschen Nordseeküste um etwa 50 % über den Meeresspiegelanstieg hinaus erhöhen, an exponierten Küstenabschnitten können diese Effekte den Anstieg der Bemessungshöhen über den Meeresspiegelanstieg hinaus sogar mehr als verdoppeln. Dieses Thema rückt gerade erst in den Fokus und sollte bei zukünftigen Planungen zum Küstenschutz verstärkt berücksichtigt werden.

Ein weiterer wichtiger Faktor, der zukünftig zu Änderungen in den beschriebenen Prozessen führen kann, ist eine veränderte Topografie im Bereich der Watten. Durch einen Anstieg des Meeresspiegels und daraus resultierenden Änderungen in den Wasserständen sowie der Intensität von Strömungen, wird sich die Topografie der Watten und Ästuare umgestalten. Dabei spielt es eine Rolle in welchem Maße und in welchem zeitlichen Rahmen sich die Einflussfaktoren Wind, Meeresspiegel und Sedimentverfügbarkeit wandeln. Bei einem Anstieg des Meeresspiegels befindet sich das System in einem Zustand, der vom morphologischen Gleichgewichtszustand abweicht, sodass ein permanenter Bedarf des Sedimentimports besteht (Van Goor et al. 2003). Steht ausreichend Sediment zur Verfügung, stellt sich ein neues Gleichgewicht ein. Wenn dieses Gleichgewicht durch eine verstärkte Anstiegsrate des Meeresspiegels oder eine zu geringe Sedimentverfügbarkeit jedoch nicht hergestellt werden kann, kann es zu einem unwiederbringlichen Verlust des Wattenmeers kommen. Durch den Rückgang intertidaler Wattflächen kann weniger Tideenergie vor Erreichen des Ufers abgebaut werden und es kann zu größeren Schäden an den Uferbefestigungen kommen. Die Auswirkungen eines geschwächten Wattenmeers sind auch in den Ästuaren deutlich zu erkennen und führen zu veränderten Wasserständen und somit potenziell zu einem erhöhten Risiko für Hochwasserereignisse in

Regionen, in denen erhöhte Außenwasserstände eine Entwässerung des Hinterlandes beeinträchtigen. Entsprechend der Schwerpunkt *Szenarienbildung* festgelegten Meeresspiegelanstiege (Brienen et al. 2020), werden mögliche Watttopografien erstellt. Die Faktoren, wie zum Beispiel die Sedimentimportkapazität, werden in Anlehnung an die Literatur festgelegt bzw. aus vorhergehenden Studien gewonnen. Aus diesen Untersuchungen können Aussagen zum Einfluss möglicher Topografieänderungen in Kombination mit einem Anstieg des Meeresspiegels und/oder einer auftretenden Sturmflut getroffen werden.

3.5 Umsetzung der Klimawirkungsanalyse im Schwerpunktthema *Hochwassergefahren*

Der Grad, in dem der Verkehr oder die Verkehrsinfrastruktur klimatischen Einflüssen oder daraus resultierende Klimawirkungen ausgesetzt ist, kann für das Bundesgebiet nicht als einheitlich betrachtet werden. Es ist zu erwarten, dass sich spezifische räumliche, z. B. durch unterschiedliche Naturräume oder Gewässereigenschaften erklärbare Muster in der Exposition zeigen und damit auch die verschiedenen Verkehrsträger unterschiedlich ausgesetzt sind.

3.5.1 Grundlagen zur Klimawirkungsanalyse (IMA Leitfaden)

Zur Notationsform für die Systemanalyse und technischen Umsetzung sei auf den Abschlussbericht *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) verwiesen. Sie ist angelehnt an den IMA Leitfaden Anpassung (Buth et al. 2017). In der Anlage des Leitfadens der IMA Anpassung (UBA 2017) sind für die Handlungsfelder der DAS grundlegende Systemzusammenhänge für die hierbei behandelten Klimawirkungen bereits beschrieben und schematisch erfasst. Exemplarisch genannt seien Zusammenhänge zwischen hydrometeorologischen Größen (klimatische Einflüsse) und Hochwasser (Klimawirkung). In dem Bestreben, möglichst viele Zusammenhänge und Begrifflichkeiten des IMA-Prozesses zu nutzen und Redundanzen zu vermeiden, werden die Systemzusammenhänge im Folgenden aufgegriffen und präzisiert bzw. ergänzt.

Die Wirkungen haben ihre Ausgangspunkte in den Handlungsfeldern "Küsten- und Meeresschutz" und "Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" (Tabelle 3-3). Die relevanten Themenfelder und Klimawirkungen werden als Startpunkte in die nachfolgende Detaillierung der Wirkungsketten übernommen. Die Wirkungsketten enden in den Handlungsfeldern "Verkehr, Verkehrsinfrastruktur" (Adressatengruppen Nutzende und Betreibende) sowie "Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" (Adressatengruppen Umwelt).

Allgemein lässt sich die Wirkungskette für Hochwasser auf die Verkehrsinfrastruktur Schiene, Straße und Wasserstraße wie in Abbildung 3-4 zusammenfassen. Dabei sei angemerkt, dass es sich für Schiene und Straße dabei um Wirkung der Überflutungen handelt, bei der Wasserstraße zusätzlich auch schon die Überschreitung des HSW betrachtet wird.

Tabelle 3-3: Handlungs- und Themenfelder der Vulnerabilitätsanalyse (UBA 2015), die Ausgangspunkte der Systemanalyse im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* sind.

Handlungsfeld	Themenfelder	Klimawirkung im Schwerpunkt <i>Hochwassergefahren</i>
Küsten- und Meeresschutz	Wasserstand und Dynamik der Meere	Meeresspiegelanstieg, Seegang, Sturmfluten, Tidedynamik
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Abfluss und Wasserstand von Oberflächengewässern	Hochwasser
Verkehr	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Einschränkung/Ausfall, Grundberührung, Querströmungen, Unterhalt

3.5.2 Wirkungspfad Hochwasser Wasserstraße

Zu den in der Literatur häufig genannten Auswirkungen des Klimawandels gehört die Zunahme von Situationen, die im weiteren Sinne mit einem (temporären oder regionalen) Überangebot an Wasser verbunden sind. Hierzu gehören höhere Risiken von Hochwasserereignissen und intensivere Starkniederschläge (Kendon et al. 2014) im Binnenbereich sowie höhere Sturmfluten und Folgen des Meeresspiegelanstiegs im Küstenbereich (BMVI 2015b).

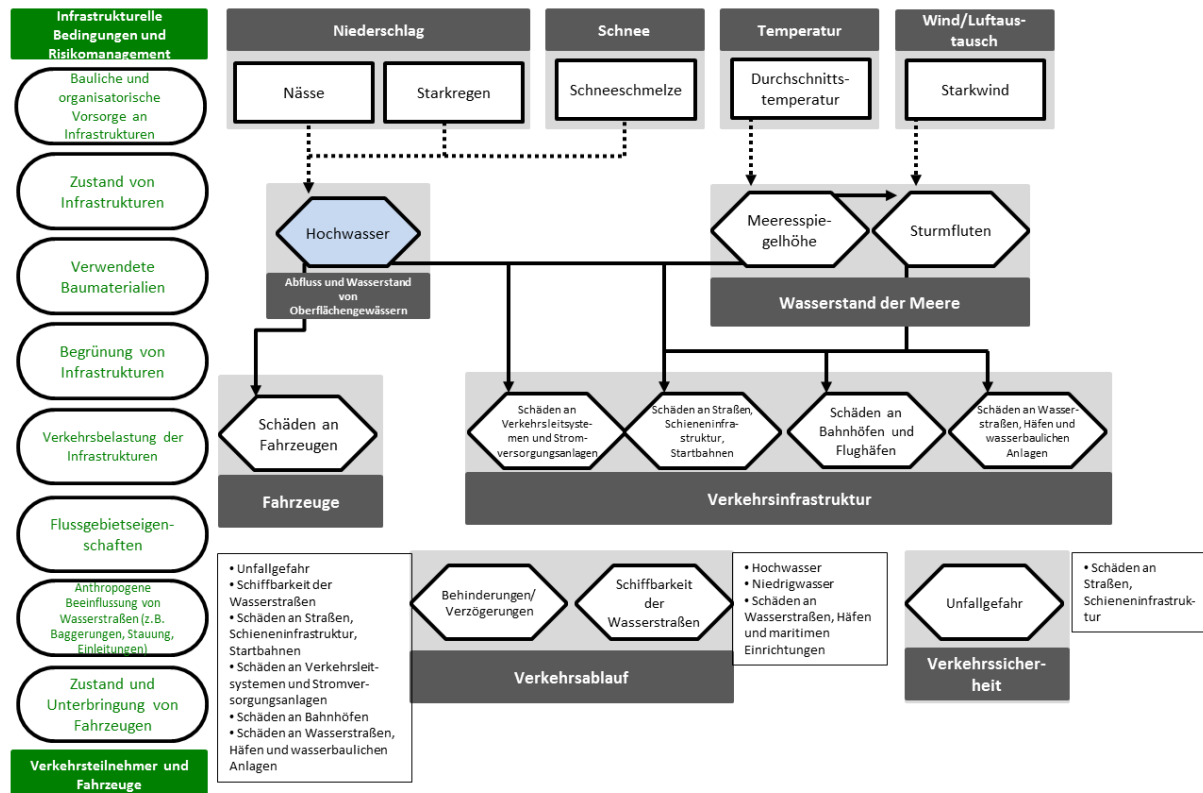


Abbildung 3-4: Allgemeines Schema der Wirkungskette Hochwasser angelehnt an den IMA Leitfadens Anpassung (Buth et al. 2017).

Diese Einflüsse auf das System der Bundeswasserstraßen sind hinsichtlich ihrer Ursachen unterschiedlich, jedoch zeigen sich Gemeinsamkeiten in den Wirkungen auf die verschiedenen Adressatengruppen. Die Überflutung einer Hafenanlage kann beispielsweise eine Einschränkung des Hafenbetriebs bewirken, unabhängig davon, ob die Überflutung durch einen hohen Durchfluss im Binnenbereich oder eine Sturmflut in der Deutschen Bucht verursacht ist.

Ebenso gehen diese Phänomene in der Regel mit einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit bzw. Wellenhöhe einher. Dies bewirkt einerseits über erhöhte Schubspannung eine intensivierte Erosion und morphologische Dynamik, was sich letztlich in veränderten Baggermengen und -orten des Sedimentmanagements durch die WSV niederschlägt. Andererseits gehen hiermit teilweise intensive Querströmungen einher, was eine Herausforderung für die Schifffahrt darstellen kann. Diese gekoppelten Aspekte sind Gegenstand von SP-106. Die Vorgehensweise ist im Meilensteinbericht M106b-1 (Nilson et al. 2017a) beschrieben.

3.5.2.1 Wirkungskette

Wasserstraßen und die Binnenschifffahrt sind von Flusshochwasser besonders betroffen, da sie in dessen direkten Einflussbereich liegen bzw. stattfinden. Durch erhöhte Wasserstände und Strömungsgeschwindig-

keiten ergeben sich nachteilige Auswirkungen auf das Gewässerbett und Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur sowie auf die Betriebssicherheit des Schiffsverkehrs. Maßgebliche Schwellenwerte des Wasserstands liegen dabei i. d. R. niedriger als in Bezug auf Straße und Schiene, so dass sich an Wasserstraßen häufigere und länger andauernde Betroffenheit ergeben.

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 – aus. Durch die damit einhergehenden Wasserstände (und Strömungsgeschwindigkeiten, s. Abschnitte 7.2. und 7.3 in Nilson et al. (2017a)) ergeben sich direkte Einwirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur sowie den Ablauf und die Sicherheit des Schiffsverkehrs (Abbildung 3-5). Besonders bedeutend sind große Hochwasser- und Sturmflutereignisse, die gewisse Schwellenwerte überschreiten. Dabei sind als mögliche Folge des Klimawandels nicht nur hohe Maximalwasserstände (z. B. Flusshochwasser- und Sturmflutscheitelwasserstände) relevant, sondern auch eine ggf. verlängerte Dauer hoher Wasserstände.

Wichtige Schwellenwerte für die Binnenschiffahrtsstraßen sind die "Höchsten Schifffahrtswasserstände" (HSW bzw. HSW-II), bei deren Überschreitung die Schifffahrt eingestellt wird. In einigen Wasserstraßenabschnitten gibt es darüber hinaus tiefere Schwellenwerte (HSW-I), die Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrverbote für einige Schiffstypen, Überholverbote oder sonstige Fahrweegeinschränkungen mit sich bringen. Entsprechende Regeln sind in den Regelwerken (Polizeiverordnungen) der einzelnen Wasserstraßen hinterlegt (Nilson und Helms 2017). Meist sind Aspekte der Verkehrssicherheit, des Schutzes der ufernahen Bebauung und/oder Brückendurchfahrtshöhen ausschlaggebend für die Festlegung eines HSW. Zudem verlieren verschiedene Wasserbauwerke jenseits gewisser Wasserstände ihre Funktion bzw. können beschädigt werden.

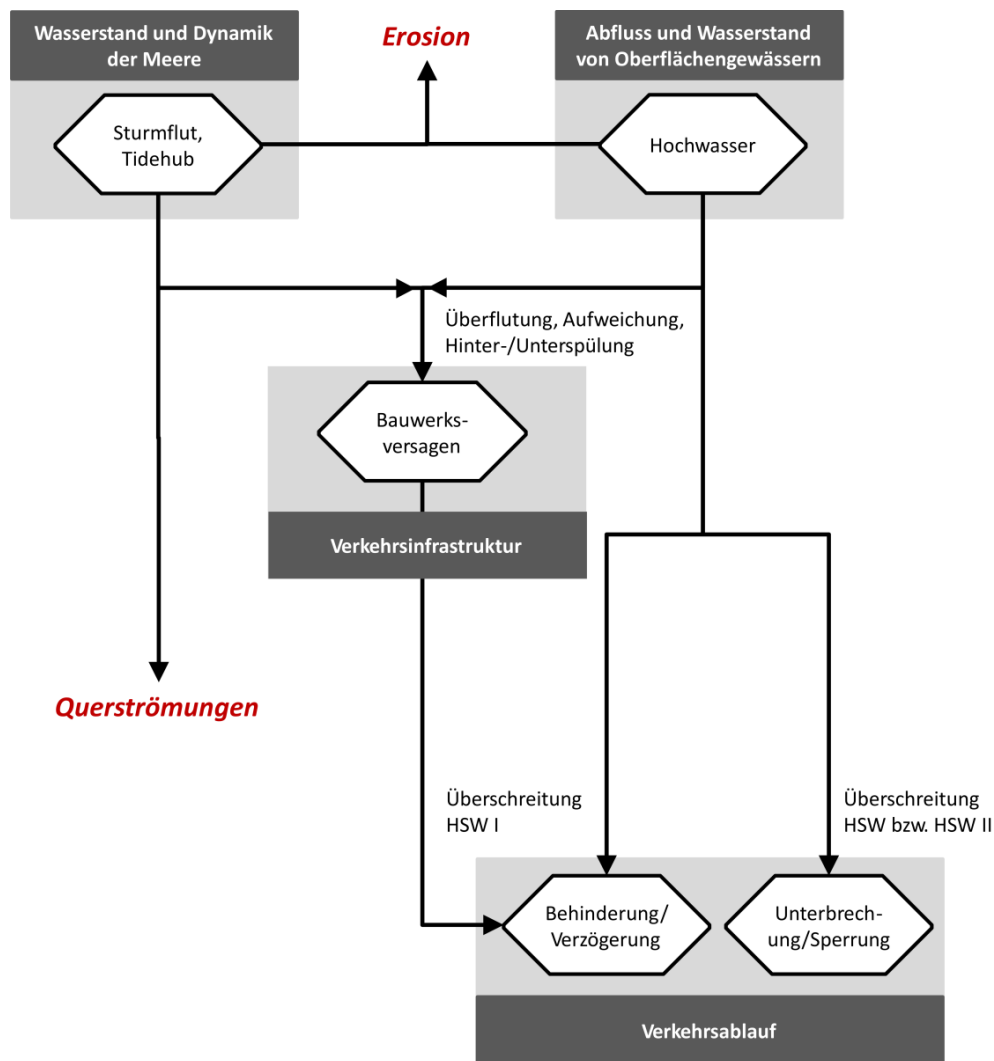


Abbildung 3-5: Schema der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

Die Definition der HSW-Marken erfolgt entlang der Binnenschiffahrtsstraßen abschnittsweise mit Bezug zu ausgewählten Pegeln und unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Flussabschnitts (Geometrie, Uferbeschaffenheit, Bauwerke etc.). Für die Binnenschiffahrt und transportabhängige Unternehmen ergeben sich durch Hochwasserereignisse mit HSW-Überschreitung Ausfallzeiten bzw. Planungsunsicherheiten. Es ist für sie daher von Interesse mit welcher Häufigkeit und mit welchen Dauern solche Hochwassersituationen auftreten, um Gütertransport, Produktion und Lagerhaltung entsprechend zu planen. Auch für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung besteht ein solches Interesse im Hinblick auf die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen.

Auch im Ästuar- und Küstenbereich hängt der Verkehrsablauf von Hochwassermarken ab. So gelten z. B. für den Hamburger Hafen mehrere Schwellenwerte, die einer partiellen bis hin zu einer vollständigen Sperrung führen (HPA 2017). Im tidebeeinflussten Bereich sind nicht nur hohe Tidehochwasserstände von Bedeutung, sondern auch hohe Ebbwasserstände. Der letztere Aspekt ist z. B. entscheidend für das Entwässerungszeitfenster von wichtigen Schifffahrtskanälen wie dem Nord-Ostseekanal, dem im Rahmen des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) des ExpN-TF1 besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird und in Auszügen hier auch dargestellt wird (siehe auch Wirkungspfade Entwässerung und Sturmfluten in den Abschnitten 3.5.4 bzw. 1.)).

3.5.2.2 Sensitivität

Die Antwort auf die Frage, wo und wie häufig bzw. mit welcher Dauer die Binnenwasserstraßen von Hochwassersituationen mit HSW-Überschreitung betroffen sind und zukünftig klimawandelbedingt betroffen sein könnten hängt von verschiedenen Faktoren ab (Abbildung 3-6). Häufig handelt es sich bei Binnenwasserstraßen um größere Flüsse mit entsprechend großem Einzugsgebiet. Deren Hochwasserneigung ergibt sich aus den in der Flussgebietsskala dominierenden hydrologischen Prozesseigenschaften (vgl. Abschnitt 3.3). Wesentlichen Einfluss haben regional vorherrschende klimatologische Eigenschaften im jeweiligen Flussgebiet, v. a. hinsichtlich Intensität, räumlicher Ausdehnung und Verteilung sowie Andauer großräumiger Niederschlagsereignisse bei hochwasserrelevanten Wetterlagen. Auch Wetterlagensequenzen sind im Wechselspiel mit der Entwicklung von Feuchtezuständen und Schneedecken im Flussgebiet zu beachten. Starken Einfluss auf die Hochwasserneigung hat ferner die landschaftliche Prägung des Flussgebiets, insbesondere hinsichtlich vorherrschender Abflussbildungseigenschaften. Diese ergeben sich aus den jeweiligen Ausprägungen der Orographie, der Landnutzung und des Untergrunds (Boden und Geologie). In der Flussgebietsskala sind dabei im Zusammenhang mit den klimatologischen Ausprägungen auch die topologischen Beziehungen zwischen Landschaftselementen bzw. Teileinzugsgebieten von großer Bedeutung, da sich Flusshochwässer (mit ihrer Intensität und Andauer) aus der Überlagerung von Hochwasserwellen aus größeren Teileinzugsgebieten ausprägen. Einfluss haben schließlich auch Hochwasserrückhaltemaßnahmen im Einzugsgebiet (z. B. in Talsperren).



Abbildung 3-6: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

Die Sensitivität einer Wasserstraße bzgl. HSW-Überschreitung hängt im Binnenbereich zudem von den Eigenschaften des jeweiligen Gewässers selbst ab. Wesentlich sind dabei die Gerinnegeometrie (Sohlform), die Sohlrauheit und die Uferbeschaffenheit (Bewuchs, Verbau, Buhnen etc.). Einfluss haben auch Bauwerke im Gewässerbereich, insbesondere Brücken hinsichtlich ihrer Durchfahrtshöhe). Eine wesentliche Rolle spielt auch der Fließtyp des Gewässers, da die Sensitivität gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen von Hochwasserabflüssen in artifiziellen Wasserstraßenabschnitten (Kanälen) deutlich geringer ist als in freifließenden Flüssen.

Im Küstenbereich sind es Ästuarereigenschaften (Wirkung auf Resonanz- und Reflexionseigenschaften, Windstauwirkung, Dissipation der Tideenergie, Sedimentverfügbarkeit und -importkapazität). Auch hierbei spielen Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen eine Rolle (z. B. Existenz und Position von Sturmflutwehren).

3.5.2.3 Technische Umsetzung

Die beabsichtigte großräumige Analyse zur mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeit der HSW an wichtigen Binnenwasserstraßen Deutschlands (Donau, Rhein, Mosel, Neckar, Main, ...) in Bezug auf die beobachtete Vergangenheit und auf simulierte Zukunftsprojektionen erfordert die Zusammenführung einer Vielzahl von Realdaten, Modellen und simulierten Daten, Regelwerken (Polizeiverordnungen) und Expertenmeinungen (Literatur). Damit können die angesprochenen Wirkungsketten und Sensitivitäten im Flussgebiet und im Gewässer unter Berücksichtigung von gewässernahen Bauwerken quantitativ erfasst werden.

Die technische Umsetzung (Abbildung 3-7) weist annähernd dieselbe Struktur auf wie das Schema der Wirkungskette (Abbildung 3-5) unter Ausschluss der Küstenaspekte, die in den Abschnitten 3.5.4 und 1.) separat dargestellt werden. Damit soll verdeutlicht werden, welcher Teil der Wirkungskette im Rahmen des Schwerpunkts mit welchem Modell bzw. Verfahrensschritt analysiert (und quantifiziert wird). Im Unterschied zu den Wirkungsketten treten somit an die Stelle der einzelnen Klimawirkungen nun die Modelle und Verfahren, mit denen sie beschrieben und möglichst quantitativ erfasst werden sollen. An den Pfeilen finden sich nun die Daten (und Kennwerte), die von einem Baustein zum nächsten übergeben werden. In Tabelle 3-4 findet sich eine Übersicht der Komponenten der technischen Umsetzung inklusive der dazugehörigen Literaturangaben.

Tabelle 3-4: Übersicht der Komponenten zur technischen Umsetzung "HSW-Überschreitung, Überflutung" für Flusshochwasser.

Komponente	Referenz für Dokumentation
IPCC AR5	IPCC (2013)
EU-CORDEX	Jacob et al. (2014)
ReKliEs-De	Hübener et al. (2017)
Wasserhaushaltsmodell	Modellsystem LARSIM (Bremicker 2000) Modell LARSIM-ME (Wolf-Schumann et al. 2013)
Bauwerksdatenbanken	WADABA, WSV Prof, BAW (2010), BAW (2015b)
Polizeiverordnungen	BinSchStrO (2016), DonauSchPV (2017), MoselSchPV (2017), RheinSchPV (2016)
Schiffsbauweisen	BinSchUO (2018), HTG e. V. (2012)

Eine detaillierte Erhebung und Verarbeitung HSW relevanter Daten für die Wasserstraßen, etwa aus Datenbanken der WSV (Wasserstraßendatenbank der WSV (WADABA) und WSV Prof bzgl. Bemessung und Zustand von Wasserbauwerken, VerkNet für den Fließtyp des Gewässers) war im Zeitrahmen des BMVI-Expertennetzwerks nicht möglich und im Hinblick auf die bereits verfügbaren HSW-Werte für die hier durchgeführten Untersuchungen nicht erforderlich. Dazu kann festgestellt werden, dass die wasserstraßenbezogenen Sensitivitätsaspekte (Uferbeschaffenheit, Fließtyp, Gerinnegeometrie, Brückenhöhen etc.) bereits in die Bestimmung der derzeit gültigen und dokumentierten HSW-Werte eingeflossen sind. Zunächst wurden daher die in Schifffahrtspolizeiverordnungen, Binnenschifffahrtsverordnungen und dem elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes angegebenen Werte des HSW sowie die zugehörigen Richtpegel und Gewässerstreckenabschnitte (Flusskilometer) erhoben (siehe Nilson und Helms (2017) für weitere Details). Des Weiteren konnten die im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten Datensätze und Modelle genutzt werden, um die Zusammenhänge der Wirkungskette ausgehend von meteorologischen Eingangsgrößen, über den Wasserhaushalt der Flussgebiete bis hin zu den hydrodynamischen Prozessen in den Gewässer- bzw. Wasserstraßenabschnitten abzubilden. Die vorliegenden Daten und Modelle repräsentieren dabei modelltechnisch das gesamte System der beschriebenen Wirkungskette (vgl. Abschnitt 3.5.2.1). Im hier vorliegenden Zusammenhang sind aus Beobachtung und Simulation abgeleitete meteorologische Rasterdatensätze, das Wasserhaushaltsmodell LAR-

SIM-ME, Abflussdauerlinien und hydrodynamische Verfahren im Fließgewässer für die hier interessierenden Aussagen in einem operationell anwendbaren Auswertungsschema zu verknüpfen, um sie auf große Fluss- und Gewässersysteme effektiv und zuverlässig anwenden zu können. Da es sich um sensitive, schwellenwertbezogene Aussagen (Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwerts HSW) handelt, musste dabei auf Unsicherheiten in den Simulationen der Modellketten besonders geachtet werden. Die operationelle Vorgehensweise wird im Folgenden beschrieben.

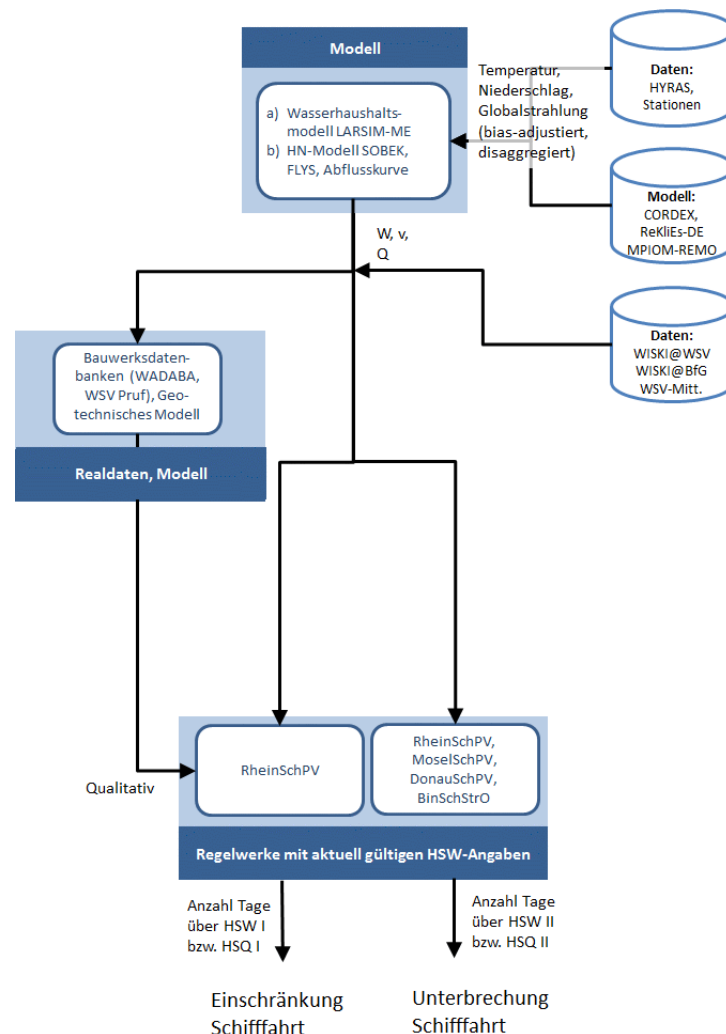


Abbildung 3-7: Technische Umsetzung der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" für Flusshochwasser.

Hochwasserereignisse mit HSW-Überschreitung treten vielerorts nicht häufig auf. So entspricht der HSW am Rheinpegel Kaub etwa einem Niveau mit einem statistischen Wiederkehrintervall von ca. fünf Jahren. Repräsentative Aussagen zur Häufigkeit der HSW-Überschreitung erfordern daher die Analyse von langjährigen Zeitreihen. Im Hinblick auf langfristige Änderungen der Gewässermorphologie kann diese Häufigkeitsanalyse dabei nicht auf den HSW bezogen werden, sondern ist auf den zugehörigen Abfluss (HSQ) als Schwellenwert zu beziehen. Ist für den Richtpegel einer Gewässerstrecke eine aktuell gültige Abflusskurve verfügbar, wird HSQ_{beo} über diese aus dem HSW ermittelt, um die tägliche Abflussreihe des Pegels in Bezug auf diesen Schwellenwert zu analysieren. Ist keine Abflusskurve am Richtpegel verfügbar, so wird der HSQ_{beo} mit Hilfe von FLYS aus dem HSW ermittelt. Ist auch keine täglich beobachtete Abflussreihe am Richtpegel verfügbar, kann in einigen Fällen mit hinreichender Genauigkeit die Abflussreihe eines Nachbarpegels verwendet werden (z. B. Abflusswerte des Pegels Speyer auch für den Pegel Mannheim, der 24

km stromabwärts liegt). In anderen Fällen konnte diese Abflussreihe über LARSIM-ME durch eine Wellenablaufmodellierung aus Abflussreihen oberstrom Pegel berechnet werden (z. B. Koblenz am Rhein aus Kaub/Rhein und Kalkofen/Lahn).

Aus der Dauerlinie der beobachteten Abflussreihe eines Richtpegels in einem *Bezugszeitraum* (insbesondere 1971–2000) wird anschließend die relative Überschreitungshäufigkeit $P\ddot{U}_{\text{Ref}}$ des HSQ_{beo} ermittelt. Soll die relative Überschreitungshäufigkeit des HSQ_{beo} auch aus simulierten täglichen Abflussreihen abgeleitet werden, sind Unsicherheiten des verwendeten Wasserhaushaltsmodells (LARSIM-ME mit meteorologischen Modelleingangsgrößen aus Beobachtung) bzw. der verwendeten Modellketten (Klimamodelle und LARSIM-ME) zu berücksichtigen. Da sich diese im Hinblick auf die hier interessierenden Schwellenwertüberschreitungshäufigkeiten sehr sensitiv und dabei modellkettenspezifisch auswirken können, werden die Modellketten zunächst getrennt voneinander analysiert. Pro Modellkette (MK) wird das Quantil $HSQ_{\text{MKsim, Ref}}$ der simulierten Abflussreihe mit der relativen Überschreitungshäufigkeit $P\ddot{U}_{\text{Ref}}$ im *Bezugszeitraum* berechnet. Dieses Quantil wird nun auch für Simulationen mit der jeweiligen MK in anderen Zeiträumen (insbesondere Projektionszeiträume der *nahen Zukunft* 2031–2060 und der *fernen Zukunft* 2070–2099) herangezogen, um in diesen (bzw. auch in deren Einzeljahren) die Anzahlen der Tage mit einer Überschreitung von $HSQ_{\text{MKsim, Ref}}$ zu ermitteln. Hieraus kann schließlich die mittlere jährliche (bzw. relative) Überschreitungshäufigkeit für einzelne Modellketten ($P\ddot{U}_{\text{MKsim, Proj}}$) oder auch für die Vereinigung mehrerer analysierter Modellketten ($P\ddot{U}_{\cup\text{MKsim, Proj}}$) berechnet werden. Aus dem Vergleich mit der mittleren jährlichen Häufigkeit für den *Bezugszeitraum* $P\ddot{U}_{\text{Ref}}$ können Rückschlüsse auf zu erwartende, ggf. veränderte Überschreitungshäufigkeiten des HSQ in den Zukunftszeiträumen gezogen werden. Diese Vorgehensweise wird in Abbildung 3-8 veranschaulicht.

Die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten für einzelne Richtpegel und zugehörige Gewässerstrecken können zusammengeführt und als Längsschnitte oder als synoptische Karten der untersuchten Wasserstraßen GIS-basiert dargestellt werden. Diese Hinweiskarte ist eine wichtige Komponente für die Analyse langfristiger veränderlicher und regional differenzierter Gefährdungen der Binnenschifffahrt durch den Klimawandel in Bezug auf Hochwasser. Zwar haben die dargestellten jährlichen Mittelwerte an sich nur eine begrenzte Aussagekraft, da die mit HSW-Überschreitungen verbundenen Sperrungen ungleichmäßig über die Zeit verteilt sind. Die Karten erlauben jedoch die Identifikation der relativen Gefährdung unterschiedlicher Streckenabschnitte. Verfeinerte Analysen und Darstellungen können damit gezielt vorgenommen werden. Dazu gehört die Ermittlung jährlicher Reihen der Tagesanzahl mit HSW-Überschreitung an interessierenden Gewässerabschnitten. Auch kann eine Analyse ereignisbezogen zusammenhängender Dauern der HSW-Überschreitung vorgenommen werden.

Des Weiteren können die Hinweiskarten bzgl. HSW-Überschreitung einer Analyse der Kritikalität der daraus resultierenden Einschränkungen für die Binnenschifffahrt gegenüber gestellt werden, wobei sich diese auf die Bedeutung nach dem Gewicht, Volumen oder Wert des Güteraufkommens oder auf die Anzahlen betroffener Schiffe oder Passagiere auf der jeweiligen Wasserstraße beziehen kann (vergleiche Schlussbericht ExpN-TF1 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, Nilson et al. (2020)). In diesem Zusammenhang können die Hinweiskarten als Baustein für eine integrierte Risikoanalyse des Bundesverkehrswegeetzes verwendet werden.

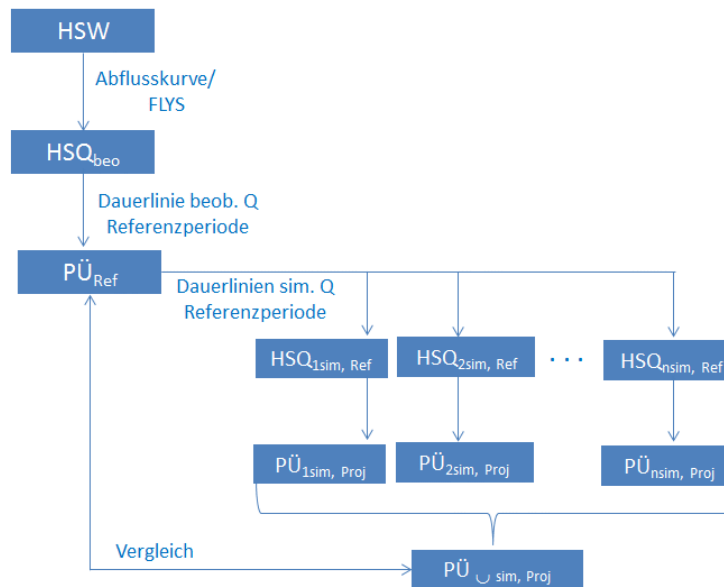


Abbildung 3-8: Schema zur Vorgehensweise bei der Berechnung und beim Vergleich mittlerer jährlicher Überschreitungshäufigkeiten des heute gültigen HSW eines Pegels in Zeiträumen eines *Bezugszeitraums* und einer Zukunftsprojektion mit ggf. veränderlichen Hochwasserhäufigkeiten. Zur Erläuterung der verwendeten Notation siehe Haupttext.

3.5.3 Wirkungspfade Hochwasser Straße und Schiene

Während eine Betroffenheit durch Überschwemmungen räumlich durch die Nähe zu Gewässern bedingt wird, ist das Auftreten von Starkregenereignissen an keine räumlichen Gegebenheiten gebunden. Sekundäre Folgen von Starkregen in Form von Hangrutschungen, Muren oder Lawinen sind wiederum abhängig vom Gefälle, weshalb ein räumlicher Bezug zu Hängen bzw. Hangfüßen hergestellt werden kann. Unabhängig ihrer unterschiedlichen Ursachen zeigen die Einflüsse eines Überangebots an Wasser auf die Straßen- und die Schieneninfrastruktur jeweils Gemeinsamkeiten in ihren Wirkungen. Überflutete Streckenabschnitte der Straße oder der Schiene führen zur Betriebsunterbrechung und ziehen somit bereits während des Überflutungsereignisses wirtschaftliche Schäden mit sich, da kein Verkehr mehr fließen kann. Dies wirkt sich im Regelfall stärker bei der Schiene als bei der Straße aus, da auf der Straße aufgrund der hohen Redundanz im Netz Umrundungen kurzfristiger möglich sind als im Schienennetz. Gleichwohl können bei beiden landgebundenen Verkehrsträgern Straße und Schiene erhebliche Schäden an der Infrastruktur entstehen.

3.5.3.1 Wirkungskette

Tritt ein größeres Flusshochwasserereignis auf, so kommt es je nach dessen Ausmaß, den Geländeverhältnissen im Gewässer und in seinem Vorland und dem Vorhandensein von Schutzmaßnahmen (v. a. Deichen) zu mehr oder weniger starken Ausuferungen und ggf. zu Überschwemmungen im Gewässervorland. Je nach deren Lage können davon auch Verkehrswege der Straße und Schiene mehrtägig betroffen sein. In der Regel haben Hochwasserereignisse, die zur Überschwemmung des Gewässervorlands führen ein größeres Ausmaß als der HSW. Sie sind somit in der Regel seltener und von kürzerer Dauer als die im Abschnitt 3.5.2 erörterten HSW-Überschreitungen. Andererseits haben sie aber eine umfassendere Auswirkung auf Verkehrsströme und die Verkehrsinfrastruktur, da sie alle drei Verkehrsträger betreffen. So kommt es bereits ab einem zehnjährlichen Hochwasser (HQ₁₀) im Rahmen von Alarm- und Einsatzplänen für Hochwasser verbreitet zu ersten Sperrungen von flussnahen Verkehrswegen (siehe z. B. MDI (2019)) und damit zu Unterbrechungen auch im landgebundenen Verkehrstrom. Extreme Hochwasserereignisse können insbesondere bei Überschreiten des Bemessungsabflusses (häufig bei HQ₁₀₀) und insbesondere bei flachem Ge-

lände zu Überschwemmungen führen, die sich ausgehend vom hochwasserführenden Gewässer bis zu mehrere Kilometer in dessen Umgebung erstrecken.¹¹ Damit können sich bei Hochwasserereignissen großer Flüsse Unterbrechungen im Verkehrsstrom ergeben, die nicht nur lokale, sondern auch überregionale und verkehrsträgerübergreifende Auswirkungen haben, insbesondere wenn sie an wichtigen Knotenpunkten oder Leitlinien der Verkehrsnetze auftreten (siehe z. B. Schlussbericht des ExpN-TF1 *Klimawirkungsanalyse*, Hänsel et al. (2020b)). Extreme Flusshochwasserereignisse haben zudem eine hohe Intensität und eine mehrtägige Dauer. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten, Erosionsprozesse, das Aufweichen und Unterspülungen können daher zu Schäden an Hochwasserschutzanlagen (Deichen) und an der Verkehrsinfrastruktur führen. Diese bleiben bestehen bis betroffene Bauwerke wiederinstandgesetzt werden. Dadurch können sich recht dauerhafte Einschränkungen der Verkehrsströme weit über die Dauer des Hochwasserereignisses hinaus ergeben.

Wie bereits im Abschnitt 3.5.2.1 erwähnt ist in Mitteleuropa mit dem Klimawandel von einer Zunahme von Hochwassersituationen auszugehen, was auch extreme Ereignisse (HQ₁₀₀) betrifft (Blöschl et al. 2019). Es ist daher von Interesse, wo und wie häufig Überschwemmungen infolge großer bzw. extremer Flusshochwasserereignisse auftreten können und welche Änderungen hierbei klimawandelbedingt zukünftig zu erwarten sind. Dazu wird in der vorliegenden Studie eine großräumige Analyse in Bezug auf Hochwasserscheitel durchgeführt, die zu den Ausdehnungen und Tiefen von Überschwemmungsflächen führen, wie sie in Hochwassergefahrenkarten (s. u.) dargestellt sind. Detailliertere hydrologische Aspekte der von Flusshochwasser ausgehenden Gefährdungen der Verkehrsströme und -infrastrukturen (s. o.) konnten in diesem zeitlichen Rahmen nicht untersucht werden. Hierzu wird auf die Hochwasserrisikokarten und -managementpläne der Bundesländer bzw. Flussgebietseinheiten (IKSD 2015, IKSE 2015, IKSr 2015, LAWA 2018) sowie auf den Schlussbericht des Schwerpunkts *Fokusgebiete Binnen* verwiesen (Hänsel et al. 2020b).

Durch Starkregen verursachte lokale Hochwasserereignisse haben skalenbedingt eine andere hydrologische Prozessdynamik als Hochwasserereignisse größerer Flusseinzugsgebiete. Hierbei sind vor allem konvektive Niederschlagsereignisse mit hoher Intensität auslösend, auch wenn sie nur eine relativ kurze Dauer (im Bereich von einer bis zu mehreren Stunden) haben. Abhängig von der Bodenbedeckung und insbesondere der Infiltrationseigenschaften des Bodens kann es in der Folge zur Bildung rasch reagierender Abflusskomponenten bis hin zu einem Oberflächenabfluss kommen. Im weiteren Verlauf kommt es abhängig von den Geländeeigenschaften (Gefälleverhältnisse, Oberflächeneigenschaften, Vorhandensein kleinerer Vorfluter) zu einem oberflächlichen oder oberflächennahen Abfließen und zu einer Abflusskonzentration in einem betroffenen Gebiet. Bei extremen Ereignissen kann es dabei durch Strömungsangriff zu Erosion und Feststofftransport (Geröll, Schwemmholz) kommen. Problematisch sind in der Folge vor allem Abflusshindernisse durch natürliche oder künstlich geschaffene Strukturen (u. a. auch Straßen- und Bahndämme). An diesen können sich Rückstaueffekte ergeben, besonders bei Verklausung von Durchlässen durch abgelagertes Geröll und Schwemmholz.

Die Wirkungskette Hochwasser ist bei beiden landgebundenen Verkehrsträgern Straße und Schiene ähnlich und in Abbildung 3-9 dargestellt. Besonders bedeutend ist dabei die Lage der Verkehrsinfrastruktur im Gelände, da sich Wasser entsprechend des Gefälles bewegt und bei eingeschränkter Abflussmöglichkeit in Senken oder an Hindernissen verbleibt. Dadurch kann es zu Schäden an Bauwerken (z. B. Brücken), an der Straße bzw. Eisenbahndämmen oder an den Verkehrsleitsystemen und Stromversorgungsanlagen kommen. Ebenfalls sind direkte Schäden an Fahrzeugen möglich. Die mögliche Verkettung verläuft entweder direkt über die Wirkung des Ereignisses selbst (eingeschränkte Verkehrssicherheit aufgrund des Vorhandenseins von Wasser) oder indirekt als sekundäre Folge (z. B. Unfallgefahr als Folge beschädigter Verkehrsinfrastruktur). Schäden an der Infrastruktur, Hindernisse auf der Fahrbahn und Unfälle führen zu temporären Behinderungen und Verzögerungen im Betriebsablauf oder haben langandauernde Unterbrechungen und Sperren zur Folge, bis die Infrastruktur wieder funktionsfähig ist.

¹¹ (siehe z. B. <https://activations.zki.dlr.de/de/activations/items/ACT116.html>)

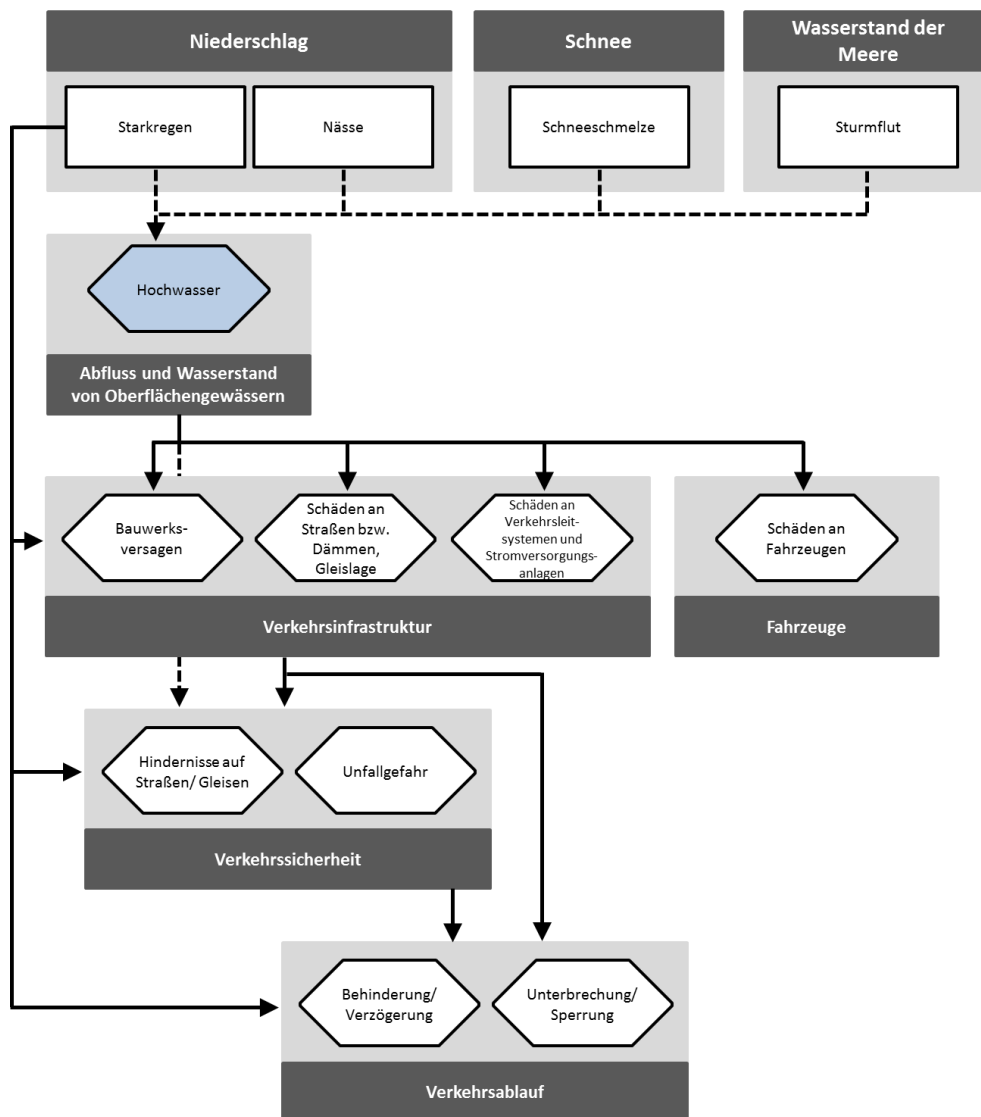


Abbildung 3-9: Wirkungskette von Hochwasser auf die landgebundenen Verkehrsträger Straße und Schiene.

Auf die **Schiene** wirken sich insbesondere diejenigen Hochwasser- oder Starkregenereignisse aus, die zu einer Überflutung des Schienenkörpers führen. Hierbei liegen keine festen Pegelhöhen als Schwellenwerte vor. Die Einstellung des Bahnbetriebs hängt insbesondere mit dem Ausfall von elektronischen Geräten und der Stromversorgung (Schalt- und Kabelanlagen) von Signalen und Weichen zusammen. Aber auch wenn nur das Umfeld der Schiene überflutet, der Gleiskopf jedoch noch sichtbar ist, wird der Betrieb aufgrund einer nicht mehr möglichen Evakuierung des Zuges und einem damit einhergehenden Sicherheitsrisiko eingestellt. Obgleich die Wirkungen von Hochwasser- und Starkregenereignissen ähnlich ausfallen, sind die Höhe der Wasserstände, die Bewegung des Wassers und die Dauer des Verbleibs entscheidend. Dabei muss zwischen Fließart, -richtung und -geschwindigkeit unterschieden werden, da hydrodynamische (Oberflächenabfluss bzw. Strömungen) und hydrostatische Prozesse (langsam ansteigendes bzw. stehendes Wasser) unterschiedliche Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturelemente haben können. Diese Überflutungen in Folge von Hochwasser- oder Starkregenereignissen können auch durch zahlreiche Schadensmechanismen auf den Verkehrsträger **Straße** einwirken. Infiltrations- und Erosionsprozesse können beispielsweise die Standsicherheit von Straßendämmen, Böschungen oder Stützbauten beeinträchtigen und somit zu Verformungen, Brüchen und Rutschungen führen. Ebenso können Schäden an Fahrbahnoberflächen, Deck- und Tragschichten sowie am Unterbau in Form von Ausspülungen, Aufbrüchen, Rutschungen oder Rissen auftreten. Darüber hinaus können auch Straßenausstattungen wie etwa Verkehrs-

zeichen, Lichtsignalanlagen oder Leiteinrichtungen durch die Einwirkungen von Hochwasser Schaden nehmen oder vollständig zerstört werden (Golz et al. 2017). Da solche Schadensbilder einen erheblichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben, können sie zum teilweisen oder vollständigen Ausfall betroffener Verkehrswege führen und so den Verkehrsablauf behindern. Die Folge von Wassereinwirkungen ist somit neben den baulichen Schäden auch eine eingeschränkte Verfügbarkeit, was Verzögerungen im Betriebsablauf, Ausfälle, langandauernde Streckensperrungen und Verkehrsverlagerungen nach sich zieht. Auch im Nachgang an ein Überflutungsereignis – unabhängig der Ursache – kann der reguläre Verkehrsbetrieb noch lange Zeit unterbrochen sein, um die Wiederherstellung der Infrastruktur vorzunehmen.

3.5.3.2 Sensitivität

Wo, wie häufig und mit welchem Ausmaß extreme Abflussscheitel durch Flusshochwasser gegenwärtig und zukünftig klimawandelbedingt entstehen können, hängt wie auch bei der Überschreitungsdauer des HSW von einer Vielzahl von Faktoren ab (siehe auch Abbildung 3-6). Grundsätzlich sind im Flusseinzugsgebiet die gleichen Prozesse zu nennen wie bereits im Abschnitt 3.5.2.2. Zu betonen ist in Bezug auf Hochwasserscheitel noch einmal die Überlagerungscharakteristik von Hochwasserwellen aus verschiedenen Teileinzugsgebieten abhängig von klimatologischen Ausprägungen und topologischen Beziehungen zwischen Landschaftselementen bzw. Teileinzugsgebieten. Extreme Hochwasserscheitel können sich insbesondere ergeben, wenn die Abflussscheitel oder scheidelnahen Phasen der Hochwasserwellen verschiedener Teileinzugsgebiete zusammentreffen, wie etwa beim Hochwasser 2013 an Inn und Donau oder an Elbe, Mulde und Saale. Besonders zu beachten sind ferner Hochwasserschutzmaßnahmen deren Ziel meist insbesondere die Kappung von Hochwasserscheiteln ist (Talsperren und Polder). Auch Deichbrüche können eine entsprechende Wirkung haben.

Ausuferungs- und Überschwemmungscharakteristiken bei einem Flusshochwasser hängen einerseits von dessen Abflussscheitel und dem zeitlichen Verlauf der Hochwasserganglinie ab. Andererseits spielen aber auch die lokale Geometrie und Beschaffenheit (vegetationsabhängige Rauigkeit) des interessierenden Gewässerabschnitts und seines Vorlands eine wesentliche Rolle. Modifizierend wirken zudem Hochwasserschutzmaßnahmen, insbesondere Deiche. Aufgrund vielfältiger möglicher Verhältnisse kann keine allgemein gültige Aussage zur Sensitivität von Gewässerabschnitten getroffen werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Einen bundesweiten Überblick über die Ausuferungs- und Überschwemmungscharakteristiken entlang der Gewässer bieten die Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer. Sie stellen die Ausdehnung und Wassertiefen der überschwemmten Flächen, also die Sensitivität betroffener Gewässerabschnitte und ihrer Vorländer bzgl. der Hochwasserexposition, für drei abgestufte Hochwasserszenarien ("häufig", "mittel", "selten/extrem") dar.

Starkregenereignisse und lokale Hochwasserereignisse können prinzipiell überall in Deutschland auftreten, es zeigen sich jedoch regionale Differenzierungen in der gegenwärtigen Situation und in den zukünftig zu erwartenden Entwicklungen (siehe Abschnitt 4.1). Die Neigung eines Gebiets, lokale Hochwasserereignisse oder Sturzfluten zu bilden, wird ferner durch seine bereits im Abschnitt 3.5.3.1 angesprochenen Eigenschaften bestimmt (Infiltrationseigenschaften der Böden, Landnutzung, Gefälleverhältnisse). Sofern vorhanden können auch Hochwasserrückhaltebecken und dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen bis zu einem gewissen Grad eine mindernde Wirkung auf lokale Hochwasserabflüsse haben. Erosion und Feststofftransport im betroffenen Gebiet hängen ebenfalls von Bodeneigenschaften, Landnutzung und Gefälleverhältnissen ab.

Wo und wie intensiv Straße und Schiene bzw. deren Infrastruktur in Deutschland durch aktuelle und zukünftige Hochwasser- oder Starkregenereignisse betroffen sein könnte, hängt von verschiedenen weiteren Faktoren ab. Neben den schon zuvor dargestellten Abhängigkeiten vom Fluss bzw. Einzugsgebiet, können die Eigenschaften der Infrastruktur die potenzielle Betroffenheit mindern oder intensivieren und beeinflussen somit die Sensitivität des jeweiligen Verkehrsträgers. Ein Überblick dazu gibt Abbildung 3-10.



Abbildung 3-10: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "Hochwasser, Überflutung" auf die Verkehrsinfrastrukturen Straße und Schiene.

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, in wie weit ein Schienenkörper bei einem Hochwasserereignis betroffen ist. Mittels 3-D-Gleislagedaten soll dieser Aspekt in der nächsten Phase des BMVI-Expertennetzwerks näher untersucht werden, ebenso wie das Vorhandensein von Hochwasserschutzmaßnahmen, die sich ebenfalls auf die Sensitivität der Schiene bei einem Flusshochwasser auswirkt. Unzureichend bemessene Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässe von Fließgewässern bergen bei Starkregenereignissen ein erhebliches Sicherheitsrisiko und können potenziell betriebliche Einschränkungen während und nach extremen Niederschlagsereignissen hervorrufen. Untersuchungen dazu werden in Abschnitt 4.1.3 dargestellt.

Tiefergehende Analysen der Betroffenheit einzelner Infrastrukturelemente der Schiene im Hinblick auf Niederschlag wurden in einem Workshop des Eisenbahn-Bundesamtes in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn AG und der Deutsche Bahn Netz AG im Oktober und November 2017 ermittelt. Während dieses Workshops wurden für die Schieneninfrastrukturelemente Oberbau, Leit- und Sicherungstechnik, konstruktiver Ingenieurbau, und Mast- und Oberleitungsanlagen die Klima- und Vulnerabilitätsindikatoren nach der RIVA-Methodik (Korn et al. 2017) bestimmt. Langfristigere Schäden an der Infrastruktur, insbesondere dem *Oberbau*, können durch die direkte Druckwirkung von Wasser als auch durch mitgeführtes Treibgut oder Erdmassen hervorgerufen werden. Langanhaltende, große Wassermengen haben Einfluss auf die Baustanz und bewirken Instabilität durch Unterspülung aufgrund von Bodenverlusten und Erosion. Diese Einflüsse führen somit zu einer Aufweichung oder Absenkung des Schienenkörpers und möglicherweise zu einem Versatz der Gleise. Auch die Elektronik kann langfristig beschädigt werden. Schalthäuser, die zur Leit- und Sicherungstechnik gehören, können von Hochwasser- und Starkregenereignissen stark betroffen sein, wenn Wasser in die Kabelanlagen eintritt. Schwellenwerte liegen in diesem Zusammenhang nicht vor, hängen jedoch mit der Höhe des Wasserpegels und der angebrachten Höhe der Strom- und Kabelanlagen zusammen. Entwässerungsanlagen, die zum konstruktiven Ingenieurbau zählen, dienen dazu, schädliche Wasseranreicherungen im Gleisbett zu verhindern und somit die Funktionsfähigkeit und die Standsicherheit der Erdbauwerke zu jeder Jahreszeit gewährleisten zu können. Unterdimensionierte Einrichtungen bewirken eine Anstauung von Wasser im Gleisbereich, mit den möglichen Folgen, dass die Tragfähigkeit bindiger Böden durch Aufweichung verringert wird, Frosthebung durch Volumenzunahme wassergesättigter Böden

zu Gleisveränderungen führt, die Lagebeständigkeit und Stabilität von Böschungen entlang von Gleisanlagen aufgrund von Rutschungen und Erosion beeinträchtigt wird oder ein gesamter Streckenabschnitt unterspült oder überschwemmt wird. Flusshochwasser, Überschwemmungen oder starke Niederschläge können somit zur Beschädigung von Entwässerungsanlagen oder zur Durchfeuchtung der trocken zu haltenden Erdbauwerke führen, was einen Totalausfall der Anlage zur Folge haben könnte. Oberleitungsmasten und die Oberleitungen können aufgrund von hohen Wassermengen in ihrer Standsicherheit beeinträchtigt werden, was eine Neigung der Masten zur Folge hätte. Schwellenwerte hinsichtlich des Wasserstands sind in diesem Zusammenhang bisher nicht bekannt. 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. Diese 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 den oben beschriebenen Sensitivitäten bei der Schiene. Detaillierte Betrachtungen zu dieser Thematik sind für die zweite Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant.

3.5.3.3 Technische Umsetzung

Die beabsichtigte großräumige Analyse zur Hochwasser- bzw. Überflutungsgefährdung landgebundener Verkehrswege in Bezug auf die beobachtete Vergangenheit und auf simulierte Zukunftsprojektionen erfordert, wie die Analyse der Überschreitungshäufigkeit der HSW, die Zusammenführung einer Vielzahl von Realdaten, Modellen und simulierten Daten (vergleiche auch Abschnitt 4.2). Für die landgebundenen Verkehrswege Straße und Schiene liegen flächendeckende Informationen dazu, welcher Streckenabschnitt ab welchem Pegelstand hochwasserbedingt gesperrt wird, bisher leider nicht in strukturierter und nutzbarer Form vor. Dazu wären entweder hydrodynamisch-numerische Simulationen in Verbindung mit sehr hochauflösender Geländeinformation erforderlich oder eine Auswertung aller Katastropheneinsatzpläne in Deutschland. Beides war im BMVI-Expertenetzwerk nicht zugänglich bzw. aus Ressourcengründen zusätzlich zur eigentlichen Forschungsagenda nicht leistbar.

Um Hinweise auf die derzeitige Exposition zu erhalten, wurde daher auf die HWGK der Bundesländer zurückgegriffen, die zuvor bereits im Portal WasserBLICK¹² zusammengeführt wurden. Abgesehen von dem Vorzug, dass diese Karten bundesweit vorliegen, wird hierbei bewusst auf diese Grundlage gesetzt, um eine mit anderen wichtigen Akteuren (u. a. den Bundesländern) kohärente Perspektive auf die Thematik "Hochwasser" einzunehmen. Damit können gefährdete Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes für unterschiedliche Hochwasser- und Sturmflutszenarien ("häufig", "mittel", "selten/extrem") nach ihrer GIS-basierten Verschneidung mit den HWGK identifiziert werden. Das mittlere Szenario wird dabei bundesweit einheitlich anhand des jährlichen Scheitelabflusses mit statistischem Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ₁₀₀) definiert und an der Küste ein dazu entsprechendes Hochwasser (HW). Für das häufige Szenario werden hingegen unterschiedliche Wiederkehrintervalle angenommen (meist HQ₁₀ oder HQ₂₀). Unterschiedliche Definitionen der Bundesländer liegen besonders auch beim extremen Szenario mit einem Wiederkehrintervall von deutlich mehr als 100 Jahren vor. Hierbei fließen auch weitere Aspekte in die Definition ein (z. B. mögliche Verklausungen, Vorhandensein von Vorranggebieten, Grad der Betroffenheit etc.), die eine operationelle Bewertung der Hochwasserexposition anhand der HWGK unterstützen.

Auch wenn die HWGK bereits eine weithin abgestimmte und anerkannte Sicht auf die Thematik "Hochwasser" in Deutschland darstellen, bedarf ihre Nutzung einer Bewertung der in ihnen enthaltenen Unsicherheiten und damit einer erweiterten Interpretation, v. a. im Hinblick auf das extreme Szenario. Daher wurden Vergleiche und Analysen für eine länderübergreifende Bewertung der vorliegenden HWGK und insbesondere der ihnen zugrundeliegenden, aktuell gültigen Hochwasserstatistiken (bzgl. der Repräsentanz, Konsistenz und Homogenität von beobachteten Abflussreihen sowie bzgl. der Annahmen von Wahrscheinlichkeitsanalysen) vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Die großräumig angelegten Untersuchungen bezogen

¹² (siehe <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>)

sich dabei auf die großen Flüsse (Rhein, Donau) und ihre wichtigsten Nebenflüsse, jedoch nicht auf kleinere Nebenflüsse, an denen sich skalenbedingt andere Verhältnisse ergeben können. Weiterführende Analysen an der Küste zu Sturmfluten werden in Abschnitt 1.) beschrieben.

Mit der Analyse und Bewertung von Hochwasserstatistiken aus beobachteten Abflussreihen für den Istzustand wird auch eine Referenz für Hochwasserstatistiken von Zukunftsprojektionen geschaffen. Für diese Zukunftsaussagen bedarf es insgesamt des Einsatzes aufeinander abgestimmter hydrologischer Analyse- und Simulationswerkzeuge (vgl. Abschnitt 3.3.2). Gegenüber Hochwasserstatistiken aus beobachteten Abflussdaten ist eine Wasserhaushaltssimulation mit simulierten meteorologischen Eingangsgrößen aus Klimamodellen hinzuzuziehen. Die extremwertstatistische Analyse von Serien der jährlichen Hochwasserscheitel HQ aus Simulationen kann dabei grundsätzlich in analoger Weise wie bei den Serien aus beobachteten Abflüssen erfolgen, jedoch sind dabei weitere Unsicherheitsaspekte zu beachten.

So sind Unsicherheiten der Modelle bzw. Modellketten (Klimamodelle und Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME) zu beachten, die sich mit prozessbedingten Streueffekten überlagern. Hinzu kommen Unsicherheiten aufgrund der hinsichtlich seltener Extremwerte kleinen Stichprobenumfänge für die Zeiträume eines *Bezugszeitraums* und der Zukunftsprojektionen von jeweils 30 Jahren, die im BMVI-Expertennetzwerk vereinbart wurden (siehe *Auswertrahmen*, Hänsel et al. (2020a)), um Klimawandelfolgen mit einheitlichem Zeitbezug zu erfassen. Eine Vergrößerung dieser Zeiträume wäre für extremwertstatistische Analysen jedoch auch problematisch wegen der mit dem Klimawandel anzunehmenden langfristigen Instationarität von HQ-Serien. Daher wurde ein erweiterter, extremwerthydrologischer Ansatz entwickelt (siehe Abbildung 3-11).

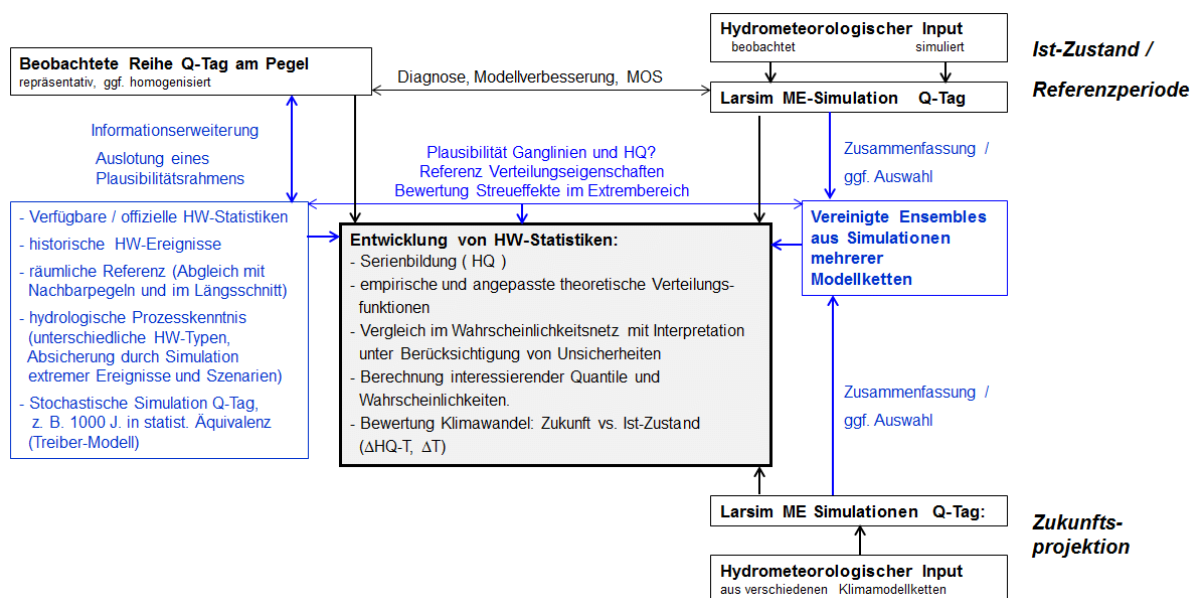


Abbildung 3-11: Schema zur Ableitung von Hochwasserstatistiken für Istzustand und Zukunftsprojektionen.

Abbildung 3-11 zeigt linksseitig für beobachtete Abflussreihen das Vorgehen bei der Entwicklung von Hochwasserstatistiken mit zeitlicher, räumlicher und kausaler Informationserweiterung. Der rechte Abbildungsteil zeigt hingegen den Ansatz ausgehend von simulierten täglichen Abflussreihen. Um auch hierbei Unsicherheiten einschätzen und behandeln zu können, ist eine Diagnose des verwendeten Wasserhaushaltsmodells im Hochwasserbereich notwendig, sowie ggf. die Anwendung von Model Output Statistics (MOS). Des Weiteren stellen die aus beobachteten Abflussreihen entwickelten Hochwasserstatistiken des Istzustands eine wichtige Referenz bzgl. plausibler Verteilungseigenschaften von HQ-Serien für den *Bezugszeitraum* dar. Unsicherheiten, v. a. im Hinblick auf Streueffekte im Extrembereich, sind gerade bei Verwendung simulierter

meteorologischer Eingangsdaten zu erwarten. Sie resultieren aus den verwendeten Modellketten, aber auch aus den relativ kurzen Serien für den *Bezugszeitraum* und Zukunftsprojektionen (s. o.). Um längere HQ-Serien (größere Stichproben) zu bilden, die auch weniger anfällig für modellkettenspezifische Unsicherheiten sind, wurden daher vereinigte Ensembleserien aus mehreren Modellketten gebildet, z. B. wurden aus den simulierten HQ-Serien von 13 Modellketten für den *Bezugszeitraum* des *Weiter-wie-bis-her-Szenarios* (mit jeweils 30 Jahren) eine vereinigte Ensembleserie mit 390 Jahren berechnet. Dabei können auch HQ-Serien einzelner Modellketten von Analysen ausgeschlossen werden, falls sie signifikant von den anderen Modellketten und von, aus Beobachtungen abgeleiteten, Referenzverteilung abweichendem. Ein Vorteil der vereinigten Ensembleserien ist schließlich, dass ihre Analyse alle verfügbaren bzw. plausiblen Modellketten für ein Klimaszenario einbezieht und den in den Klimamodellen impliziten Kenntnisstand insgesamt repräsentiert.

Die HQ-Serien (bzw. vereinigten Ensembleserien) aus Simulation und Beobachtung werden im Ansatz nach Abbildung 3-11 in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm zusammengeführt, in dem ihre Verteilungseigenschaften verglichen werden. Damit kann die Auswahl theoretischer Verteilungsfunktionen für die simulierten HQ-Serien, zunächst für den *Bezugszeitraum*, auch unter Berücksichtigung der Referenz der Verteilungsfunktionen der aus Beobachtungen abgeleiteten bzw. heute gültigen Hochwasserstatistiken erfolgen. Neben einer vergleichbaren Lage sind dabei vor allem vergleichbare Form- und Skalierungseigenschaften der Verteilungsfunktionen anzustreben. Dies erlaubt einen möglichst verzerrungsfreien Bezug der simulierten Verteilung auf die beobachtete Verteilung gemäß einer für den *Bezugszeitraum* abzuleitenden Transformationsregel mittels Quantilsquotienten (s. u.). Im Idealfall sind dabei der gleiche theoretische Verteilungsfunktionstyp und die gleiche Schätzmethode geeignet, falls sie jeweils auch die empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der simulierten HQ-Serien hinreichend repräsentieren.

Nach der Auswahl und Anpassung einer Verteilungsfunktion für die simulierten HQ-Serien des *Bezugszeitraums* erfolgt eine entsprechende Analyse für die simulierten HQ-Serien der Zukunftsprojektionen. Auch hierbei sind der gleiche Verteilungsfunktionstyp und die gleiche Schätzmethode wie im *Bezugszeitraum* vorzuziehen, wenn sie sich gegenüber der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung der HQ-Serie eignen. Es ist jedoch möglich, dass sich die Verteilungseigenschaften langfristig ändern. Solche Entwicklungen sind anhand der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu identifizieren, wobei die aus Beobachtung und Simulation abgeleiteten Verteilungen des *Bezugszeitraums* eine Plausibilitätsbewertung unterstützen. Mit den ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen für die simulierten HQ-Serien des *Bezugszeitraums* und der Zukunftsprojektionen werden nun statistische Wiederkehrintervalle T und Quantile $HQ-T$ berechnet und verglichen. Zwischen den Zeiträumen werden prozentuale Änderungen $\Delta(HQ-T)$ ermittelt. Zudem werden für ausgewählte Quantile (HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{1000}) Änderungen im statistischen Wiederkehrintervall ΔT für die simulierten HQ-Serien berechnet.

Daneben wird auch für die Verteilungen der Zukunftsprojektionen eine Transformation gemäß der für den *Bezugszeitraum* abgeleiteten Transformationsregel (s. o.) vorgenommen. Für die transformierten Verteilungen werden ebenfalls Änderungen im statistischen Wiederkehrintervall zwischen *Bezugszeitraum* und Zukunftsprojektionen berechnet, die sich abhängig von der Transformationsregel mehr oder weniger von den rein aus Verteilungen der simulierten HQ-Serien berechneten ΔT unterscheiden. Es resultieren Vertrauensintervalle für ΔT , die zur Bewertung der HWGK im Kontext des Klimawandels dienen können. Damit ist gegebenenfalls den aktuellen HWGK bezogen auf Zukunftsprojektionen ein verändertes Wiederkehrintervall zuzuweisen. Eine Neuberechnung von Überflutungsflächen der HWGK mit gegebenen statistischen Wiederkehrintervallen war im Rahmen der synoptisch angelegten Studie nicht leistbar.

Mit den neu berechneten, ggf. veränderten Wiederkehrintervallen können die Hochwassergefährdungen der bereits heute im Bereich der HWGK gelegenen Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes neu bewertet werden. Die Vorgehensweise zur technischen Umsetzung und deren Einbindung in das Hochwasserrisikomanagement gemäß Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der EU (2007) lässt sich wie

in Abbildung 3-12 zusammenfassen. Zusätzlich ist hier (Abbildung 3-12) der Zusammenhang zwischen Teilen der Wirkungskette „Hochwasser“ (Abbildung 3-9) im Rahmen des Schwerpunkts mit dem jeweiligen Modell bzw. Verfahrensschritt dargestellt. Neben dem Istzustand der Betroffenheit der Schiene und Straße durch die drei verschiedenen Hochwasserszenarien der HWGK, werden für die Zukunft die Wiederkehrintervalle der Szenarien neu berechnet, was eine Einschätzung der zukünftigen Betroffenheit von Schiene und Straße erlaubt.

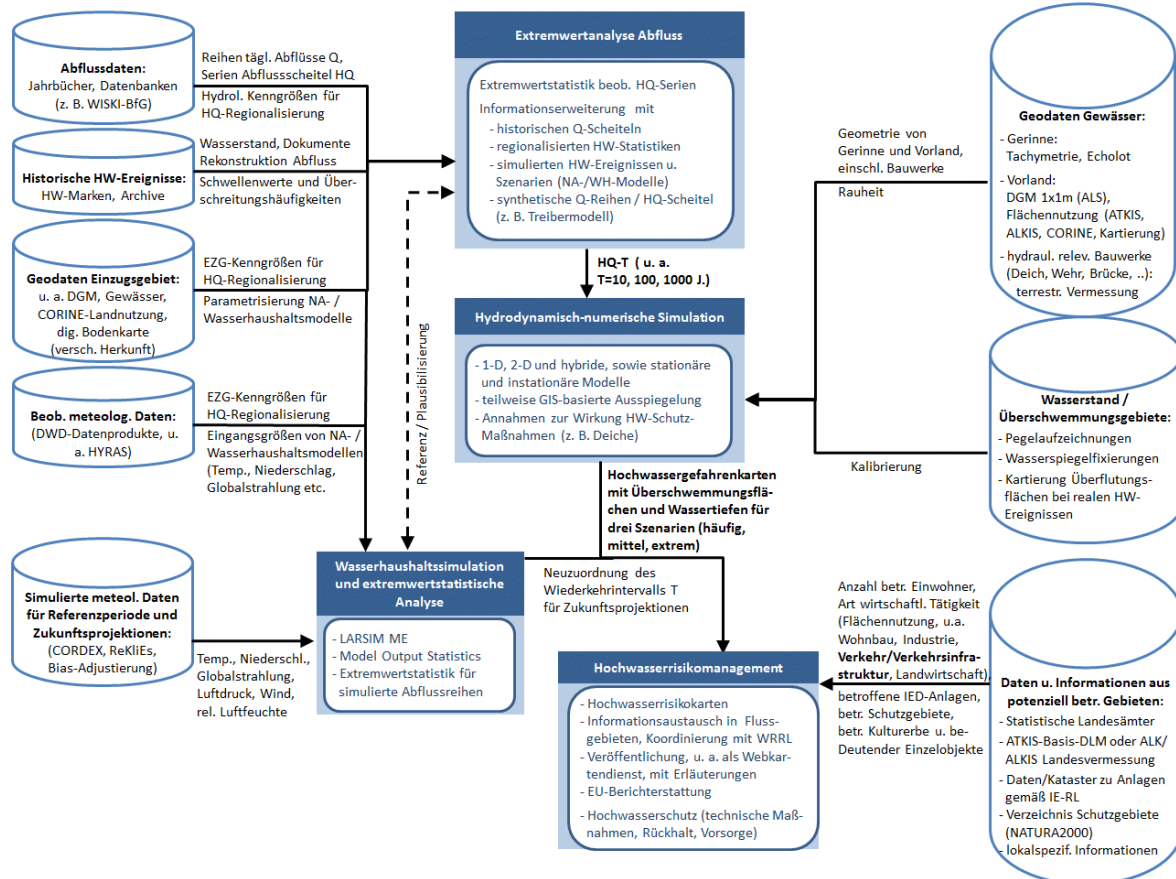


Abbildung 3-12: Technische Umsetzung der Wirkungsweise von „Hochwasser“ auf die Schiene und Straße (HWGK) im Kontext der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der EU. Vergleiche auch LAWA (2018).

3.5.4 Wirkungspfad Entwässerung an den Küsten

Bei Untersuchungen zur Entwässerung an den Küsten muss immer das jeweils betroffene Einzugsgebiet betrachtet werden, da regionale Besonderheiten nicht nur den Abfluss und den Wasserstand der Oberflächengewässer (und damit die Überflutung angrenzender Gebiete), sondern auch den Außenwasserstand und die Dynamik der Küstengewässer bestimmen. So spielt beispielsweise die Lage (Neigung, Höhe ü. NN, etc.) und Beschaffenheit des Gebiets (Boden, Versiegelungsgrad, etc.), wie auch der regionale Meeresspiegelanstieg eine wichtige Rolle. Die Lage des Gebiets entscheidet über die Möglichkeit der Entwässerung (freies Gefälle, Pumpen), die Beschaffenheit darüber, ob auf der Oberfläche stehendes Wasser versickern kann oder abfließen muss. Der Außenwasserstand kontrolliert das Zeitfenster zur Entwässerung. Das heißt ein ansteigender Meeresspiegel wird das Zeitfenster verringern, in dem z. B. über ein freies Gefälle entwässert werden kann, bzw. den Aufwand des Abpumpens erhöhen. Zusätzlich kann eine zeitlich befristete Erhöhung des Außenwasserstands, beispielsweise während einer Sturmflut (siehe Abschnitt 1.)), die Möglichkeit zur Entwässerung einschränken oder im schlimmsten Falle komplett verhindern.

3.5.4.1 Wirkungsketten

Abbildung 3-13 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Wirkungskette auf, die die im vorherigen Absatz beschriebenen klimaseitigen Faktoren berücksichtigt. So ist der Abfluss und Wasserstand der Oberflächengewässer direkt beeinflusst vom Niederschlag sowie dem Wasserstand und der Dynamik der Meere.

Der Niederschlag kann dabei als kurzzeitiges, örtlich begrenztes Ereignis, aufgefasst werden (Starkregen), oder aber als längerfristige und räumlich ausgedehnte Vorfeuchte des Bodens. Der Wasserstand des Meeres steuert die Möglichkeit zur Entwässerung und wird dabei durch die aktuelle Großwetterlage, Starkwind und klimawandelbedingte Prozesse der Temperaturerhöhung (Ausdehnung des Wassers durch erhöhten Wärmeinhalt, Zufluss von Süßwasser durch Abschmelzen der Gletscher) bestimmt. Schäden an bzw. Versagen der Verkehrsinfrastruktur, und damit Behinderungen und Unterbrechungen im Verkehrsablauf, können somit entstehen, wenn die Entwässerung beeinträchtigt ist.

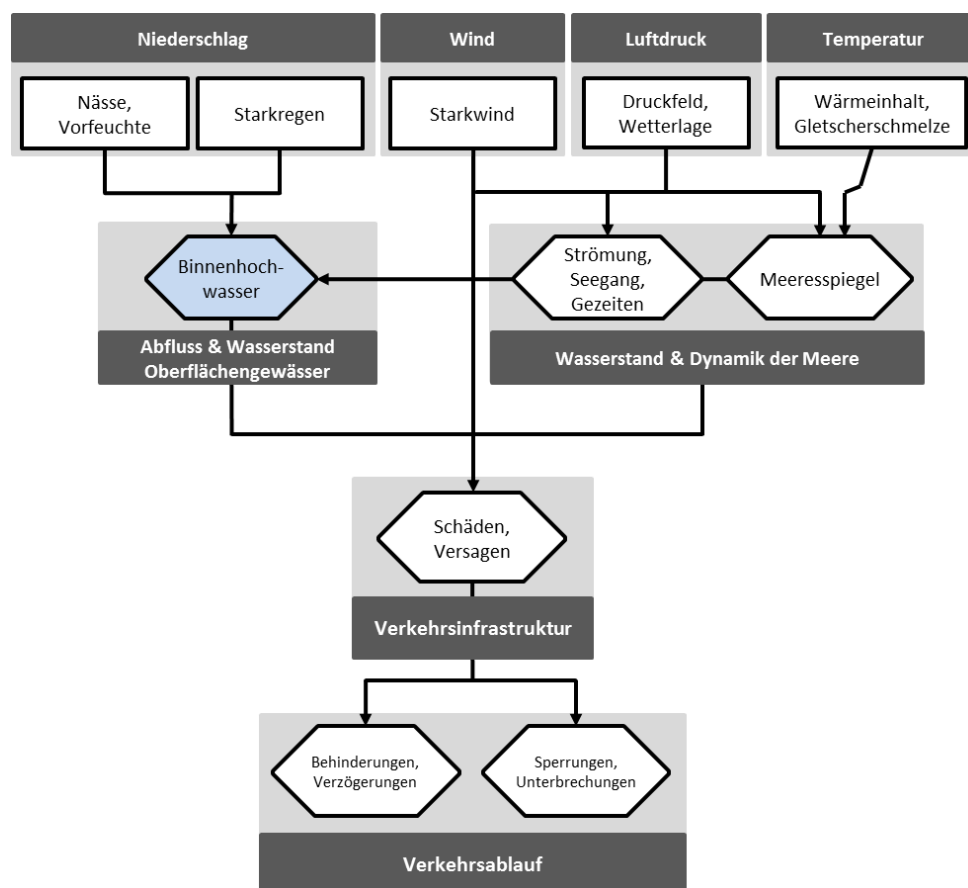


Abbildung 3-13: Vereinfachte Darstellung der Wirkungskette "Entwässerung an den Küsten", angelehnt an den IMA Leitfaden (Buth et al. 2017).

3.5.4.2 Sensitivität

Sensitivitäten ergeben sich klimaseitig aus den Eigenschaften des Meeres (Meerestopografie, Wasseraustausch) und des Hinterlandes (Küstentopografie, Küstenschutz). Ferner stellen infrastrukturelle Bedingungen und Risikomanagement, sowie das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und die Eigenschaften des Verkehrsnetzes (z. B. durch das Vorhandensein von Ausweichmöglichkeiten) wichtige Systemeigenschaften dar (siehe Abbildung 3-14).

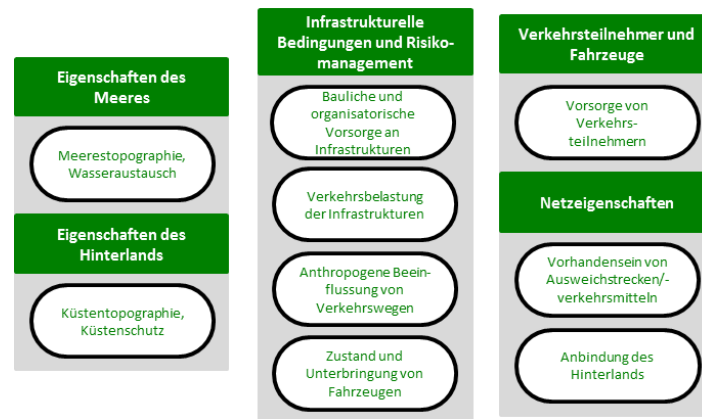


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "Entwässerung an den Küsten".

3.5.4.3 Technische Umsetzung

Abbildung 3-15 zeigt eine mögliche technische Umsetzung für die Entwässerung der Küstengebiete. Zusätzlich findet sich in Tabelle 3-5 eine Übersicht der einzelnen Komponenten des operationellen Ansatzes inklusive der dazugehörigen Literaturangaben. Beispielhaft wurde dieses Schema im Rahmen der Untersuchungen am NOK durchlaufen (siehe Schlussbericht SP-108, (Schade et al. 2020)). Dabei wurden Binnenabfluss und Außenwasserstand mithilfe zweier Ansätze von der BfG im Rahmen eines GDWS Auftrags und dem BSH untersucht (siehe Abschnitt 3.4.1). Beide zielten darauf ab, Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOK zu identifizieren und Häufigkeitsänderungen für die Zukunft abzuleiten.

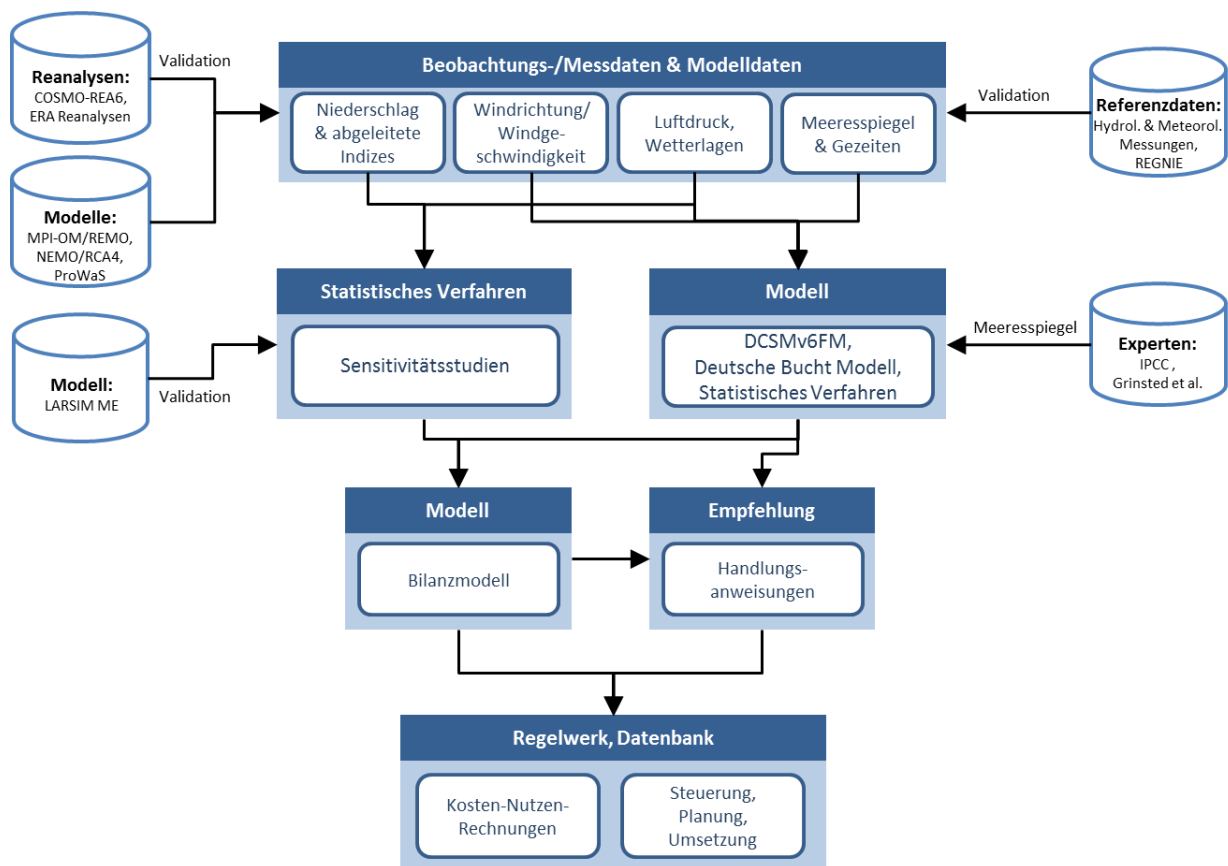


Abbildung 3-15: Technische Umsetzung der Wirkungsweise "Entwässerung an den Küsten" in den Küstengebieten. Beispielhaft wurde das Schema für die Untersuchungen am NOK durchlaufen.

Tabelle 3-5: Übersicht der Komponenten zur technischen Umsetzung „Entwässerung an den Küsten“.

Komponente	Referenz für Dokumentation
IPCC AR5	IPCC (2013)
Meeresspiegel High Impact Szenario	Grinsted et al. (2015)
COSMO-REA6	Bollmeyer et al. (2015)
ERA Reanalysen	Berrisford et al. (2009), Uppala et al. (2005)
MPI-OM/REMO	Bülow et al. (2014) und Referenzen darin; Sein et al. (2015)
EU-CORDEX	Jacob et al. (2014)
ReKliEs-De	Hübener et al. (2017)
Kontinentalschelfmodell	Dutch Continental Shelf Model, Version 6; DCSMv6FM (DFlow-FM-basiert); Zijl et al. (2013); Zijl et al. (2015)
Küstenmodell (Deutsche-Bucht-Modell)	Modellsystem UnTRIM-SediMorph (Casulli und Lang 2004, Malcherek et al. 2005)
Wasserhaushaltsmodell	Modellsystem LARSIM (Bremicker 2000) Modell LARSIM-ME (Wolf-Schumann et al. 2013)

- 1.) Modellansatz BfG: Für das Wasserhaushalts- und Kanalbewirtschaftungsmodell des NOK wurden als Randwerte an den seeseitigen Rändern die Wasserstände in Kiel und Brunsbüttel benötigt. Diese wurden vom BSH aus Messungen oder aus Ergebnissen von Klimamodellsimulationen sowie von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) aus ihren Modellen (DCSMv6FM, Deutsche Bucht Modell) bereitgestellt. Zusätzlich wurden meteorologische Antriebswerte über Land benötigt. Für Betrachtungen der Vergangenheit wurden diese als Rasterdaten vom DWD (*Szenarienbildung*, (Brienen et al. 2020)) geliefert. Ferner wurden Möglichkeiten zur Steuerung der Entwässerung implementiert.
- 2.) Prädiktoren-Ansatz BSH: Die jeweiligen Prädiktoren stammen dabei direkt aus dem Output (regionaler) Klimamodelle und lassen mit Hilfe statistischer Analysen auf beobachtete und zukünftige Veränderungen schließen. Hierfür wurden vom BSH die extremen Wasserstände analysiert und als Randdaten für das Modell der BfG geliefert. Messdaten des Zuflusses in den NOK sind nur sporadisch und nicht flächendeckend vorhanden. Eine Validierung des Zuflusses auf Basis von Beobachtungen war somit nicht möglich. Stattdessen wurden die von der BfG berechneten Zuflüsse verwendet. Die Indizes zur Bestimmung des Zuflusses wurden direkt aus Niederschlagsdaten abgeleitet. Schließlich wurden Zusammenhänge mit der vorherrschenden atmosphärischen Zirkulation mit Hilfe von Wetterlagenanalysen erfasst und untersucht.

Die erzielten Ergebnisse können nun entweder direkt über Handlungsanweisungen in Regelwerke eingehen sowie zur Planung und Umsetzung genutzt werden, oder aber über ein weiteres Modellsystem näher untersucht und optimiert werden. Beide Verfahren wurden am NOK genutzt: Die WSV hat Ergebnisse zum Meeresspiegelanstieg direkt zur Planung und Umsetzung der neuen Schleuse in Brunsbüttel verwendet, aber auch weiterführende Untersuchungen der BfG zur Steuerung des NOK in Auftrag gegeben.

3.5.5 Wirkungspfad Sturmflut

Wenn es zu Sturmfluten kommt, spielen verschiedene Faktoren sowie deren zeitliches Aufeinandertreffen eine entscheidende Rolle (vgl. 3.4.2).

3.5.5.1 Wirkungsketten

Die folgende Wirkungskette (Abbildung 3-16) beschreibt die Wirkung der verschiedenen Parameter sowie deren Zusammenwirken in Bezug auf Sturmfluten. Wind kann in zweierlei Hinsicht zu Schäden beitragen. Zum einen können Starkwindereignisse direkte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur hervorrufen (siehe auch Ergebnisse des Scherpunkts *Sturmgefahren*, Bott et al. (2020)). Zum anderen beeinflusst der Wind die

Wasserstände in der Nordsee bzw. in den Ästuaren durch Windstau und Seegang. Ein Anstieg der Temperatur und die damit verbundene thermische Ausdehnung des Wassers sowie ein Zufluss von Süßwasser durch das Abschmelzen der Gletscher führen zu einem angehobenen Meeresspiegel. Die klimawandelbedingte Änderung des Wasserstands sowie der Dynamik der Meere kann zu einem verstärkten Wirkungsmechanismus von Sturmfluten führen. Daraus resultieren Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, die bis zum Versagen führen können. Für den Verkehrsablauf kann dies Sperrungen, Unterbrechungen oder Verzögerungen bedeuten.

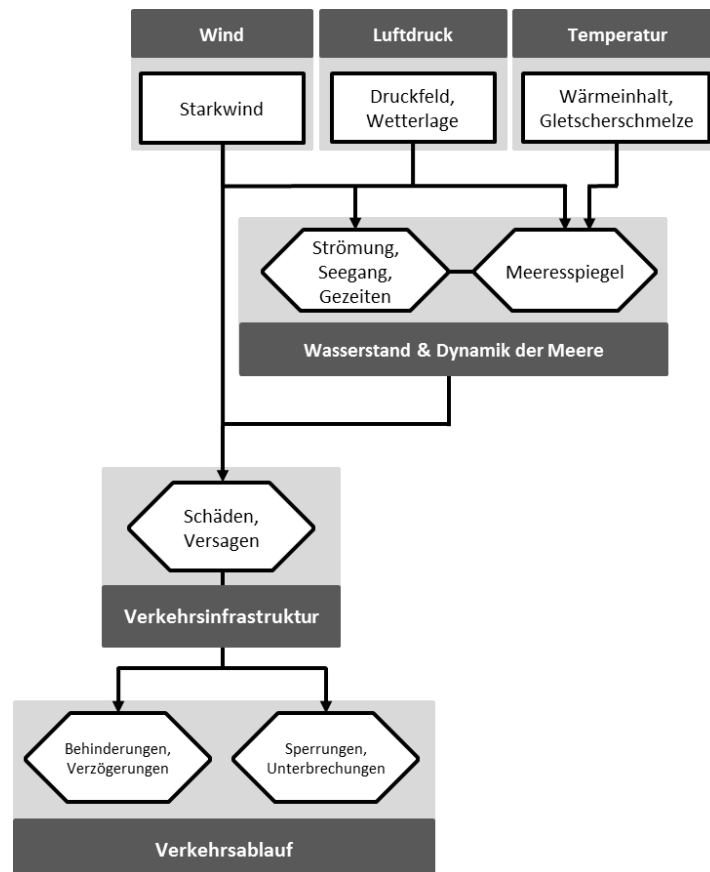


Abbildung 3-16: Vereinfachte Darstellung der Wirkungskette "Sturmflut", angelehnt an Buth et al. (2017).

3.5.5.2 Sensitivität

Die Sensitivitäten (vgl. Abbildung 3-17) bestimmen sich hauptsächlich aus den Eigenschaften des Meeres sowie den Eigenschaften des Hinterlandes. Hierzu zählen die Topografie des Meeres und der Küste sowie Küstenschutzmaßnahmen. Weitere Systemeigenschaften ergeben sich aus infrastrukturellen Bedingungen sowie dem Risikomanagement. Beispielsweise seien hierbei bauliche und organisatorische Vorsorge an Infrastrukturen sowie die anthropogene Beeinflussung von Verkehrswegen genannt. Die Verkehrsnetzeigenschaften (z. B. die Anbindung des Hinterlandes) sowie das Verhalten der Verkehrsteilnehmer spielen ebenfalls eine wichtige Rolle.

3.5.5.3 Technische Umsetzung

Abbildung 3-18 zeigt eine mögliche technische Umsetzung für die Wirkungskette Sturmfluten. Es weist eine ähnliche Struktur wie die Wirkungskette auf, sodass die Herkunft einzelner Bausteine nachvollzogen werden kann. Das gezeigte Schema ist eine mögliche Grundlage für eine zukünftige Vorgehensweise im DAS-Basisdienst. Weitere Infos zu den einzelnen Komponenten des Bearbeitungsschemas sind in Tabelle 3-5 enthalten.

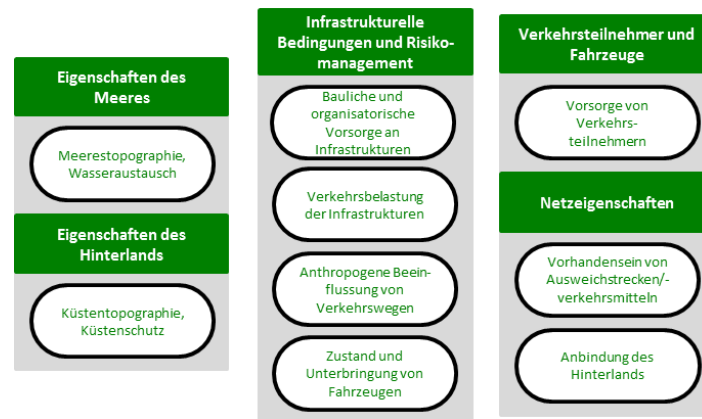


Abbildung 3-17: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "Sturmflut".

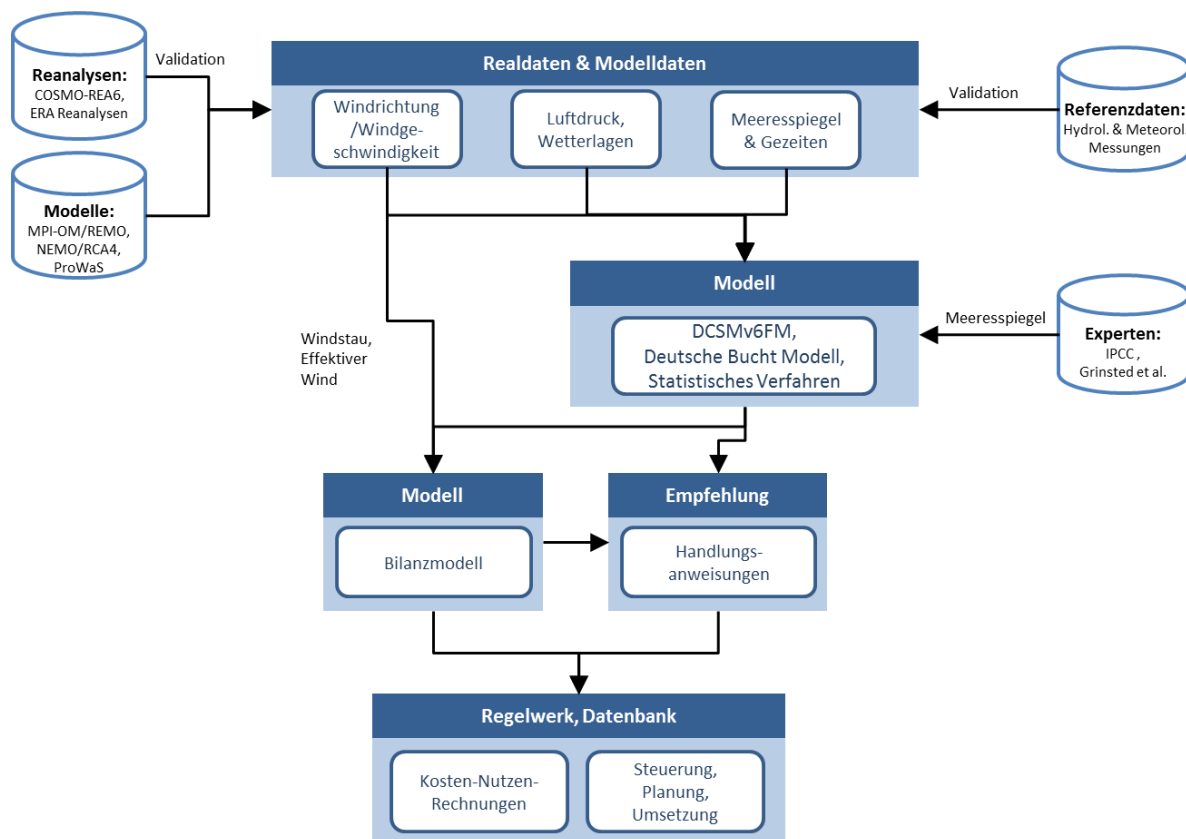


Abbildung 3-18: Technische Umsetzung der Wirkungsweise "Sturmflut" für die Untersuchungen in den Küstengebieten (vgl. Tabelle 5).

Verschiedene Reanalysen, Modelle aus übergeschalteter Stufe sowie Expertenwissen liefern Randbedingungen für die Faktoren Wind, Luftdruck sowie Meeresspiegel und Gezeiten. Referenzdaten aus hydrologischen und meteorologischen Messungen werden für die Validierung der Modelle herangezogen. Die mithilfe der Modelle erarbeiteten Daten können in einer nachgeschalteten Stufe von Bilanzmodellen weiter aggregiert werden. Sie können jedoch auch nach eingängiger Prüfung direkt in Empfehlungen und Handlungsanweisungen genutzt werden, sowie zu Anpassungen vorhandener Regelwerke führen.

4 Ergebnisse der Arbeitsschwerpunkte

Nach der Darlegung der theoretischen Grundlagen und der in der ersten Phase mit BMVI-Expertennetzwerk realisierten Wirkungsketten werden in diesem Kapitel nun im Detail die Arbeitsergebnisse zum Bereich Hochwasser dargestellt.

4.1 Starkniederschlag

Im Folgenden werden die gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklungen des Starkniederschlags (Abschnitt 4.1.1) dargestellt. Zusätzlich werden mit der Blue-Spot Analyse im Bereich Straße (Abschnitt 4.1.2) und der Gleisentwässerung im Bereich Schiene (Abschnitt 4.1.3) zwei Aspekte der Auswirkung von Starkniederschlägen betrachtet.

4.1.1 Indizes & Kernschätzer

4.1.1.1 Mittlerer Niederschlag – Beobachtungszeitraum und rezente Trends

In der Regel sind für Flusshochwasser großflächige, lang andauernde und intensive Niederschläge verantwortlich. Jedoch können auch weitere Faktoren, wie etwa eine hohe Vorfeuchte des Bodens die Entstehung von Hochwasserereignissen begünstigen (Schröter et al. 2015). Dies trifft insbesondere auf große Einzugsgebiete zu, wo die Vorfeuchte des Bodens eine wichtige Bedeutung besitzt (Woldemeskel und Sharma 2016). Somit ist für die Auswertung hochwasserrelevanter Faktoren im Klimawandel auch zwingend die Veränderung der mittleren Niederschlagsverhältnisse zu berücksichtigen.

Grundsätzlich verteilt sich der **Jahresniederschlag** über Deutschland relativ gleichmäßig auf die einzelnen Jahreszeiten. So betrug die **durchschnittliche Niederschlagsmenge** im Flächenmittel über Deutschland im Zeitraum von 1971–2000 rund 774 mm. Davon entfielen etwa 181 mm auf den Winter und 231 mm auf den Sommer sowie 176 bzw. 188 mm auf die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst. Während vor allem in den westlichen Mittelgebirgen der meiste Niederschlag in den Wintermonaten fällt, tritt im Süden, Osten und an den Küsten der meiste Niederschlag im Sommer auf (siehe Schlussbericht *Szenarienbildung* Bericht, Brienens et al. (2020)).

Die Auswertungen für die Temperatur (siehe Abbildung 4-1 oben) im Zeitraum von 1951–2015 zeigen im Mittel über Deutschland, aber auch regional und jahreszeitlich, einen signifikant ansteigenden Jahrestrend (+1,6 °C). Die Entwicklung für den Niederschlag in diesem Zeitraum ist deutlich heterogener und bis auf wenige Ausnahmen liegen keine statistisch signifikanten Trends vor. Für den **mittleren jährlichen Niederschlag** lässt sich im Zeitraum von 1951–2015 im Flächenmittel für Deutschland eine leichte Zunahme beobachten (ca. +4,5 %) (Abbildung 4-1 unten). Im Flächenmittel traten dabei einzelne Jahre auf, die mehr bzw. weniger als 20 % Niederschlag gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 aufwiesen. Details zu den beobachtenden Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen finden sich im Schlussbericht des SP-101 *Szenarienbildung* (Brienens et al. 2020).

4.1.1.2 Mittlerer Niederschlag – Klimaprojektionen und zukünftige Trends

Für den Projektionszeitraum ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und des Klimaszenarios, generell von einer weiteren Zunahme der **durchschnittlichen Niederschlagsmengen** auszugehen (*nabe Zukunft*: -1,5 % bis +10 %; *ferne Zukunft*: -3,8 % bis +15 %). Dabei ist das Trendverhalten aber in den Jahreszeiten durchaus unterschiedlich. Abbildung 4-2 zeigt das 30-jährige gleitende Mittel der **mittleren Niederschlagssumme** für Winter (links) und Sommer (rechts) im Flächenmittel über Deutschland für das Klimamodellensemble und die einzelnen Klimaszenarien von 1951–2100. Im Gegensatz zur Beobachtungsperiode (1951–2005) werden für den Klimaprojektionszeitraum (2006–2100)

z. T. statistisch signifikante Trends projiziert. So liegt für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* im Winter (Sommer) ein statistisch signifikant ansteigender (fallender) Trend des **mittleren Niederschlags** für den Zeitraum 2006–2100 vor (+5 mm bzw. -2,7 mm pro Dekade).

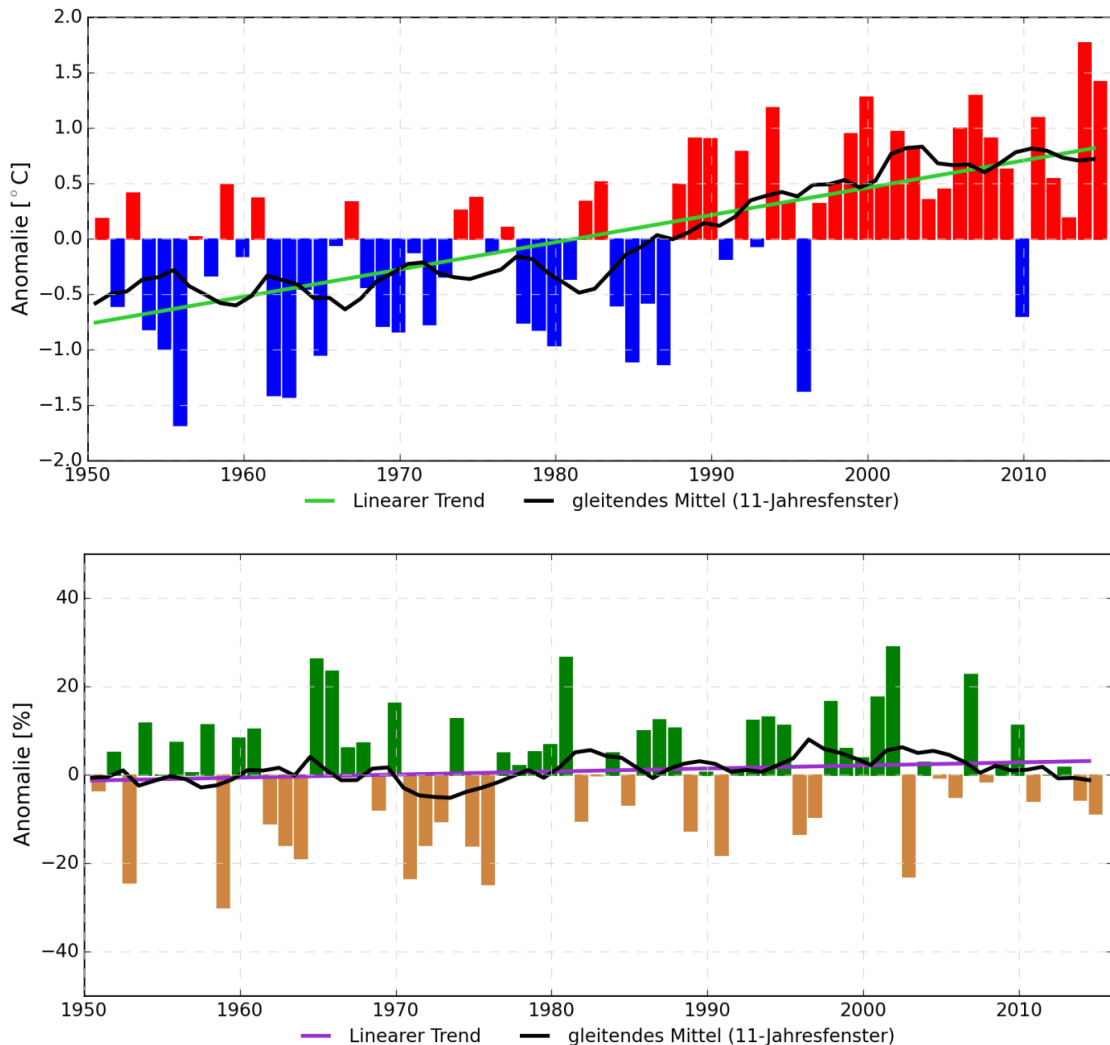


Abbildung 4-1: Mittlere Abweichungen der Temperatur (oben) und des Niederschlags (unten) über Deutschland vom *Bezugszeitraum* (1971–2000) auf Basis von HYRAS-2015. Neben den farblichen differenzierten positiven und negativen Abweichungen sind der lineare Trend und ein 11-jährig gleitendes Mittel dargestellt.

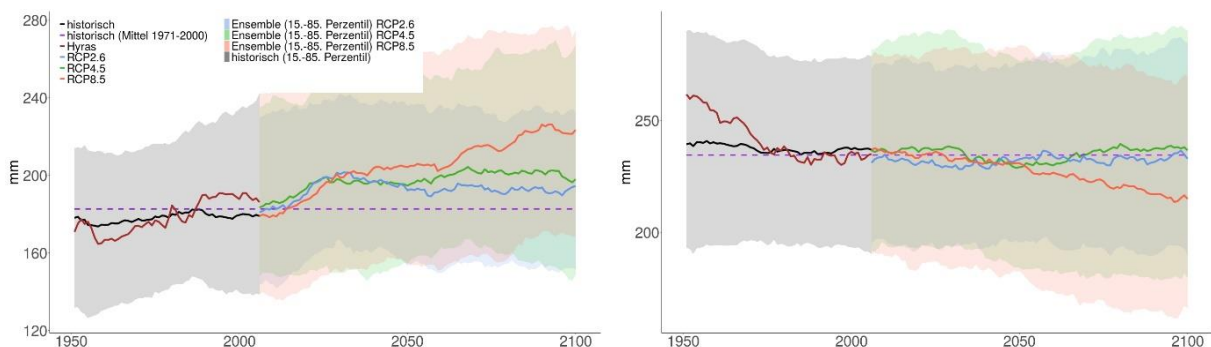


Abbildung 4-2: Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für die mittlere Niederschlagssumme im Winter (links) und Sommer (rechts) für das Klimamodellensemble und die Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland. Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den *Bezugszeitraum*.

Aufgrund der räumlichen Heterogenität der Niederschläge ist eine regionale Betrachtung der Änderungssignale sinnvoll. Abbildung 4-3 zeigt die relative Änderung des **mittleren Jahresniederschlags** über Deutschland für das *Weiter-wie-bisber-Szenario* in der *fernen Zukunft* (Mitte) sowie die monatlichen Änderungen über den Jahresverlauf an neun ausgewählten Standorten. Dabei wurden 3x3 Gitterpunkte der Klimaprojektionsdaten um den Standort gemittelt. Grundsätzlich wird für alle dargestellten Standorte eine Veränderung des Jahresgangs des mittleren Niederschlags durch das Klimamodellensemble projiziert. So weisen alle Standorte fast durchgehend eine Tendenz zu mehr Niederschlag in den Monaten Januar bis Juni sowie Oktober bis Dezember für das 50. Perzentil des Klimamodellensembles auf. Vor allem im Juli und August werden häufig Abnahmen des Niederschlags projiziert. Hierbei zeigen alle Klimaszenarien eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Änderung des Jahresgangs. Am schwächsten fällt diese Änderung für das *Klimaschutzszenario* und am stärksten für das *Weiter-wie-bisber-Szenario* aus. Ebenfalls ist der Jahresgang an den südlichen und westlichen Standorten ausgeprägter als an den östlichen und nördlichen, was überwiegend an einer stärkeren Abnahme der **mittleren Niederschläge** in den Sommermonaten liegt.

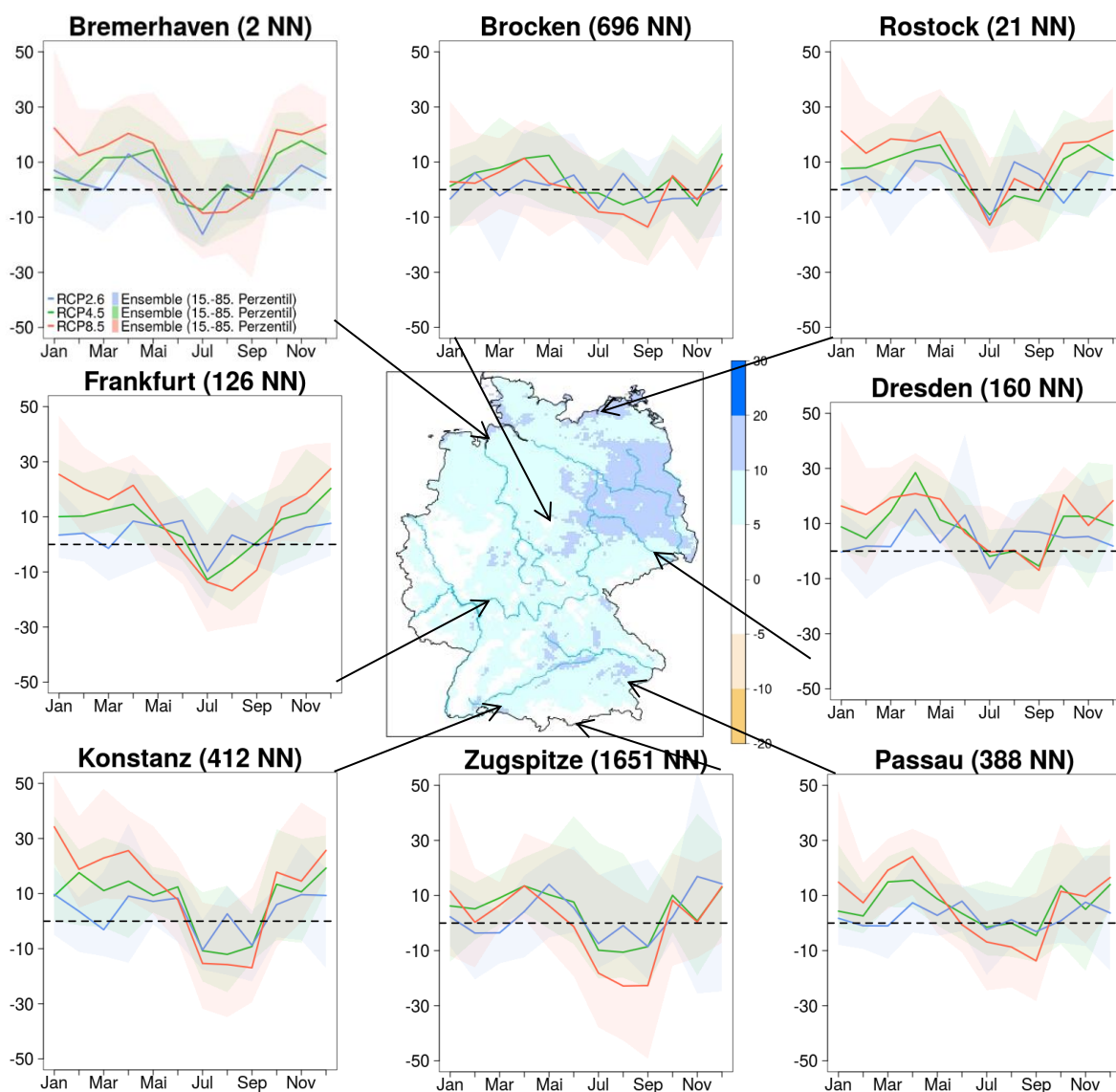


Abbildung 4-3: Karte in der Mitte: Ensemble Median der Änderung des mittleren Niederschlags [%] für das *Weiter-wie-bisber-Szenario* und den Zeitraum 2071–2100. Umgebende Grafiken zeigen den mittleren Jahresgang der Änderung des mittleren Niederschlags aller Klimaszenarien im Zeitraum 2071–2100. Linien repräsentieren die Änderung des 50. Perzentils, schraffierte Bereiche zeigen die untere und obere Bandbreite des Ensembles (15 bis 85. Perzentil). Die Ergebnisse basieren je auf dem Mittelwert der nächsten 3 x 3 Gitterzellen des Standorts.

Um für die im Folgenden untersuchten Flussgebiete einen Überblick zu den beobachteten Trends für Temperatur und mittleren Niederschlag zu geben, sind die Ergebnisse für die verschiedenen Szenarien und Bezugszeiträume in Tabelle 4-1 pro Flusseinzugsgebiet zusammengefasst. Auch hierbei zeigt sich in allen Flusseinzugsgebieten die weiter deutlich zunehmende Temperatur von 0,5-2,5 °C je nach Szenario bis Mitte des Jahrhunderts und bis Ende des Jahrhunderts eine Spanne von 1-2 °C im *Klimaschutzszenario* bis hin zu 5,5 °C in einzelnen Einzugsgebieten im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dabei gibt es keine größeren Unterschiede zwischen Winter- und Sommerhalbjahr. Im Gegensatz dazu gibt es beim Niederschlag deutliche Jahreszeitenunterschiede zwischen Winter- und Sommerhalbjahr. Im Sommer sind Änderungssignale über die meisten Flussgebiete und auch Szenarien nicht signifikant und ohne klare Aussage ob Zu- oder Abnahmen zu erwarten sind. Allein am Rhein sind signifikante Abnahmen bis -25 % beim *Weiter-wie-bisher-Szenario* zu verzeichnen. Im Winter hingegen sind teils deutliche Niederschlagszunahmen in den Flussgebieten von bis zu maximal +25 % zur Mitte des Jahrhunderts und maximal +35 % bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten. Dabei zeigt sich, dass unter dem *Klimaschutzszenario* diese Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts verringert werden könnten. Für detaillierte Informationen für die hydrometeorologischen Rahmenbedingungen sei auf den Schlussbericht *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* verwiesen (Nilson et al. 2020).

Tabelle 4-1: Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge in den Flusseinzugsgebieten für die *nabe* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000) fürs Sommer- und Winterhalbjahr.

		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		<i>Klimaschutzszenario</i>		<i>moderates Szenario</i>		<i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
		Nahe Zukunft (2031–2060)	Ferne Zukunft (2071–2100)	Nahe Zukunft (2031–2060)	Ferne Zukunft (2071–2100)	Nahe Zukunft (2031–2060)	Ferne Zukunft (2071–2100)
Lufttemperatur Sommer	Rhein	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5,5°C
	Donau	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2°C	+2°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +6°C
	Elbe	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3°C bis +5°C
	Weser	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +4,5°C
	Ems	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +4,5°C
Lufttemperatur Winter	Rhein	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
	Donau	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +3°C	+4°C bis +5°C
	Elbe	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
	Weser	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +4,5°C
	Ems	+1°C bis +1,5°C	+1°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3°C bis +4,5°C
Niederschlag Sommer	Rhein	-10% bis +5%	-10% bis +10%	-15% bis +5%	-15% bis +10%	-10% bis +5%	-25% bis 0%
	Donau	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-20% bis +5%
	Elbe	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +15%	-10% bis +10%	-15% bis +10%
	Weser	-10% bis +5%	-10% bis +10%	-10% bis +10%	-10% bis +15%	-10% bis +10%	-15% bis +10%
	Ems	-15% bis +5%	-10% bis +10%	-15% bis +10%	-15% bis +10%	-10% bis +10%	-20% bis +5%
Niederschlag Winter	Rhein	0% bis +15%	-5% bis +15%	+5% bis +15%	0% bis +20%	0% bis +20%	+5% bis +30%
	Donau	0% bis +20%	-5% bis +30%	0% bis +20%	+5% bis +25%	0% bis +25%	+10% bis +35%
	Elbe	0% bis +15%	-5% bis +15%	+5% bis +15%	+5% bis +20%	+5% bis +25%	+10% bis +35%
	Weser	0% bis +10%	-5% bis +10%	0% bis +15%	0% bis +15%	0% bis +25%	+5% bis +30%
	Ems	0% bis +10%	-5% bis +10%	0% bis +15%	0% bis +15%	0% bis +20%	+10% bis +25%

Tendenz zur Zunahme
 Tendenz zur Abnahme
 uneinheitliches Änderungssignal

4.1.1.3 Starkniederschlag – Beobachtungszeitraum und rezente Trends

Neben der Änderung der **durchschnittlichen Niederschlagsmenge** sind für den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur insbesondere auch Extreme des Niederschlags von großer Bedeutung, da sie erhebliches Schadenspotenzial besitzen. So können in Deutschland auf kurzen Zeitskalen erhebliche Niederschlagsmengen fallen, die sich im klimatologischen Mittel nur im Laufe von mehreren Monaten aufsummieren. So wurde z. B. in Zinnwald (Erzgebirge) am 13. August 2002 mit 312 mm die höchste je gemessene 24-stündige Niederschlagsmenge in Deutschland registriert, was anschließend das „Jahrhunderthochwasser“ an der Elbe zur Folge hatte. Am 29. Juli 2014 wurde in Münster/Westfalen mit 292 mm Niederschlag eine ähnlich hohe Summe gemessen, die sich allerdings während einer Abfolge von konvektiven Starkniederschlägen in nur sieben Stunden aufsummierte. Um Starkniederschläge aus der aktuellen Generation von regionalen Klimamodellensembles statistisch robust für einzelne Gitterpunkte abzuleiten, hat sich ein Schwellenwert von 20 mm Niederschlag pro Tag bewährt. Diese Tage – im Weiteren auch als **Starkniederschlagstage**¹³ bezeichnet – weisen im Gegensatz zum **mittleren Niederschlag** deutlich größere Unterschiede zwischen den einzelnen Jahreszeiten auf. Von 4,4 Tagen pro Jahr im Flächenmittel über Deutschland entfallen 0,7 Tage auf den Winter, aber mit 1,8 Tagen mehr als das Doppelte auf den Sommer. Im Frühling und Herbst treten 0,8 bzw. 1,1 Tage im Mittel zwischen 1971–2000 auf. Auch treten – analog zur **mittleren Niederschlagsmenge** – die meisten **Tage mit Starkniederschlag** in den westlichen Mittelgebirgen in den Wintermonaten auf, während in den restlichen Regionen Deutschlands im Sommer häufiger **Tage mit Starkniederschlag** auftreten (Abbildung 4-4).

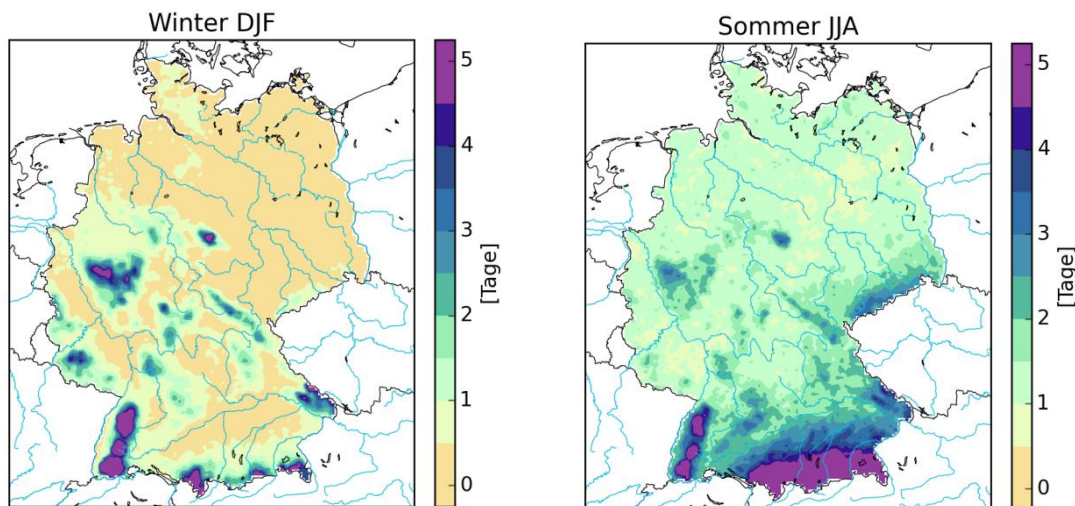


Abbildung 4-4: Anzahl der Tage mit Niederschlag > 20 mm (1971–2000) im Winter (DJF; links) und Sommer (JJA; rechts) über Deutschland.

Die meisten **Tage mit Starkniederschlag** pro Jahr treten im langjährigen Mittel (1971–2000) mit bis zu 40 Tagen pro Jahr in den Alpen auf. In den Mittelgebirgen besteht eine große Bandbreite zwischen 5 Tagen und bis ca. 30 Tage im Schwarzwald. Im Flachland liegt die Anzahl pro Jahr dagegen verbreitet bei weniger als 5 Tagen und im Nordosten sowie einzelnen Flusstälern und Beckenlagen sogar unter 2 Tagen pro Jahr. Mit einer Zunahme von +0,05 Tage/Dekade ist der Herbst die einzige Jahreszeit mit einem statistisch signifikanten Trend im Beobachtungszeitraum von 1951–2015. Im Winter und Frühling liegt mit jeweils +0,03 Tagen/Dekade ebenfalls ein ansteigender Trend vor, während im Sommer die Anzahl an **Tagen mit Starkniederschlägen** sich praktisch nicht ändert (-0,001 Tage/Dekade).

Neben dem Anstieg der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen zählt zu den weiteren wichtigen Indikatoren, die Änderung der Intensität solcher Ereignisse. Im Beobachtungszeitraum zeigen sich für die

¹³ Als Starkniederschlagstage sind Tage mit einer Niederschlagssumme von mindestens 20 mm definiert.

Niederschlagsmengen an Starkniederschlagstagen¹⁴ bisher insgesamt geringe Änderungen. Nur im Winter und Frühling ist eine leichte Zunahme von ca. 2–3 % zu verzeichnen. Für die **maximale Tagesniederschlagshöhe** ergibt sich im Winter mit knapp 16 % Zunahme im Beobachtungszeitraum jedoch schon ein deutlicheres Signal in Richtung intensivere Niederschlagsereignisse. Auch wird bereits im Beobachtungszeitraum sichtbar, dass sich ein immer größerer Anteil am Gesamtniederschlag auf wenige niederschlagsreiche Tage konzentriert. So steigt für den Winter im Beobachtungszeitraum der Anteil am Gesamtniederschlag von **sehr feuchten Tagen**¹⁵ von ca. 30 % auf 35 % und von **extrem feuchten Tagen**¹⁶ von ca. 8,5 % auf etwa 11 %. Im Frühling und Herbst ist der Trend ähnlich hoch, im Sommer gab es bislang jedoch kaum eine Änderung.

Auch länger andauernde Niederschlagsereignisse sind von Bedeutung, da sie zu Vernässung und damit wassergesättigten Böden führen, was wiederum die Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen erhöht. Im Beobachtungszeitraum zeigen die Auswertungen zwar keine Änderung für die Länge der maximalen **Feuchteperioden**¹⁷, jedoch treten im Winter (+30 %), Frühling (+61 %) und Herbst (+35 %) häufiger Ereignisse mit **Dauerregen**¹⁸ auf. Einzig der Sommer zeigt eine Abnahme (-14 %). Auch die **maximale 5-Tagesniederschlagshöhe** zeigt mit Ausnahme des Sommers einen positiven Trend zu intensiveren Niederschlägen über mehrere Tage hinweg. Dieser positive Trend ist von ähnlicher Größenordnung wie der ansteigende Trend der **maximalen Tagesniederschlagshöhe**.

4.1.1.4 Starkniederschlag – Klimaprojektionen und zukünftige Trends

Für den Projektionszeitraum ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer deutlichen Zunahme der Anzahl an **Tagen mit Starkniederschlag** zu rechnen (*nabe Zukunft*: +0,2 % bis +37 %; *ferne Zukunft*: -2 % bis +63 %). Die deutlichste Zunahme wird dabei mit bis ca. +65 % (*nabe Zukunft*) und +101 % bis +128 % (*ferne Zukunft*) im Frühling bzw. Winter projiziert. Auffällig ist, dass in der *nahen Zukunft* der Unterschied zwischen den einzelnen Klimaszenarien eher gering ist, während er in der *fernen Zukunft* im Winter, Frühling und Herbst deutlich ausgeprägter ist (Abbildung 4-5, unten). Abbildung 4-5, links oben (Winter) und Abbildung 4-5, rechts oben (Sommer) zeigen das 30-jährige gleitende Mittel der Anzahl an **Starkniederschlagstagen** im Flächenmittel über Deutschland für das Klimamodellensemble und die einzelnen Klimaszenarien von 1951–2100. Im Projektionszeitraum (2006-2100) werden für das 50. Perzentil des Klimamodellensembles für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* ausnahmslos signifikant ansteigende Trends projiziert. Dies trifft ebenfalls mit Ausnahme des Sommers auf das *moderate Szenario* zu, während beim *Klimaschutzszenario* für die Jahreszeit sowie den gesamten Jahresverlauf keine signifikanten Trends projiziert werden. Am stärksten ist der Trend hierbei für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* im Winter mit einem Anstieg von +0,06 Tagen/Dekade.

Für **Niederschlagsmengen an Starkniederschlagstagen** ist im Gegensatz zum Beobachtungszeitraum für die Zukunft von einem deutlichen Anstieg auszugehen. Die stärkste Zunahme wird dabei für den Sommer (*ferne Zukunft* und *Weiter-wie-bisher-Szenario*: +1,1 % bis +21 %) projiziert, wo für die Änderung der **Starkniederschlagstage** die geringste Zunahme im Vergleich zu den restlichen Jahreszeiten projiziert wird. Auch für die **maximale Tagesniederschlagshöhe** wird für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine deutliche Zunahme von ca. 70 mm im Beobachtungszeitraum auf 66-115 mm in der *nahen Zukunft* und 73-134 mm in der *fernen Zukunft* projiziert. Der Anteil am Gesamtniederschlag von **sehr feuchten** und **extrem feuchten Tagen**, der bereits in der Beobachtungsperiode zugenommen hat, wird sich in der *nahen* und *fernen Zukunft* weiter deutlich erhöhen, wobei auch im Gegensatz zur Beobachtungsperiode im Sommer eine ähnlich starke Zunahme wie für die restlichen Jahreszeiten durch das Klimamodellensemble gezeigt wird. Für **sehr**

¹⁴ Es wird die mittlere Niederschlagssumme der Tage mit mindestens 20 mm Tagesniederschlagshöhe ausgewertet.

¹⁵ Sehr feuchte Tage beschreiben Tage mit Niederschlägen oberhalb des 95. Perzentils (abgeleitet im *Bezugszeitraum*)

¹⁶ Sehr feuchte Tage beschreiben Tage mit Niederschlägen oberhalb des 99. Perzentils (abgeleitet im *Bezugszeitraum*)

¹⁷ Untersucht wird die maximale Andauer von Feuchteperioden – sprich einer ununterbrochenen Folge von Tagen mit einer Niederschlagssumme von mehr als 1 mm.

¹⁸ Unter Dauerregen werden Ereignisse mit mindestens 40 mm innerhalb von 72 h verstanden.

feuchte Tage erhöht sich der Anteil am Gesamtniederschlag somit in der *fernen Zukunft* unter dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* im Jahresverlauf auf 43,2 % bis 48,8 % und für **extrem feuchte Tage** auf 16,3 % bis 21,8 %. Auch für das *Klimaschutzszenario* ist mit einer merklichen Zunahme des Anteils am Gesamtniederschlag an diesen Tagen auszugehen.

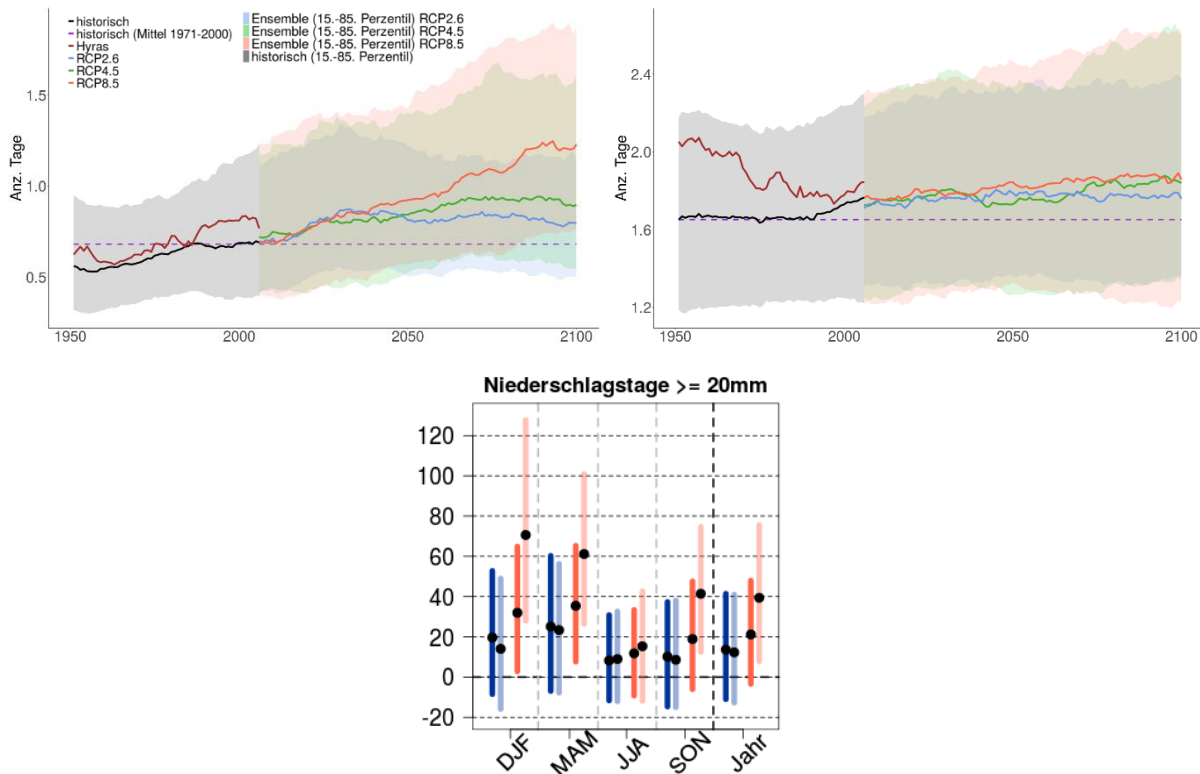


Abbildung 4-5: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel; in Prozent) von Tagen mit Starkniederschlag (unten) für die *nabe* (dunkler Farbton) und die *ferne Zukunft* (heller Farbton) im Vergleich zum *Bezugszeitraum* unter Verwendung des *Klimaschutzszenarios* (blau) und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter [(DJF), Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON])) und das Jahr sowie die Zeitreihe (1951–2010; 30-jähriges gleitendes Mittel) des Deutschlandmittels für die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag im Winter (oben links) und Sommer (oben rechts) für das Klimamodellensemble und die Beobachtungsdaten (HYRAS-PR) im Deutschlandmittel. Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den *Bezugszeitraum*.

Die Länge der maximalen **Feuchteperiode** sowie die Häufigkeit von **Feuchteperioden** über mehrere Tage ändert sich zwar auch in der Zukunft kaum, aber die Anzahl der Ereignisse mit **Dauerregen** setzt im 21. Jahrhundert den in der Beobachtungsperiode begonnene Trend weiter deutlich fort, mit dem Unterschied, dass auch für den Sommer eine Zunahme der Ereignisse in der *naben* und *fernen Zukunft* projiziert wird. Die stärkste Zunahme soll jedoch im Winter und Frühling mit +23 % bis +140 % bzw. +27 % bis +145 % in der *fernen Zukunft* und der Bandbreite des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* stattfinden. Für das *Klimaschutzszenario* sind die Zunahmen dagegen für alle Jahreszeiten deutlich geringer. Auch die **maximale 5-Tagesniederschlagssumme** steigt zukünftig von im Mittel 113 mm auf Werte zwischen 100–167 mm (*nabe Zukunft*) sowie 101–185 mm (*ferne Zukunft*) an, wobei im Gegensatz zur Beobachtungsperiode die Zunahme der **maximalen Tagesniederschlagshöhe** etwas stärker projiziert wird als die **maximale 5-Tagesniederschlagssumme**.

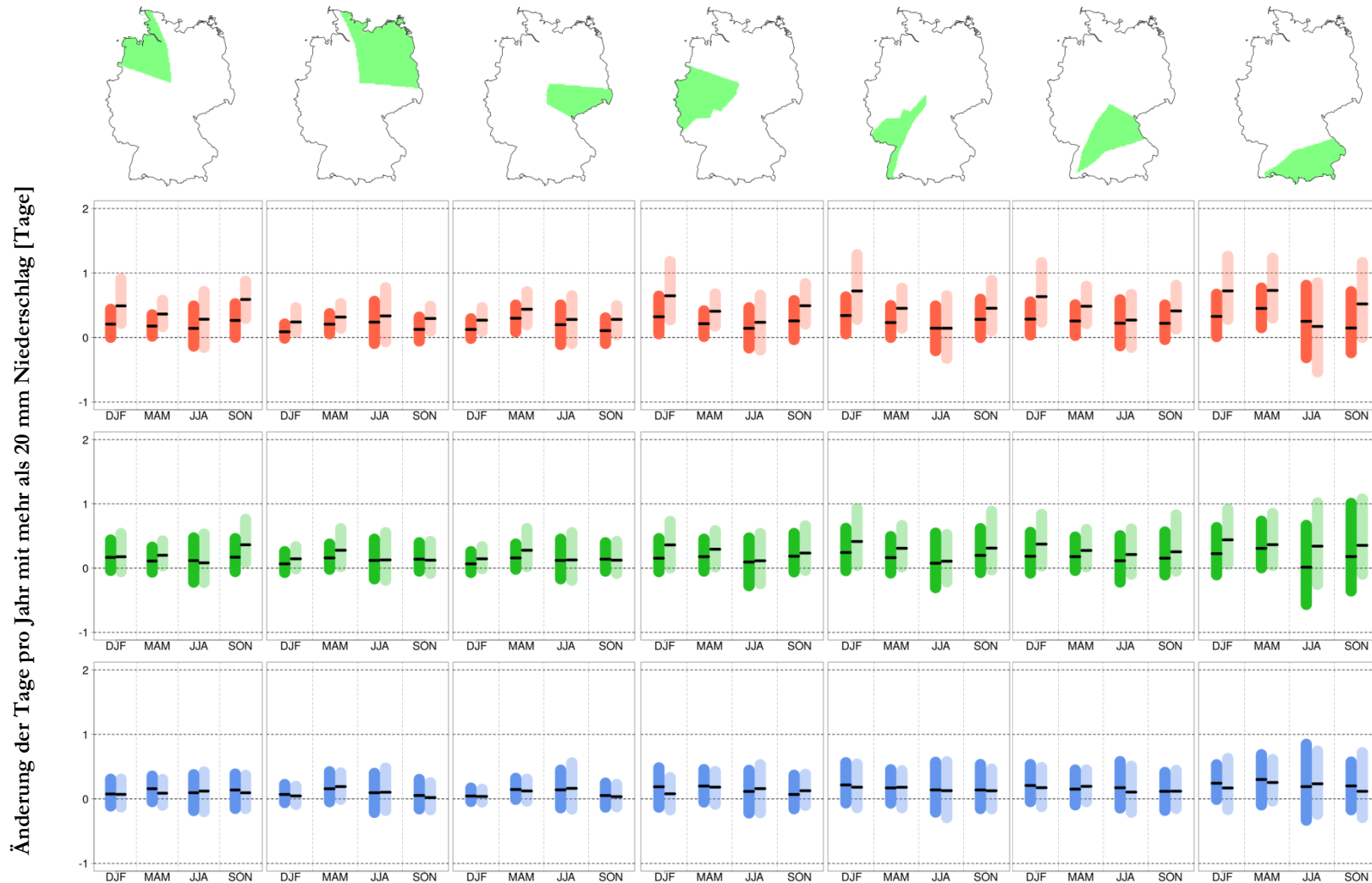


Abbildung 4-6: Projizierte Klimaänderung: Anzahl der Tage mit Starkniederschlag für Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) in den Regionen Nordseeküste, Ostseeküste, Ostdeutschland, Westdeutschland, Südwestdeutschland, Süddeutschland und Alpenvorland. Projektionen für Mittelwerte der Zeiträume 2031–2060 (dunkler Farbton) und 2071–2100 (heller Farbton) im Vergleich zum *Bezugszeitraum* 1971–2000. Drei Klimaszenarien werden berücksichtigt: *Weiterwiesiger* (oben; rot), *moderat* (Mitte; grün) und *Klimaschutz* (unten; blau). Die Unter- und Obergrenze der Balken repräsentieren das 15. bzw. 85. Perzentil des Klimamodellensembles. Die mittlere Linie (schwarz) steht für den Median des Ensembles.

Regionale Veränderungen der Anzahl an **Starkniederschlagstagen** für die *nabe* und *ferne Zukunft* sind in Abbildung 4-6 zu sehen. Es fällt auf, dass für das jeweilige 50. Perzentil der Klimamodellensembles der drei betrachteten Klimaszenarien für alle ausgewerteten Regionen ein Anstieg der **Starkniederschlagstage** gezeigt wird, sowohl in der *fernen*, als auch in der *naben Zukunft*. Dies kann jedoch kleinräumig auch anders ausfallen (nicht gezeigt; weitere Details siehe Schlussbericht *Szenarienbildung*, Brien et al. (2020)).

4.1.1.5 Starkniederschlag – Auswertungen der Kerndichteschätzung

Neben den Auswertungen für die verschiedenen Klimaindikatoren wurde für seltene und intensive Niederschlagsereignisse eine Extremwertanalyse mittels der Kerndichteschätzung durchgeführt (Methode siehe Abschnitt 3.2.2). Als Datengrundlage dient hierzu das regionalen Klimamodellensembles vor der Bias-Adjustierung und Anwendung des statistischen Downscaling Verfahrens (weitere Details hierzu siehe Schlussbericht des SP-101 *Szenarienbildung*, Brien et al. (2020)).

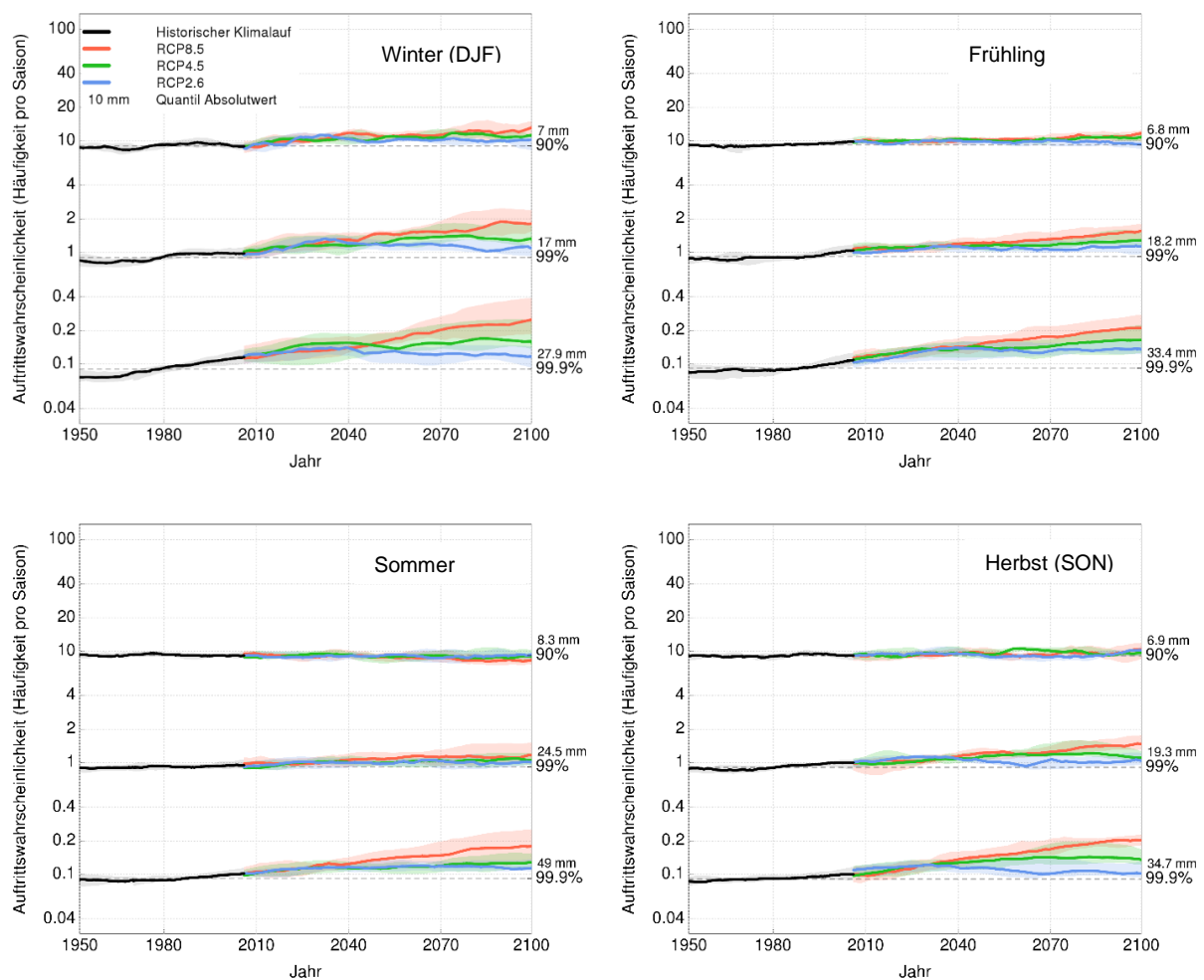


Abbildung 4-7: Zeitlicher Verlauf (1951–2100) der Auftretswahrscheinlichkeit (Häufigkeit pro Saison; 1/a) von Starkniederschlagsereignissen (ab und oberhalb des 90%, 99%, 99,9% Quantils) auf Basis von Tagesniederschlagssummen aus Analysen der Kerndichteschätzung für Winter (DJF; oben links), Frühling (MAM; oben rechts), Sommer (JJA; unten links) und Herbst (SON; unten rechts) im Deutschlandmittel. Historische Klimäläufe von 1950–2005 (schwarz) und Klimaprojektionen von 2006–2100 mit drei Klimaszenarien: *Winter-wie-bisher* (rot), *moderat* (grün) und *Klimaschutz* (blau). Transparente Flächen repräsentieren das 15. bzw. 85. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles (nicht bias-adjustierte Daten). Linien repräsentieren das 50. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles.

Abbildung 4-7 zeigt hierfür den zeitlichen Verlauf der Auftretswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen für die vier Jahreszeiten im Deutschlandmittel, basierend auf drei verschiedenen relativen Schwellenwerten (90 %, 99 %, 99,9 % Quantil bzw. entsprechend 10 %, 1 %, 0,1 % der höchsten Werte der Niederschlagszeitreihe) im *Bezugszeitraum*. Die absolute Niederschlagsmenge kann abhängig von Region, Jahreszeit, aber auch Klimamodell stark variieren. Zur Orientierung enthalten die einzelnen Teilabbildungen für die Jahreszeiten jeweils auf der rechten Seite die Tagesniederschlagssummen des zugehörigen Quantils, angegeben als Mittelwert für das Klimamodellensembles sowie dem Flächenmittel für Deutschland (Abbildung 4-7). So beträgt das 90 % Quantil des Tagesniederschlags für den Winter im Mittel über Deutschland ca. 7 mm, während für das 99,9 % Quantil der Wert auf knapp 28 mm ansteigt. Im Sommer erhöhen sich die Werte auf 8,3 mm (90 % Quantil) bzw. fast 49 mm (99,9 % Quantil). In der Region Alpenvorland ist der Mittelwert aus dem Klimamodellensembles im Flächenmittel im Winter mit knapp 8 mm für das 90 % Quantil und etwa 33 mm für das 99,9 % Quantil höher als für ganz Deutschland, während der Wert in der Region Ostdeutschland mit 5,7 mm (90 % Quantil) sowie ca. 25 mm (99,9 % Quantil) kleiner ist (nicht gezeigt). Relevant sind nun die projizierten Änderungen der Auftretswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen, die die oben beschriebenen Schwellenwerte im Zeitverlauf von 1951–2100 bzw. vor allem von 2006–2100 erreichen oder überschreiten. Für den *Bezugszeitraum* lässt sich (Tabelle 3-2) für jedes Quantil, abhängig von der betrachteten Zeitperiode (z. B. Jahreszeit), eine feste Auftretswahrscheinlichkeit (Häufigkeit pro Zeitperiode) oder ein Wiederkehrintervall zuordnen. Bezogen auf das Gesamtjahr treten Ereignisse ab dem 90 % Quantil und darüber an 36,5 Tagen pro Jahr auf, während für die einzelnen Jahreszeiten die Werte entsprechend der geringeren Anzahl an Tagen der jeweiligen Zeitreihe kleiner ausfallen. Die Auftretswahrscheinlichkeit im *Bezugszeitraum* für das 90 % Quantil beträgt somit z. B. neun Starkniederschlagsereignisse pro Winter, für das 99 % Quantil 0,9 und für das 99,9 % Quantil 0,09 bzw. anders ausgedrückt ein Ereignis ca. jeden elften Winter. Die Werte für die restlichen Jahreszeiten variieren aufgrund der sehr ähnlichen Periodenlänge im Vergleich zum dem Winter nur marginal.

Deutlich wird aus Abbildung 4-7, dass für alle Jahreszeiten generell mit einer Zunahme der Auftretswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen zu rechnen ist und hierbei die relative Zunahme für die höheren Quantile deutlicher ausfällt als für die niedrigeren. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Auftretswahrscheinlichkeit aller drei betrachteten Klimaszenarien im Zeitverlauf – unabhängig von der Jahreszeit und dem Quantil – zunächst eine sehr ähnliche Entwicklung zeigen. Erst ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ändern sich die Auftretswahrscheinlichkeit zwischen den einzelnen Klimaszenarien deutlich auffälliger, wobei die stärkste Zunahme fast immer für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*, gefolgt vom *moderaten Szenario* und *Klimaschutzszenario* projiziert wird. Die stärkste Zunahme der Auftretswahrscheinlichkeit findet generell im Winter statt. Für die *ferne Zukunft* kann vor allem für die höheren Quantile und das *Weiter-wie-bisher-Szenario* von einer deutlich erhöhten Auftretswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen ausgegangen werden. So treten Starkniederschlagsereignisse ab dem 90 % Quantil mit ca. 12 Ereignissen pro Winter für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der *fernen Zukunft* um +35 % häufiger auf als im *Bezugszeitraum*. Für intensivere Starkniederschlagsereignisse ab dem 99,9 % Quantil erhöht sich die Auftretswahrscheinlichkeit unter diesem Szenario sogar um +150 %, wodurch diese Ereignisse statt einmal jeden elften Winter in der *fernen Zukunft* fast jeden fünften Winter auftreten würden. Die obere Bandbreite des Klimamodellensembles (85. Perzentil) zeigt gar einen Anstieg der Auftretswahrscheinlichkeit um bis zu +280 % was zum Auftreten dieser Starkniederschlagsereignisse in jedem dritten Winter führen würde. Im Gegensatz zum Winter ist der Trend in den anderen Jahreszeiten vor allem für Starkniederschlagsereignisse ab dem 90 % Quantil deutlich weniger eindeutig. Im Frühling (+19 %) und Herbst (+7 %) wird im Vergleich zum Winter nur eine geringe Zunahme für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der *fernen Zukunft* projiziert. Im Sommer hingegen kann für Starkniederschlagsereignisse ab dem 90 % Quantils sogar von einer Abnahme für die *ferne Zukunft* ausgegangen werden. Am deutlichsten ist die Abnahme dabei für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (-17 % bis +3 %), das ansonsten für die restlichen Jahreszeiten und Starkniederschlagsschwellen die deutlichsten Zunahmen für die Auftretswahrscheinlichkeiten zeigt. Für dieses Klimaszenario würde sich die Anzahl von etwas mehr als neun Starkniederschlagsereignisse pro Sommer im

Bezugszeitraum auf etwas mehr als 8 Ereignisse (50. Perzentil) und knapp 7,5 Ereignisse (15. Perzentil) in der *fernen Zukunft* reduzieren.

Abbildung 4-8 zeigt die Auftrittswahrscheinlichkeit gemittelt für die *nabe* und *ferne Zukunft*, jedoch für den Mittelwert einzelner Regionen in Deutschland für den Winter (Abbildung 4-8 Mitte) und Sommer (Abbildung 4-8 unten). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen deutlich weniger ausgeprägt sind als die Unterschieden zwischen den Jahreszeiten, Quantilen, Klimaszenarien sowie der *naben* und *fernen Zukunft*. Die auffälligsten Unterschiede liegen überwiegend für Starkniederschlagsereignisse ab dem 99,9 % Quantils vor. Im Winter zeigen die südlichen Regionen (Südwestdeutschland, Süddeutschland, Alpenvorland), unabhängig von den Klimaszenarien, einen stärkeren Anstieg der Auftrittswahrscheinlichkeiten als die restlichen Regionen Deutschlands. Dies betrifft vor allem das *Klimaschutzszenario* und *Moderate Szenario* sowie die *nabe Zukunft* beim *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Der auffälligste Unterschied bei den Änderungssignalen des mittleren Niederschlags zwischen Ostdeutschland und den restlichen Regionen Deutschlands, der im Sommer für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in der *fernen Zukunft* projiziert wird, lässt sich ebenfalls in den Auswertungen für das 90 % Quantil der Kerndichteschätzung erkennen (Abbildung 4-8 und Abbildung 4-6 unten). Hierbei zeigen die Regionen Ostseeküste und Ostdeutschland eine geringere Abnahme der Auftrittswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen (Ostdeutschland: -13 % bis +5 %), während im Süden Deutschlands (Regionen: Südwestdeutschland, Süddeutschland, Alpenvorland) eine stärkere Abnahme projiziert wird (Südwestdeutschland: -27 % bis -2 %). Betrachtet man die höheren Quantile (99 %, 99,9 %) so lässt sich dieses Phänomen jedoch nicht mehr erkennen. Während im Winter für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in der *fernen Zukunft* selbst die untere Bandbreite des Klimamodellensembles (15. Perzentil) für alle Regionen eine deutliche Zunahme der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Starkniederschlagsereignissen ab dem 99,9 % Quantil aufweist, zeigt die untere Bandbreite des Klimamodellensembles (15. Perzentil) für die Regionen Südwestdeutschland und Nordseeküste im Sommer fast keine Änderung (Abbildung 4-8 unten).

Neben der Auswertung von Starkniederschlagsereignissen für Tagesniederschlagssummen liegen zusätzlichen Daten auf Basis des sogenannten maximal stündlichen Niederschlags pro Tag vor. Beachtet werden muss jedoch, dass für diese Variable weniger Klimamodelle zur Verfügung standen und das Klimamodellensemble somit kleiner ist (siehe Tabelle 8-1).

Analog zu Abbildung 4-7 zeigt Abbildung 4-9 den zeitlichen Verlauf der Auftrittswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagsereignissen für die vier Jahreszeiten im Deutschlandmittel für Starkniederschlagsereignisse auf Basis des maximal stündlichen Niederschlags pro Tag. Für die *nabe Zukunft*, das *Klimaschutzszenario* und *Moderate Szenario* sowie die Starkniederschlagsschwellen ab dem 90 % und 99 % Quantil sind die Unterschiede der Änderungssignale zwischen Starkniederschlagsereignissen auf Basis der Tagesniederschlagssummen und dem maximal stündlichen Niederschlag pro Tag für alle vier Jahreszeiten nur sehr gering und liegen für die Bandbreite der beiden Klimamodellensembles zwischen -2 % bis +15 %. In der *fernen Zukunft* steigen die Differenzen für diese beiden Szenarien und die beiden unteren Quantile auf +1 % bis +25 %, wobei die größten Differenzen im Winter auftreten. Deutlich größer werden die Unterschiede, wenn man den Winter und das *Weiter-wie-bisher-Szenario* und hier vor allem Starkniederschlagsereignisse ab dem 99,9 % Quantil vergleicht. In der *naben Zukunft* beträgt der Unterschied der Änderungssignale für die Bandbreite des Klimamodellensembles für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* bereits zwischen +26 % bis +136 % und in der *fernen Zukunft* sogar zwischen +57% bis +203 %. Im Sommer ist der Unterschied zwischen Starkniederschlagsereignissen auf Basis der Tagesniederschlagssummen und dem maximal stündlichen Niederschlag pro Tag deutlich geringer. Es könnten somit im Winter für die obere Bandbreite (85. Perzentil) des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* Starkniederschlagsereignisse auf Basis des maximal stündlichen Niederschlags pro Tag statt einmal jeden elften Winter in der *fernen Zukunft* häufiger als jeden zweiten Winter auftreten.

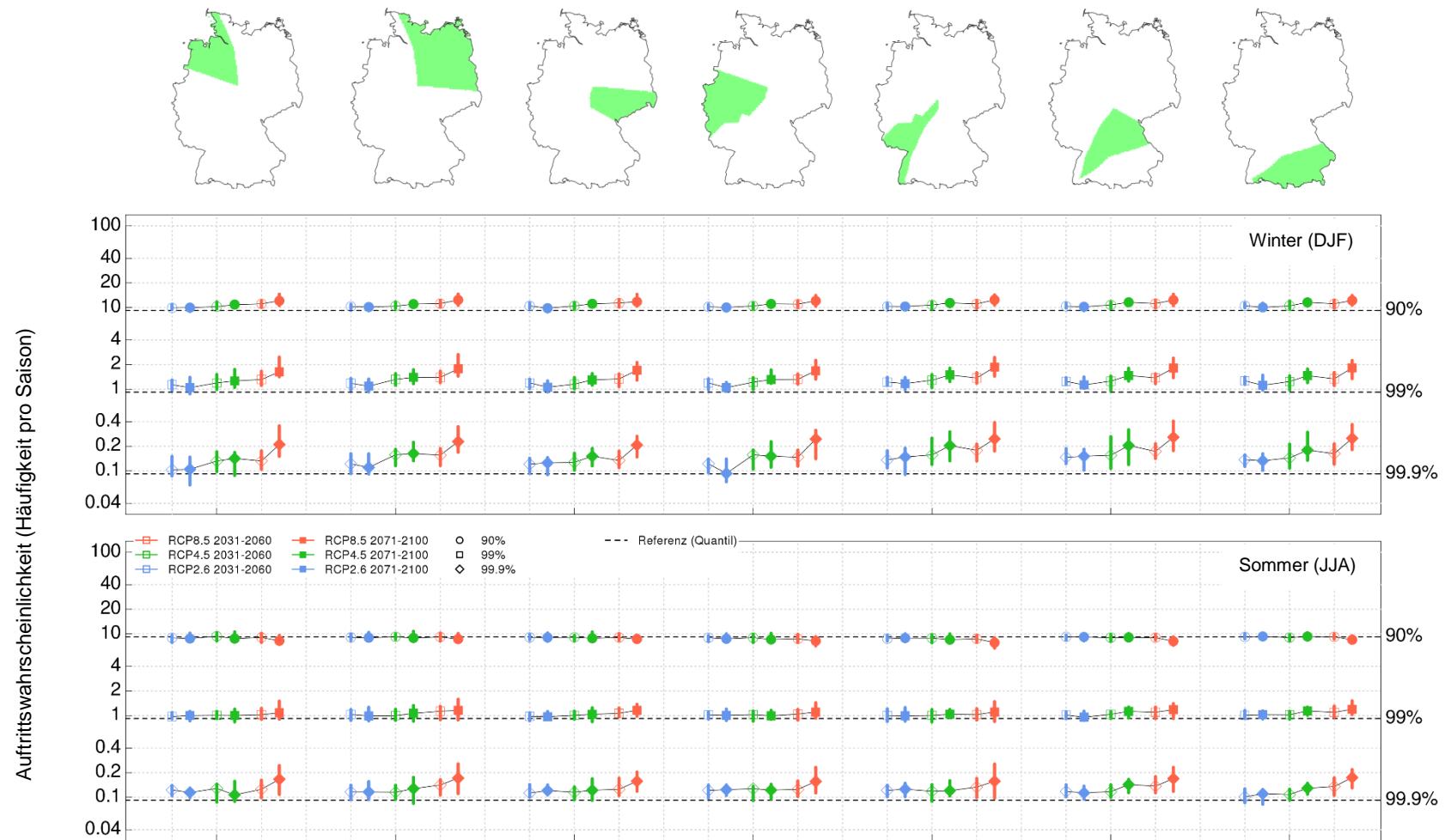


Abbildung 4-8: Auftrittswahrscheinlichkeit (Häufigkeit pro Saison; 1/a) von Starkniederschlagsereignissen (ab und oberhalb des 90 %, 99 %, 99,9 % Quantils) auf Basis von Tagesniederschlagssummen aus Analysen der Kerndichteschätzung für den Winter (DJF) und Sommer (JJA) in den Regionen Nordseeküste, Ostseeküste, Ostdeutschland, Westdeutschland, Südwestdeutschland, Süddeutschland und Alpenvorland. Klimaprojektionen für die Mittelwerte der Zeiträume 2031–2060 (nicht gefüllte Symbole) und 2071–2100 (gefüllte Symbole) im Vergleich zum entsprechenden Wert des jeweiligen Quantils (schwarz gestrichelt) im *Bezugszeitraum*. Drei Klimaszenarien werden berücksichtigt: *Weiter-wie-bisher* (rot), *moderat* (grün) und *Klimaschutz* (blau). Die Unter- und Obergrenze der senkrechten Linien repräsentieren das 15. bzw. 85. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles (nicht bias-adjustierte Daten). Die Symbole repräsentieren das 50. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles.

Für die einzelnen Regionen in Deutschland lässt sich feststellen, dass die Unterschiede der Änderungssignale zwischen Starkniederschlagsereignissen auf Basis der Tagesniederschlagssummen und dem maximal stündlichen Niederschlag pro Tag im Winter für den Norden (Region Nord- und Ostseeküste) am geringsten und in der Region Ostdeutschland und Alpenvorland am größten sind. Im Sommer sind die größten Differenzen ebenfalls in der Region Alpenvorland zu finden, während die geringsten Differenzen in der Region Westdeutschland und Südwestdeutschland projiziert werden (nicht gezeigt; weitere Details siehe Schlussbericht *Szenarienbildung*, Brien et al. (2020)).

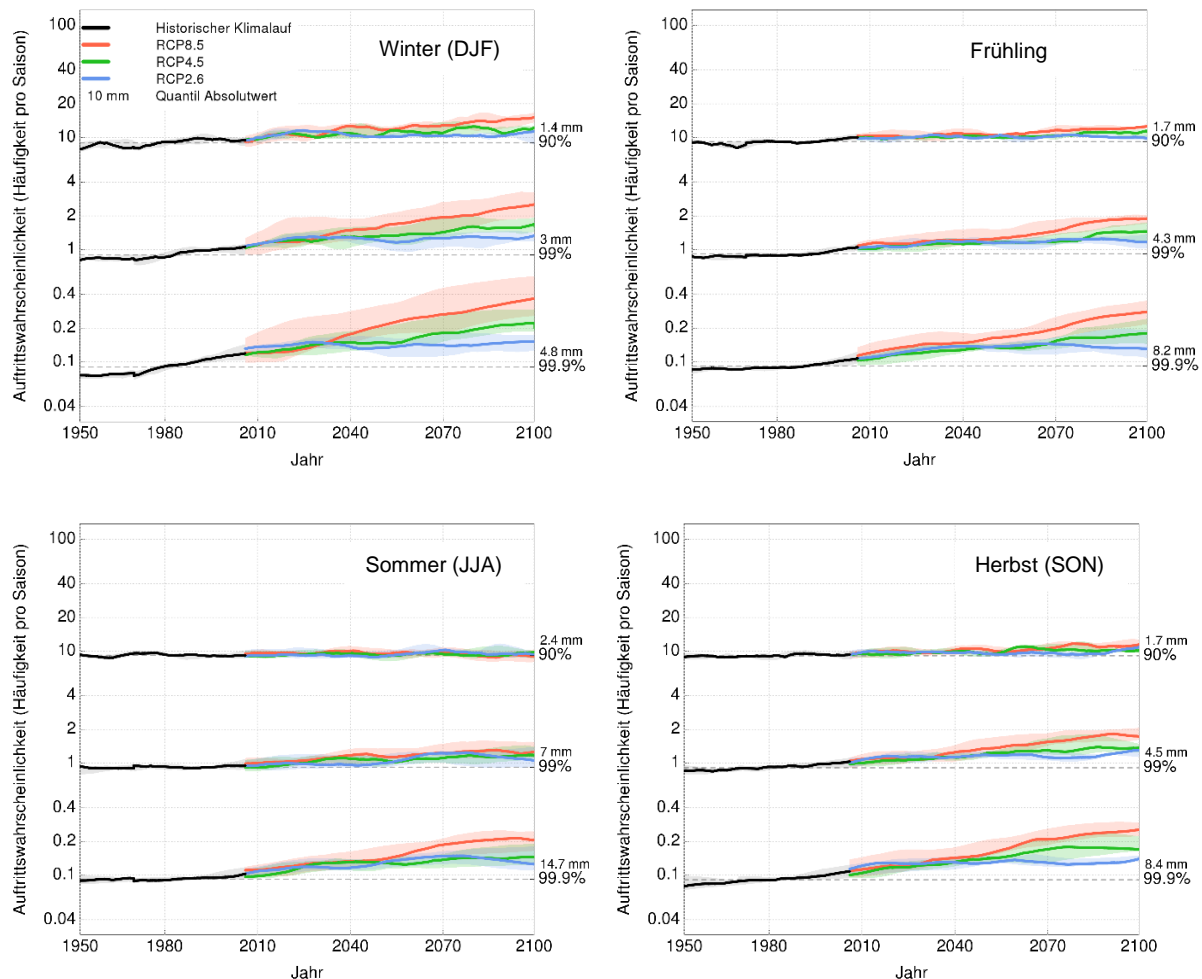


Abbildung 4-9: Zeitlicher Verlauf (1951–2100) der Auftretswahrscheinlichkeit (Häufigkeit pro Saison, 1/a) von Starkniederschlagsereignissen (ab und oberhalb des 90 %, 99 %, 99,9 % Quantils) auf Basis des maximal stündlichen Niederschlags pro Tag aus Analysen der Kerndichteschätzung für den Winter (DJF; oben links), Frühling (MAM; oben rechts), Sommer (JJA; unten links) und Herbst (SON; unten rechts) im Deutschland-mittel. Historische Klimäläufe von 1950–2005 (schwarz) und Klimaprojektionen von 2006–2100 mit drei Klimaszenarien: *Weiter-nie-bis-her* (rot), *moderat* (grün) und *Klimaschutz* (blau). Transparente Flächen repräsentieren das 15. bzw. 85. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles (nicht bias-adjustierte Daten). Linien repräsentieren das 50. Perzentil des jeweiligen Klimamodellensembles.

4.1.2 Blue-Spot-Analyse

4.1.2.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Häufigkeit und Ausprägung von Starkregenereignissen tragen zu einer erhöhten Gefährdung der Bundesfernstraßen durch Sturzfluten und Überschwemmungen bei. Insbesondere das Zusammenwirken von langanhaltender Trockenheit und

plötzlichen, heftigen Niederschlägen in den Sommermonaten kann zu extremer Abflussbildung führen und somit Schäden an Straßen und Infrastruktureinrichtungen verursachen.

Zur Expositionsabschätzung und -bewertung von potenziellen Überflutungen im Bereich des Bundesfernstraßennetzes infolge von lokalen Starkregenereignissen wird derzeit exemplarisch für Nordrhein-Westfalen (NRW) eine Blue-Spot-Analyse durchgeführt. Der Begriff „Blue-Spot“ bezieht sich auf Veröffentlichungen des dänischen Straßeninstituts und des schwedischen Straßen- und Verkehrsforschungsinstituts (Larsen et al. 2010a, Larsen et al. 2010b), die mit dem sogenannten Blue-Spot-Modell ein Werkzeug für die Identifizierung hochwassergefährdeter Bereiche in Verkehrsnetzen durch starke Niederschlagsereignisse entwickelt haben. Ein „Blue-Spot“ ist dabei definiert als ein Straßenabschnitt, in dem die Überflutungswahrscheinlichkeit relativ hoch ist und dessen Folgen relevant für das Verkehrssystem sind (Larsen et al. 2010b). Auf Grundlage von digitalen Geländemodellen (DGM), Niederschlagsstatistiken, Bodenparametern und Infrastrukturinformationen wird das Gelände im Umfeld von Verkehrswegen auf lokale Senken untersucht in denen sich das Niederschlagswasser potenziell ansammeln kann. Anschließend wird das Überflutungspotenzial durch die Berechnung von ober- und unterirdischen Fließwegen mittels eines hydrodynamischen Modells ermittelt (Larsen et al. 2010b). Das übergeordnete Blue-Spot-Konzept beinhaltet eine Reihe von Verfahren, mit denen das Straßennetz systematisch analysiert, angepasst und vor Überflutungen geschützt werden kann (Larsen et al. 2010a).

4.1.2.2 Methodik

Die lokale Analyse und Kartierung von potenziellen Überflutungsflächen im Bundesfernstraßennetz von Nordrhein-Westfalen in Folge von Starkregenereignissen wird vom Auftragnehmer geomer GmbH in drei Schritten bearbeitet (siehe Abbildung 4-10). Die Entwicklung einer GIS-Toolbox zur Durchführung aller erforderlichen Arbeitsschritte soll ermöglichen, die Anwendung der erprobten Methodik auf das gesamte Bundesgebiet auszuweiten.

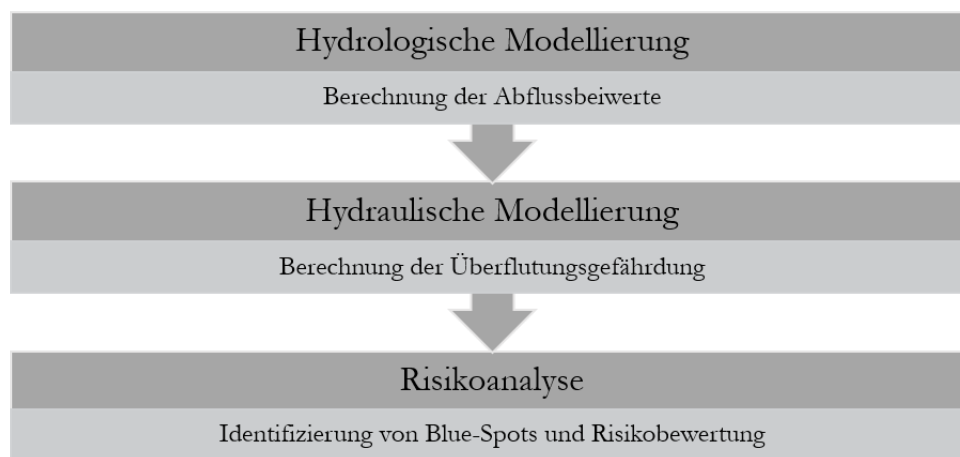


Abbildung 4-10: Arbeitsschritte der Blue-Spot-Analyse.

Der erste Schritt ist die **hydrologische Modellierung**, in der für verschiedene Niederschlagsszenarien die entsprechende Abflussmenge beziehungsweise der ortsspezifisch unmittelbar abflusswirksame Anteil des Gesamtniederschlags, der sogenannte Abflussbeiwert, flächendeckend zeitlich und räumlich hochaufgelöst ermittelt wird. In die Berechnung gehen drei Niederschlagsszenarien, die Landnutzung, das Relief und Bodenparameter ein (Büche et al. 2019).

Für die Niederschlagsszenarien wurden drei Starkregenintensitäten gewählt, die eine möglichst große Spannweite abdecken sollen. Das Szenario mit 50 mm/h orientiert sich an einem Starkregenereignis mit einer Wiederkehrhäufigkeit von 100 Jahren für NRW (DWD 2010, Junghänel et al. 2017). Da in der Vergangenheit bei einzelnen Extremereignissen deutlich höhere Niederschlagsintensitäten auftraten (bspw. Münster

am 28.07.2014: 164 mm/h), wurden für das mittlere Szenario 80 mm/h und für das extreme Szenario eine Intensität von 110 mm/h gewählt, um eine größere Spannbreite bei der Modellberechnung zu erzielen (MULNV 2018). Die Intensität steigt dabei innerhalb einer Stunde an und besitzt ihren höchsten Wert am Ende der Berechnungszeit (endbetontes Szenario).

Darüber hinaus wird der Versiegelungsgrad durch die Landnutzungsclassen aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell abgeleitet sowie ein Hangneigungsraaster auf Grundlage eines hochaufgelösten Geländemodells (DGM1 mit 1m Laserscandaten) generiert. Auf Basis der Bodenkarte 1:50.000 des Geologischen Diensts NRW (BK 50) fließt die Bodenart in die Modellrechnung ein, da sie einen großen Einfluss auf das Abfluss- bzw. Versickerungspotenzial von Böden besitzt.

Die Berechnung der ortsspezifischen Abflussbeiwerte erfolgt mittels der Software HydroRAS (hydrologische Prozessierungssoftware für Starkregenmodellierung), die an das sogenannte *Lutz-Verfahren* zur Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen angelehnt ist. Hierbei wird aus einer dreidimensionalen Matrix aus Landnutzungs-, Relief- und Bodenparametern jeder Rasterzelle des Untersuchungsgebietes ein entsprechender Abflussbeiwert zugewiesen, der die Infiltrations- bzw. Abflusspotenziale mit einem dimensionslosen Wert von 0-1 beschreibt. Versiegelte Flächen besitzen dabei beispielsweise einen Abflussbeiwert von 1, da keine Infiltration stattfindet. Es ergeben sich für jedes Niederschlags-szenario 12 Abflussbeiwert-raaster (je ein Raster pro 5-Minuten-Intervall). Aus dem Abflussbeiwert und der Niederschlagsmenge kann so der effektive Oberflächenabfluss je Rasterzelle ermittelt werden (Büche et al. 2019). Abbildung 4-11 zeigt exemplarisch die Abflussbeiwerte des 80 mm/h Szenarios für Nordrhein-Westfalen gemittelt über eine Stunde.

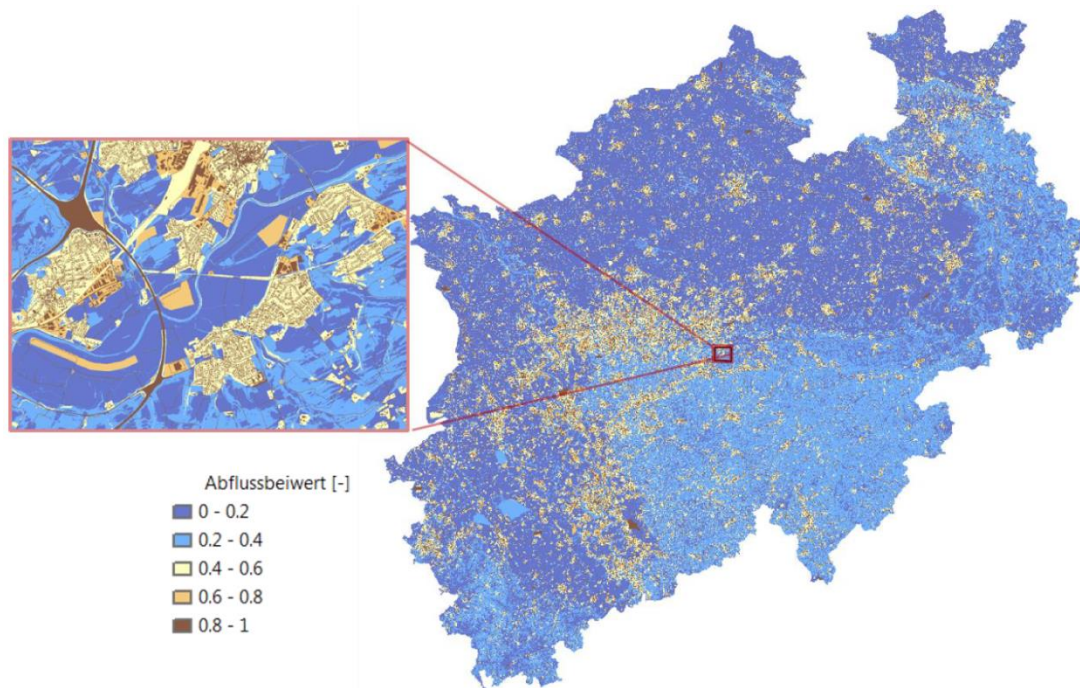


Abbildung 4-11: Mittlere Abflussbeiwerte im mittleren Szenario (80 mm/h) auf Grundlage von Landnutzungs-, Relief- und Bodenparametern (Büche et al. 2019).

Die anschließende **hydraulische Modellierung** wird mit der Software *FloodArea^{IPC}* der geomer GmbH umgesetzt. Das rasterbasierte hydrodynamische 2D-Modell berechnet die Fließwege des Oberflächenabflusses und die damit einhergehenden Überflutungsszenarien. Die Eingangsgrößen sind hierbei die berechneten Abflussraaster, die Rauheit der Geländeoberfläche sowie ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell

(DGM1). Die Rauheit nach *Gauckler-Manning-Strickler* wird aus dem Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW 2016) abgeleitet, in dem Rauheitswerte abhängig von der Landnutzung definiert sind.

Das verwendete DGM1 ist ein Geländemodell aus Laserbefliegungen mit einer Auflösung von einem Meter, das im Datenportal open.nrw kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Um Rechenkapazitäten zu sparen, wird ein Hydroresampling durchgeführt, das die Auflösung auf fünf Meter verringert ohne Informationen über hydraulisch-hydrologisch bedeutsame Geländeeigenschaften zu verlieren. Hierbei werden in das aggregierte DGM5 Informationen bezüglich der Gewässernetze, untergeordneter Verkehrswege und dem Bundesfernstraßennetz übernommen. Einzelne Detailgebiete werden trotzdem mit der höheren 1m-Auflösung modelliert, um detailliertere Ergebnisse zu erzielen und diese mit den DGM5-Rechnungen vergleichen zu können.

Das Gelände wird anschließend auf weitere bedeutsame Durchlässe und Hindernisse untersucht. Brückenbauwerke werden beispielsweise in Abhängigkeit ihrer räumlichen Ausdehnung und Geometrie danach bewertet, ob sie potenziell abflussrelevant sind und gegebenenfalls aus dem digitalen Oberflächenmodell in das DGM übertragen. Verdohlungen, Brücken sowie unter- und überirdische Gewässer werden mittels Pumplinien in das DGM integriert. Diese Pumplinien simulieren einen definierten Durchfluss, um somit die Fließwege möglichst realitätsnah abbilden zu können. Auf Basis dieser Daten erfolgt die Berechnung der Überflutungstiefen im Gelände im Verlauf der beschriebenen Niederschlagsszenarien. Bereiche im Straßenverkehrsnetz, die von diesen Überflutungen infolge von Starkregenereignissen betroffen sind, werden als „Blue-Spots“ bezeichnet. In Abbildung 4-12 sind beispielhaft die Überflutungstiefen entlang einer Bundesautobahn für die Niederschlagsszenarien 50 mm/h und 110 mm/h dargestellt.

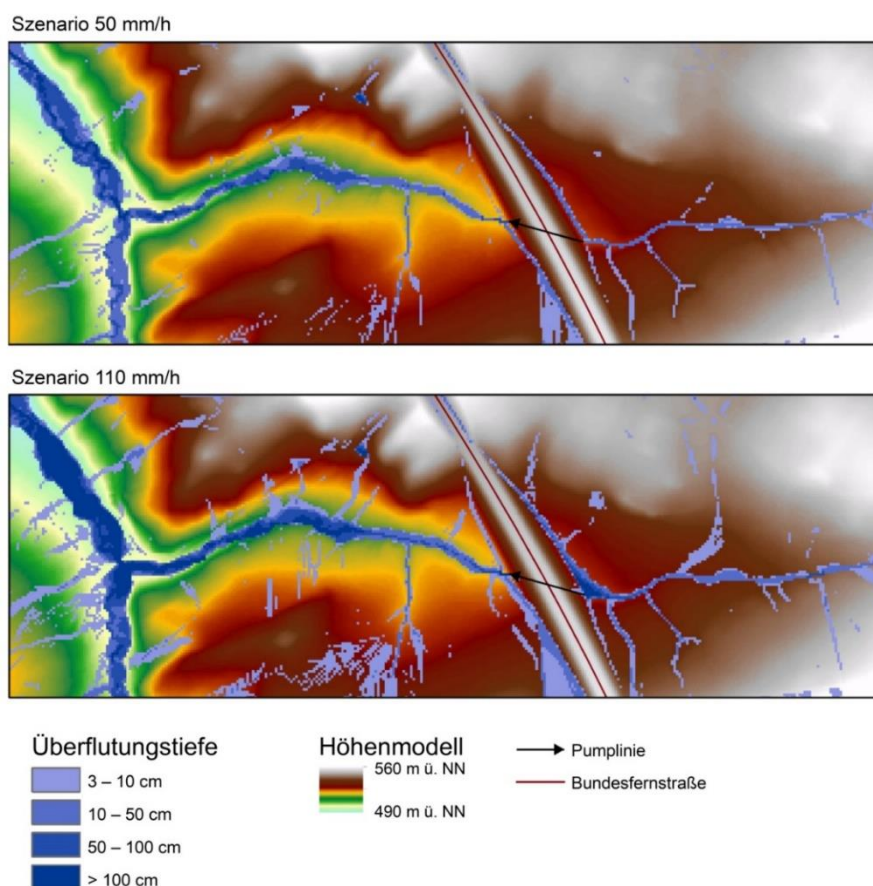


Abbildung 4-12: Darstellung maximaler Überflutungstiefen der Szenarien 50 mm/h und 110 mm/h für einen exemplarischen Autobahnabschnitt (Büche et al. 2019).

Im dritten Schritt wird eine **Risikoanalyse** durchgeführt, bei der eine statistische Analyse der Betroffenheit der Verkehrswege erfolgen soll. Dabei werden die Risikobereiche betrachtet, für die länger anhaltende Überflutungen oder hohe Fließgeschwindigkeiten prognostiziert werden. Mithilfe einer dreidimensionalen Risikomatrix können diese Blue-Spots abhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit, der Gefährdungsintensität und der Relevanz des betroffenen Straßenabschnitts bewertet werden.

4.1.3 Gleisentwässerung

4.1.3.1 Hintergrund und Zielsetzung

Eine kontinuierliche Anpassung der Entwässerungsanlagen der Bahn an veränderte klimatische Bedingungen spielt für die Eisenbahn eine entscheidende Rolle, um eine regelkonforme Gleislage und somit Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Fahrweges sicherstellen zu können. Die Gebrauchstauglichkeit ist vor allem dann eingeschränkt, wenn sich aufgrund von unzureichend dimensionierter, aber auch bei eingeschränkt funktionstüchtiger Gleisentwässerung Stauwasser bilden kann, welches den Lastabtrag negativ beeinflusst. Die Folge sind Gleislagefehler und ein möglicher Verlust der Tragfähigkeit, wenn z. B. Dammkörper zu stark vernässen. Auch zu gering dimensionierte Durchlässe¹⁹ können diese Wirkungen hervorrufen, wenn aufgrund eines Aufstaus von Wasser stromaufwärts die Umspülung, Unterspülung oder Überflutung eines Erdbauwerks zur Folge hat.

Bahnanlagen zählen zu den langlebigen Infrastrukturen und sind bei Planung und Bau auf eine lange Haltbarkeit ausgerichtet. Die den Bauwerken und Infrastruktureinrichtungen zugrunde gelegten Richtlinien und Regelwerke wurden im Laufe der Zeit wiederholt den aktuellen fachlichen und technischen Rahmenbedingungen angepasst, was dazu führte, dass der gegenwärtige Zustand des Eisenbahntwässerungssystems sehr unterschiedlich ausgestaltet ist. Selbst für die nach heutigen Niederschlägen bemessenen Einrichtungen können veränderte Niederschlagsverhältnisse im Rahmen des projizierten Klimawandels ein Problem darstellen. In Deutschland ist eine Zunahme der Niederschläge im Winter und tendenziell ein Abnahme im Sommer zu erwarten (siehe Abschnitt 4.1.1). Insgesamt verändert sich sowohl die Magnitude als auch die Häufigkeit der Niederschläge. Die jährliche Gesamtniederschlagsmenge ist dabei weitestgehend gleichbleibend, jedoch sind die einzelnen Regenereignisse zeitlich stärker konzentriert – vermehrte Starkregenereignisse sind die Folge.

Vor dem Hintergrund der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Bundesregierung 2008), der zukünftig erwarteten Niederschlagsveränderungen und den wiederholten Modifizierungen der Richtlinien, Regelwerke und Berechnungen der Regenspenden besteht ein unzureichender Kenntnisstand bezüglich der Dimensionierung gegenwärtig vorhandener Entwässerungsanlagen und Durchlässen und ihrer damit einhergehenden hydraulischen Leistungsfähigkeit. Um folglich schädlichen Einwirkungen entgegenzuwirken und auch eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen durch den Klimawandel zu berücksichtigen, ist eine Anpassung bzw. Überprüfung bestehender Anlagen bzw. die Dimensionierung neuer Anlagen jeweils nach dem aktuellen Regelwerk bzw. die ständige Regelwerksfortschreibung erforderlich. Deshalb wurde im Rahmen BMVI-Expertennetzwerk vom Eisenbahn Bundesamt (EBA) ein Forschungsprojekt (EBA 2019) initiiert, das die folgenden vier Ziele beinhaltet:

- (1) Umfassende Recherche zur historischen Entwicklung der Normen und Regelwerke von Entwässerungseinrichtungen, der Bemessungsgrundlagen sowie zur Ausgestaltung von Entwässerungssystemen und Durchlässen
- (2) Rechnerische Überprüfung der hydraulischen Restkapazität der kategorisierten Anlagen

¹⁹Durchlässe sind Kreuzungsbauwerke mit einer lichten Weite von < 2,0 m, welche die Kreuzung von Gewässern durch Anlagen, wie z.B. Bahndämmen, ermöglichen.

- (3) Rechnerische Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit eines realen Systems als Anwendungsbeispiel (*Weinböbla*)
- (4) Konstruktive Bewertung der Dimensionierung von Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässen sowie Erarbeitung von Handlungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen

4.1.3.2 Überblick der Rechercheergebnisse

Die Grundlage für eine Kategorisierung der unterschiedlichen Anlagen bilden die u. a. im aktuellen Regelwerk RIL (Richtlinie) 836 (DB Netz AG 2008) beschriebenen Entwässerungsanlagen und deren einzelne Elemente. Ergänzend dazu wurden bei der Produktionsführung (PD) Dresden und PD Magdeburg Recherchen zu deren aktuellen Anlagenbestand der Entwässerungsanlagen durchgeführt. Die Entwässerungsanlagen zur Gleisentwässerung der PD werden derzeit aufgenommen und in das Datenmanagementsystem der Deutschen Bahn Netz AG eingepflegt. Durchlässe sind dagegen weitestgehend kategorisiert und im Datenbanksystem der Deutschen Bahn Netz AG vorhanden. Die PD Dresden repräsentiert einen für Deutschland typischen Standort mit Streckenabschnitten im Hügel- bzw. Bergland. Die PD ist eine von 34 PDs in Deutschland und betreut insgesamt etwa 1.500 km Streckennetz. Für die PD Magdeburg, als PD mit Strecken im Flachland und einem Streckennetz von etwa 1.300 km, liegen Daten von insgesamt 1.066 Durchlässen vor, die zum Vergleich mit herangezogen wurden.

Als Grundlage des Regelwerks RIL 836 der DB Netz AG (2008) sowie der Recherche bei der PD Dresden und der PD Magdeburg wurden die Entwässerungsanlagen zusammengefasst und entsprechend Abbildung 4-13 kategorisiert. Die Kategorisierung der Entwässerungsanlagen erfolgt aus hydraulischer Sicht in Bezug auf die Bewertung der Anlagen hinsichtlich der durch den Klimawandel erhöhten Starkregenereignisse. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Kategorisierung nach Erdbauwerken und sonstigen geotechnischen Bauwerken. Weiterführende Auswertungen und hydraulische Berechnungen erfolgten im Rahmen des Projekts für die Kategorie 1: **Gleisentwässerung der freien Strecke** und für die Kategorie 2: **Durchlässe**.

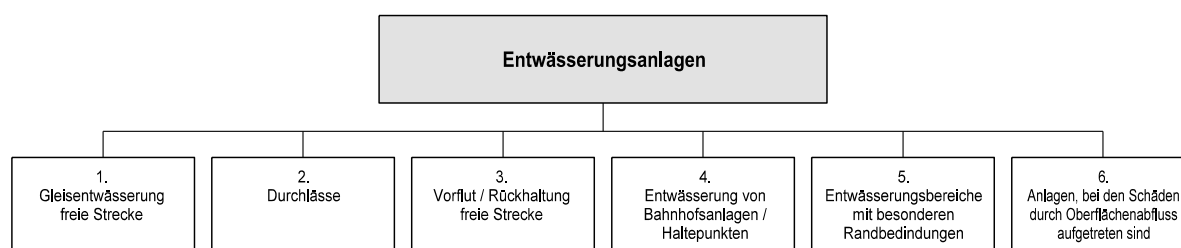


Abbildung 4-13: Kategorisierung der Entwässerungsanlagen.

4.1.3.3 Gleisentwässerung der freien Strecke

Anlagen zur Bahnentwässerung wurden seit Beginn des Eisenbahnbaus (1835) konzipiert. Die hydraulische Bemessung der Bahnentwässerungsanlagen einschließlich ihrer Elemente wurde erst seit ca. Mitte der 70er Jahre des vorherigen Jahrhunderts eingeführt. Erste Bemessungsansätze und Vorgaben sind in den „Vorläufigen Richtlinien für die Planung und Erstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h“ (DB 1979) und in der Richtlinie für die Tiefenentwässerung (DR 1976) enthalten. Die damals geltende Bemessung und die Parameter wurden kontinuierlich modifiziert; die Basisregenspende $r_{15,1}$ wurde angepasst. Die geometrischen Ausbildungen der Entwässerungsanlagen haben sich dagegen im Laufe der Zeit unwesentlich bzw. nicht geändert. Die einzelnen Richtlinien bzw. Normen der Bahn geben dabei immer einen Verweis oder haben einen Bezug zum Regelwerk der Straße. Die Bemessungsgrundlagen für die Bahnentwässerung wurden mit einzelnen Variationen in Anlehnung z. B. an (MFV 1985): TGL 12 098/01, 02, 03 und 04 bzw. der RAS-Ew (2005) erarbeitet.

Zur Berechnung der noch vorhandenen Restkapazität wurden die theoretischen Ansätze der unterschiedlichen Berechnungsverfahren des statischen (Zeitbeiwertverfahren) und dynamischen Modells miteinander verglichen und für unterschiedliche geometrische Randbedingungen und Regenereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrzeiten hydraulische Nachweise geführt. Eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen durch den Klimawandel floss bei den Betrachtungen mit ein. Aktuelle Erkenntnisse und Forschungsprojekte (z. B. Höntsch (2003) und Below et al. (2008)) zeigen, dass lediglich ein geringerer Teil der im Zeitbeiwertverfahren als Spitzenabfluss berechneten Bemessungswassermenge tatsächlich den funktionsfähigen und instandgehaltenen Entwässerungsanlagen zufließt bzw. hier eine zeitliche Verzögerung vorhanden ist. In der Folge fällt die Bemessungswassermenge kleiner aus und wird darüber hinaus über einen längeren Zeitraum von den Entwässerungsanlagen aufgenommen und abgeleitet. Dies wurde mit exemplarischen Berechnungen im Gleisbereich und für Außeneinzugsgebiete belegt.

Bei der derzeitigen hydraulischen Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen sind große Reserven vorhanden, sowohl in Hinblick auf die Eingangsparameter des Berechnungsverfahrens (Regenspende nach (Reinhold 1940) und Spitzenabflussbeiwert) als auch durch a) die nutzbare Speicherung, b) das natürliche Rückhaltevermögen von Lockergesteinen, c) die Oberflächenbenetzung des Schotters, d. h. die Berücksichtigung von Versicherungsraten (RAS-Ew 2005), e) die Verdunstung und f) die Nutzung des Porenraums bei Verwendung eines grobkörnigen Filters beim Bau von Tiefenentwässerungen. Diese genannten Prozesse sind der Grund, weshalb bei den bisher betrachteten Pilotprojekten nicht die berechneten Spitzenabflüsse festgestellt wurden. Die Reserven sind in Hinblick auf eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen im Zusammenhang mit dem Klimawandel von erheblichem Vorteil. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Regenereignisse mit größerer Intensität schadlos für den Bahnkörper von den Entwässerungsanlagen aufgenommen und abgeleitet werden können.

4.1.3.4 Hydraulische Bemessung

In einer Parameterstudie wurden die unterschiedlichen Bemessungsansätze und Eingangsparameter zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 näher untersucht und verglichen. Für die Annahme des zukünftigen Bemessungsregens für das Jahr 2040 (Zeitscheibe 2010–2040) wurden die Werte von 2019, basierend auf der Änderung des mittleren Niederschlags aus Klimaprojektionsdaten (Szenario A1B), um 30 % bzw. 50 % erhöht und diese dann analysiert. Der hydraulische Nachweis erfolgt anhand des Fließzeitverfahrens für Streckenabschnitte von 100 m, 500 m und 1.000 m Länge. Spitzenabflussbeiwerte für das Fließzeitverfahren wurden für das Außeneinzugsgebiet und den Gleisbereich aus den exemplarischen hydrodynamischen Berechnungen abgeleitet.

In dieser Studie wurden für die Bemessungsansätze für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung, für

- unterschiedliche Bemessungsregen,
- unterschiedliche abflusswirksame Flächen aufgrund verschiedener Spitzenabflussbeiwerte und
- den unterschiedlichen, daraus resultierenden Bemessungsabflüssen

verglichen. Die vorhandenen Kapazitäten der Gleisentwässerung wurden berechnet und der hydraulische Nachweis geführt. Im Ergebnis wurden der Bemessungsabfluss und die Abflusskapazität ohne und mit Außeneinzugsgebiet unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung der verschiedenen Regelwerke und Bemessungsansätze für die verschiedenen Regenhäufigkeiten grafisch aufbereitet und gegenübergestellt. Abbildung 4-14 zeigt dies exemplarisch. Die Auswertungen zeigen für eine Länge von 100 m und 1 % Sohlgefälle, dass in Abhängigkeit von den Streckeneinstufungen und den Regenereignissen auch in Zukunft die Abflusskapazität der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke ausreichend ist.

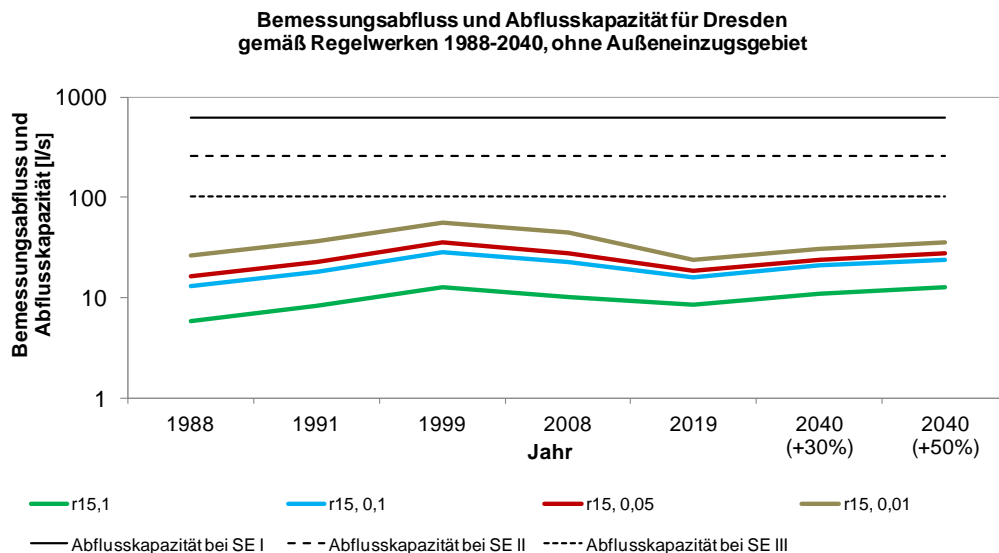


Abbildung 4-14: Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen (SE), ohne Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlgefälle 1 % für ein 15 minütiges Regenereignis (r15) mit Wiederkehrzeiten von einem Jahr (1 a-1), 10 Jahren (0,1 a-1), 20 Jahren (0,05 a-1) und 100 Jahren (0,01 a-1).

4.1.3.5 Fallbeispiel freie Strecke (*Weinböhl*)

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgte die hydraulische Bemessung und Bewertung der Anlagen im Hinblick auf den Klimawandel an einem konkreten Fallbeispiel für die freie Strecke. Der gewählte Streckenabschnitt ist 242 m lang und liegt auf der zweigleisigen Bahnstrecke 6248 Dresden – Elsterwerda zwischen km 17,873 bis km 18,115 im bahnrechten Gleis innerhalb der Ortschaft Weinböhl. Für vier verschiedene Modellregenereignisse sowie zwei Naturregen erfolgten Berechnungen mit dem statischen und dem dynamischen Modell. Die Ergebnisse zeigen, dass das Fallbeispiel, bemessen mit den Fließzeitverfahren (statisches Modell), im Hinblick auf Starkregenereignisse Reserven aufweist.

Berechnungen mit dem dynamischen Modell zeigten, dass auch ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren rechnerisch sicher abgeleitet werden kann. Bezogen auf die in diesem Forschungsbericht gewählten Eingangsparameter im dynamischen Modell sind die Entwässerungsanlagen dieses Fallbeispiels auch unter Annahme einer 30 bis 50 prozentigen Erhöhung von Bemessungsregenspenden ausreichend dimensioniert und bei guter Instandhaltung in der Lage, auch die zukünftig angenommenen erhöhte Bemessungsregenspenden sicher aufzunehmen und abzuleiten.

4.1.3.6 Handlungsempfehlungen freie Strecke

Das Fließzeitverfahren ist durch Anpassung der Eingangswerte für die hydraulische Bemessung weiter anwendbar. Eine Verringerung der Bemessungswassermengen durch Anpassung der konservativen Ansätze des Fließzeitverfahrens oder die Wahl einer anderen als derzeit üblichen Bemessungsregenspende wäre eine Option, um trotz durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Starkregenereignisse eine wirtschaftliche Dimensionierung zu realisieren. Die Anwendung von hydrodynamischen Modellen wird bei komplexen Abflusssystemen und zur Nachrechnung bestehender Systeme empfohlen.

Die Pflege und Instandhaltung der Bahngräben und Tiefenentwässerung sollte eine hohe Priorität haben. Die Bedeutung einer gut funktionierenden Gleisentwässerungsanlage sollte auch bei anderen Gewerken und den zuständigen Behörden stärker kommuniziert werden. Offene Systeme (Bahngräben) sollten den geschlossenen Systemen bereits bei der Planung vorgezogen werden. Nach Möglichkeit sollten keine Außeneinzugsgebiete an die Entwässerungsanlagen der Bahn angeschlossen werden. Für Streckeneinstufungen II und III sollte ein kurzfristiger Wasserstand im Bahngraben für Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten von

20 und 100 Jahren analog der Streckeneinstufung I zugelassen werden. Die Retention des Sickerkörpers der Tiefenentwässerung sollte auch weiterhin als zusätzliche Reserve für Starkregenereignisse verbleiben. Die Längen zur Vorflut könnten verringert werden bzw. größere Gräben ohne Hebeanlagen anstelle der Standardbahngräben als eine Möglichkeit der Retention geschaffen werden. Der Weg bis zum Einleitbereich weg vom Gleis zur Vorflut sollte bei regelmäßigen Inspektionen der Gleisentwässerung mit inspiziert und einbezogen werden.

Insgesamt sind die Entwässerungseinrichtungen mit dem Fließzeitverfahren ausreichend dimensioniert. Durch die derzeit im aktuellen Regelwerk vorgegebenen Bemessungsansätze und die modellbedingten Reserven sind die bestehenden Entwässerungsanlagen des Regelquerschnittes der freien Strecke im Schotteroberbau sowie die in Zukunft danach bemessenen Entwässerungsanlagen in der Lage, auch einen möglicherweise durch den Klimawandel um 50 % erhöhten Bemessungsregen $r_{15,0,1}$ ohne schadenhaften Rückstau aufzunehmen und ableiten zu können. Maßgeblich für eine sichere und staufreie Ableitung des Wassers sind regelmäßige Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen. Dies betrifft die Entwässerungsanlagen selbst aber auch die Zuleitung zur Vorflut sowie die Einleitstelle der Bahnentwässerung in die Vorflut.

4.1.3.7 Durchlässe mit Fließgewässern

Die Recherche in der PD Dresden zeigte, dass die Durchlässe größtenteils kategorisiert sind. Typische geometrische Durchlassquerschnitte sind der Kreis, das Rechteck bzw. Quadrat, das Ei- sowie das Maulprofil. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die häufigsten Geometrien Rohr- und Plattendurchlässe sind (Abbildung 4-15), mit einer lichten Weite zwischen 0,3 und 1,0 m bei den Rohrdurchlässen und 0,6 m bei den Plattendurchlässen.

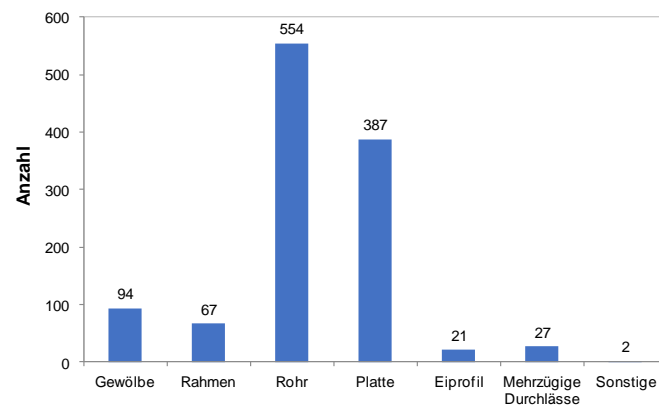


Abbildung 4-15: Anzahl der Durchlässe der PD Dresden, bezogen auf die Geometrie (Gesamtzahl: 1.152).

Für diese Forschungsarbeit wurde ein Ablaufschema zur hydraulischen Erstabschätzung entwickelt, auf dessen Grundlage exemplarisch an fünf ausgewählten Beispielen der PD Dresden eine Bewertung der hydraulischen (Rest)Kapazität für das Jahr 2019 und für eine klimabedingte Zunahme der Abflussmenge vorgenommen werden konnte. Die Ergebnisse sind dem Gesamtbericht (EBA 2019) zu entnehmen.

Die historische Recherche ergab, dass seit ca. 1985 die Forderung zur hydraulischen Bemessung von Durchlässen vorliegt. Die Literaturrecherche zeigte, dass für die Bemessung von Durchlässen in den Regelwerken keine Festlegungen zum zu betrachtenden Einzugsgebiet getroffen wurden und werden. Auf Basis der Auswertung von Datensätzen der PD Dresden und der PD Magdeburg konnten jedoch geometrische Standardbauwerke herausgearbeitet werden. Für diese Standardbauwerke erfolgte anhand von fünf Beispielen der PD Dresden eine Bewertung der hydraulischen Restkapazität, auch in Hinblick auf die klimabedingte Zunahme von Starkregenereignissen.

Es wurde ein Ablaufschema zur hydraulischen Bemessung von Durchlässen für das Bundesland Sachsen erstellt, das für eine Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Durchlässen zum heutigen Zeitpunkt und auch bei durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Abflüssen herangezogen werden kann. Eine zukünftige Übertragung auf andere Bundesländer ist möglich, wenn Abflussspenden und Abflüsse für Gewässer, wie in Sachsen oder auch in Baden-Württemberg, existieren und in frei verfügbaren Portalen zur Verfügung gestellt werden.

4.1.3.8 Handlungsempfehlungen für Durchlässe mit Fließgewässern

Eine allgemeine flächendeckende Aussage zur Restkapazität von Durchlässen mit Fließgewässern ist pauschal nicht möglich. Die Einzelnachweise sind daher standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten. Allgemein lassen sich Empfehlungen zur Bauweise, Maßnahmen zur Inspektion und Instandhaltung sowie zur Bewertung der Restkapazität bei eventuell durch den Klimawandel bedingten erhöhten Starkregenereignissen und daraus resultierenden höherem Abfluss bei Durchlässen formulieren.

Für die zukünftigen hydraulischen Bemessungen der Durchlässe sollten unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten Vorgaben für das nachzuweisende Sicherheitsniveau gemacht werden. Denkbar wäre ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren (HQ_{100}) für Durchlassneubauten. Die Abfrage nach aktuellen Hochwasserabflüssen und Prognosen sollte immer bei der zuständigen Behörde erfolgen.

Falls keine frei verfügbaren Daten vorliegen, können als Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit die erarbeiteten Tabellen im Abschlussbericht zu diesem Projekt herangezogen werden. Eine objekt-konkrete Erstabschätzung der Kapazität der Durchlässe bei der Sanierung bzw. bei durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Abflüssen könnte damit ebenfalls erfolgen. Erfahrungen aus bisherigen Hochwasserereignissen sollten bei der Bewertung immer mit einfließen.

Als bauliche Maßnahmen werden die Vermeidung von doppelzügigen Durchlässen sowie die Befestigung von Ein- und Ausläufen besonders bei Fließrichtungswechsel empfohlen, da so Ausspülungen reduziert werden. Im Auslaufbereich sollten hydraulisch günstige an das Durchlassprofil und die Fließgeschwindigkeit im Durchlass angepasste Querschnitte gewählt werden. Auf den Einbau von Rechen im Ein- und Auslaufbereich sollte verzichtet werden, da bereits kleinstes Schwemmgut kontinuierlich zurückgehalten wird und zum Zusetzen des Durchlasses und damit zur Minderung der Abflusskapazität führen kann. Ohne Rechen würde das kleine Schwemmgut oft durch den Durchlass hindurchfließen. Nach Hochwasserereignissen sollten eine Kontrolle und die Beräumung der abgelagerten Sedimente erfolgen.

Eisenbahndämme im Bestand dürfen ohne geotechnisches und hydrologisches Gutachten nicht als Deiche im Sinne von Hochwasserschutzmaßnahmen ausgelegt werden. Im Rahmen von Neubauvorhaben wären eine Retention und ein Hochwasserrückhalt durch Eisenbahndämme bei Einhaltung entsprechender Nachweise grundsätzlich eine Möglichkeit.

4.2 Flusshochwasser

Im bisherigen Verlauf des BMVI-Expertenetzwerks wurden insbesondere der Rhein, die Donau und ihre wichtigen Nebenflüsse untersucht (siehe Abbildung 4-16 für eine Übersicht mit ausgewählten Pegeln). Wie in den Abschnitten 3.3.2, 3.5.2.1 und 3.5.3.1 dargelegt, setzt die Analyse der Auswirkungen von Flusshochwasser auf Verkehrswege (Wasserstraße, Schiene und Straße) umfassendere Kenntnisse der Hochwassersituation im jeweiligen Flussgebiet voraus. Einleitend werden hier daher die Aspekte der Stationarität bzw. Homogenität und der Repräsentanz beobachteter Pegelabflussreihen sowie der Simulation dieser Abflussreihen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME sowie mit Modellketten aus Klimamodellen und LARSIM-ME betrachtet. Die Konsistenz der verfügbaren Abflussreihen konnte im Rahmen der hier vorliegenden Studie nicht weiterführend untersucht werden. Es wird auf die im Abschnitt 3.3.2 genannten Referenzen mit umfangreichen Überarbeitungen von Abflusskurven und Abflussreihen am Rhein und an

der Donau aus der jüngeren Vergangenheit verwiesen und davon ausgegangen, dass die daraus resultierenden und veröffentlichten Abflussreihen den aktuell bestmöglichen Wissensstand repräsentieren.

Weitere Aspekte der Hochwassersituation in den analysierten Flussgebieten werden im Zusammenhang mit der Ergebnisdokumentation bzgl. der Auswirkungen von Flusshochwasser auf die Wasserstraße (Abschnitt 4.2.2) und auf die Straße und Schiene (Abschnitt 4.2.3) berücksichtigt.

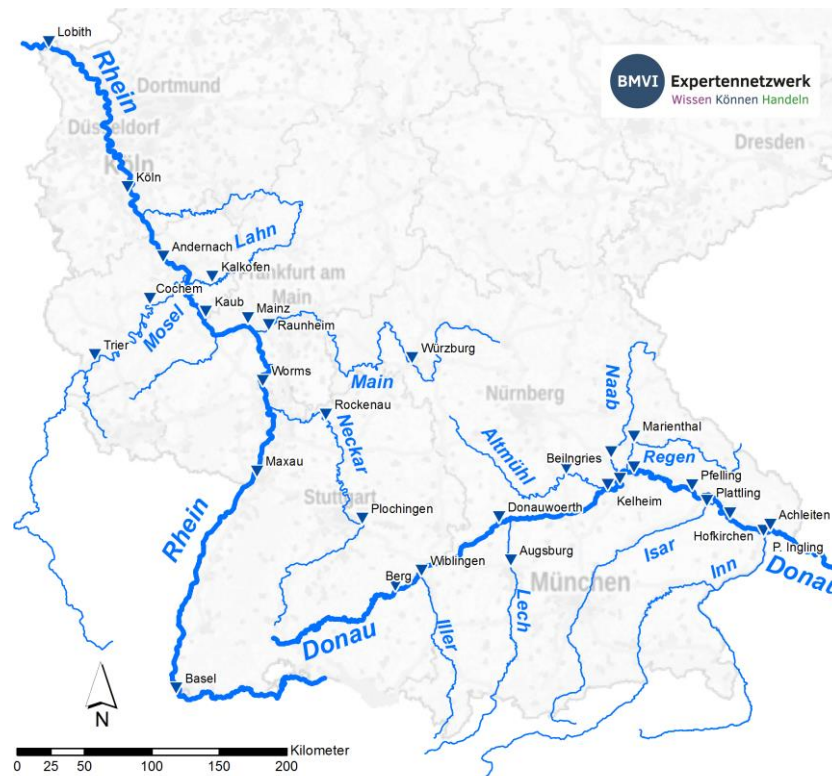


Abbildung 4-16: Das analysierte Gewässernetz mit wichtigen Pegeln.

4.2.1 Hydrologische Analysen und Simulationen – Vorarbeiten

4.2.1.1 Stationaritätsanalyse für Serien jährlicher Abflussscheitel HQ:

Um die langfristige Entwicklung der Hochwassersituation an Rhein und Donau in der beobachteten Vergangenheit zu analysieren und mögliche Inhomogenitäten im Abflussprozess durch anthropogene Einflüsse zu erkennen, wurden für Serien jährlicher Abflussscheitel HQ 30-jährliche gleitende Mittelwerte berechnet, die sich an einem Zeitpunkt jeweils auf die letzten 30 Jahre beziehen (siehe Abbildung 4-17 für den Rheinpegel Kaub und den Donaupegel Hofkirchen). Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass Vergleichssimulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME nur relativ geringe Auswirkungen von Talsperren auf die Hochwasserabflüsse der genannten Pegel ergaben.

Am Rheinpegel Kaub zeigt das gleitende Mittel gegen Ende (bis zum Jahr 2006, das den Zeitraum 1977–2006 repräsentiert) nach zuvor weitgehend stationärer Entwicklung einen deutlichen Anstieg um ca. 20 %. Danach fiel das gleitende HQ-Mittel wieder, blieb jedoch deutlich über dem Niveau vor dem genannten Anstieg. Eine ähnliche Entwicklung zeigen auch die Serien anderer Rheinpegel (Worms und Köln). Zu dieser Entwicklung zunehmender Abflussscheitel am Rhein bis in die späten 1970er Jahre hat u. a. der bis dahin erfolgte Entzug von Retentionsflächen am Rhein beigetragen. Als Folge von weniger Retentionsfläche beschleunigt sich der Ablauf von Hochwasserwellen im Rhein und deren Scheitel überlagern sich stärker mit denen der Nebenflüsse (IKSR 2012, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2016). Jedoch zeigen auch die HQ-Serien wichtiger Nebenflusspegel (Rockenau/Neckar,

Würzburg/Main, Kalkofen/Lahn, Cochem/Mosel) im angesprochenen Zeitraum eine mehr oder weniger vergleichbare Entwicklung, was auch für eine klimabedingte Ursache (Langfristvariabilität) spricht. An den Pegeln Cochem und Würzburg (mit Beginn der Pegelabflussreihen in den 1820er Jahren) finden sich in der fernerer Vergangenheit ebenfalls Schwankungen im gleitenden HQ-Mittel, die ebenfalls für das Auftreten einer klimabedingten Langfristvariabilität sprechen.

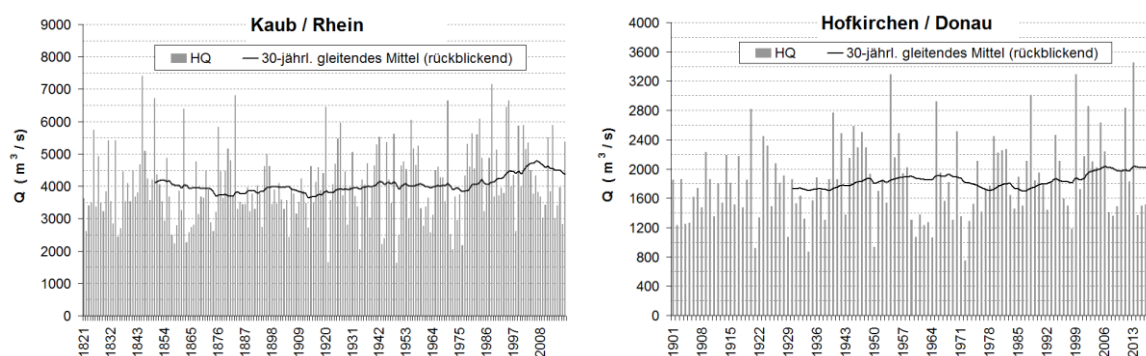


Abbildung 4-17: Serien jährlicher Scheitelabflüsse aus beobachteten Abflussreihen der Pegel Kaub und Hofkirchen. Die eingezeichneten 30-jährigen gleitenden Mittelwerte beziehen sich an einem Zeitpunkt jeweils auf die letzten 30 Jahre.

Am Donauegel Hofkirchen ist ein entsprechender Anstieg gleitender HQ-Mittelwerte um ca. 17 % bis zum Jahr 2006 festzustellen, nachdem sie in den vorangehenden Jahrzehnten schwächer variierten. In den Folgejahren fiel das gleitende HQ-Mittel hier im Gegensatz zum Rhein kaum. Ähnliche Entwicklungen sind wiederum auch an anderen Donauegeln festzustellen (Oberndorf, Pfelling, Donauwörth). Da Untersuchungen der TU München ergaben, dass der Entzug von Retentionsflächen an der Donau nur geringe Effekte auf Hochwasserscheitel hat (Asenkerschbaumer et al. 2012, Skublics 2014), ist der angesprochene Anstieg gleitender HQ-Mittelwerte bis zum Jahr 2006 offenbar v. a. klimabedingt. Dies wird bestätigt durch ähnliche Anstiege an den Nebenflusspegeln Heitzenhofen/Naab und Marienthal/Regen. Wie Würzburg und Cochem im Rhein-Einzugsgebiet waren diese Pegel auch in der fernerer Vergangenheit von Schwankungen der gleitenden HQ-Mittelwerte, also einer klimabedingten Langfristvariabilität betroffen. Dagegen ergab sich der Anstieg bis zum Jahr 2006 an den Nebenflüssen aus dem alpinen Raum (Pegel Plattling/Isar und Passau Ingling/Inn) bei auch langfristig relativ geringen Schwankungen nicht, womit der Anstieg am Donauegel Achleiten (unterhalb der Inn-Mündung) auch schwächer ausfällt als am Pegel Hofkirchen.

Die Stationaritätsanalyse zeigt, dass bei der Entwicklung von Hochwasserstatistiken für den Rhein, die Donau und ihre wichtigen Nebenflüsse eine Orientierung v. a. für den Zeitraum ab Ende der 1970er Jahre geeignet ist, um grundlegende Eigenschaften des Istzustands der Hochwassersituation im Hinblick auf eine klimatologische Langfristvariabilität sowie am Rhein auch im Hinblick auf dessen Ausbauzustand zu erfassen. Ein solcher Bezug auf einen auf wenige Dekaden begrenzten Zeitraum der jüngeren Vergangenheit schafft dabei auch eine bessere Vergleichbarkeit zu Abflusssimulationen für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 im Zusammenhang mit der vorgesehenen Analyse der Entwicklung der Hochwassersituation in Zukunftsprojektionen. Allerdings müssen ggf. auch seltene Extremereignisse aus der fernerer Vergangenheit in die Entwicklung von Hochwasserstatistiken einbezogen werden, um Aussagen im extremen Hochwasserbereich abzusichern (vgl. Abschnitt 3.3.2). Eine weitere Erkenntnis aus der Stationaritätsanalyse ist, dass in den Teileinzugsgebieten mehr oder weniger mit dem Auftreten einer langfristigen klimabedingten (dekadischen) Variabilität der Hochwasserabflüsse gerechnet werden muss. Von den angesprochenen Instationaritäten sind v. a. jährliche Scheitelabflüsse betroffen. So zeigten Vergleichsanalysen für jährlich maximale Abflüsse mit mehrtägig kontinuierlicher Überschreitung deutlich schwächere Instationaritäten.

4.2.1.2 Simulation mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME

Über die Analyse beobachteter Pegelabflussreihen hinaus bedarf es einer Simulation täglicher Abflussreihen, um entsprechende Analysen auch für meteorologische Zukunftsprojektionen und weitere verkehrsrelevante Hochwasserszenarien durchführen zu können. Hierfür wird im BMVI-Expertennetzwerk das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME eingesetzt (siehe Abschnitt 3.3.2). Um seine Zuverlässigkeit zu erhöhen, wurde LARSIM-ME im BMVI-Expertennetzwerk einer vertieften Diagnose unterzogen und damit weitergehend begründet oder bei erkanntem Bedarf weiterentwickelt und in seinen Unsicherheiten bewertet (siehe Abschnitt 3.2.2 und Schlussbericht des ExpN-TF1 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, Nilson et al. (2020)). Auch wenn die mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen danach insgesamt eine gute Anpassung an die beobachteten Abflussreihen verfügbarer Pegel zeigen, treten im Hochwasserbereich weiterhin Modellfehler bzw. -unsicherheiten auf (siehe Abbildung 4-18). Diese erschweren, wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erörtert, gerade die in dieser Studie angestrebten vergleichenden und schwellenwertbezogenen Aussagen von Hochwasserstatistiken auf Grundlage der Simulationen. Für präzisierete Modellaussagen wurden daher Model Output Statistics (MOS) für die mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen entwickelt, sofern sich Adjustierungsregeln gegenüber beobachteten Abflussreihen am jeweiligen Pegel identifizieren ließen und als vorteilhaft erwiesen. Das für die Adjustierung verwendete univariate quantile mapping wird in Abbildung 4-18 am Beispiel der Abflussreihe des Pegels Kaub 1971–2015 in seiner Funktionsweise und seiner Auswirkung auf die simulierten Abflüsse veranschaulicht (siehe auch Abschnitt 3.2.2). Hingewiesen sei hier noch einmal darauf, dass im (extremen) Hochwasserbereich nur lineare Beziehungen zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten zugelassen wurden, um eine robuste und zuverlässige Extrapolation der Bias-Adjustierung zu gewährleisten.

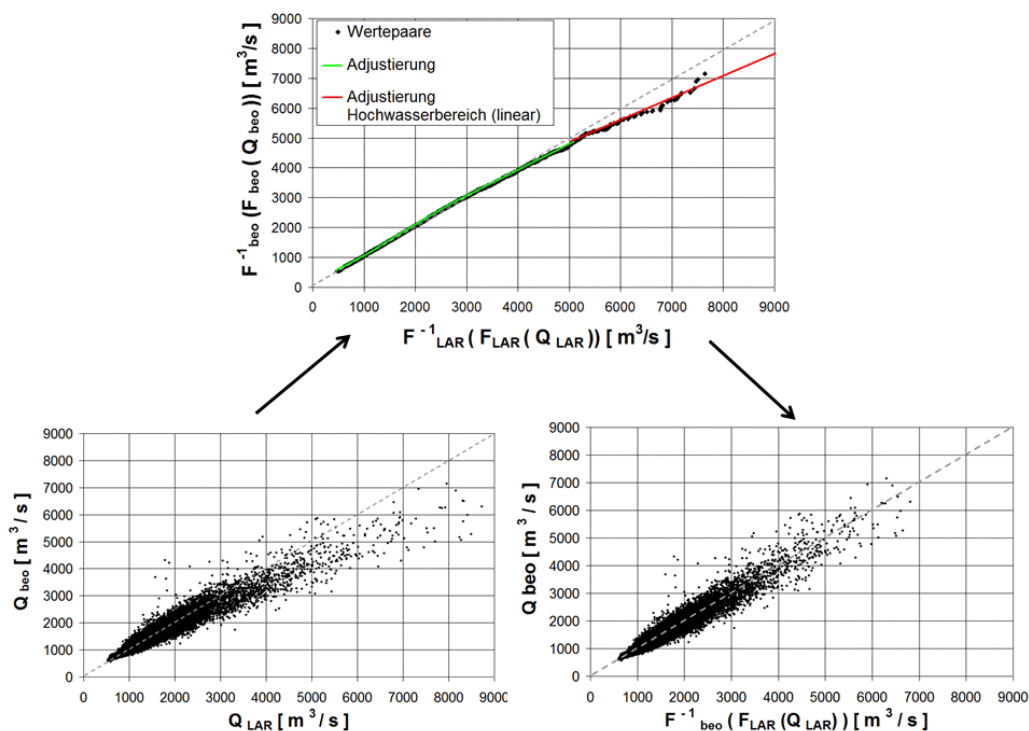


Abbildung 4-18: Streudiagramme beobachteter gegenüber mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen am Pegel Kaub für den Zeitraum 1971–2015 vor (unten links) und nach (unten rechts) einer Adjustierung durch ein univariates *quantile mapping*, wie im oberen Diagramm dargestellt.

Eine denkbare Ursache für zu hoch simulierte Hochwasserabflüsse ist die Wirkung von Talsperren im Einzugsgebiet, deren Wirkung im Modell nicht adäquat simuliert wird. Daher wurden an ausgewählten Pegeln Simulationen mit und ohne die in LARSIM-ME implementierten Talsperren verglichen (implementierte

Seen wurden in beiden Fällen berücksichtigt). Die Talsperrenwirkung war dabei meist deutlich geringer als der durch die Adjustierung im Hochwasserbereich auszugleichende Modellfehler, insbesondere am Rhein. Eine Ausnahme ist der Isarpegel Plattling, der unter dem Einfluss des Sylvensteinspeichers steht, jedoch kann die Talsperrenwirkung auch hier nur einen kleineren Anteil des Modellfehlers im Hochwasserbereich erklären. Bereits am Donaupegel Hofkirchen (unterhalb der Isarmündung) tritt dieser Effekt im Rahmen der MOS wieder deutlich zurück.

Um die Adjustierungsbeziehungen weitergehend abzusichern wurde eine split-sample-Analyse durchgeführt, indem es getrennt auf die Teilreihen 1971–1994 und 1995–2015 angewandt wurde (siehe Abbildung 4-19 exemplarisch für den Pegel Kaub). Die Beziehungen zwischen beobachteten und simulierten Abflusswerten waren dabei im Hochwasserbereich für beide Teilreihen unter sich sowie im Vergleich zur Gesamtreihe hinreichend ähnlich, um die für die Gesamtreihe durchgeführte Bias-Adjustierung zu bestätigen. Entsprechende Ergebnisse ergaben sich auch an den Rheinpegeln Worms und Köln sowie (allerdings weniger deutlich) an den Donaupegeln Donauwörth und Hofkirchen. Weitere Argumente für die MOS ergaben sich aus Füllenbilanzvergleichen für die jeweils größten Hochwasserereignisse sowie aus noch leicht verbesserten Nash-Sutcliffe-Effizienzkriterien an Pegeln, an denen die Notwendigkeit einer Adjustierung erkannt wurde.

Insgesamt wurden somit MOS für die Simulationen an allen Pegeln im Rhein- und Donau-Einzugsgebiet erstellt, falls eine Adjustierungsbeziehung für das univariate quantile mapping identifiziert werden konnte. Damit werden die Simulationen an den verschiedenen Pegeln gleich behandelt und orientiert an beobachteten Reihen gerade Hochwasserbereich gegenüber der reinen Wasserhaushaltssimulation präzisiert. Beispiele für diese Präzisierung zeigt die Abbildung 4-20 mit den empirischen Verteilungsfunktionen von HQ-Serien aus einer LARSIM-ME-Simulation mit und ohne MOS für die Pegel Kaub und Hofkirchen. Es ist erkennbar, dass die MOS zu einer besseren Übereinstimmung mit der empirischen HQ-Verteilungsfunktion aus beobachteten Abflüssen führt.

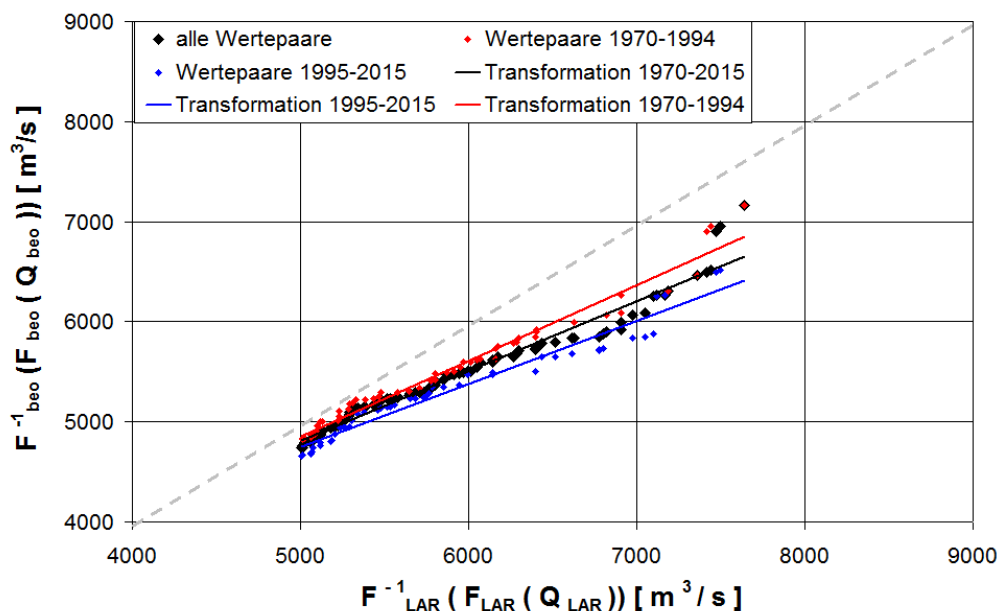


Abbildung 4-19: Streudiagramme beobachteter gegenüber mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen am Pegel Kaub im Hochwasserbereich für den Zeitraum 1971–2015 und die Teilzeiträume 1971–1994 und 1995–2015. Die Adjustierungsbeziehungen zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten sind für alle Reihen ähnlich, womit sich ihre Anwendbarkeit für die simulierte Gesamtreihe bestätigt.

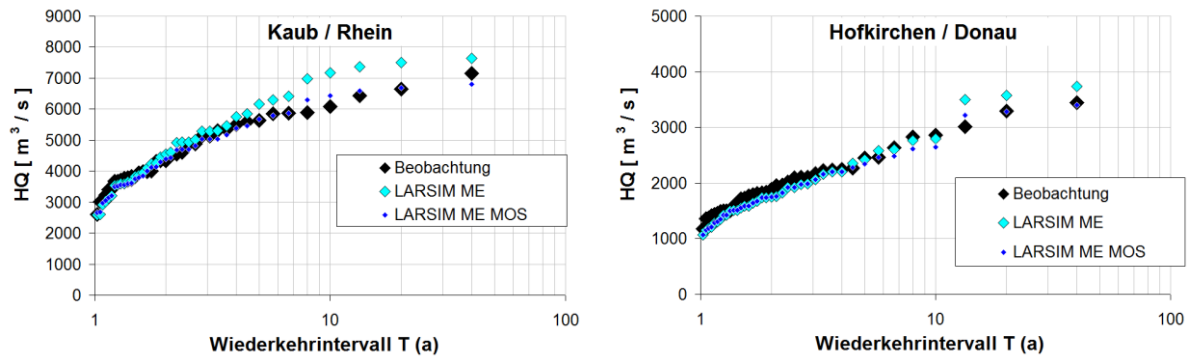


Abbildung 4-20: Empirische Verteilungsfunktionen der Serien 1977–2015 jährlicher Scheitelabflüsse HQ für die Pegel Kaub und Hofkirchen aus Beobachtung sowie aus Simulation mit LARSIM-ME (ohne und mit Adjustierung der MOS).

4.2.1.3 Simulation von Abflussreihen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5)

Um Aussagen zu möglichen Hochwassersituation in Zukunftsprojektionen zu treffen, wurden simulierte und bias-adjustierte meteorologische Daten verschiedener Modellketten globaler und regionaler Klimamodelle genutzt. Diese Daten stellten die Eingangsgrößen für anschließende Wasserhaushaltssimulationen mit LARSIM-ME dar, so dass mit diesem an beliebigen Flussstandorten, u. a. an Pegelstandorten am Rhein, an der Donau und an ihren wichtigsten Nebenflüssen tägliche Abflussreihen simuliert werden konnten. Die hier vorliegende Studie bezieht sich dabei auf das *Weiter-wie-bisher-Szenario*, für die im BMVI-Expertennetzwerk die Simulationsläufe von zunächst 21 Klimamodellketten vorlagen. Hiervon wurden fünf Modellketten ausgeschlossen (alle Modellketten mit WRF-Regionalmodell sowie HadGEM2-ES-CLM und CanESM-CLM), da die ursprünglich simulierten meteorologischen Daten (vor deren Bias-Adjustierung) keine plausiblen Eigenschaften aufwiesen (z. B. inverser Jahresgang der Gebietsniederschläge). Damit scheinen diese Modellketten nicht geeignet, um auf ihrer Grundlage Projektionsaussagen zu treffen. Die in dieser Studie in Bezug auf das *Weiter-wie-bisher-Szenario* berücksichtigten Modellketten sind in der Tabelle 8-1 zusammengestellt.

Mit jeder der verbleibenden Modellketten wurden tägliche Abflussreihen im Zeitraum von 1970–2099 simuliert, die damit die im BMVI-Expertennetzwerk vereinbarten Auswertungszeiträume 1971–2000 (*Bezugszeitraum*), 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*) umfassen. Diese Simulationen erfolgten für das Rhein- und Donau-Einzugsgebiet ohne Wirkung der in LARSIM-ME prinzipiell implementierten Talsperren im alpinen Bereich, da v. a. in den jeweils bedeutenden alpinen Einzugsgebietsanteilen in den Zukunftsprojektionen mit dem Klimawandel von einer starken Modifikation des Abflussregimes (Jahresgang) auszugehen war, die eine grundsätzlich modifizierte Talsperrensteuerung erfordern wird. Diese kann jedoch erst mit weitergehenden Erkenntnissen zum zukünftig zu erwartenden Abflussregime abgeleitet werden. Größere Seen (z. B. Bodensee) mit einer z. T. deutlichen und grundsätzlich wirksamen Dämpfung von Hochwasserabflüssen wurden jedoch auch in den Zukunftsprojektionen berücksichtigt.

Wie sich im vorangehenden Abschnitt zeigte, ist die Wirkung der angesprochenen Talsperren im Hochwasserbereich an den Pegeln des Rheins, der Donau und ihrer wichtigen Nebenflüsse im Vergleich zum Modellfehler gering. Daher wurden in der vorliegenden Studie auch für die ohne Talsperrenwirkung simulierten Abflussreihen des *Bezugszeitraums* Adjustierungsbeziehungen in Bezug auf die beobachteten Abflussreihen abgeleitet. Diese abgeleiteten Beziehungen wurden anschließend für Zukunftsprojektionen angewandt. Die bias-adjustierten Zukunftsprojektionen bekommen damit eine der gegenwärtigen Talsperrenwirkung geprägt. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Talsperrenwirkung auf die in dieser Studie interessierenden Hochwasserkenngrößen ähnlich sein wird wie im *Bezugszeitraum* und sich im Rahmen der Gesamtunsicherheit der Simulation nur schwach auswirkt.

Die auf dem Globalmodell HadGEM2-ES basierenden Simulationen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* neigen insbesondere am Rhein, jedoch auch an der Donau zum gehäuften Auftreten extremer Hochwasserscheitel, die die bisher aufgetretenen Extremwerte und zum Teil auch die HQ₁₀₀₀ Abflüsse der gültigen Hochwasserstatistiken überschreiten. Dieses Problem ergibt sich trotz der (hydrologischen) Bias-Adjustierung, die extreme Abflussscheitel gegenüber den originalen Simulationen noch reduziert. Problematisch ist dabei v. a. bereits ein „gegenwärtiges“ Ereignis, das für das Abflussjahr 2009 simuliert wurde. An den Rheinpegeln Worms, Kaub und Köln sowie an den Donauegeln Donauwörth und Hofkirchen ergaben sich für die Modellketten HadGEM2-ES-r1-RACM und HadGEM2-ES-r1-RCA4 Abflussscheitel im Bereich des HQ₁₀₀₀ der heute gültigen Hochwasserstatistiken oder noch (deutlich) höhere Abflussscheitel. Auch bei der Modellkette HadGEM2-ES-r1-REMO liegt der Abflussscheitel dieses Ereignisses recht hoch (HQ₁₅₀ bis HQ₂₀₀ an den Donauegeln, HQ₅₀₀ bis >HQ₁₀₀₀ an den Rheinpegeln). Auch in den Zukunftsprojektionen dieser Modellketten treten relativ viele Extremereignisse auf. Bei HadGEM2-ES-r1-RCA4 und HadGEM2-ES-r1-RACM sind an allen o. g. Pegeln mehrfach Ereignisse mit einem HQ₁₀₀ nach der heute gültigen Hochwasserstatistik zu verzeichnen, jeweils mindestens ein Ereignis mit einem HQ₁₀₀₀ sowie teilweise auch mehrere HQ₁₀₀₀ Ereignisse. HadGEM2-ES-r1-REMO hat diesbezüglich teilweise moderatere Eigenschaften, jedoch sind in Worms und an den Donauegeln auch Ereignisse mit heutigem HQ₁₀₀₀ zu finden. Wegen dieser offenbar zu starken Neigung der HadGEM2-ES-Modellketten, extreme Hochwasserereignisse zu bilden, wurden sie aus den bisherigen Analysen der Zukunftsprojektionen im Hochwasserbereich ausgeschlossen, sodass 13 Modellketten verbleiben.

4.2.2 Hochwasser Wasserstraße

Wie im Abschnitt 3.5.2.1 erörtert, wird bei Überschreiten des HSW in einem Wasserstraßenabschnitt die Binnenschifffahrt eingestellt. Um die Frage zu untersuchen, wo und wie häufig bzw. mit welcher Dauer die Binnenwasserstraßen von Hochwassersituationen mit HSW-Überschreitung in der beobachteten Vergangenheit betroffen waren und zukünftig klimawandelbedingt (*Weiter-wie-bisher-Szenario*) betroffen sein könnten, wurden Analysen zur jährlichen Überschreitungshäufigkeit des HSW bzw. des nach heutigem Gewässerzustand korrespondierenden HSQ vorgenommen. Bisher wurden im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* der Rhein, der Main, die Lahn und die Donau sowie einzelne Abschnitte an der Mosel und am Neckar mit der im Abschnitt 3.5.2.3 beschriebenen Methodik untersucht.

Nach Erhebung der HSW für die zu analysierenden Richtpegel wurden für den Istzustand der Gewässer über verfügbare Abflusskurven oder mit Hilfe von FLYS entsprechende HSQ ermittelt. Mit den beobachteten Abflussreihen an diesen Pegeln oder an geeigneten Referenzpegeln konnten damit bereits Serien jährlicher Überschreitungshäufigkeiten des jeweiligen HSQ gebildet werden. Abbildung 4-21 zeigt diese Serien exemplarisch für die Pegel Kaub am Rhein und Hofkirchen an der Donau. Serien weiterer Pegel dieser Flussgebiete finden sich im Anhang. Die Serien zeigen je nach Wasserstraße, jedoch auch je nach Pegel bzw. Wasserstraßenabschnitt desselben Gewässers ein recht differenziertes Bild. Hierin kommen die spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Flussabschnitts (Geometrie, Uferbeschaffenheit, Bauwerke etc.) zum Ausdruck, auch wenn es sich innerhalb eines Gewässers um einen sehr ähnlichen Abflussprozess handelt. Auffällig ist zudem, dass die Überschreitungshäufigkeit an den Nebenflusspegeln des Rheins (auch an der Lahn und am Neckarpegel Rockenau) meist größer ist als am Rhein. Anzusprechen ist auch eine Langfristvariabilität in der beobachteten Vergangenheit mit Phasen unterschiedlicher Häufigkeit der HSQ-Überschreitung. An allen bisher untersuchten Pegeln ergaben sich für die Zeiträume 1971–2000 und 1981–2010 sehr ähnliche mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten, womit die in dieser Studie für die Bewertung von Zukunftsprojektionen gewählten *Bezugszeitraum* 1971–2000 den Zustand der jüngeren Vergangenheit nach wie vor hinreichend repräsentiert.

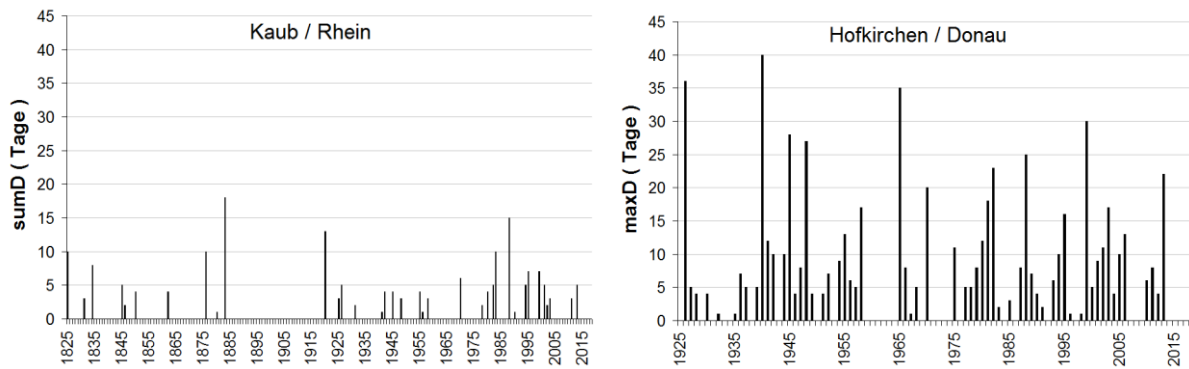


Abbildung 4-21: Jährliche Überschreitungshäufigkeiten des HSQ (Abfluss bei HSW für den heutigen Gewässerzustand) am Rheinpegel Kaub und am Donaupegel Hofkirchen.

Um Aussagen auch für die Zukunftsprojektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* treffen zu können, wurden über die im Anhang 8.1 genannten Modellketten (ohne Modellketten mit HadGEM2-ES Globalmodell) tägliche Abflussreihen für den Zeitraum von 1970–2099 simuliert und nach der im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Vorgehensweise bzgl. ihrer Überschreitungshäufigkeit des HSQ pro Richtpegel bzw. Gewässerabschnitt ausgewertet. Die im Abschnitt 4.2 einleitend angesprochenen Unsicherheiten wurden durch eine Bias-Adjustierung der simulierten Abflussreihen berücksichtigt, wobei diese im Hinblick auf die hier interessierende, sehr sensitive schwellenwertbezogene Aussage modellketten-spezifisch durchgeführt wurde. Neben den damit erhaltenen Serien jährlicher Überschreitungshäufigkeiten einzelner Modellketten wurden für die Zeiträume der *Bezugszeitraum* (1971–2000), der *nahen Zukunft* (2031–2060) und der *fernen Zukunft* (2070–2099) jeweils auch vereinigte Ensembleserien gebildet, die einen größeren Stichprobenumfang haben und die berücksichtigten 13 Modellketten insgesamt repräsentieren. Schließlich konnten für diese vereinigten Ensembleserien mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten in Bezug auf den *Bezugszeitraum* und die beiden o. g. Zukunftszeiträume berechnet und verglichen werden. Die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten für einzelne Richtpegel und Gewässerstrecken wurden in Längsschnitten der untersuchten Wasserstraßen zusammengeführt und geben in dieser Form wertvolle Hinweise auf langfristig sich verändernde und regional differenzierte Gefährdungen der Binnenschifffahrt durch den Klimawandel in Bezug auf Hochwasser.

Abbildung 4-22 zeigt exemplarisch die Häufigkeit der HSW-Überschreitung für den Rhein im Längsschnitt von Flusskilometer 335 (Oberrhein) bis zur deutsch-niederländischen Grenze bei Flusskilometer 860. In der Gegenwart (*Bezugszeitraum* 1971–2000) 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, um bis zum Pegel Andernach wieder auf zwei bis drei Tage pro Jahr anzusteigen. Unterhalb des Pegels Köln lagen die Überschreitungshäufigkeiten wiederum unterhalb von einem Tag pro Jahr. Beobachtung (schwarz) und Simulation (grau) decken sich dabei gut. Am Main (Abbildung 4-22, von der Mündung der Regnitz in den Main bis zu dessen Mündung in den Rhein) liegen die Überschreitungshäufigkeiten pro Jahr im *Bezugszeitraum* bei zwei bis drei Tagen im Unterlauf (ab Hafen Aschaffenburg) und bei drei bis sechs Tagen oberstrom. Deutlich größere Häufigkeiten ergaben sich an der Lahn mit knapp 30 Tagen pro Jahr. An der Mosel und am Neckar wurden bisher nur einzelne Abschnitte analysiert. Hier ergaben sich am Neckarabschnitt mit Richtpegel Rockenau und am Moselabschnitte der Richtpegel Trier und Cochem an neun bzw. sechs Tage pro Jahr. Auch die Donau (Abbildung 4-22, von der Mündung des Altmühl bis Passau) zeigt schließlich im *Bezugszeitraum* ein differenziertes Bild. Im Bereich oberstrom von Straubing (km 2321, zwischen Regensburg und Isarmündung) sind die Überschreitungshäufigkeiten mit ein bis zwei Tagen relativ gering, während sie zwischen Straubing und Schalding (km 2234, wenige km oberhalb von Passau) mit sechs bis sieben Tagen deutlich höher liegen. Ab Schalding liegen sie bis Passau mit zwei bis drei Tagen wieder bei deutlich geringeren Werten.

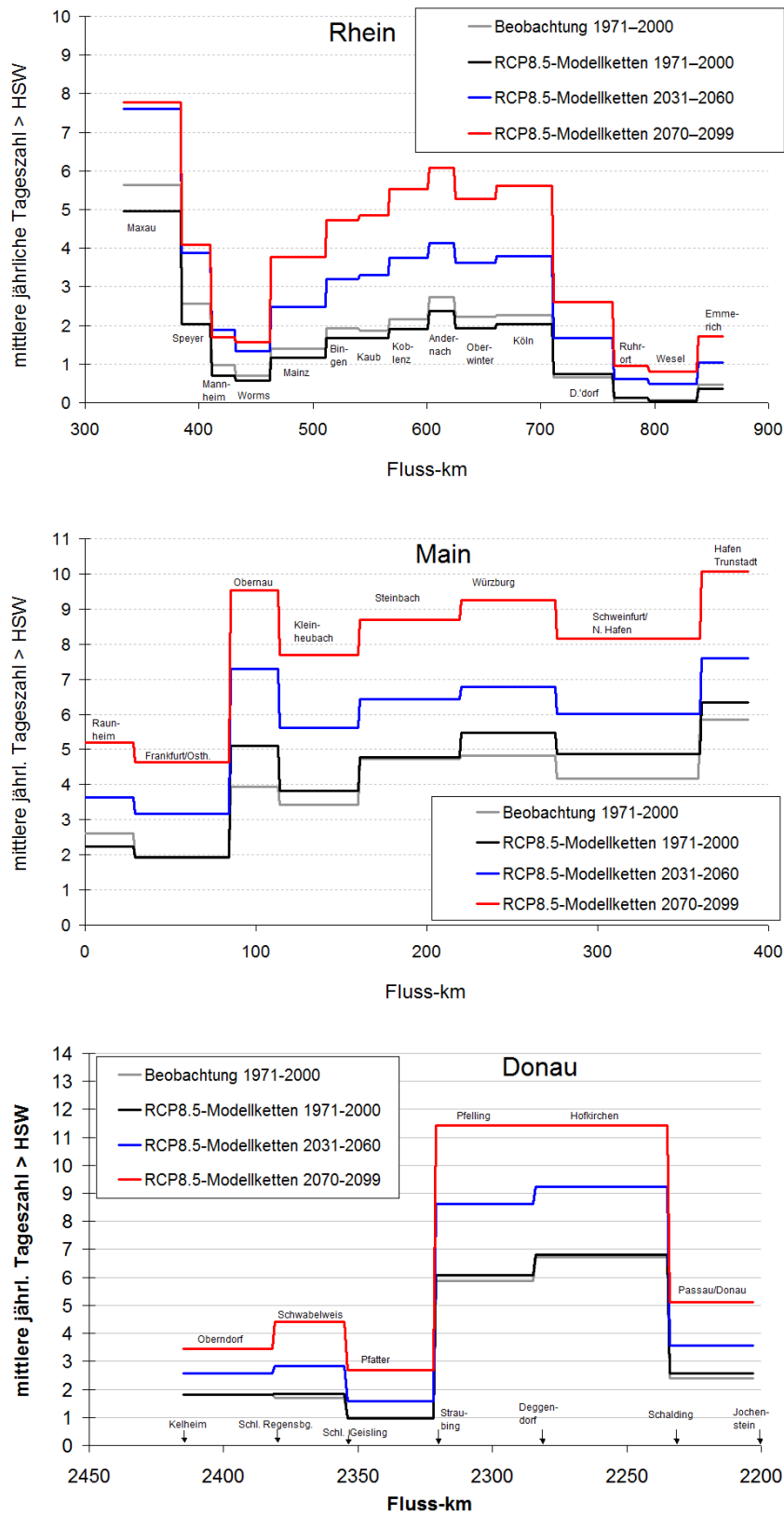


Abbildung 4-22: Längsschnitte von Rhein (oben), Main (mittig) und Donau (unten) für die mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeit des Abflussschwellenwerts HSQ (entsprechend zum heute gültigen HSW). Verglichen werden jeweils die Längsschnitte aus der beobachteten Abflussreihe 1971–2000 sowie der simulierten, vereinigten Ensembleserien von 13 Modellketten für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in Bezug auf den *Bezugszeitraum*, die *nabe* und die *ferne Zukunft* mit den im Diagramm genannten Zeiträumen.

Aus den für die Zukunftsperioden simulierten Abflussreihen und daraus gebildeten, vereinigten Ensembleserien wurden erhöhte Überschreitungshäufigkeiten ermittelt, wobei die relativen Strukturen der Längsschnitte an Rhein, Main und Donau weitgehend erhalten bleiben. Bei den nachfolgend genannten, zum Teil sehr deutlichen relativen Zunahmen ist zu berücksichtigen, dass die absoluten Differenzen zum Ausgangszustand im Mittel nur wenige Tage pro Jahr ausmachen. Für die *nabe Zukunft* (2031–2060) ergaben sich am Rhein gegenüber dem *Bezugszeitraum* verbreitete relative Zunahmen um 50-100 %, an Abschnitten mit geringen Überschreitungshäufigkeiten ergaben sich auch stärkere relative Zunahmen, jedoch auf niedrigem Niveau (absolut um max. einen Tag pro Jahr). Für die *ferne Zukunft* (2070–2099) erhöhen sich die Überschreitungshäufigkeiten fast ausnahmslos weiter, bis zum Abschnitt des Pegels Worms gegenüber der *naben Zukunft* aber nur noch wenig. In den Rheinabschnitten zwischen denen der Pegel Mainz und Köln erhöhen sie sich dagegen deutlich weiter, so dass sich hier gegenüber dem *Bezugszeitraum* verbreitete relative Zunahmen der Überschreitungshäufigkeiten in der Größenordnung von 150-200 % ergeben.

In den Abschnitten des Niederrheins ab dem des Pegels Düsseldorf finden sich auch stärkere relative Zunahmen, jedoch bleiben diese nach wie vor auf vergleichsweise geringem Niveau (max. 2,5 Tage im Abschnitt des Pegels Düsseldorf). Insgesamt ergab sich am Rhein maximal eine zukünftige mittlere jährliche HSW-Überschreitungshäufigkeit von knapp acht Tagen im Abschnitt des Pegels Maxau. An den Nebenflüssen des Rheins ergaben sich in den meisten Gewässerabschnitten geringere relative Zunahmen der Überschreitungshäufigkeit gegenüber dem *Bezugszeitraum* mit 20-50 % für die *nabe Zukunft* und 40-100 % für die *ferne Zukunft*. Stärkere Zunahmen (60 % für die *nabe Zukunft*, 130-140 % in der *fernen Zukunft*) wurden am Unterlauf des Mains gefunden, jedoch ausgehend von geringeren Überschreitungshäufigkeiten im *Bezugszeitraum* (s. o.). Mit Ausnahme der Lahn bleiben die mittleren jährlichen Überschreitungsdauern an den Nebenflussabschnitten auch in der *fernen Zukunft* unterhalb von 12 Tagen. An der Donau schließlich betragen die relativen Zunahmen der Überschreitungshäufigkeit gegenüber dem *Bezugszeitraum* für die *nabe Zukunft* zwischen 35-65 % und für die *ferne Zukunft* zwischen 70-180 %. Sie nehmen damit eine Zwischenstellung zwischen den am Rhein und den an dessen Nebenflüssen festgestellten relativen Zunahmen ein. In den Abschnitten zwischen Straubing und Schalding mit im *Bezugszeitraum* bereits relativ hohen Überschreitungshäufigkeiten (s. o.) fallen die relativen Zunahmen dabei insgesamt etwas geringer aus als in den anderen Abschnitten der Donau. Die mittleren jährlichen Überschreitungsdauern bleiben auch in der *fernen Zukunft* in allen Abschnitten unterhalb von 12 Tagen.

Insgesamt lässt sich das Fazit ziehen, dass nach dem untersuchten Ensemble von Simulationsläufen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* deutliche relative Zunahme der mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten am Rhein, seinen wichtigen Nebenflüssen und an der Donau zu erwarten sind. Abgesehen von Flussabschnitten mit heute vernachlässigbaren Überschreitungshäufigkeiten (<1 Tag), ergaben sich um bis zu dreifach erhöhte Häufigkeiten. Am Rhein bleiben die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten jedoch unter acht Tagen, an den Nebenflusspegeln des Rheins und an der Donau (meist deutlich) unter zwei Wochen. Im Vergleich mit den meist wesentlich länger ausgeprägten Niedrigwasserphasen führen Hochwasserereignisse damit auch in den betrachteten Zukunftsszenarien i. d. R. nur zu untergeordneten Unterbrechungsdauern für die Schifffahrt.

Allerdings haben die dargestellten Mittelwerte nur begrenzte Aussagekraft, da die mit HSW-Überschreitungen verbundenen Sperrungen ungleichmäßig über die Zeit verteilt sind. Die dargestellten Mittelwerte erlauben jedoch die Identifikation der relativen Gefährdung unterschiedlicher Streckenabschnitte. Verfeinerte Analysen und Darstellungen können damit gezielt vorgenommen werden. Dazu gehört die Ermittlung jährlicher Reihen der Tagesanzahl mit HSW-Überschreitung an interessierenden Gewässerabschnitten. Wie aus den Längsschnitten der Abbildung 4-22 entnommen werden kann, ist die relative Gefährdung an den Wasserstraßenabschnitten der Pegel Köln am Rhein und Hofkirchen an der Donau vergleichsweise hoch. Für diese Pegel wurden exemplarisch die vereinigten Ensembleserien der jährlichen Überschreitungshäufigkeiten aller analysierten Modellketten für den *Bezugszeitraum* und die beiden analysierten Zukunftszeiträume in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm zusammengeführt (siehe Abbildung 4-23). Diese Darstellungen zeigen, dass für die aus den letzten Jahrzehnten bekannten, maximalen jährlichen Überschreitungshäufigkeiten

des HSW zukünftig ein deutlich gehäuftes Auftreten zu erwarten ist. Bspw. kann den größten jährlichen Überschreitungsdauern des Zeitraums 1971–2015 mit 15 Tagen am Pegel Köln (Abflussjahr 1983) bzw. 30 Tagen am Pegel Hofkirchen (Abflussjahr 1999) im Vergleich zum *Bezugszeitraum* jeweils ein statistisches Wiederkehrintervall von knapp 50 Jahren zugeordnet werden. In der Projektion für die *ferne Zukunft* lassen sich hingegen Wiederkehrintervalle von 7 Jahren (Köln) bzw. knapp 10 Jahren (Hofkirchen) abschätzen. Des Weiteren kann mit diesen Projektionen eine ereignisbezogene Analyse der Dauern der HSW-Überschreitungen vorgenommen werden, siehe z. B. Schlussbericht des ExpN-TF1 *Fokusgebiete Binnen* (Hänsel et al. 2020c).

Perspektivisch können die entwickelten Längsschnitte (Hinweiskarten) sowie die weiteren hier dargestellten Ergebnisse bzgl. der HSW-Überschreitung an Wasserstraßen einer Analyse der Kritikalität der daraus resultierenden Einschränkungen für die Binnenschifffahrt gegenüber gestellt werden und damit als Grundlage für ein schiffahrtsbezogenes Hochwasserrisikomanagement dienen (vergleiche auch Abschnitt 3.5.2.3 und Schlussbericht des ExpN-TF1 *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, Nilson et al. (2020)).

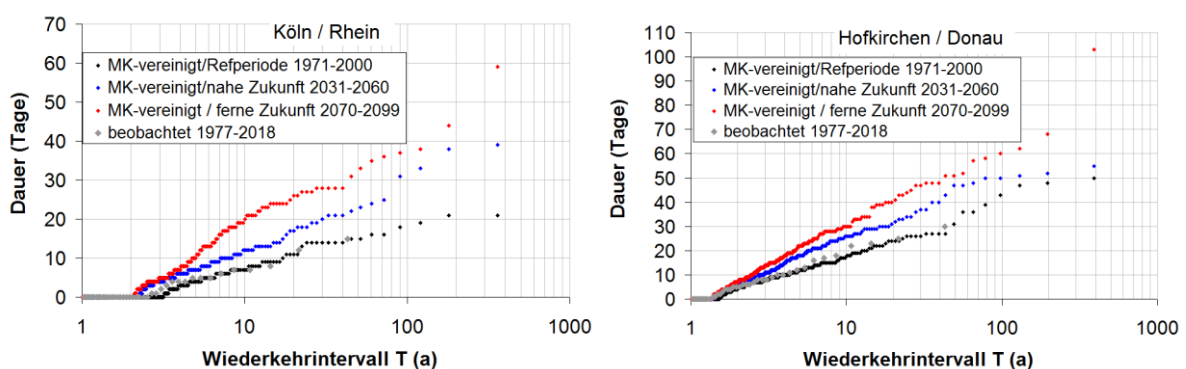


Abbildung 4-23: Serien jährlicher Überschreitungshäufigkeiten des Abflussschwellenwerts HSQ (entsprechend zum heute gültigen HSW) an den Pegeln Köln und Hofkirchen im Wahrscheinlichkeitsdiagramm. Verglichen werden jeweils die Serie aus der beobachteten Abflussreihe 1977–2015 und die vereinigten Ensembleserien aus 13 MK für das *Weiter-wie-bis-her-Szenario* in Bezug auf den *Bezugszeitraum*, die *nabe* und die *ferne Zukunft* mit den im Diagramm genannten Zeiträumen.

4.2.3 Hochwasser Straße und Schiene

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 die landgebundenen Verkehre auf Straße und Schiene beeinträchtigt werden. Schäden an der Infrastruktur und damit verbundene weitreichende Folgen für die Verkehrsströme sind möglich

Um Hinweise auf die derzeitige Exposition zu erhalten, wurde auf die 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 Hochwasser- und Sturmflutszenarien liegen („häufig“, „mittel“, „selten/extrem“), identifiziert werden. Um im nachfolgenden auch Hinweise zu den Veränderungen in der Zukunft zu bekommen, sind die folgenden Analyseschritte notwendig:

- Status quo der Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer
- Abgleich aktuell gültiger Hochwasserstatistiken mit eigenen Extremwertanalysen für beobachtete Abflussreihen

- Entwicklung von Hochwasserstatistiken für simulierte Zukunftsprojektionen (*Weiter-wie-bisher-Szenario*)

Diese werden nun im Detail dargestellt bevor am Ende des Abschnitts die Darstellung der Exposition von Schiene und Straße dargelegt wird.

4.2.3.1 Status quo der Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer:

Wie bereits im Abschnitt 3.5.3.3 angesprochen, werden im BMVI-Expertennetzwerk die bundesweit vorliegenden HWGK der Bundesländer genutzt. Nach einer GIS-basierten Verschneidung der HWGK mit Karten der landgebundenen Verkehrsnetze (Schiene und Straße) werden damit Hinweise auf die allgemeine derzeitige Exposition für die landgebundenen Verkehrsträger in möglichen Überschwemmungsbereichen entlang der Flussläufe abgeleitet. Zudem können besonders gefährdete Bereiche der Verkehrsnetze identifiziert werden. Mit dem Bezug auf die HWGK wird zudem eine einheitliche Schnittstelle zu weiteren Akteuren des Hochwasserrisikomanagements (insbesondere Umweltministerien und -behörden der Bundesländer) gewährleistet.

Auch wenn die HWGK bereits eine weithin abgestimmte und anerkannte Sicht auf die Thematik "Hochwasser" in Deutschland darstellen (siehe z. B. LAWA (2018)), bedarf ihre Nutzung einer Bewertung der in ihnen enthaltenen Unsicherheiten und damit einer erweiterten Interpretation. Bevor die zugrundeliegenden Hochwasserstatistiken für die Gegenwart und die Zukunft in den nachfolgenden Abschnitten diesbezüglich bewertet werden, wird hier zunächst ein länderübergreifender Vergleich der HWGK vorgenommen, um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Definitionen der den HWGK zugrundeliegenden Hochwasser- und Sturmflutszenarien herauszuarbeiten.

Zunächst ist festzustellen, dass die im BMVI-Expertennetzwerk genutzten HWGK aus dem nationalen Berichtsportaal WasserBLICK²⁰ stammen, in dem sie bundesweit zusammengeführt wurden. Es handelt sich dabei um eine generalisierte Variante der HWGK, gewisse Unterschiede zu den von den Bundesländern veröffentlichten HWGK können sich daher insbesondere bei lokalen Betrachtungen ergeben. Bundesweit einheitlich stellen die HWGK eine Kartierung von Überflutungsflächen und -tiefen bei Flusshochwasser für abgestufte Auftretenshäufigkeiten dar. Je nach Auftretenshäufigkeit werden bundesweit einheitlich drei sogenannte Szenarien unterschieden: 1. Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit, 2. Hochwasser mit mittlerer Wahrscheinlichkeit und 3. Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Szenarien für Extremereignisse. Mit dieser im Grundsatz einheitlichen Gliederung sind die HWGK als bundesweit definierter Indikator für Hochwasserexposition für die Verkehrsinfrastruktur geeignet. Im Hinblick auf die einheitliche Definition nicht nur dieser grundsätzlichen Gliederung, sondern auch der einzelnen Szenarien wurde eine bundesweite Recherche anhand der durch die Bundesländer veröffentlichten Angaben durchgeführt. Die Ergebnisse für die Bundesländer mit Anteilen der im Schwerpunkt untersuchten Gewässer sind in der Tabelle 8-4 im Anhang 8.4 zusammengefasst.

Bundesweit einheitlich wird das *Szenario mit mittlerer Wahrscheinlichkeit* definiert, es entspricht dem jährlichen Scheitelabfluss mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ₁₀₀). In allen Bundesländern wird die Wirksamkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen (v. a. Deiche) berücksichtigt. Teilweise werden für dieses Szenario auch potenzielle Überflutungsflächen gesondert dargestellt, die sich bei einem Versagen der Hochwasserschutzmaßnahmen ergeben würden (Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Schleswig-Holstein).

Für das *Szenario mit hoher Wahrscheinlichkeit* werden hingegen unterschiedliche Wiederkehrintervalle angenommen. Diesem Szenario werden je nach Bundesland Jährlichkeiten zwischen 10 (in Bayern auch 5) und 25 Jahren zugeordnet (siehe Tabelle 8-4 im Anhang 8.4). Teilweise werden auch für einzelne Länder verschiedene Jährlichkeiten angegeben, z. B. in Sachsen-Anhalt und Brandenburg 20 Jahre nur an der Elbe. Mit

²⁰ <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>

den unterschiedlichen Angaben wird z. B. auch eine unterschiedliche Ausuferungscharakteristik berücksichtigt. Problematisch ist die Tatsache, dass das Szenario bisher nicht durchgehend an allen Gewässerstandorten berechnet bzw. dokumentiert wurde. In Sachsen und Baden-Württemberg wurden zusätzlich HWGK für eine Jährlichkeit von 50 Jahren veröffentlicht.

Für das *extreme Szenario mit niedriger Wahrscheinlichkeit* werden in den Bundesländern ebenfalls unterschiedliche Jährlichkeiten angenommen (siehe DKKV (2015)). Nach Empfehlungen der LAWA (2018) werden dabei grundsätzlich Jährlichkeiten von mindestens 200 Jahren angesetzt. In Rheinland-Pfalz und im Saarland wird darüber hinaus jedoch keine weitere Konkretisierung angegeben. In Bayern wird der 1,5-fache, in Niedersachsen der 1,3-fache und in Bremen (Mittelweser) der 1,4-fache Wert des 100-jährlichen Hochwasserabflussscheitels gewählt. In allen anderen Bundesländern liegen die dem extremen Hochwasserszenario zugeordneten Jährlichkeiten zwischen 200 und 1000 Jahren. Eine Jährlichkeit von 200 Jahren wird in den Bundesländern Berlin, Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen angesetzt. Bis auf Berlin und Schleswig-Holstein beziehen sich diese Angaben auf Hochwasserszenarien ohne Hochwasserschutzmaßnahmen. In Hessen wird ebenfalls eine Jährlichkeit von 200 Jahren angesetzt, jedoch zzgl. eines Freibords (50 cm). In Sachsen werden der 200 bis 300-jährliche, aber auch der 300- bis 500-jährliche Hochwasserscheitel genannt (LfULG 2017 und DKKV 2015). In Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen wird schließlich überwiegend der 1000-jährliche Hochwasserabflussscheitel zugrunde gelegt.

Die Karten für das extreme Szenario enthalten für alle Bundesländer Überflutungsflächen, die sich unter Annahme des Versagens (bzw. des Nichtvorhandenseins) von Hochwasserschutzmaßnahmen (v. a. Deiche) ergeben. Geschützte, potenzielle Überflutungsflächen werden für das extreme Szenario der Flusshochwasser (Binnenbereich) i. d. R. nicht gesondert dargestellt. Die unterschiedlichen Jährlichkeiten für das extreme Szenario resultieren u. a. daraus, dass weitere Aspekte bei der Bewertung der Hochwasserexposition einbezogen werden, z. B. mögliche Verklausungen, das Vorhandensein von Vorranggebieten, Grad der Betroffenheit etc. Eine bundesweite Vereinheitlichung der Jährlichkeit des extremen Szenarios ist zurzeit nicht absehbar. Hinzu kommen unterschiedliche hydrodynamische Berechnungsansätze für die Überflutungsflächen (1D, 2D). Daher ist es bei einer länderübergreifenden Nutzung von HWGK des extremen Szenarios, z. B. zur Analyse hochwasserbedingter Exposition für die Verkehrsinfrastruktur, wichtig, die genannten Unterschiede in der Szenariodefinition zu beachten. Dies gilt besonders bei Analysen innerhalb eines Flussgebiets, da sich sonst widersprüchliche Aussagen zur Hochwassergefährdung ergeben können.

Neben der Szenariodefinition sind bei der Interpretation der HWGK Unsicherheiten der zugrundeliegenden Hochwasserstatistiken und ihrer Datengrundlage zu beachten. Zudem können sich die Hochwasserverhältnisse unter dem Einfluss des Klimawandels ändern. Dies ist Gegenstand der folgenden Abschnitte.

4.2.3.2 Abgleich aktuell gültiger Hochwasserstatistiken mit eigenen Extremwertanalysen für beobachtete Abflussreihen

Um die den HWGK zugrundeliegenden Hochwasserstatistiken zu bewerten und als Referenz für Hochwasserstatistiken der im BMVI-Expertennetzwerk berechneten Zukunftsprojektionen nutzen zu können, wurden auch eigene extremstatistische Analysen beobachteter Abflussreihen durchgeführt und den meist von Seite der Bundesländer dokumentierten Statistiken gegenübergestellt. Damit wird einerseits ein Beitrag zur länderübergreifenden Plausibilitätsprüfung bzw. Harmonisierung der Hochwasserstatistiken geleistet. Andererseits sind die meisten Hochwasserstatistiken bereits gut begründet und basieren auf regionalem und lokalem Fachwissen, so dass sie für die hier vorliegende Studie und insbesondere für den beabsichtigten Vergleich von simulierten Zukunftsprojektionen mit dem Istzustand eine Orientierungsgrundlage boten. Im Sinne der im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Vorgehensweise war es daher erforderlich, die bereits verfügbaren Statistiken (meist nur als HQ-T ausgewählter Wiederkehrintervalle verfügbar) durch eigene

extremwertstatistische Analysen mit kontinuierlich berechneten Verteilungsfunktionen möglichst nachzuvollziehen oder aber Unsicherheiten zu identifizieren und in Folgeuntersuchungen zu berücksichtigen.

Zu diesem Zweck wurden in diesem Schwerpunkt die veröffentlichten, aktuell gültigen Hochwasserstatistiken (Hochwasserabflussscheitel HQ-T ausgewählter Wiederkehrintervalle T) wichtiger Pegel des Rheins, der Donau und ihrer Nebenflüsse im Wesentlichen aus folgenden Quellen erhoben IKS (2014), Brahmer et al. (2015), BAFU (2019), LUBW (2019), HLNUG (2019), Busch und Rost (2000), Sartor et al. (2010), GKD Bayern (LfU 2019). In einigen dieser Quellen fanden sich auch Angaben zu Abflussscheiteln extremer, auch historischer Hochwasserereignisse, die zur zeitlichen Informationserweiterung bei der Entwicklung eigener Extremwertstatistiken genutzt werden konnten. Zudem wurden tägliche Abflussreihen der in Abbildung 4-16 gezeigten Pegel aus verschiedenen Quellen erhoben (siehe Abschnitt 3.3.1). Teilweise reichten diese Beobachtungen weit in die Vergangenheit zurück (z. B. bis zum Jahr 1816 am Pegel Köln). Nach den Erkenntnissen der im Abschnitt 4.2 einleitend dargestellten Stationaritätsanalysen wurden jedoch vorrangig beobachtete Pegelabflussreihen der jüngeren Vergangenheit analysiert (z. B. Abflussreihe 1977–2015 an den Rheinpegeln), da sie die grundlegende Eigenschaften des Istzustands der Hochwassersituation repräsentieren und damit auch besser mit den Abflusssimulationen für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 (s. u.) verglichen werden können. Allerdings müssen teilweise auch seltene Extremereignisse aus der fernerer Vergangenheit in die Entwicklung von Hochwasserstatistiken einbezogen werden, um Aussagen im extremen Hochwasserbereich abzusichern.

Nach der in den Abschnitten 3.3.2 und 4.2.2 beschriebenen Vorgehensweise wurden aus den täglichen Abflussreihen Serien jährlicher Abflussscheitel HQ (Tagesmittel) extrahiert, so dass für diese theoretische Verteilungsfunktionen ausgewählt und angepasst werden konnten. Diese Verteilungsfunktionen konnten in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm mit den aktuell gültigen Hochwasserstatistiken zusammengeführt und verglichen werden. Abbildung 4-24 zeigt diese Vergleiche exemplarisch für den Rheinpegel Köln und den Donauegel Hofkirchen. Vergleiche für eine Auswahl weiterer Pegel am Rhein und an der Donau sowie an deren Nebenflüssen findet sich in Abbildung 8-3 und Abbildung 8-4 im Anhang.

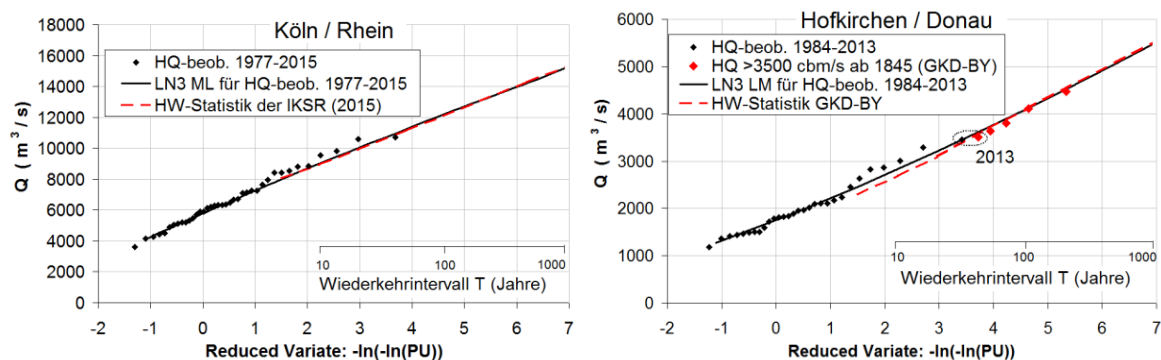


Abbildung 4-24: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (beobachtete Tagesmittel) sowie angepasste theoretische Verteilungsfunktionen im Vergleich zu aktuell gültigen Hochwasserstatistiken der jeweils genannten Quellen am Rheinpegel Köln und am Donauegel Hofkirchen. Am Pegel Hofkirchen wurden bei der Auswahl der anzupassenden Verteilungsfunktionen empirische Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse in Bezug auf die genannten, erweiterten Zeiträume berücksichtigt.

An den meisten Pegeln im Rhein-Einzugsgebiet konnten mit der Auswahl und Anpassung theoretischer Verteilungsfunktionen für die HQ-Serien des Zeitraums 1977–2015 die aktuell gültigen bzw. in den oben genannten Quellen veröffentlichten Hochwasserstatistiken gut nachvollzogen und damit bestätigt werden. Am Moselpegel Cochem wurden auch historische Extremereignisse bei der Auswahl der anzupassenden Verteilungsfunktion berücksichtigt, um sie trotz der vergleichsweise kurzen Serie (1977–2015) auch im Ext-

rembereich abzusichern. An den Pegeln Kalkofen/Lahn und Trier/Mosel lagen bisher keine weiteren Hochwasserstatistiken vor, hier können die abgeleiteten Statistiken jedoch als recht zuverlässig eingeschätzt werden. Größere Unsicherheiten ergaben sich hingegen aus dem Vergleich eigener und aktuell publizierter Hochwasserstatistiken der Pegel Maxau (Rhein), Plochingen (Neckar) und Würzburg (Main), in Plochingen und Würzburg evtl. auch wegen der unterschiedlichen Zeitbezüge für Abflussscheitel (Momentwert, Tagesmittelwert).

Im Donau-Einzugsgebiet erwies sich die Serie 1984–2013 an den meisten Pegeln als geeignet, um mit ausgewählten und angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen die aktuell gültigen Hochwasserstatistiken zu repräsentieren. Dies ist mit Ausnahme des Pegels Schwabelweis insbesondere an der Donau ab dem Pegel Kelheim der Fall (siehe z. B. Abbildung 4-24 für den Pegel Hofkirchen). Bei der Auswahl der an die Serie 1984–2013 angepassten theoretischen Verteilungsfunktion wurden dabei allerdings die größten bekannten Scheitel (auch aus der Zeit vor Beginn der systematischen Beobachtungsreihe) im längerfristigen (historischen) Zeitbezug beachtet, um eine bessere Absicherung im Extrembereich (entsprechend zu den Statistiken des GKD Bayern) zu erreichen. Besonders bei den Pegeln der Nebenflüsse war – wie bereits für Würzburg und Plochingen – zu beachten, dass die eigenen Hochwasserstatistiken aus Abflussscheiteln der Tagesmittelwerte berechnet wurden, die von Momentwerten und damit von anderen Statistiken abweichen können. Größere Unsicherheiten aus diesen Vergleichen sind neben dem Pegel Schwabelweis auch für den Pegel Augsburg (unterhalb der Wertachmündung) zu vermerken.

Insgesamt zeigt sich, dass die zzt. gültigen Hochwasserstatistiken der angesprochenen Pegel in den Einzugsgebieten von Rhein und Donau durch eigene Extremwertanalysen in den meisten Fällen gut nachvollzogen und damit auch bestätigt werden konnten. Es konnten jedoch auch die angesprochenen Unsicherheiten identifiziert werden, um sie in Folgeuntersuchungen zu berücksichtigen. Damit wurde eine bestmöglich abgesicherte Referenz für entsprechend abgeleitete Hochwasserstatistiken aus simulierten Zukunftsprojektionen geschaffen.

4.2.3.3 Entwicklung von Hochwasserstatistiken für simulierte Zukunftsprojektionen (Klimaszenario RCP8.5 – *Weiter-wie-bisher-Szenario*)

Zur Ableitung von Hochwasserstatistiken für Projektionen des Klimaszenarios *Weiter-wie-bisher-Szenario* in Bezug auf die *nabe Zukunft* (Zeitraum 2031–2060) und die *ferne Zukunft* (2070–2099) lagen im BMVI-Expertenetzwerk, wie im Abschnitt 4.2 einleitend beschrieben, insgesamt 16 Simulationsläufe von Modellketten aus globalen und regionalen Klimamodellen für den Zeitraum von 1970–2099 vor, die als Eingang für Wasserhaushaltssimulationen mit dem Modell LARSIM-ME genutzt wurden.

Damit wurden tägliche Abflussreihen des genannten Zeitraums an den in der Abbildung 4-16 gezeigten Pegeln simuliert und, sofern anhand der mit beobachteten meteorologischen Eingangsgrößen simulierten Abflüsse als vorteilhaft identifiziert, in der im Abschnitt 4.2 einleitend erörterten Weise bias-adjustiert. Die auf dem Globalmodell HadGEM2-ES basierenden Simulationen wurden dabei aus den ebenfalls im einleitenden Teil des Abschnitts 4.2 genannten Gründen von den hier dokumentierten hochwasserstatistischen Analysen ausgeschlossen, so dass die simulierten Abflussreihen aus 13 Modellketten verbleiben. Für diese wurden nach der im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Vorgehensweise Hochwasserstatistiken an den genannten Pegeln entwickelt.

Dabei wurden pro untersuchtem Pegel zunächst vereinigte Ensembleserien jährlicher Scheitelabflusswerte für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) sowie für die o. g. Zeiträume der *naben* und *fernen Zukunft* gebildet und in Wahrscheinlichkeitsdiagrammen mit den Verteilungsfunktionen der anhand der beobachteten Abflüsse entwickelten Hochwasserstatistiken zusammengeführt. Abbildung 4-25 zeigt exemplarisch den Rheinpegel Kaub und den Donaupegel Hofkirchen. Eine erweiterte Pegelauswahl ist in Abbildung 8-5 und Abbildung

8-6 im Anhang 0 dargestellt. Um eine geeignete theoretische Verteilungsfunktion für die vereinigte Ensembleserie des *Bezugszeitraums* auszuwählen und anzupassen werden zwei Aspekte herangezogen. Zum einen ist der Verlauf der empirischen Wahrscheinlichkeiten der vereinigten Ensembleserie für den *Bezugszeitraum* wichtig. Zum anderen ist der Verlauf der Referenz also der Verteilungsfunktion für den beobachteten Istzustand (insbesondere im besonders interessierenden Wahrscheinlichkeitsbereich mit einem Wiederkehrintervall ab ca. 10 Jahren) ebenso zu beachten (vgl. Abschnitt 3.5.3.3). Da die Lage der angepassten Verteilungsfunktion weitgehend durch das mittlere Abflussniveau der analysierten Serie bestimmt wird, wurde bei ihrer Auswahl v. a. auf eine ähnliche Form und Skalierung wie in der Verteilungsfunktion für den beobachteten Istzustand geachtet.

Abbildung 4-25 und Abbildung 8-5 im Anhang 0 zeigen exemplarisch, dass dieses Auswahlkriterium (Ähnlichkeit von Form und Skalierung) bei den meisten untersuchten Pegeln im Rhein-Einzugsgebiet erfüllt ist, auch wenn es sich meist um einen anderen Verteilungsfunktionsstyp handelt und zum Teil Abweichungen in der Lage zu verzeichnen sind. Unsicherheiten sind jedoch für den Pegel Raunheim (sowie in ähnlicher Weise am Pegel Würzburg, ebenfalls am Main) deutlich erkennbar. Hier wurde eine Bias-Adjustierung der mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen angewandt, die im Zusammenhang mit der in Abbildung 8-5 erkennbaren Abweichung steht, jedoch ihrerseits recht eindeutig identifiziert wurde. Andererseits sind auch die aktuell gültigen bzw. aus beobachteten Abflüssen abgeleiteten Hochwasserstatistiken zu hinterfragen. Auch am Rheinpegel Maxau sind Unsicherheiten zu vermerken.

Bei den untersuchten Pegeln im Donau-Einzugsgebiet wurde das Auswahlkriterium (Ähnlichkeit von Form und Skalierung) am Pegel Donauwörth (sowie auch an den anderen Donauegeln bis Pfelling relativ gut erfüllt. An den Donauegeln Hofkirchen (siehe Abbildung 4-25) und Achleiten nehmen die Abweichungen der Form und Skalierung, sowie auch der Lage der Verteilungsfunktionen stromab zu, durch die Auswahl entsprechender theoretischer Verteilungsfunktionen wurden diese Abweichungen jedoch so gering wie möglich gehalten. Der Form der aus Beobachtungen abgeleiteten Verteilungsfunktionen wurde in beiden Fällen zumindest grundsätzlich entsprochen (siehe Abbildung 4-25 und Abbildung 8-6 im Anhang). An den Nebenflusspegeln sind Abweichungen in der Lage zu erkennen, Form und Skalierung sind zwischen den aus Beobachtungen und den aus Simulationen abgeleiteten Verteilungsfunktionen insgesamt aber recht ähnlich.

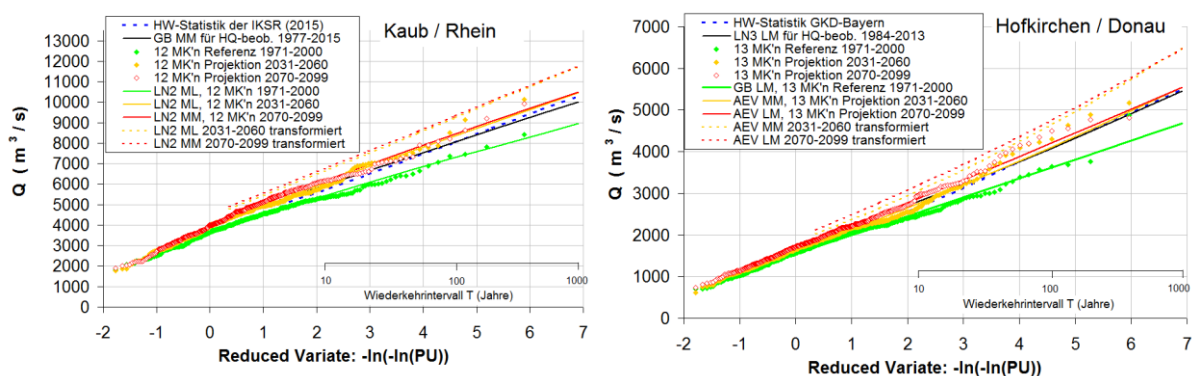


Abbildung 4-25: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (Tagesmittel) sowie daran angepasste theoretische Verteilungsfunktionen für vereinigte Ensembleserien aus Modellketten für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Die Serien beziehen sich auf die genannten Pegel und die in den Legenden genannten Zeiträume. Als Referenz sind auch die aus Beobachtungen abgeleiteten Verteilungsfunktionen des Istzustands dargestellt. Für die simulierten Zukunftszeiträume wurden die Verteilungsfunktionen auch transformiert, um sie auf die beobachteten Verteilungsfunktionen zu beziehen (vgl. Abschnitt 3.5.3.3).

Anschließend wurden auch für die simulierten Abflussscheitel der Zukunftszeiträume theoretische Verteilungsfunktionen ausgewählt und angepasst. Wenn mit der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung der jeweiligen vereinigten Ensembleserien vereinbar, wurde der gleiche theoretische Verteilungstyp wie für die simulierten Abflussscheitel des *Bezugszeitraums* bevorzugt. Häufig mussten hier jedoch in der Wahl der Verteilungsfunktionen Kompromisse gefunden werden, wobei neben der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung und dem theoretischen Verteilungsfunktionstyp wiederum auch die Form und Skalierung der für den *Bezugszeitraum* gewählten Verteilungsfunktion im Sinne einer Plausibilitätsprüfung beachtet wurde. Generelle Aussagen sind diesbezüglich aufgrund vielfältiger Verhältnisse an den verschiedenen Pegeln kaum zu treffen.

Mit den angepassten Verteilungsfunktionen wurden die Quantile HQ-T für ausgewählte Wiederkehrintervalle T (T = 10, 100 und 1000 Jahre) berechnet, so dass für diese auch die prozentualen Unterschiede $\Delta(\text{HQ-T})$ zwischen dem *Bezugszeitraum* und den Zukunftszeiträumen ermittelt werden konnten. Diese sind für die genannten Wiederkehrintervalle in Abbildung 4-26 für das Rhein-Einzugsgebiet und Abbildung 4-27 für das Donau-Einzugsgebiet zusammengestellt. Die Abbildung 4-28 zeigt zudem Karten der den untersuchten Pegeln zuzuordnenden Fluss- bzw. HWGK-Abschnitte mit klassierten prozentualen Änderungsbeträgen des HQ₁₀₀ zwischen dem *Bezugszeitraum* und der *naben* bzw. der *fernen Zukunft*. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass sich die hier dargestellten Ergebnisse nur auf die in der Karte gezeigten Flussabschnitte beziehen und nicht auf oberstrom liegende, kleinere Teileinzugsgebiete, in denen sich skalenbedingt andere Verhältnisse ergeben können.

Im Rhein-Einzugsgebiet ergaben die Analysen in Bezug auf HQ₁₀₀ für beide Zukunftsprojektionen und jeweils für alle untersuchten Pegel Zunahmen (siehe Abbildung 4-26 und Abbildung 4-28). Diese liegen am Oberrhein (Pegel Basel-Rheinhalle und Maxau bei ca. 13 % (*nabe Zukunft*) bzw. ca. 9 % (*ferne Zukunft*). Stärkere Zunahmen wurden an den Neckarpegeln ermittelt (mehr als 20 % für die *nabe Zukunft*, ca. 17 % für die *ferne Zukunft*), und damit auch für den unterhalb der Neckarmündung gelegenen Rheinpegel Worms (ca. 18 % bzw. ca. 13 %). Am Main sowie auch an der Lahn ergaben sich für die *nabe Zukunft* hingegen zunächst nur moderate Zunahmen von knapp 10 %, in der *fernen Zukunft* jedoch auch eine starke Zunahme von mehr als 20 %. Unterhalb der Mainmündung (Rheinpegel Mainz und Kaub) resultieren aus den bis hierhin angesprochenen Entwicklungen recht ähnliche Zunahmen für die *nabe* und die *ferne Zukunft* um jeweils ca. 15 %. Deutlich schwächere Zunahmen als am Neckar und am Main ergaben sich an der Mosel mit etwa 8 % (*nabe* und *ferne Zukunft*), womit auch die Zunahmen unterhalb der Moselmündung (Rheinpegel Andernach, Köln und Lobith) mit ca. 10 % (*nabe Zukunft*) bzw. etwa 13 % (*ferne Zukunft*) wieder schwächer ausfallen als am Rheinpegel Kaub.

Am Donauegel Berg und am Altmühl ergaben die Analysen in Bezug auf HQ₁₀₀, wie am benachbarten Neckar und für die *ferne Zukunft* am Main, relativ starke Zunahmen (mehr als 20 % für die *nabe* und die *ferne Zukunft*). An der Naab ergaben sich, ähnlich wie im nördlich anschließenden Main-Einzugsgebiet, für die *nabe Zukunft* noch moderate relative Zunahmen von ca. 10 %, während für die *ferne Zukunft* starke Zunahmen von (hier sogar sehr deutlich) über 20 % ermittelt wurden. Die südlichen Donauzuflüsse zeigen von West nach Ost verstärkte relative Zunahmen des HQ₁₀₀. Während die Zunahmen an der Iller in beiden Zukunftsprojektionen mit maximal 6 % schwach sind, sind sie an Isar und Inn mit 18 bis 21 % in der *naben Zukunft* und mehr als 20 % in der *fernen Zukunft* stark. Der Lech nimmt eine Übergangsstellung ein. Auch der Regen hat für die *nabe Zukunft* mit relativen Zunahmen von ca. 15 % eine räumlich plausible Übergangsstellung zwischen Naab und Isar bzw. Inn. Für die *ferne Zukunft* ergaben sich hingegen wie an der benachbarten Naab starke Zunahmen von sehr deutlich über 20 %. An den Donauegeln zwischen Donauwörth und Hofkirchen zeigen die Analysen im Vergleich zu den Nebenflüssen einheitlichere relative Zunahmen des HQ₁₀₀ mit 12 bis 14 % in der *naben* und 10 bis 16 % in der *fernen Zukunft*. Dabei ergeben sich die relativen Zunahmen am Pegel Donauwörth plausibel aus den stärkeren Zunahmen der Donau von oberstrom und

den schwächeren Zunahmen der Iller. Im weiteren Verlauf der Donau variieren die relativen Zunahmen des HQ_{100} schwächer als diejenigen der Nebenflüsse, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Hochwasserscheitel der (kleineren) Nebenflusseinzugsgebiete denen der Donau i. d. R. mehr oder weniger vorweglaufen.

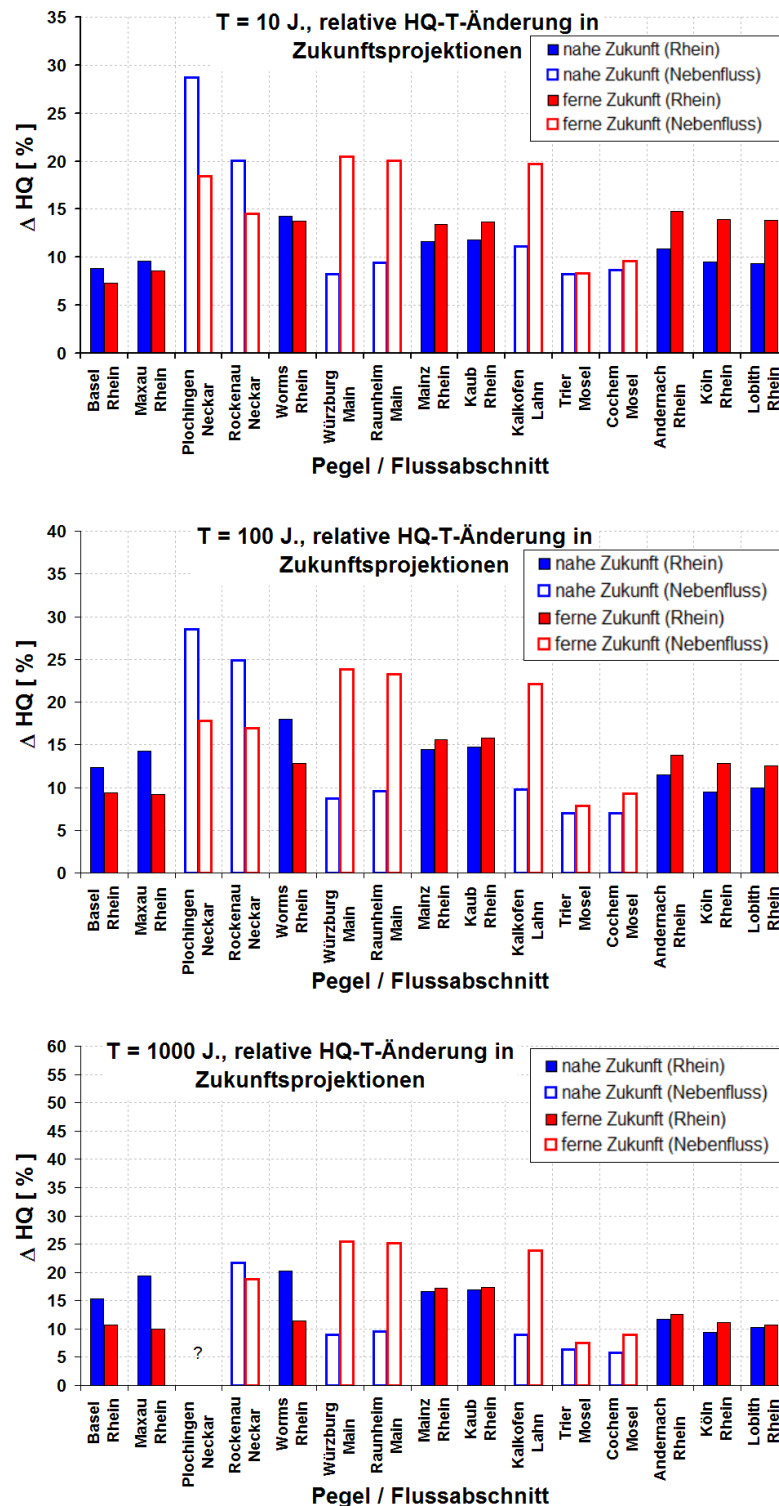


Abbildung 4-26: Prozentuale Zunahmen der aus Simulationen abgeleiteten Hochwasserkenngößen $HQ-T$ ($T=10, 100, 1000$ Jahr) vom *Bezugszeitraum* (1971–2000) zu den Zeiträumen der *nahen* und der *fernen Zukunft* (2031–2060 und 2070–2099) an Pegeln des Rheins und seiner wichtigen Nebenflüsse.

Für die *ferne Zukunft* (mit stärkeren relativen Zunahmen in den Nebenflüssen) ist jedoch eine Verstärkung der relativen Zunahme der HQ₁₀₀ vom Pegel Donauwörth (ca. 10 %) bis zum Pegel Hofkirchen (ca. 16 %) zu erkennen. Eine deutlichere relative Zunahme ergab sich schließlich am Donaupegel Achleiten mit ca. 18 % für die *nahe Zukunft* und mehr als 20 % in der *fernen Zukunft*. Auch diese relative Zunahme ist erklärbar, da hier von überlagerten von Hochwasserscheiteln der Donau und des ähnlich großen Inn auszugehen ist.

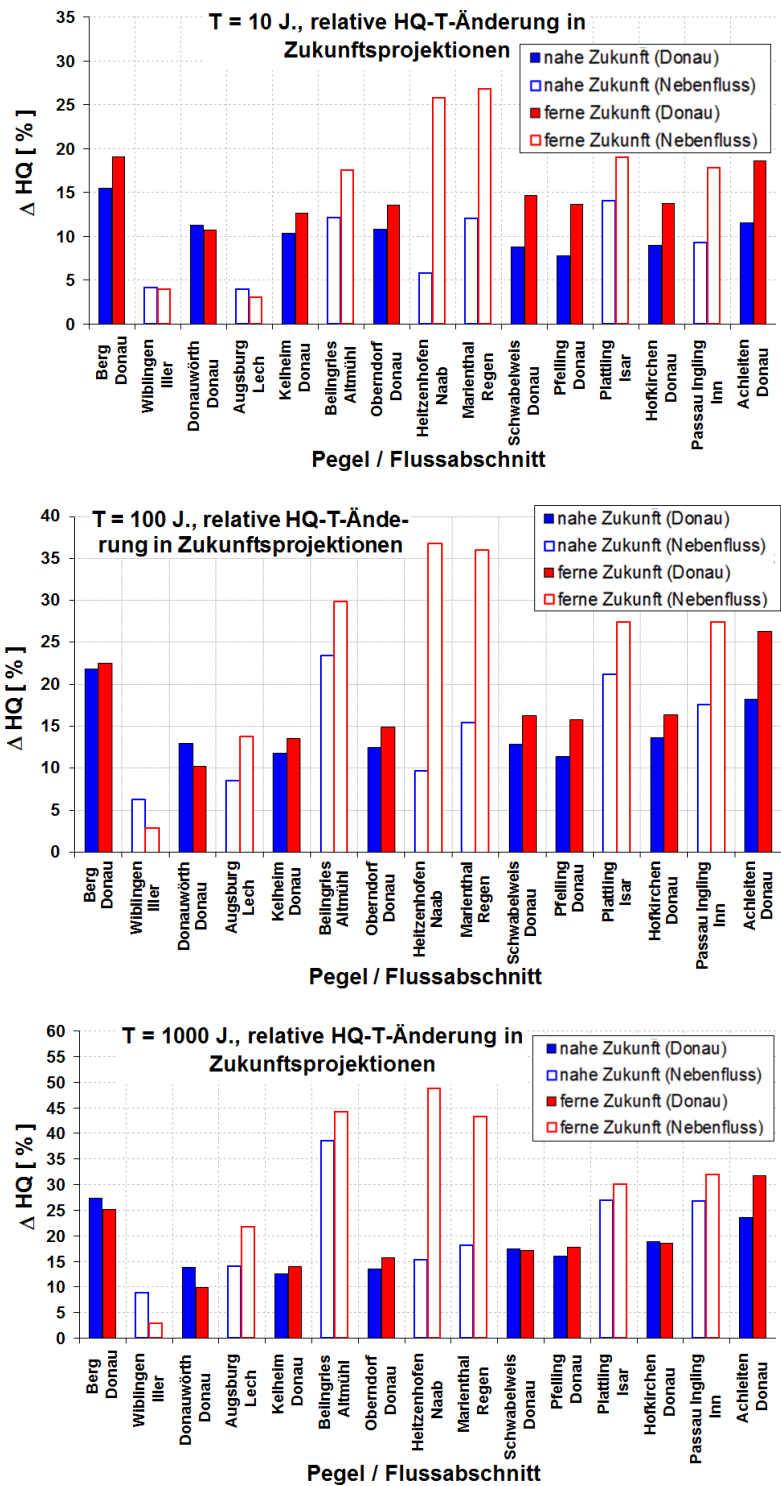


Abbildung 4-27: Prozentuale Zunahmen der aus Simulationen abgeleiteten Hochwasserkenngößen HQ-T (T=10, 100, 1000 Jahr) vom *Bezugszeitraum* (1971–2000) zu den Zeiträumen der *nahen* und der *fernen Zukunft* (2031–2060 und 2070–2099) an Pegeln der Donau und ihrer wichtigen Nebenflüsse.

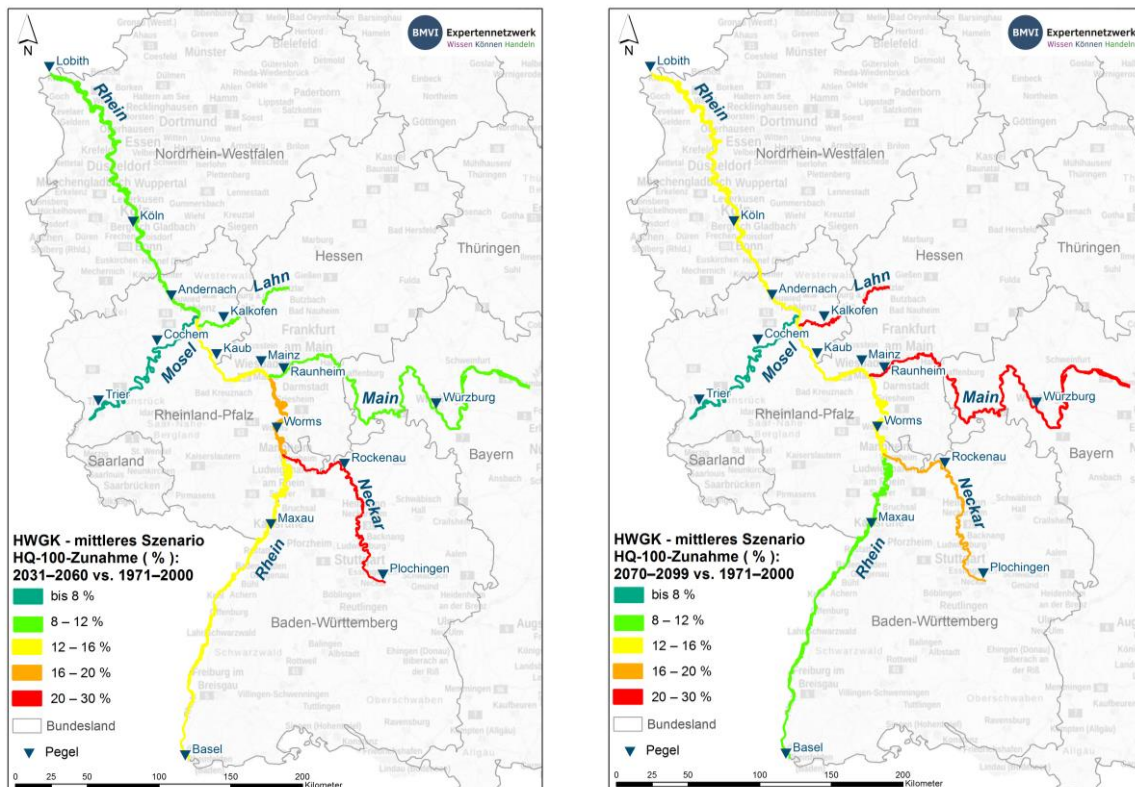


Abbildung 4-28: Relative Änderung des den Hochwassergefahrenkarten des mittleren Szenarios zugrundeliegenden Hochwasserkennwerts HQ_{100} für die Zukunftsprojektionen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000. Links für die *nahe Zukunft* (2031–2060), rechts für die *ferne Zukunft* (2070–2099).

In Bezug auf HQ_{10} ergaben sich im Rhein-Einzugsgebiet relative Zunahmen in ähnlicher Größenordnung wie beim HQ_{100} , wobei auch die räumliche und zeitliche Struktur dieser Zunahmen vergleichbar ist. Etwas schwächere relative Zunahmen als beim HQ_{100} sind beim HQ_{10} mit knapp 10 % für die *nahe Zukunft* am Oberrhein zu verzeichnen, was sich auch weiter unterstrom auswirkt. Auch im Donau-Einzugsgebiet ergab sich für HQ_{10} eine grundsätzlich ähnliche räumliche und zeitliche Struktur der relativen Zunahmen im Vergleich zu HQ_{100} , jedoch sind die relativen Zunahmen insgesamt etwas schwächer (v. a. für die *ferne Zukunft* an den Nebenflüssen und am Donauegel Achleiten). Hohe Unsicherheiten sind grundsätzlich bei den Ergebnissen zur Änderung der HQ_{1000} in den Zukunftsprojektionen zu beachten. Die Analysen ergaben hier im Rhein-Einzugsgebiet relative Zunahmen in ähnlicher Größenordnung und in ähnlicher räumlicher und zeitlicher Struktur wie beim HQ_{100} . Auch im Donau-Einzugsgebiet haben die berechneten relativen Zunahmen des HQ_{1000} eine ähnliche räumliche und zeitliche Struktur wie in Bezug auf HQ_{100} , sie sind dabei tendenziell aber etwas stärker.

Schließlich wurden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der simulierten Zukunftsprojektionen nach dem im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Ansatz transformiert, um sie auch mit den aus Beobachtungen abgeleiteten Verteilungen in Bezug zu setzen (siehe Abbildung 4-25). Ausgehend vom *Bezugszeitraum* wurden dann veränderte Wiederkehrintervalle für $T = 10, 100$ und 1000 Jahre berechnet. Diese Berechnung bezog sich einerseits auf die Verteilungen der simulierten HQ-Serien im *Bezugszeitraum* und in den Zukunftszeiträumen, sowie andererseits auf die Verteilung der beobachteten HQ-Serien des Istzustands und die transformierten Verteilungen der simulierten HQ-Serien der Zukunftszeiträume. Aus den pro Pegel, Wiederkehrintervall und Zukunftszeitraum jeweils zwei neu berechneten Wiederkehrintervallen ergeben sich Vertrauensintervalle, die in Abbildung 4-29 (Rhein-Einzugsgebiet) und Abbildung 4-30 (Donau-Einzugsgebiet) zusammengestellt sind.

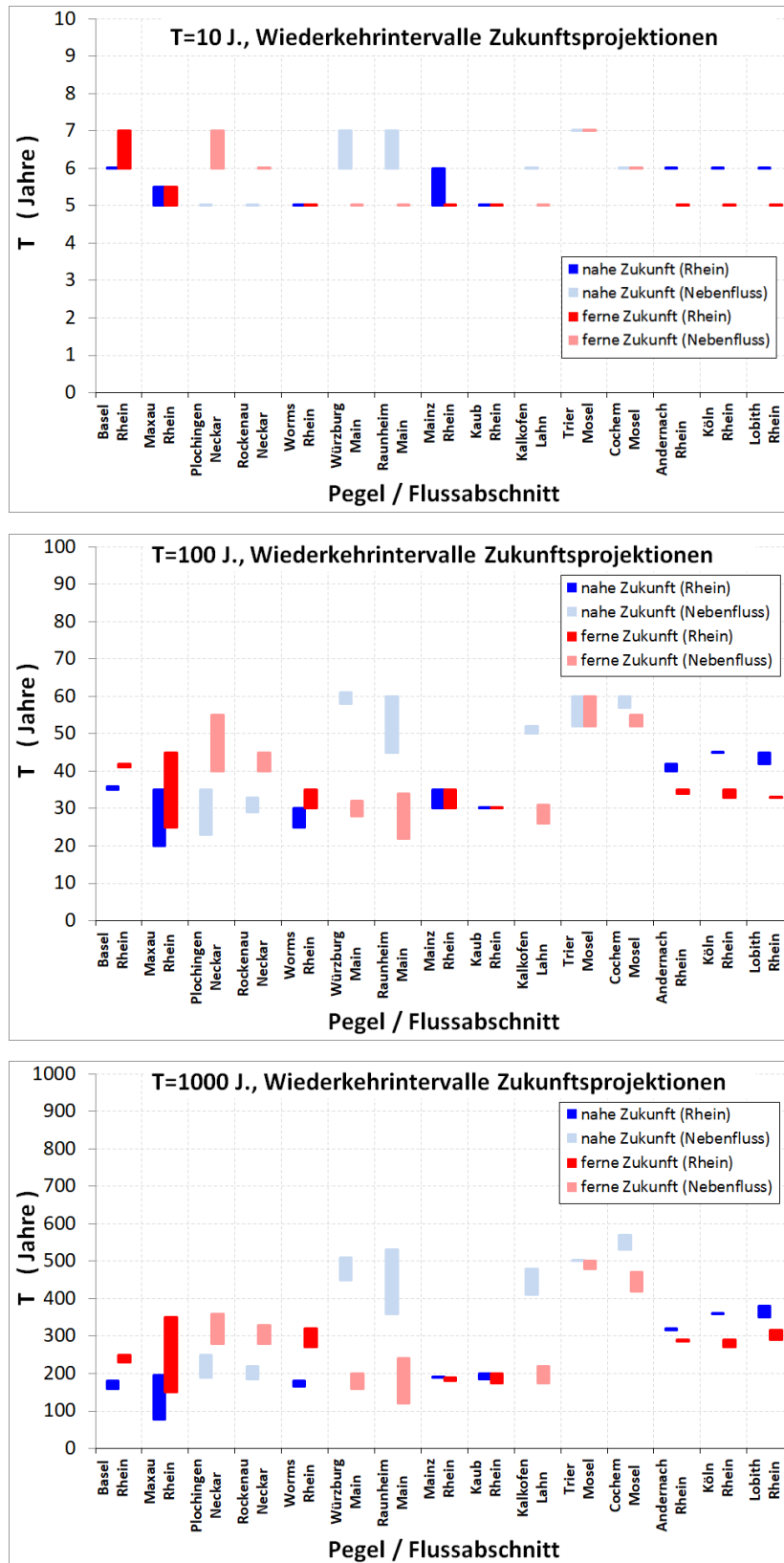


Abbildung 4-29: Neu berechnete Wiederkehrintervalle des zehnjährigen, hundert- und tausendjährigen Hochwasserscheitels des *Bezugszeitraums* (1971–2000) bzw. der aktuell gültigen Hochwasserstatistik für die Projektionen der *nahen* und der *fernen Zukunft* (2031–2060 bzw. 2070–2099) an Pegeln des Rheins und wichtiger Rhein Nebenflüsse. Die Säulen stellen Intervalle der nach den im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Methoden (mit und ohne Transformationsregel zum Bezug auf beobachtungsbasierte Hochwasserstatistiken) ermittelten Wiederkehrintervalle dar.

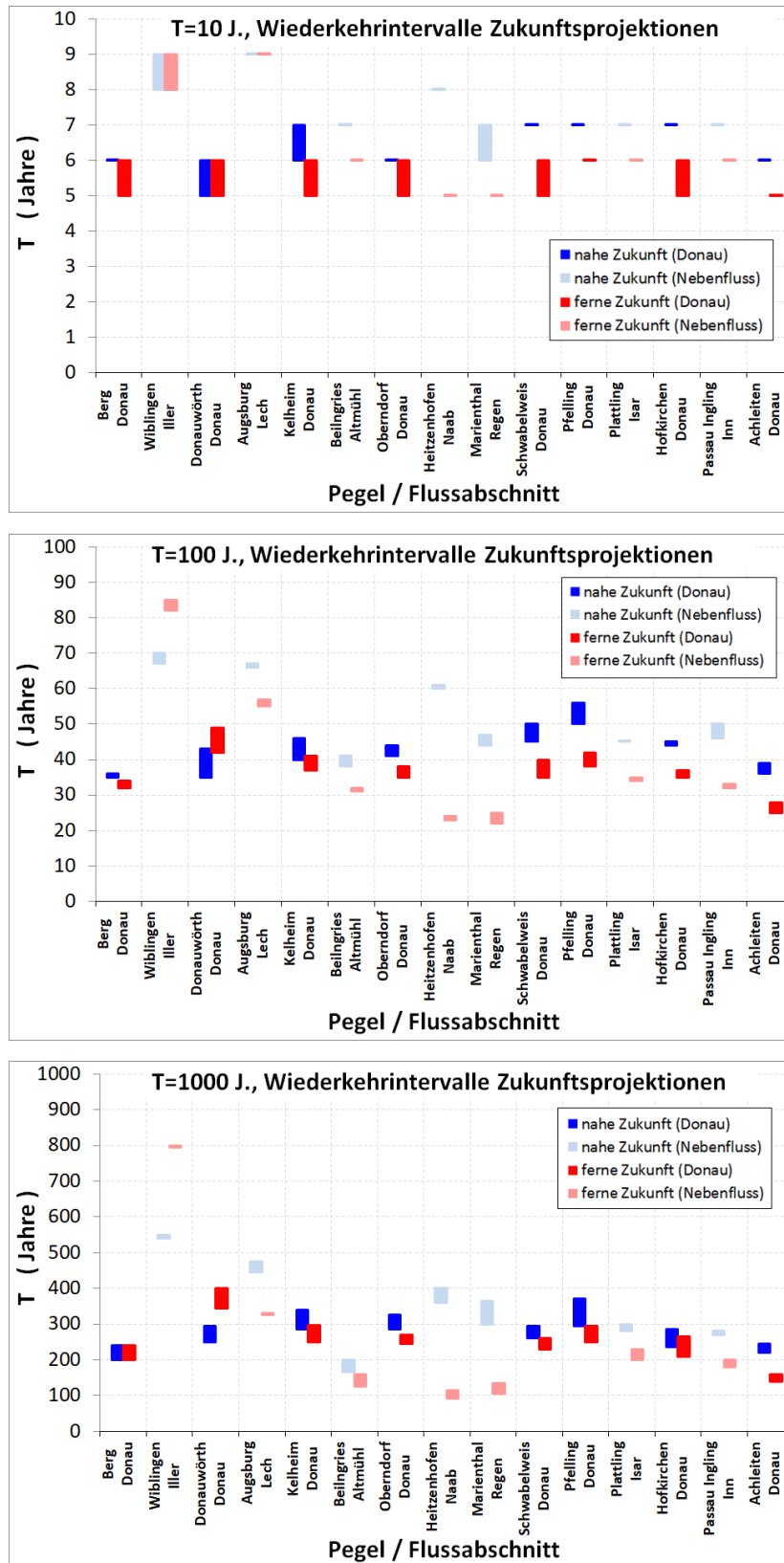


Abbildung 4-30: Neu berechnete Wiederkehrintervalle des zehnjährlichen Hochwasserscheitels des *Bezugszeitraums* (1971–2000) bzw. der aktuell gültigen Hochwasserstatistik für die Projektionen der *nahen* und der *fernen Zukunft* (2031–2060 bzw. 2070–2099) an Pegeln der Donau und wichtiger Donaunebenflüsse. Die Säulen stellen Intervalle der nach den im Abschnitt 3.5.3.3 beschriebenen Methoden (mit und ohne Transformationsregel zum Bezug auf beobachtungsbasierte Hochwasserstatistiken) ermittelten Wiederkehrintervalle dar.

Die Zukunftsprojektionen ergaben für heutige HQ_{100} entsprechend zum zunehmenden Niveau extremer Hochwasserabflüsse (s. o.) an allen untersuchten Pegeln im Rhein- und Donau-Einzugsgebiet eine zunehmende Häufigkeit, die je nach Pegel und Zukunftszeitraum jedoch differenziert anzusprechen ist. An den Pegeln des Rheins ist demnach verbreitet mit einem Wiederkehrintervall zwischen etwa 30 und 40 Jahren zu rechnen (unter Berücksichtigung der bisher identifizierten Unsicherheiten 20 bis 45 Jahre). Auch am Neckar liegen die Wiederkehrintervalle der Zukunftsprojektionen etwa in diesen Bereichen, wobei sich v. a. für die *nabe Zukunft* verkürzte Wiederkehrintervalle mit ca. 30 Jahren ergeben. Für Main, Lahn und Mosel ergaben sich für die *nabe Zukunft* weniger stark verkürzte Wiederkehrintervalle von 50 bis 60 Jahren, für die Mosel auch in der *fernen Zukunft*. An Main und Lahn ergaben sich hingegen in der *fernen Zukunft* deutlich weiter verkürzte Wiederkehrintervalle im Bereich von etwa 30 Jahren. 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). Nur am Donaupegel Achleiten wurde für die *ferne Zukunft* eine stärkere Häufung (Wiederkehrintervall 25 bis 30 Jahre) ermittelt. Die Ergebnisse für Naab und Regen ähneln denen an Main und Lahn (s. o.): während für die *nabe Zukunft* weniger stark verkürzte Wiederkehrintervalle im Bereich von etwa 50 Jahren gefunden wurden, ergab sich für die *ferne Zukunft* eine starke Häufung (Wiederkehrintervalle im Bereich von 25 Jahren). Eine deutlich geringere Verschärfung für *nabe* und *ferne Zukunft* wurde für die Iller ermittelt (Wiederkehrintervalle 65 bis 85 Jahre). Der Lech nimmt schließlich eine Übergangsstellung zwischen Iller und den zuvor angesprochenen Pegeln ein (Wiederkehrintervalle um 60 Jahre).

Einheitlicher veränderte Wiederkehrintervalle ergaben sich für die heutigen HQ_{10} . Sie liegen an fast allen Pegeln in beiden Zukunftsprojektionen im Bereich zwischen fünf und sieben Jahren. Nur die für Iller und Lech ermittelten Wiederkehrintervalle weichen deutlich davon ab (acht bis neun Jahre).

Wie bereits erwähnt unterliegen Aussagen zu Änderungen von HQ_{1000} hohen Unsicherheiten, was für Änderungen der Häufigkeit heutiger HQ_{1000} in besonderem Maße gilt. Die in den Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30 dargestellten Änderungen werden hier daher nicht im Detail diskutiert. Tendenziell ergeben sich ähnliche Änderungen wie beim HQ_{100} . An Rhein und Donau ergaben sich verbreitet Wiederkehrintervalle im Bereich zwischen 200 und 400 Jahren. Besondere Beachtung sollte unter diesem Aspekt den Bereichen des Oberrheins, des Mains, der nördlichen Donauzuflüsse und des Donaupegels Achleiten zukommen, wo sich zum Teil auch Wiederkehrintervalle von weniger als 200 Jahren ergaben.

4.2.3.4 Ergebnisse für Straße und Schiene

Nachdem die HWGK der Bundesländer eingehend analysiert wurden und die zukünftigen Entwicklungen mit Hilfe extremwertstatistischer Ansätze abgeschätzt wurden, können auf dieser Grundlage Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes, die im Einflussbereich unterschiedlicher Hochwasser- und Sturmflutszenarien liegen („häufig“, „mittel“, „selten/extrem“), identifiziert werden. Abbildung 4-31 zeigt exemplarisch Ausschnitte der auf diese Weise entstandenen Hinweiskarte Hochwasser für das mittlere und extreme Hochwasserszenario. Das „mittlere“ Szenario hat ein statistisches Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ_{100}/HW_{100}) und ist in allen Bundesländern mit gleichem Wiederkehrintervall definiert und eignet sich somit besonders gut für eine bundesweite Analyse. Das „extreme“ Szenario hingegen wurde in verschiedenen Bundesländern unterschiedlich hergeleitet, sodass hierfür keine bundesweit einheitliche Datengrundlage besteht.

Die Analyse (siehe Tabelle 4-2) 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 ist weitaus größer, sodass hierbei rund 8 % des Bundesfernstraßennetzes (rd. 3.900 km) und 8 % des Schienennetzes (rd. 2.900 km) betroffen wären.

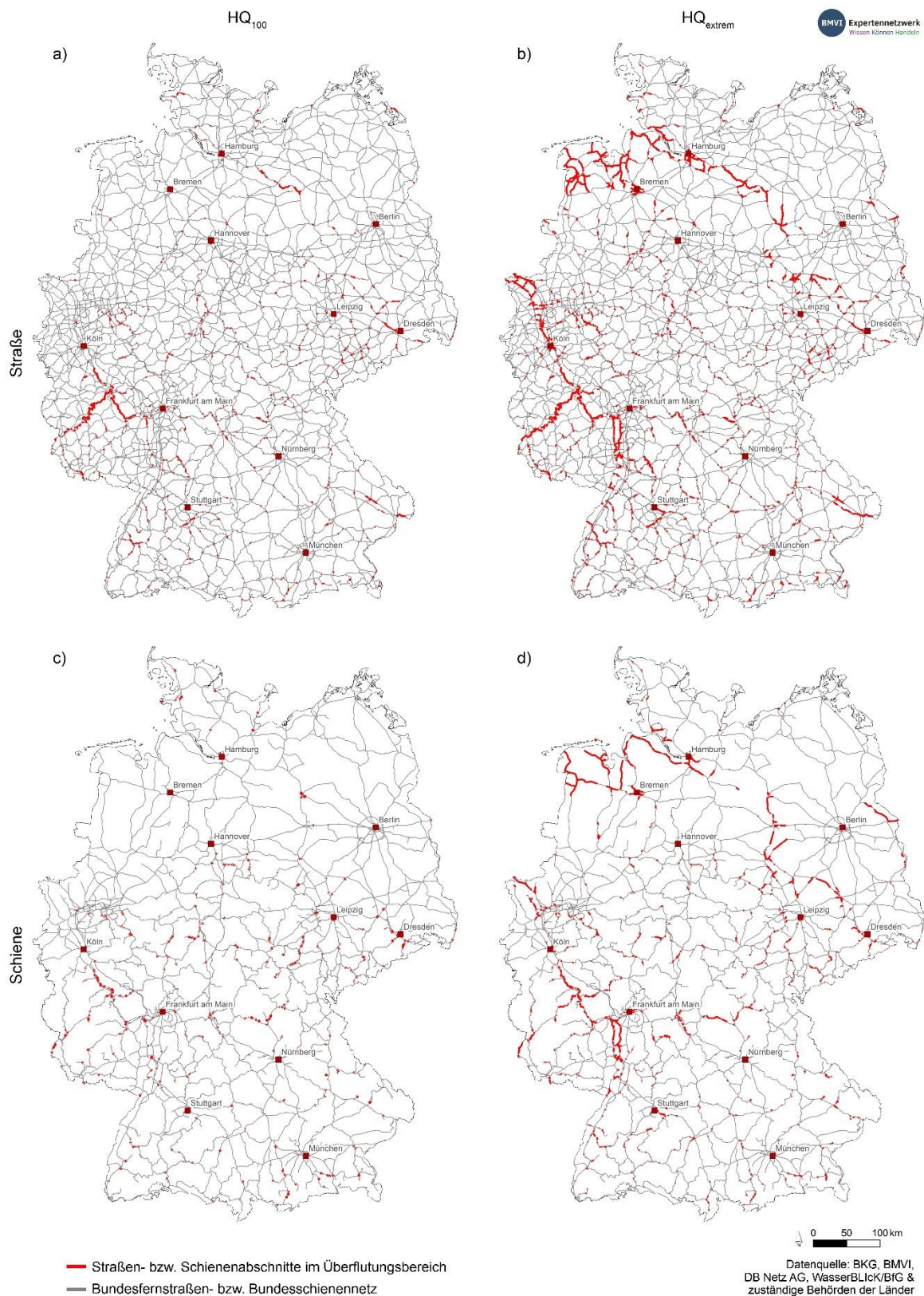


Abbildung 4-31: Abschnitte des Bundesfernstraßen- (oben, a+b) und des Schienennetzes (unten, c+d), die im Bereich der potenziellen Überflutungsflächen eines mittleren (links) bzw. extremen Hochwasser- und Sturmflutszenarios (rechts) liegen (rot hervorgehoben).

Tabelle 4-2: Übersicht über Netzlänge und betroffene Streckenanteile bei HQ_{extrem} und HQ_{100} für Straße und Schiene.

Gegenwart	Straße	Schiene
Netzlänge insgesamt	51.150 km	34.140 km
Betroffenheit HQ_{extrem}	3.900 km (8 %)	2.900 km (8 %)
Betroffenheit HQ_{100}	1.100 km (2 %)	480 km (1 %)

Eine Neuberechnung der Überflutungsflächen unter Annahme klimawandelbedingt veränderter Hochwasserabflüsse ist im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks nicht ohne weiteres möglich²¹. Um einen Eindruck der zukünftigen Exposition zu erhalten, wurden die Jährlichkeiten der vorliegenden Hochwasserzennarien auf Basis von Projektionen zukünftiger Hochwasserabflüsse neu berechnet (siehe erste Abschnitt 4.2.3). Die räumlich differenzierte Analyse der projizierten Wiederkehrintervalle des hundertjährigen Hochwasserscheitels erlaubt es, die zukünftige hochwasserbedingte Belastung des Verkehrs auf die Straßen- und Schieneninfrastruktur im Bereich der heutigen Überschwemmungsflächen eines HQ_{100} überschlägig und vorläufig einzuschätzen. Es handelt sich hier um eine potentielle Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur 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 (genaue Höhenlage, Dämme, Bauwerksinformationen etc.) nicht auf der Netzebene getroffen werden.

Dies geschieht hier exemplarisch für den Rhein und seine großen Nebengewässer. Insgesamt liegen heute rund 360 Straßenkilometer und rund 80 Schienenkilometer in diesem Überschwemmungsbereich (Abbildung 4-32). Hochwasser in der Größenordnung eines heutigen HQ_{100} treten zukünftig an allen Strecken häufiger auf. An etwa der Hälfte der Straßenabschnitte wird eine entsprechende Situation doppelt so häufig oder häufiger auftreten als heute (HQ_{100} wird somit zu HQ_{50} bis HQ_{30} ohne große Unterschiede zwischen der *nahen* und *fernen Zukunft*). Bei der Schiene sind den Auswertungen zufolge über 80 % der heute in der Gefährdungszone eines HQ_{100} liegenden Streckenabschnitte zukünftig alle 55 Jahre (*nabe Zukunft*) bzw. 35 Jahre (*ferne Zukunft*) oder häufiger exponiert.

Wie die schon vorliegenden Auswertungen für die Donau zeigen (z. B. Abbildung 4-30) ist auch hier über weite Strecken mit einer deutlichen Verringerung der Wiederkehrzeit beim HQ_{100} zu rechnen. Die genauen Untersuchungen bzgl. der Auswirkungen auf den Straßen- und Schienenverkehr stehen noch aus und sind für die nächste Phase BMVI-Expertenetzwerks geplant. Für weitere detailliertere Untersuchungen der Hochwasserexposition werden beispielsweise Informationen bezüglich der genauen Höhenlage, der Dammelage oder zur Bauweise benötigt. Auch diese sollen im Rahmen der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks berücksichtigt werden, um die Exposition und Sensitivität gegenüber Hochwasser genauer abzuschätzen. Zudem ist die Einbeziehung von Katastropheneinsatzplänen o.ä. zu prüfen.

²¹ Die Erstellung der Hochwassergefahrenkarten liegt im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer und erfordert flächendeckende hochdetaillierte Daten und Modelle sowie einen deutlich erweiterten Finanz- und Zeitrahmen.

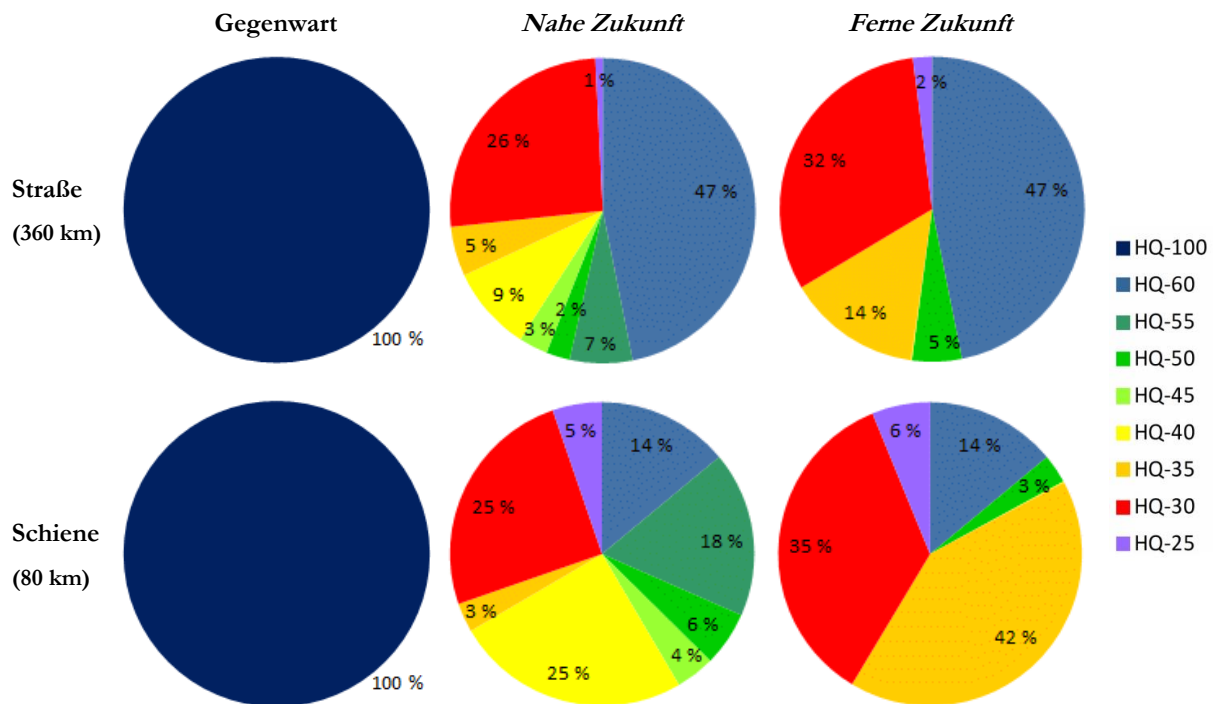


Abbildung 4-32: Zusammenstellung der im Bereich der Flächen der heute gültigen HWGK des mittleren Szenarios (HQ₁₀₀) gelegenen Straßen- und Schienenabschnitte am Rhein und an wichtigen Nebenflüssen, denen nach den Zukunftsprojektionen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* die in der Legende genannten geänderten Wiederkehrintervalle zugeordnet werden können.

4.3 Hochwasser Küste

Untersuchungen zu Hochwassereexposition an der Küste beziehen sich zum einen auf Beobachtungen in der Gegenwart sowie auf projizierte mögliche Änderungen für die Zukunft. Als Beobachtungsdaten wurden die REGNIE Daten des DWD (Rauhe et al. (2013)) für Untersuchungen des Niederschlags verwendet, sowie modellierte Zuflüsse in den NOK des LARSIM Modells der BfG als Referenz für Untersuchungen des Vorfeuchteindex als Zufluss-Proxy. Änderungssignale für die Entwässerung des NOK stammen aus dem gekoppelten Modell MPI-OM/REMO sowie zusätzlichen High-End Abschätzungen zum Meeresspiegelanstieg (Grinsted et al. 2015).

4.3.1 Entwässerungsproblematik

Für die Gegenwart hat sich bereits gezeigt, dass in den letzten Jahrzehnten im Nordosten Deutschlands signifikante positive Trends für Vorfeuchte und Ereignisniederschlag zu erkennen sind (Abbildung 4-33). Die Muster passen dabei gut zur Verlagerung der Zyklonenzugbahnen und der damit verbundenen Niederschlagsereignisse (Stendel et al. 2016). Dabei ist zu beachten, dass je nach Auswahl des untersuchten Zeitraums und des Untersuchungsgebiets unterschiedliche Trends erkennbar sind (Abbildung 4-34), was neben der Verlagerung der Zyklonenzugbahnen sicherlich auch durch die hohe dekadische Variabilität bedingt wird. Es wird zudem deutlich, dass auch für zukünftige Untersuchungen ein Zeitraum von mehr als 30 Jahren betrachtet werden muss, und die einfache Aufteilung in Zeitscheiben für *nahe* und *ferne Zukunft* nur eine „Momentaufnahme“ bietet, die ggf. zu falschen Rückschlüssen in der Interpretation führen kann.

Da das Einzugsgebiet des NOK nur zu ca. 40 % durch Pegel überwacht ist, sind die Zuflusswerte der BfG die einzig nutzbaren Referenzdaten, um Vergleiche mit den Niederschlagsindizes anzustellen. Hier ergaben sich für die Gegenwart die besten Übereinstimmungen zwischen Zufluss in den NOK aus dem LARSIM Modell der BfG und dem Vorfeuchteindex API im hydrologischen Winter (Abbildung 4-35, links). Dabei werden einige der beobachteten angespannten Situationen durch den API nahezu perfekt abgebildet, wie z.

B. ein Ereignis Anfang des Jahres 2012 (Abbildung 4-35, rechts). Der Ereignisniederschlag spielt eine untergeordnete Rolle, nur im hydrologischen Sommer, wenn der Boden ausgetrocknet ist und das Wasser nicht versickern kann, kann es zu erhöhten Zuflüssen in den NOK kommen. Derartige Ereignisse spielen für die Entwässerung des NOK aber kaum eine Rolle, da der Außenwasserstand dann im Normalfall eine Entwässerung erlaubt (Im Zeitraum von 1979–2012 wurden nur drei derartige Ereignisse gefunden).

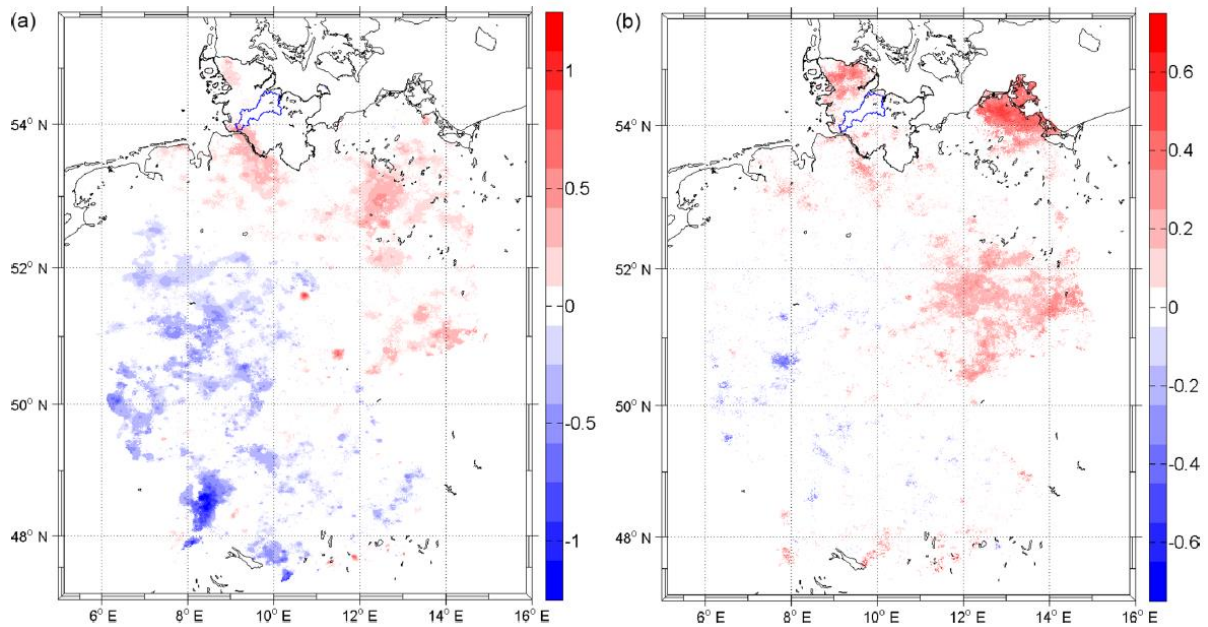


Abbildung 4-33: Signifikante Trends (oberhalb 95 % Signifikanzlevel) in Millimetern pro Jahr für die fünf höchsten (a) 3-Tages Ereignisniederschläge und (b) Vorfuchteindizes pro Jahr in Deutschland (1983–2012), bestimmt aus dem REGNIE Datensatz (DWD). Administrative Grenzen von Schleswig-Holstein sind schwarz markiert, die Grenzen des Einzugsgebiets des Nord-Ostsee-Kanals blau (Quelle: Schade (2017); Abbildung 11).

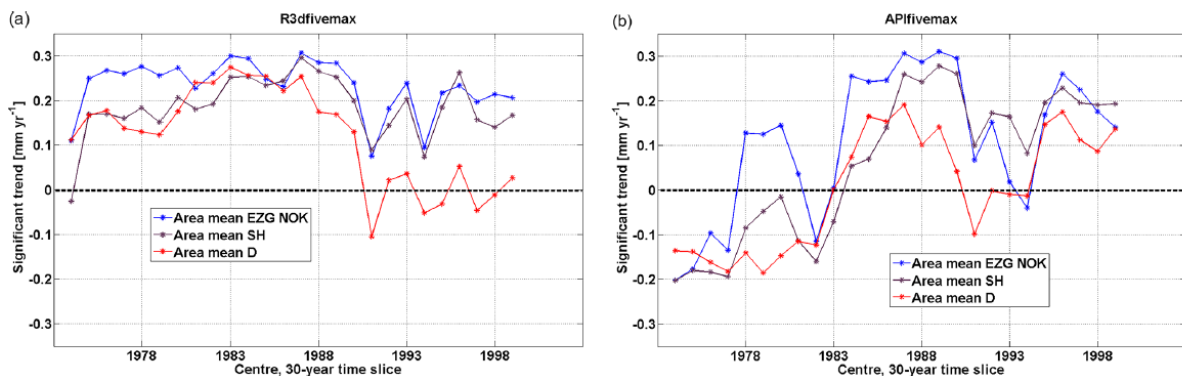


Abbildung 4-34: Mittlere signifikante Trends (oberhalb 95 % Signifikanzlevel) über 30-jährige gleitende Zeitscheiben von 1960–89 bis 1985–2014 in Millimetern pro Jahr für die fünf höchsten (a) 3-Tagesereignisniederschläge (R3dfivemax) und (b) Vorfuchteindizes (APIfivemax) pro Jahr für das Einzugsgebiet des NOK (blau), Schleswig-Holstein (lila) und Deutschland (rot), bestimmt aus dem REGNIE Datensatz. (Quelle: Schade (2017); Abbildung 12).

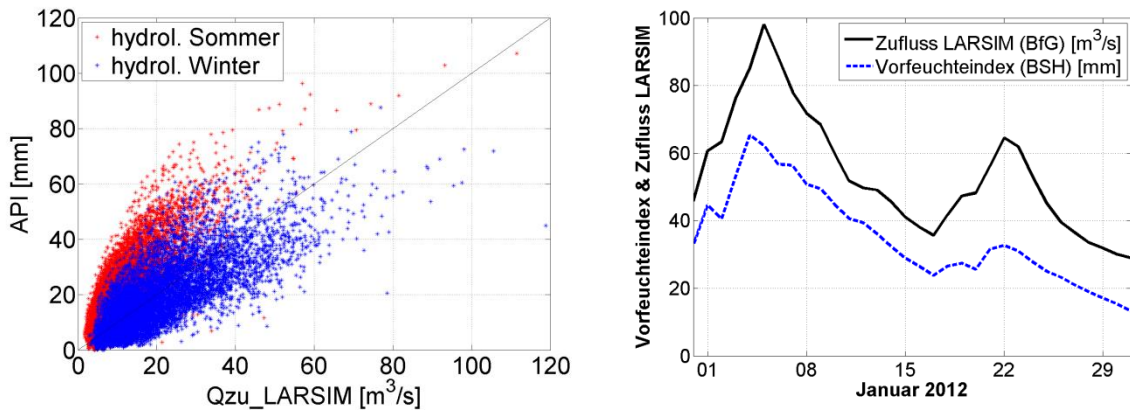


Abbildung 4-35: API im Einzugsgebiet des NOK im Vergleich zu den Zuflussdaten aus dem LARSIM Modell der BfG.

Des Weiteren wurden im Rahmen einer Analyse im Einzugsgebiet des NOK gegenwärtige angespannte Entwässerungssituationen untersucht, bei denen ein zusätzlich vorherrschender Windstau bzw. der Außenwasserstand in Brunsbüttel ein Entwässern des Kanals über mehrere Tidezyklen hinweg verhindert (Ganske und Schade 2017). Dabei wurde deutlich, dass bei den beobachteten Situationen fast immer ein erhöhter Außenwasserstand bzw. anhaltender Windstau vorlag, der verhinderte, dass das zugeführte Wasser aus dem Kanal gebracht werden konnte. Somit scheint der Meeresspiegelanstieg und das Zusammenspiel von hohem Wasserstand und Niederschlag, z. B. im Rahmen einer Sturmflut für die Entwässerung von Küstengebieten von entscheidender Bedeutung zu sein.

Zukünftige Entwässerung des NOK

Die Entwässerung des NOK erfolgt in der Regel im Zeitfenster des meeresseitigen Tideniedrigwasserstands zu 90 % über die Schleuse Brunsbüttel in die tidebeeinflusste Elbe/Nordsee, da die Wasserstandsdifferenz 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. Diese Entwässerung wird auch ohne zukünftige stärkere Niederschläge alleine schon durch den Meeresspiegelanstieg und Landsenkungen schwieriger werden, da dadurch das Entwässerungszeitfenster verringert wird. Die Zeitfenster für die Entwässerung werden folgendermaßen bestimmt:

- Aus dem Evaluierungslauf des globalen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modells (MPI-OM/REMO) werden stündliche Wasserstände für die Region Cuxhaven mit Beobachtungen validiert. Daraufhin werden die Beobachtungsdaten an Brunsbüttel angepasst, da das Modell aufgrund seiner Auflösung keinen eigenen Modellgitterpunkt für Brunsbüttel besitzt. Diese Anpassung erfolgt über eine aus Beobachtungen über einen Zeitraum von 30 Jahren gewonnene Regression.
- Mit dieser Regressionsbeziehung wird aus den stündlichen Wasserständen des historischen und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (Lauf1) die Zeitreihe der stündlichen Wasserstände bei Brunsbüttel bestimmt. Als zusätzliche Szenarien werden das High-end-Szenario von Grinsted et al. (2015) (1,74 m Meeresspiegelanstieg bis 2100), jeweils addiert mit Landsenkungen bei Brunsbüttel von 0.35 mm/a, 2 mm/a bzw. 4 mm/a berechnet.
- Aus den stündlichen Wasserständen wird über eine aus Naturmessungen gewonnene Korrelation zwischen der Differenz Elbwasserstand Brunsbüttel - Zielwasserstand des NOK und der Anzahl geöffneter Schleusen und Umläufen das mögliche Entwässerungspotenzial für jede einzelne Stunde von 1951–2100 (im Klimaszenario *Weiter-wie-bisher*) berechnet. Abbildung 4-36 zeigt diese Korrelation (mündliche Kommunikation von Frau Ebner von Eschenbach). Aus der Abbildung wird deutlich, dass dieser Zusammenhang nichtlinear ist.

- Um den Einfluss der natürlichen Variabilität im Meeresspiegelanstieg etwas zu verringern, werden gleitende Mittel über 30 Jahre genutzt. So kann das Entwässerungspotenzial der Zukunft bei steigendem Meeresspiegel mit dem der Gegenwart verglichen werden.

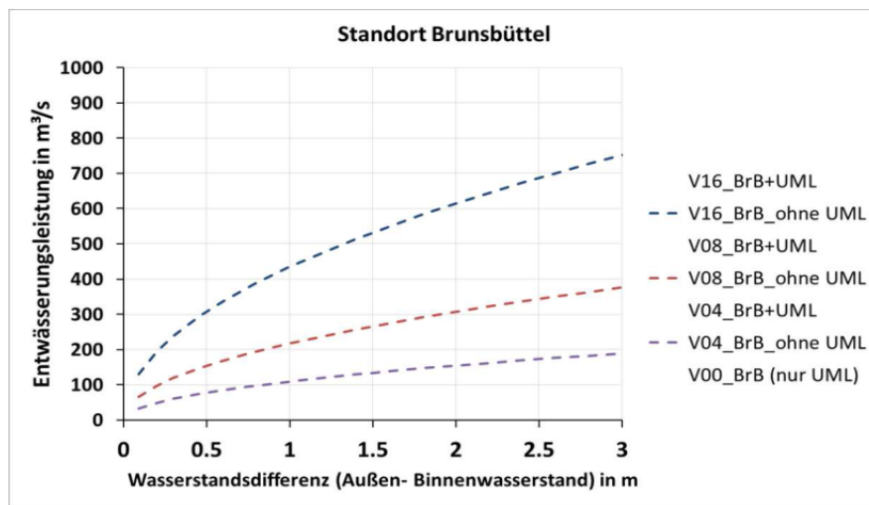


Abbildung 4-36: Entwässerungsleistung in Brunsbüttel in Abhängigkeit von der Wasserstands-differenz und der Anzahl geöffneter Schleusen und Umläufen. Quelle: Ebner von Eschenbach (BFG), 8. Hydrol. Gespräch.

Abbildung 4-37 zeigt ein Beispiel für Modellergebnisse aus dem global gekoppelten Klimamodell MPI-OM im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Zusätzlich sind noch Landsenkungsaspekte und Abschätzungen für das beschleunigte Abschmelzen der Polkappen berücksichtigt. Schon ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm bis 2100 führt zu einem Rückgang der potenziellen Entwässerungsleistung um über 40 %. Bei der Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von 1,74 m bis 2100 (dies entspricht dem 95. Perzentil für Hamburg aus Grinsted et al. (2015)) würde schon zum Ende des 21. Jahrhunderts die potenzielle jährliche Entwässerungsleistung unterhalb der heute schon nötigen jährlichen Entwässerungsleistung liegen, der NOK könnte also spätestens dann nicht mehr im freien Gefälle entwässert werden.

Schließlich wurden gemeinsame Auswertungen von hohem Außenwasserstand und hohen bzw. langanhaltenden Niederschlägen, bzw. daraus abgeleiteter Indizes, herangezogen und deren gemeinsame Auftretenswahrscheinlichkeiten, sowie mögliche Änderungen dieser Wahrscheinlichkeiten, in der Zukunft untersucht. Extrem hohe Tideniedrigwasserstände reduzieren oder verhindern sogar die Möglichkeit zur Entwässerung. Während es normalerweise nicht schwierig ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung für den Fall, dass zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser, die höher sind als der Wasserstand im NOK (mindestens 480 cm über Pegelnull), auftreten. Es ist ein rapider Anstieg in der Zukunft an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern auszumachen, der zudem noch statistisch hochsignifikant ist (auf dem 99 % Level), insbesondere für 5 und 6 aufeinanderfolgende Ereignisse. Während demnach aktuell im Durchschnitt etwa 17 einzelne Niedrigwasser oberhalb des kritischen Wasserstands pro Jahr beobachtet werden, wird sich die Zahl in Zukunft also durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen.

Tabelle 4-3 zeigt dazu Ereignisse von 1 bis 6 aufeinanderfolgenden Niedrigwassern mit Wasserständen oberhalb des kritischen Levels (480cm) für 30-Jahres Perioden aus dem MPI-OM/REMO *Weiter-wie-bisher-Szenario* Lauf. Es ist ein rapider Anstieg an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern auszumachen, der zudem noch statistisch hochsignifikant ist (auf dem 99 % Level), insbesondere für 5 und 6 aufeinanderfolgende Ereignisse. Während demnach aktuell im Durchschnitt etwa 17 einzelne Niedrigwasser oberhalb des kritischen Wasserstands pro Jahr beobachtet werden, wird sich die Zahl in Zukunft also durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen.

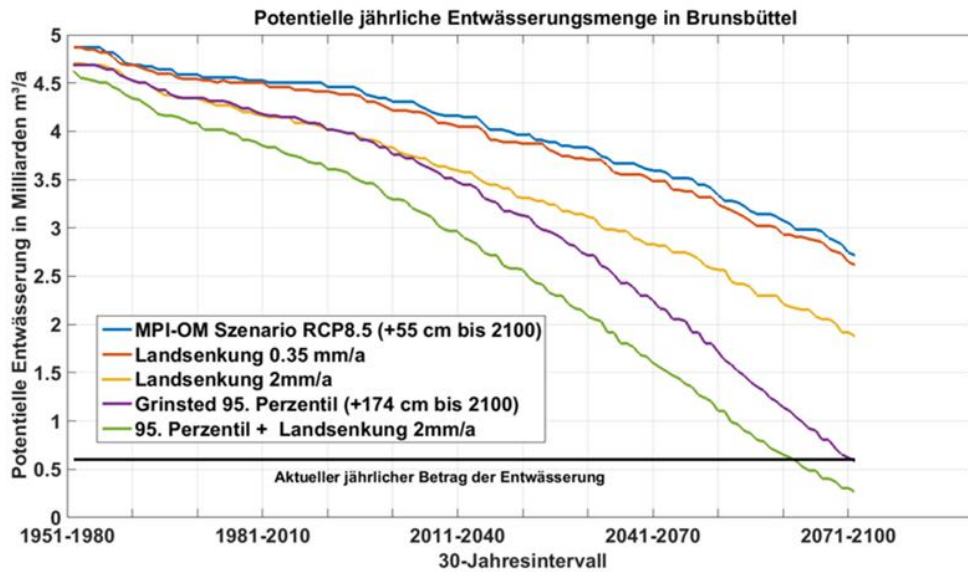


Abbildung 4-37: Potenzielle jährliche Entwässerungsmenge in m^3/Jahr in Brunsbüttel, berechnet mithilfe stündlicher Wasserstandsdaten aus dem gekoppelten Klimamodell MPI-OM im *Weiter-wie-bis-her-Szenario* (blau) und mit einer zusätzlich angenommenen Landsenkung von $0,35 \text{ mm/a}$ (rot) bzw. 2 mm/a (gelb). Dargestellt ist außerdem ein zusätzlich angenommener Meeresspiegelanstieg von $1,74 \text{ m}$ bis 2100, wie in Grinsted et al. (2015) im 95. Perzentil berechnet (violett) mit zusätzlicher Landsenkung von 2 mm/Jahr (grün).

Tabelle 4-3: Anzahl von Ereignissen pro 30-Jahres-Periode, bei denen das Niedrigwasser (NW) in Brunsbüttel höher als der Betriebswasserstand im NOK ist, dargestellt für $N = 1$ bis 6 aufeinanderfolgende Niedrigwasser.

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

4.3.2 Sturmflut

Innerhalb der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks wurde untersucht, ob sich die meteorologischen Bedingungen für Sturmfluten in der Nordsee in Zukunft möglicherweise verändern. Da die Untersuchung historischer Sturmfluten (Gerber et al. 2016) ergab, dass schwere Sturmfluten in Cuxhaven immer auch an der Niedersächsischen und der Schleswig-Holsteinischen Küste auflaufen, beschränken sich unsere Untersuchungen auf Cuxhaven. Eine ausführliche Beschreibung dieser Analyse bietet Ganske (2019). Basis dieser Untersuchungen ist der sogenannte effektive Wind, der aus den Modellergebnissen der zwei gekoppelten Klimamodelle MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 jeweils für den Zeitraum 1961–2099 und für die drei Szenarien *Weiter-wie-bis-her*, *moderat* und *Klimaschutz* bestimmt wurde. Dabei ist die effektive Windrichtung diejenige, bei der die Wirkung des Windes auf den Wasserstand an einem bestimmten Punkt an der Küste am stärksten ist. Für Cuxhaven ist die Effektivwindrichtung 295° (Westnordwest), vgl. Müller-Navarra und Giese (1999).

Die effektive Windgeschwindigkeit an einem Modellgitterpunkt ist die orthogonale Projektion des Windes auf die effektive Windrichtung. Erreicht oder überschreitet die effektive Windgeschwindigkeit bei Cuxhaven das 98. Perzentil der Effektivwindgeschwindigkeitsverteilung für mindestens 10 Stunden, so liegt ein „potentes“ Extremwindereignis vor, das „potenziell“ zu einer Sturmflut führen kann und deshalb als „Potenzielle Sturmflut“ bezeichnet wird. Für alle Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* wurden die potenziellen Sturmfluten identifiziert und durch die Andauer des Ereignisses und die dabei aufgetretene effektive Höchstwindgeschwindigkeit charakterisiert. Für die Zeitscheibenvergleiche wurden jeweils 30-jährige Mittelwerte für diese beiden Kenngrößen und die Anzahl Potenzieller Sturmfluten bestimmt.

Die Abweichungen der Zeitscheibenmittelwerte für Andauer und maximale effektive Windgeschwindigkeit in der *naben* und *fernen Zukunft* von denen im *Bezugszeitraum* erwiesen sich als uneinheitlich im Vorzeichen (vgl. Abbildung 4-38). Das Ensemblemittel (der Abweichungen) über die 8 analysierten Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* geht für Andauer und max. Effektivwindgeschwindigkeit gegen Null. Für die Anzahl Potenzieller Sturmfluten pro Jahr liefern die Simulationen mehrheitlich eine Zunahme gegenüber dem *Bezugszeitraum*, die sich im Ensemblemittel auf 0,2 (*nabe Zukunft*) bzw. 0,3 (*ferne Zukunft*) beläuft. Die zeitliche Entwicklung der jährlichen Potenziellen Sturmflutereignisse und ihrer Kenngrößen im Gesamtzeitraum 1961–2099 erwies sich in nahezu allen Realisierungen der 3 Szenarien als (linear) trendfrei. Signifikante Änderungen in Andauer, maximaler effektiver Windgeschwindigkeit und Häufigkeit „Potenzieller Sturmfluten“ konnten für Cuxhaven auf Basis der verfügbaren Szenarienrechnungen und der verwendeten Methoden weder für die *nabe* noch für die *ferne Zukunft* festgestellt werden.

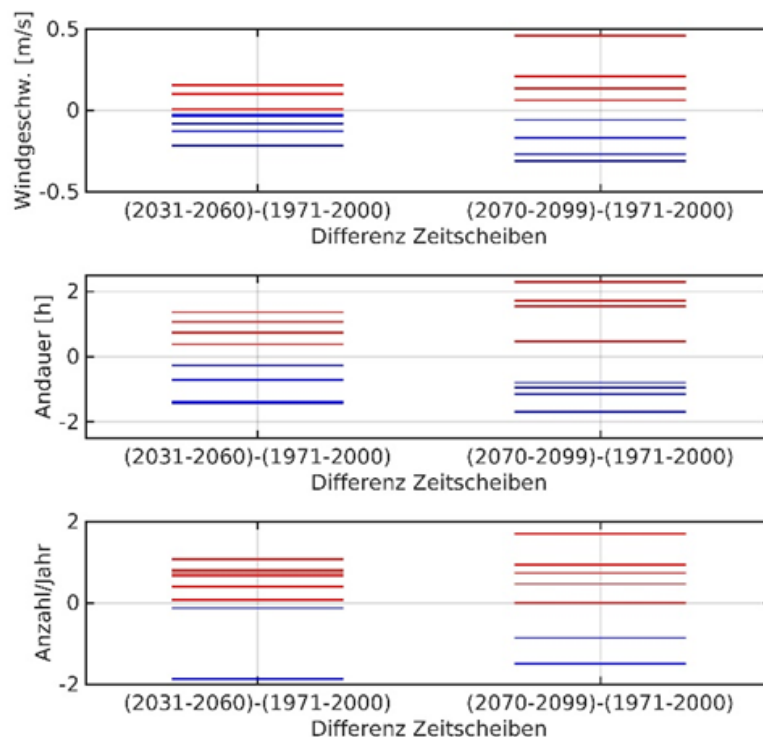


Abbildung 4-38: Differenzen (*nabe* (links) bzw. *ferne Zukunft* (rechts) minus Gegenwart) der klimatischen Mittel der Kenngrößen für Potenzielle Sturmfluten bei Cuxhaven im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Oben: Max. effektive Windgeschwindigkeit (m/s). Mitte: Andauer (h). Unten: Häufigkeit. Die Ergebnisse beruhen auf 8 Realisierungen der gekoppelten Klimamodelle MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4.

Ein Beispiel für die verkehrliche Auswirkung einer Sturmflut in der Deutschen Bucht bietet die Risikoanalyse von Buthe et al. (2015) des BBSR, die unter Mitwirkung des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) entstanden ist. Die potenziell überflutungsgefährdeten Gebiete bei Eintritt einer extremen Sturmflut sind in Buthe et al. (2015), Abbildung 2, in grau hinterlegt und identisch mit dem HQ_{extrem}

der Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer (siehe Meilensteinbericht M103b-1, Nilson et al. 2017b). Davon wurden in einer vereinfachten Annahme ca. 15 % überflutet, was einem Gebiet von ca. 1.350 km² entspricht. Die verkehrsbedingten Auswirkungen dieses Szenarios wurden schließlich mit dem Transportstrom-Visualisierungs-Modell und dem Erreichbarkeitsmodell des BBSR bestimmt. Wie man ferner aus dieser Abbildung erkennen kann, liegen insbesondere in Niedersachsen längere Autobahnstrecken und überregional bedeutsame Schienenverbindungen zwischen den Seehäfen im Bereich des potenziellen Überflutungsgebiets. 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.

Laut 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 (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, ebenso für Evakuierungspläne und -routen, Notversorgungen und Katastrophenschutzmaßnahmen. Insbesondere auf die niedersächsischen Küstengebiete könnten hier größere Probleme zukommen.

Sturmfluten in den Bundeswasserstraßen

Im Rahmen der Projekte KLIWAS (Laufzeit: März 2009 bis Dezember 2013) und KLIMZUG-NORD (Laufzeit: April 2009 bis März 2014) wurden von der BAW mithilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Ästuar von Elbe, Jade-Weser und Ems verschiedenen Zukunftsszenarien untersucht. Für die Sturmflutuntersuchungen werden historische sehr hohe Sturmfluten mit einem Meeresspiegelanstieg in der Nordsee (25 cm, 80 cm und 115 cm) sowie einem veränderten Abfluss aus dem Binnenbereich in die Ästuar kombiniert. Alle anderen Parameter werden nicht verändert. Diese Sensitivitätsstudien ermöglichen es klare Wenn-Dann Aussagen zu formulieren und mögliche Betroffenheiten abzuleiten. Die Ergebnisse stellen keine Projektionen dar, sondern vermitteln prinzipiell, welche Auswirkungen z. B. ein Meeresspiegelanstieg auf die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes hat. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudien wurden im KLIWAS Abschlussbericht vorgestellt sowie in Rudolph (2014) und Seiffert et al. (2014) veröffentlicht und ausführlich für die Elbe in einem BAW Bildatlas (BAW 2015a) dargestellt.

Als Ergebnis der Sensitivitätsstudie zeigt sich, dass der Meeresspiegelanstieg bis tief in die Ästuar hinein den Sturmflutscheitelwasserstand um ungefähr den Betrag des Meeresspiegelanstieges erhöht. Im oberen Bereich der Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand zusätzlich durch die Höhe des Abflusses aus dem Binnenbereich verändert (siehe Tabelle 2 in BAW Bildatlas (BAW 2015a)). Zusätzlich zur Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes verändert sich durch den Meeresspiegelanstieg auch die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes. Bezogen auf einen Ort in der Mündung der Ästuar treten die Sturmflutscheitelwasserstände bei einem Meeresspiegelanstieg im zentralen Ästuar früher ein (siehe Tabelle 3 in BAW Bildatlas (BAW 2015a)).

Das vom BMBF im Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) geförderte Projekt EXTREMENESS (Extreme North Sea Storm Surges and their consequences, Projektpartner: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, DWD, BAW, die Universität Hamburg und das Forschungsinstitut Umwelt und Wasser der Universität Siegen) verfolgte das Ziel, extreme Sturmflutereignisse in der Nordsee in Klimaszenarien ausfindig zu machen, die zum einen extrem unwahrscheinlich, zum anderen aber dennoch physikalische plausibel und möglich sind und mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein können.

In EXTREMENESS beschäftigt sich der DWD mit der Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können und die BAW mit der Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und einer möglichen Verstärkung.

In EXTREMENESS wurden extreme Sturmtiden mit den zugehörigen meteorologischen Bedingungen aus existierenden Datensätzen heutiger und möglicher zukünftiger Klimabedingungen gesucht. Gesucht wurde für einen Ort in der Außenems bei Borkum nach dem höchsten Ereignis (Hohe Flut, HF), nach einer Sturmflutserie (SFS) mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche sowie nach der Sturmflut mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser (Lange Flut, LF). Die HF wurde in einer Klimaprojektion basierend auf dem Emissionsszenario B1 im Februar 2030 gefunden. Die SFS, die auch die LF enthält, wurde in einer Klimaprojektion basierend auf dem Emissionsszenario A1B im November 2030 gefunden (BAW 2020). Durch eine geeignete zeitliche Verschiebung der meteorologischen Sturmsituation gegen die astronomische Tide konnte das Sturmflutereignis HF zusätzlich verstärkt werden (HF_v).

Mit dem hochaufgelösten Modell der Deutschen Bucht und der Ästuare von Ems, Jade-Weser und Elbe wurde die Auswirkung einer zusätzlichen Verstärkung, der extremen Sturmflutereignisse HF_v und LF/SFS in den Fokusregionen von EXTREMENESS, Ems und Elbe untersucht. Als zusätzliche Verstärkung wurde ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee von 50 cm und 100 cm sowie eine Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich von MQ (mittlerer Abfluss) auf HHQ (höchster jemals gemessener Abfluss) betrachtet. Beispielhaft ist für das Sturmflutereignis SFS der Wasserstandsverlauf bei Brunsbüttel in der Elbmündung in Abbildung 4-39 dargestellt. Zusätzlich ist der Wasserstandsverlauf für einen Meeresspiegelanstieg und für einen erhöhten Abfluss dargestellt. Ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee führt zu einer Erhöhung der Wasserstände in der Größenordnung des gewählten Meeresspiegelanstieges. Eine Zunahme des Abflusses erhöht die Wasserstände im breiten und tiefen Mündungsbereich der Elbe nur geringfügig.

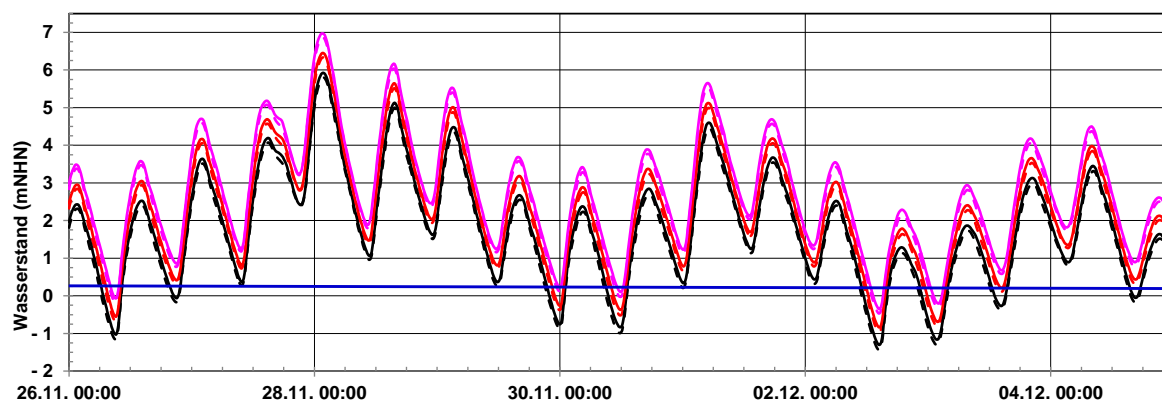


Abbildung 4-39: Wasserstandsverlauf der Sturmflutserie SFS bei Brunsbüttel (Elbeästuar) ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (rot) und 100 cm (pink). Die gestrichelte Linie kennzeichnet einen Abfluss von MQ = 714 m³/s, die durchgezogene Linie von HHQ = 4.080 m³/s. Die blaue Linie markiert einen Wasserstand von NHN +0,25 m.

Große Gebiete Schleswig-Holsteins werden über den NOK entwässert. Um einen uneingeschränkten Schiffsverkehr im Kanal zu gewährleisten, darf der Wasserstand im NOK einen Wasserstand von NHN - 0,20 m nicht unterschreiten aber auch nicht über NHN +0,25 m steigen (Ganske und Schade 2017). Die Entwässerung des NOK erfolgt heute zum größten Teil bei Brunsbüttel in die Elbe. Während der 176 Stunden dauernden Sturmflutserie SFS liegt der Wasserstand in der Elbe bei Brunsbüttel ca. 24 Stunden unter NHN +0,25 m. In diesem Zeitraum wäre eine Entwässerung des NOK in die Elbe möglich. Durch einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm verkürzt sich dieser Zeitraum auf ca. 16 Stunden und bei einem

Meeresspiegelanstieg von 100 cm auf ca. 8 Stunden. Dieses extreme Ereignis SFS ist geeignet, Betroffenheiten für die Entwässerungsleistung und die Schiffbarkeit des NOK zu analysieren und Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.

Die Analyse des Sturmflutscheitelwasserstandes (höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum) entlang der Ästuar von Elbe und Ems ermöglicht die Einordnung der Bedeutung von Meeresspiegelanstieg und Abflussveränderung für die Sturmflutszenarien HF_v und SFS. Abbildung 4-40 zeigt beispielhaft den Sturmflutscheitelwasserstand auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und Bleckede für den heutigen Meeresspiegel sowie einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm und 100 cm jeweils in Kombination mit dem Abfluss aus der Mittel-elbe von MQ (714 m³/s) und HHQ (4.080 m³/s). Ein Meeresspiegelanstieg erhöht auch in den extremen Sturmflutereignissen HF_v und SFS den Sturmflutscheitelwasserstand bis tief in die Ästuar hinein um einen Betrag in der Größenordnung des Meeresspiegelanstieges. Eine Erhöhung des Abflusses führt zu einer zusätzlichen Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände von wenigen Zentimetern im Bereich von Brunsbüttel bis zu mehreren Dezimetern im Bereich stromauf von Zollenspieker.

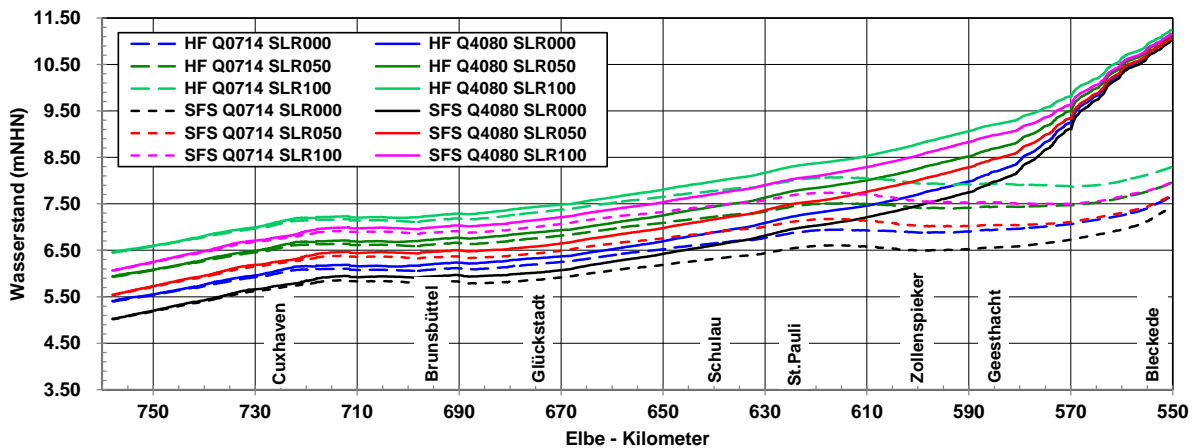


Abbildung 4-40: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbeästuar für die Sturmflutereignisse HF_v (blau) und SFS (schwarz). Ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm ist dunkelgrün (HF_v) bzw. rot (SFS) und von 100 cm grün (HF_v) bzw. pink (SFS) markiert. Die gestrichelte Linie kennzeichnet MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

Für Cuxhaven in der Elbmündung und Hamburg im zentralen Bereich des Elbeästuar sind die Sturmflutscheitelwasserstände der HF in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Zum Vergleich ist der höchste beobachtete Sturmflutscheitelwasserstand eingetragen. Sowohl für Cuxhaven als auch für Hamburg beobachtet man eine Zunahme des Sturmflutscheitelwasserstandes um den Betrag des Meeresspiegelanstieges.

Tabelle 4-4: Hohe Flut HF_v: Sturmflutscheitelwasserstand in der Elbe für Cuxhaven und Hamburg St.Pauli für MQ = 714 m³/s und HHQ = 4.080 m³/s in Kombination mit keinem, 50 cm und 100 cm Meeresspiegelanstieg. Zusätzlich ist in der rechten Spalte der höchste beobachtete Wasserstand (HThw)(3. Januar 1976) eingetragen.

Sturmflut	HF_v						HThw
	MQ		HHQ		MQ		
Abfluss	MQ	HHQ	MQ	HHQ	MQ	HHQ	500 m ³ /s
Meeresspiegelanstieg	0 cm		50 cm		100 cm		—
	m NHN	m NHN	m NHN	m NHN	m NHN	m NHN	m NHN
Cuxhaven	6,01	6,07	6,55	6,60	7,07	7,12	5,10
Hamburg	6,89	7,25	7,46	7,80	8,02	8,33	6,45

In Hamburg bewirkt eine Zunahme des Abflusses von MQ auf HHQ eine zusätzliche Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um ca. 30 cm. Ohne Meeresspiegelanstieg liegen die Sturmflutscheitelwasserstände dieser extremen Sturmflut höher als der höchste gemessene Wert HThw (3. Januar 1976) in Cuxhaven oder Hamburg. Sie erreichen jedoch nicht die Höhe der heutigen Bemessungswasserstände von NHN +6,28 m in Cuxhaven bzw. NHN +8,10 m in Hamburg St. Pauli.

Untersuchungen von Ganske et al. (2016) zeigen, dass sich das Windklima in den verwendeten Klimaprojektionen gegenüber heute nicht signifikant verändert, sondern auf multidekadischen Zeitskalen schwankt. Es kann deshalb angenommen werden, dass die in diesen Projektionen vorkommenden extremen Sturmereignisse bereits heute möglich wären.

4.4 Übersicht der Ergebnisse aus SP-103 für Klimawirkungsanalyse

Neben den schon in Abschnitt 3.5 dargestellten theoretischen Grundlagen für die Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser sind für den integrierenden Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* eine Reihe konkreter Produkte in diesem Schwerpunkt entstanden. Eine Zusammenfassung dazu findet sich in Tabelle 4-5. Diese beinhaltet das Produkt, die betrachteten Regionen und die Bereitstellungsart.

Tabelle 4-5: Übersicht der Zulieferungen aus diesem Schwerpunkt an die *Klimawirkungsanalyse*. Die mit * bzw. ** gekennzeichneten Produkte werden über die *Szenarienbildung* bzw. *Schiffbarkeit- und Wasserbeschaffenheit* geliefert.

Produkt	Region	Bereitstellungsart
Diverse Niederschlags- und Starkregenindizes*	ganz Deutschland	GIS-fähige Daten
Aktuelle Hochwassergefahrenkarte (HWGK) für drei Sturmflut- und Hochwasserszenarien („häufig“, „mittel“, „extrem“)	ganz Deutschland	GIS-Karten
Straßennetz für Bundesfernstraßen	ganz Deutschland	GIS-Karte
Schiennetz	ganz Deutschland	GIS-Karte
Verschnitt HWGK mit Schienen bzw. Straßennetz zur Identifizierung betroffener Verkehrsnetze bei den verschiedenen Szenarien	ganz Deutschland	GIS-Karten
Änderung des HQ ₁₀₀ bei Flusshochwasser für die <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher-Szenarios</i>	Rhein & Donau	Tabellen & GIS-Karten für Flussabschnitte
Statistiken zu den veränderten Jährlichkeiten der vom heutigen HQ ₁₀₀ betroffenen Schienen und Straßenanteile für die <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher-Szenarios</i>	Rhein	Tabellen & Tortendiagramme
Anzahl der Tage mit HSW-Überschreitung für Gegenwart und für die <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i> unter Annahme des <i>Weiter-nie-bisher-Szenarios</i> **	Rhein & Donau	GIS-Karte für Mittelrhein (Vergangenheit), Längsschnitte

Des Weiteren werden die Ergebnisse der im Rahmen der *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) durchgeführten Fallstudie NOK, die u. a. auch in das Abschlussdokument der Expertengruppe zu Klimafolgen und Klimaanpassung für Verkehrsnetze und -knoten²² der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) aufgenommen wurde, sowie Erkenntnisse aus der BBSR Analyse zu verkehrlichen Auswirkungen einer Sturmflut als Anwendungsbeispiele an die *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) geliefert.

²² Für Informationen zur UNECE Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes siehe <https://www.unece.org/trans/areas-of-work/trends-and-economics/activities/group-of-experts-on-climate-change-impacts-and-adaptation-for-transport-networks-and-nodes-wp5ge3.html>.

5 Fazit & Ausblick

Die Wirkungszusammenhänge zum Themenkomplex Hochwasser unter dem Einfluss des Klimawandels und extremer Witterungsbedingungen sind sehr weitläufig. Im vorliegenden Dokument wurden ausgewählte Wirkungsketten hervorgehoben, die für das BMVI-Expertenetzwerk, das BMVI sowie deren Fachbehörden als besonders relevant erachtet wurden. Des Weiteren wurden technische Schritte vorgestellt, mit denen die Indikatoren für die Gefährdung durch Hochwasser der Verkehrsinfrastruktur der innerhalb im ExpN-TF1 verfügbaren Ressourcen grundsätzlich abgeleitet und bereitgestellt werden können. Die einzelnen Methoden und Modelle wurden hierfür aufbereitet, konzeptionell zusammengeführt und erfolgreich angewandt. Dabei konnten auch geeignete Schritte für weitere Entwicklungen identifiziert werden.

5.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn

Ein zentraler Aspekt der Arbeiten im BMVI-Expertenetzwerk ist die interdisziplinäre Integration der Methoden und Sichtweisen der verschiedenen vernetzten Behörden. Diese Integration ist nicht nur im verkehrsträgerübergreifenden Kontext des gesamten Netzwerkes eine Herausforderung, sondern auch innerhalb des Schwerpunkts *Hochwassergefahren*. Dabei gilt es zu beachten, dass die Wasserstraße schon beim höchsten Schifffahrtswasserstand nicht mehr befahrbar ist und auch bereits bei darunterliegenden Wasserständen Einschränkungen erlebt. Schiene und Straße sind jedoch erst durch Ausuferungen von Flüssen und Bächen bei größeren Hochwasserereignissen betroffen. An größeren Gewässern können solche Hochwassersituationen eine Dauer von bis zu mehreren Tagen haben. Lokale Hochwasserereignisse infolge kurzfristiger Starkniederschläge können auch abseits größerer Gewässerbereiche auftreten, vor allem bei prädestiniertem Gelände. Vor diesem Hintergrund sind Ansätze der Fachbereiche Meteorologie, Ozeanografie, Hydrologie, Wasserbau und Verkehrswirtschaft skalenübergreifend zusammenzuführen. Aufgrund der Unterschiede im Untersuchungsgegenstand und in den Datengrundlagen ist insbesondere die Herstellung kohärenter Betrachtungsweisen für Küsten- und Binnengewässer eine Herausforderung. Die im BMVI-Expertenetzwerk neu generierten bzw. zusammengestellten Daten erlauben eine differenzierte Analyse spezifischer Klimawirkungen auf das Verkehrssystem in Vergangenheit und Zukunft. Unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* wird eine Erhöhung der Exposition in Bezug auf Hochwasser projiziert. In Verbindung mit der Bewertung der Kritikalität und Sensitivität von Strecken und Objekten können prioritäre, vertieft zu untersuchende und ggf. anzupassende Bereiche des Verkehrssystems identifiziert werden.

Im Küstenbereich hat sich herausgestellt, dass der zu erwartende Meeresspiegelanstieg die Lage im Bereich Hochwasser dominiert. Die Watten im Küstenbereich sind grundsätzlich in der Lage, bei einem Meeresspiegelanstieg aufzuwachsen. In diesem Fall könnte das Mitwachsen der Watten die Reaktion der Tidedynamik auf einen Meeresspiegelanstieg im Küstenvorfeld teilweise kompensieren. Jedoch wird bei einem stark beschleunigten Meeresspiegelanstieg ein Verlust an Wattfläche erwartet, da die natürliche morphologische Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers durch das Sedimentdargebot begrenzt wird. Die Veränderungen von Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie Tidehub sind innerhalb der Deutschen Bucht räumlich und zeitlich heterogen. Das zu erwartende häufigere Auftreten von Wetterlagen aus Nord-West über der Nordsee geht potenziell mit einem häufigeren Auftreten angespannter Entwässerungssituationen am Nord-Ostsee-Kanal einher, die den Betrieb des Kanals negativ beeinflussen, was sich mit dem zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zusätzlich verschärft. Ein besonderes Problem an der Küste ist also der Außenwasserstand, denn er ist entscheidend dafür, ob und wie das im Hinterland abgeregnete bzw. durch z. B. Flusshochwasser zugeführte Wasser abgeleitet werden kann (siehe auch Schlussbericht *Fokusgebiete Küsten* Schade et al. (2020)). Dabei spielen mögliche zukünftige Meeresspiegeländerungen, Änderungen der Tidedynamik, Sturmfluten, aber auch Landhebung/-senkung und Änderungen des Grundwasserspiegels eine Rolle, ganz abgesehen von menschlichen Faktoren. Zudem erfordern Untersuchungen in den Küstenregionen den Einsatz von gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen, um eine physikalisch konsistente Basis zwischen den

verschiedenen zu untersuchenden Parametern (Niederschlag, Vorfeuchte, Wind, Wasserstand) zu gewährleisten. Wichtig ist hierbei, dass die Auflösung der Modelle in den entsprechenden Fokusregionen ausreichend fein ist und alle topografischen Gegebenheiten berücksichtigt werden. Ohne diese können keine sinnvollen Aussagen getroffen werden, da die einzelnen Parameter direkt miteinander wechselwirken und sich gegenseitig beeinflussen. Dabei sind viele Fragestellungen Untersuchungsgegenstand aktueller Forschungsarbeiten, insbesondere was mögliche Veränderungen des regionalen Meeresspiegels (z. B. Programm SPP 1889 - Regional Sea Level Change and Society, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG), Sturmfluten (z. B. das Projekt EXTREMENESS), oder des regionalen Entwässerungsmanagements (z. B. das Projekt KLEVER im Verbandsgebiet Emden) betrifft.

Bei den für Hochwasser relevanten klimatologischen Parametern werden – abhängig vom betrachteten Klimaszenario – teils deutliche Veränderungen durch die Klimamodelle gezeigt. Im Winter und Frühling ist etwa für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit einer deutlichen Zunahme des mittleren Niederschlags zu rechnen, während im Sommer kaum Änderungen im Osten bzw. leichte Abnahmen im Westen Deutschlands (z. B. Rhein Einzugsgebiet) projiziert werden. Des Weiteren muss zukünftig von einem häufigeren und intensiveren Auftreten von Starkniederschlägen ausgegangen werden. Bei den Starkniederschlägen nehmen besonders seltene Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zu als weniger extreme Ereignisse. Auch für die Mitteltemperatur wird vor allem für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine deutliche Zunahme projiziert, was vor allem im Winter zu einem erheblich höheren Anteil an flüssigem Niederschlag führen dürfte.

Für Analysen der Auswirkungen von Flusshochwasser auf Wasserstraßen und landgebundene Verkehrswege (Straße & Schiene) im Binnenland kam einheitlich das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME mit beobachteten und simulierten meteorologischen Eingangsgrößen (HYRAS, bias-adjustierte Ausgänge meteorologischer Modellketten) zur Anwendung. LARSIM-ME wurde im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks weiterentwickelt und damit gerade auch im Hochwasserbereich verbessert. Um zuverlässige Hochwasserstatistiken abzuleiten, wurden ferner Konzepte für den Einsatz von LARSIM-ME im Zusammenhang mit weiteren hydrologischen Methoden (u. a. Model Output Statistics, FLYS, Dauerlinien, Extremwertanalyse mit verschiedenen Informationserweiterungen) entwickelt und in den Flussgebieten von Rhein und Donau eingesetzt. Damit konnte der aus der beobachteten Vergangenheit abgeleitete Istzustand der Hochwassersituation auch auf Grundlage der eingesetzten Modelle gut abgebildet werden, wobei auch prozess-, modell- und stichprobenbedingte Unsicherheiten identifiziert wurden. Hervorzuheben ist die Erkenntnis, dass wesentliche Verteilungseigenschaften beobachteter Serien jährlicher Abflussscheitel der untersuchten Flusspegel (bzw. ihre aktuell gültigen Hochwasserstatistiken) mit vereinigten Ensembleserien für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* untersuchten Modellketten erfasst werden konnten. Auf Grundlage dieser Referenz wurden die entwickelten Konzepte für die Simulation und Diagnose von Zukunftsprojektionen des genannten Klimaszenarios eingesetzt.

Die damit abgeleiteten Längsschnitte des Rheins, des Mains und der Donau für die mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung des Höchsten Schifffahrtswasserstandes zeigen für die Zukunftsprojektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* vergleichbare räumliche Strukturen wie in der beobachteten Vergangenheit, jedoch mit deutlichen relativen Zunahmen. Die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten (bzw. Gesamtdauern) bleiben absolut jedoch i. d. R. unter zwei Wochen, am gesamten Rhein und an weiteren Flussabschnitten auch unter einer Woche. Im Vergleich mit Niedrigwasserphasen führen Hochwasserereignisse damit auch in den Zukunftsprojektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* im Mittel nur zu untergeordnet relevanten Unterbrechungshäufigkeiten bzw. -dauern für die Schifffahrt. In Einzeljahren der Zukunftsprojektionen kann es zunehmend auch zu deutlich größeren Überschreitungshäufigkeiten von einem Monat pro Jahr oder mehr kommen, jedoch bleiben diese insbesondere am Rhein selten.

Bei den auch für die landgebundenen Verkehrsträger Straße und Schiene relevanten, extremen Hochwasserereignissen zeigen die Zukunftsprojektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in den Flussgebieten von Rhein und Donau deutliche Zunahmen ihrer Abflussscheitel bzw. Häufigkeiten, die den Hochwassergefahrenkarten zugrunde liegen. Am Rhein und an der Donau wurden je nach Flussabschnitt und Zukunftszeitraum

Zunahmen des 100-jährlichen Hochwasserscheitels um 10 bis 25 % gefunden bzw. verkürzte Wiederkehrintervalle auf etwa 30 bis 50 Jahre. Für die analysierten Projektionen der *nahen* und *fernen Zukunft* (2031–2060 und 2070–2099) wurden dabei jeweils räumlich differenzierte Strukturen identifiziert, die in sich plausibel sind, sich aber zwischen den beiden Zeiträumen unterscheiden. Sie ergeben sich v. a. in den Teileinzugsgebieten, während sie sich an Rhein und Donau zum Teil ausgleichen. Die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Strukturen der in den genannten Zukunftszeiträumen festgestellten Zunahmen bzw. Häufungen extremer Flusshochwasserabflüsse sind damit als skalenabhängige dekadische Variabilität zu interpretieren, die einheitliche Aussagen zur zukünftig veränderten Hochwassersituation bzw. zu deren kontinuierlichen Entwicklung mit dem Klimawandel erschweren. Vielmehr stellen die beiden Zeiträume zwei mögliche Szenarien zur zukünftigen Hochwassersituation dar, die trotz der Verwendung vereinigter Ensembleserien im Extrembereich als Stichproben aufzufassen sind und Unsicherheiten enthalten.

Die etwas unterschiedlichen Vorgehensweisen für die Wasserstraßen einerseits und die Straße und die Schiene sind andererseits möglichst gut in Einklang zu bringen. Wo immer möglich, wurden im vorliegenden Bericht gemeinsame Systemanalysen und -schemata erstellt. Den erarbeiteten Aussagen zum Flusshochwasser liegen für alle Verkehrsträger die gleichen meteorologischen und hydrologischen Modelle zugrunde. Damit wurden auch die potenziell überfluteten Bereiche des Bundesfernstraßen- und des Bundesschiennetzes für „mittlere“ und „extreme“ Hochwasserszenarien identifiziert. Hierzu wurden mittels einer konsistenten GIS-basierten Methode betroffene Streckenabschnitte der Straße und der Schiene abgeleitet, indem die Verkehrsnetze mit den potenziellen Überflutungsflächen verschnitten wurden.

Aktuell wird ein weiterer methodischer Ansatz auf Basis hydrologischer und hydraulischer Modellierungen zur Untersuchung lokaler Überflutungsflächen (Blue-Spots) im Bundesfernstraßennetz von Nordrhein-Westfalen in Folge von Starkregenereignissen erarbeitet. Diese Blue-Spot-Analyse soll in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) im Zusammenhang mit weiteren Untersuchungen zum Auftreten von Starkregen und lokalen Hochwasserereignissen weiterentwickelt und, sofern möglich, bundesweit für die Verkehrsträger angewendet werden.

Außerdem wurde die Dimensionierung von Entwässerungseinrichtungen der freien Strecke sowie von Durchlässen der Schieneninfrastruktur in Bezug auf den Klimawandel näher untersucht. Die bestehenden Entwässerungsanlagen des Regelquerschnittes der freien Strecke im Schotteroberbau sowie die in Zukunft danach bemessenen Entwässerungsanlagen sind in der Lage, auch einen möglicherweise durch den Klimawandel erhöhten Bemessungsregen ohne Rückstau aufzunehmen und ableiten zu können. Eine allgemeine flächendeckende Aussage zur Restkapazität von Durchlässen mit Fließgewässern ist pauschal nicht möglich. Die Einzelnachweise sind daher standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten. Allgemein lassen sich Empfehlungen zur Bauweise, Maßnahmen zur Inspektion und Instandhaltung sowie zur Bewertung der Restkapazität bei eventuell durch den Klimawandel bedingten erhöhten Starkregenereignissen und daraus resultierenden höherem Abfluss bei Durchlässen formulieren.

Nicht alle Wirkungszusammenhänge konnten im Rahmen des Schwerpunkts *Hochwassergefahren* flächendeckend für das gesamte Bundesgebiet analysiert, technisch umgesetzt und hinsichtlich der Klimawandelaspekte in Indikatoren überführt werden. Die dargestellten Wirkungsketten, die technischen Pfade zur Erstellung von Indikatoren der gegenwärtigen und zukünftigen Wirkungen des Klimawandels und extremer Witterungsbedingungen auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur wurden als Vorschlag in die verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalyse innerhalb des Themenfeldes 1 (hier *Klimawirkungsanalyse*, Hänsel et al. (2020b)) eingebracht.

5.2 Offene Forschungsfragen

Das BMVI-Expertennetzwerk hat viele Fragen beantwortet, aber auch – wie für ein Forschungsprogramm üblich – neue Fragen aufgeworfen. Ausgewählte Wirkungszusammenhänge, Datenlücken sowie das heterogene und wachsende Nutzerfeld bedürfen weiterer Befassung. Nur so kann der klimawirkungsbezogene

Informationsbedarf des Verkehrssektors und verknüpfter Handlungsfelder in den wichtigsten Punkten erfüllt werden. Dies gilt auch für die Thematik Hochwasser.

Die bisherigen Arbeiten des BMVI-Expertennetzwerks an der Küste haben bei den vier folgenden Aspekten Forschungsbedarf aufgezeigt:

- Die vorherrschenden Wetterlagen bestimmen die Hochwasser- und Entwässerungssituation wesentlich mit. Jetzt stellt sich die Frage wie sich der Einfluss der vorherrschenden Großwetterlage auf das Wettergeschehen unter Klimawandelbedingungen entwickelt.
- Die gemeinsame Auftretenswahrscheinlichkeit von erhöhtem Außenwasserstand und binnenseitigem Zufluss zeigen sich für die Deutschen Küstengebiete als sehr komplexes Zusammenspiel. Dazu kommt der Einfluss des Niederschlags auf den binnenseitigen Zufluss, der weitere detaillierte und hochaufgelöste Modellierungen erfordert.
- Der Meeresspiegelanstieg wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle für Planungsprozesse spielen, dementsprechend müssen Untersuchungen zur Anpassung an einen erhöhten Außenwasserstand weiterentwickelt werden.
- Derzeit ist der Einfluss einer geänderten Topografie im Wattenmeer der Deutschen Bucht auf die Sturmflutscheitelwasserstände in den Ästuaren noch nicht im Detail untersucht. Die ist aber im Zuge des Klimawandels ein nicht unerheblicher Faktor.

Die bisher durchgeführten Analysen zum Thema Flusshochwasser bezogen sich auf die Flussgebiete des Rheins und der Donau. In Folgearbeiten hinzuzuziehen sind die Flussgebiete der Elbe, der Weser und der Ems. Entsprechende Hochwasseranalysen wie an Rhein und Donau konnten an der Elbe aufgrund von Schwierigkeiten bei der Wasserhaushaltsmodellierung extremer Hochwasserereignisse im Bereich Tschechiens noch nicht zufriedenstellend durchgeführt werden. Die Schwierigkeiten lassen sich mit der zu groben zeitlichen Auflösung der meteorologischen Eingangsdaten (tägliche Niederschlagshöhen) erklären. Außerdem sind daher Module zur verbesserten Simulation bei Starkniederschlag, die erst in jüngster Vergangenheit entwickelt wurden noch nicht in LARSIM-ME implementiert (Haag et al. 2019, LARSIM-Entwicklergemeinschaft 2019). Großskalig auftretende Starkniederschläge, etwa bei Vb-Wetterlagen, und zu extremen Hochwasserabflüssen neigende Flussgebieteigenschaften (Mittelgebirgskonstellationen) finden sich v. a. im Elbe-Einzugsgebiet, so dass die genannten Module in Verbindung mit detaillierteren Eingangsdaten gerade hier zur verbesserten Hochwassersimulation führen kann. Auch in den anderen Flussgebieten sollten v. a. in typischen Hochwasserentstehungsgebieten entsprechende Modelluntersuchungen erfolgen, um die bisherigen Ergebnisse weiter zu verbessern und zu begründen. Diese Untersuchungen sind im Zusammenhang mit einer Analyse kleinräumiger lokaler Hochwasserereignisse und ihrer Auswirkung auf die Verkehrsträger Straße und Schiene durchzuführen (vergleiche unten).

Über starkregenbezogene Unsicherheiten bei der Wasserhaushaltssimulation hinaus sind auch andere modell- und verfahrensbedingte Unsicherheiten bei der Ableitung von Hochwasserstatistiken der Zukunftsprojektionen weitergehend zu untersuchen. Neben den in LARSIM-ME (wie in jedem hydrologischen Modell) enthaltenen, weiteren strukturellen und parameterbezogenen Unsicherheiten betrifft dies im Einzelnen sowie im Zusammenhang:

- die Klimamodelle der untersuchten Modellketten sowie die Bias-Adjustierung ihrer Modellausgänge (bzgl. Flusshochwassers v. a. die Ausprägung hochwasserträchtiger Großwetterlagen und Sequenzen dieser sowie ihre Niederschlagscharakteristiken bei Extremereignissen),
- die bedarfsweise Bias-Adjustierung simulierter täglicher Abflussreihen,
- die Transformation der Verteilungsfunktionen simulierter HQ-Serien zum Bezug auf die aus Beobachtung abgeleiteten Hochwasserstatistiken des Istzustands,

- die aus Beobachtung abgeleiteten bzw. aktuell gültigen Hochwasserstatistiken selbst, sowie die in den durchgeführten Extremwertstatistiken getroffenen Annahmen (Serienbildung für *jährliche* Abflussscheitel, Auswahl anzupassender Verteilungsfunktion und Schätzverfahren).

Neben Modellunsicherheiten ist die im vorangehenden Abschnitt angesprochene Stichprobenunsicherheit infolge der dekadischen Variabilität des Hochwassergeschehens weitergehend und dabei skalenübergreifend zu untersuchen. Die bisher im BMVI-Expertennetzwerk vereinbarten Bezugs- und Zukunftszeiträume sind im Hinblick auf Hochwasserstatistiken eher willkürlich gewählt und nicht zwangsläufig repräsentativ für gegenwärtige und zukünftige Zustände. In diesem Zusammenhang ist schließlich auch die Unsicherheit, die sich aus der Definition des vereinigten Ensembles der extremwertstatistisch analysierten Modellketten ergibt, zu beachten. Dabei sind insbesondere reduzierte Ensembles zu betrachten, die auch einen ebenbürtigen Vergleich der Hochwassersituationen zwischen verschiedenen Klimaszenarien (mit unterschiedlichen Anzahlen verfügbarer Modellketten) erlauben würden.

Die bisherigen Untersuchungen im BMVI-Expertennetzwerk zu Hochwasser bezogen sich v. a. auf langandauernde und großräumige Ereignisse. Die Exposition gegenüber Überschwemmungen für den landgebundenen Verkehr (Straße & Schiene), die durch kleinräumige Starkregenereignisse verursacht wird, sind aber ebenso zu quantifizieren. Hierfür gibt es mit dem Bedarf an hochaufgelöster hydrologischer und hydrodynamischer Modellierung in Raum und Zeit auch einen großen Forschungsbedarf bezüglich der meteorologischen Inputdaten, insbesondere in Bezug auf subtägliche Niederschläge. Dies bezieht sich sowohl auf die Beobachtungsseite als auch auf die Klimamodellierung. Für die Verkehrsträger Straße und Schiene zeigte sich, dass ein großer Bedarf an Fachinformationen, vor allem in Form von Daten, besteht. Für detailliertere Untersuchungen der Hochwasserexposition werden beispielsweise Informationen bezüglich der genauen Höhenlage, der Dammlage oder zur Bauweise benötigt. Erst auf Grundlage dieser Daten könnten die Exposition und Sensitivität gegenüber Hochwasser genauer abgeschätzt werden. Weitere Potenziale werden in der Auswertung von Ereignis- bzw. Schadensdatenbanken oder Dokumentationen zum Ereignismanagement, wie etwa Streckensperrungen, gesehen. Darüber hinaus besteht zur Analyse der ereignisbezogenen Schadensmechanismen Forschungsbedarf. Auf Grundlage einer systematischen Auswertung der Wirkungsketten und einem besseren Prozessverständnis könnten wichtige Beiträge und Empfehlungen für klimadaptierte Bauweisen erarbeitet werden.

5.3 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase

Einige der noch offenen Forschungsfragen, die im Abschnitt zuvor erwähnt wurden, wird das Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks in seiner nächsten Bearbeitungsphase (2020–2025) aufgreifen. Bearbeitet wird die Thematik der Gestaltung eines klimaresilienteren Verkehrssystems in vier Kernthemen, die entlang der Hauptkomponenten der in Phase 1 entwickelten Klimawirkungsanalyse und -bewertung (Exposition, Sensitivität, Kritikalität und Integration) formuliert sind. Dabei ist für die langandauernden Hochwasserereignisse aufgrund von Schneeschmelz- und Regenereignissen eine Reihe von genaueren Untersuchungen notwendig, um die in Phase 1 getroffenen Aussagen zu präzisieren:

- Um die tatsächliche Exposition der Straßen- und Schieneninfrastruktur durch Hochwasser abzuleiten ist die 3d-Gleis- und Straßenlage notwendig. Diese soll mit weiteren Bauwerksinformationen wie Dämmen für weiterführende Analysen u. a. der Sensitivität genutzt werden.
- In weiteren Arbeiten ist auch das Flussgebiet der Elbe (neben denen der Weser und der Ems) entsprechend zu den Flussgebieten von Rhein und Donau zu analysieren.
- Neben dem Rhein mit seinen wichtigen Nebenflüssen werden für alle weiteren großen Flussgebiete die Verschnitte der Hinweiskarte Hochwasser mit Straße und Schiene herausgearbeitet und die zukünftigen Veränderungen in der Jährlichkeit dargestellt.
- Das Straßen- und Schienennetz soll mit den neuen HWGK (geplante Bereitstellung von den Bundesländern bis Ende 2021) verschnitten werden, die neue Datengrundlagen enthalten sollen. Dabei

können auch die in den Hochwasserrisikomanagementplänen der Bundesländer bis dahin getroffenen Aussagen zum Klimawandel berücksichtigt werden.

Insgesamt ist die Betrachtung von skalenübergreifenden Aspekten, für ein verbessertes und umfassendes Verständnis der Genese und der Auswirkungen von Hochwasserereignissen wichtig. Daneben ist die Weiterentwicklung von für Hochwasser relevanten, rezenten klimatologischen und hydrologischen Datenprodukten durch DWD, BfG und BSH unentbehrlich.

Im Bereich der Meteorologie gibt es insbesondere drei Aspekte die für eine Weiterentwicklung der bisherigen Analysen im Bereich Hochwasser ergänzend angedacht sind:

- Weiterentwicklung der hydrometeorologischen Referenzdatensätze (HYRAS) mit Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Auflösung insbesondere für den Niederschlag unter Nutzung neuer Datenquellen (wie z. B. Radar und Reanalysen)
- Intensivere Nutzung von konvektionserlaubenden regionalen Klimamodellen mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung
- Untersuchungen zur möglichen Einbeziehung von Klimavorhersagedaten zur Untersuchung der Entwicklung von Hochwasserereignissen für die nächsten Jahre bis zu einem Jahrzehnt

Zur Wasserhaushaltmodellierung mit LARSIM-ME -sind folgende Weiterentwicklungen geplant:

- Die Nachführung des Modells und seiner Parameter entsprechend zu den weiter entwickelten HYRAS-Datensätzen (s. o.).
- Die weitere Verbesserung der Simulation von Talsperren und Seen, insbesondere auch in den ausländischen Einzugsgebietsanteilen (Tschechien, Schweiz).
- Weiterentwicklungen zur komponentendifferenzierten Simulation, insbesondere auch im Hinblick auf schnelle Abflusskomponenten (Einsatz neu entwickelter LARSIM-Module, siehe vorangehendes Unterkapitel). Dabei sollen verschiedene Skalenbereiche betrachtet werden.
- Mit der weiter entwickelten Wasserhaushaltsmodellierung ist auch die hydrologische Bias-Adjustierung nachzuführen, sofern sie nicht entbehrlich wird.

Des Weiteren sind von hydrologischer Seite weiterführende Analysen zur Erfassung von Unsicherheiten in den Extremwertstatistiken für die Gegenwart und Zukunftsprojektionen erforderlich. Diese beinhalten:

- Die Weiterentwicklung der aus Beobachtungen abgeleiteten bzw. zzt. offiziell gültigen Hochwasserstatistiken in Abstimmung mit den Bundesländern, v. a. mit dem Ziel, Unsicherheiten auszuloten bzw. weiter einzugrenzen. Auch die Dauer extremer Ereignisse kann dabei verstärkt berücksichtigt werden.
- Analysen zur strukturellen, verfahrensbedingten Unsicherheit der Hochwasserstatistiken für simulierte Zukunftszeiträume (bzgl. Varianten mit/ohne hydrologischer Bias-Adjustierung, sowie mit/ohne Transformation von Statistiken aus Simulation zum Bezug auf beobachtete Verteilungen).
- Kausale Informationserweiterungen für Hochwasserstatistiken simulierter Zukunftsprojektionen (saisonal differenzierte Analyse bis hin zur Analyse einzelner Extremereignisse (verfeinerte Plausibilitätsprüfung).
- Analysen zur Ableitung von hochwasserbezogen repräsentativen Zukunftszeiträumen zur verbesserten Berücksichtigung der raumzeitlichen Strukturen instationärer Entwicklungen und dekadischer Variabilität.
- Analysen zur Ensembleunsicherheit in den Hochwasserstatistiken der simulierten Abflussreihen, insbesondere auch mit der Analyse reduzierter Ensembles, die u. a. einen ebenbürtigen Vergleich zwischen verschiedenen Klimaszenarien (*Weiter-nie-bisher, moderat, Klimaschutz*) erlauben.

Im Küstenbereich sind für die zweite Phase folgende Arbeiten geplant:

- Anwendung weiterentwickelter Methoden zur Analyse extremer Niederschläge, Abflüsse und Wasserstände
- Einbeziehung von Erkenntnissen zu geänderter Wetterlagendynamik – Änderung relevanter Wetterlagen in den Klimaprojektionen
- Verbessertes Verständnis bezüglich des kombinierten Auftretens von Ereignissen, die in ihrem Zusammenspiel zu extremen Auswirkungen führen
 - Sturmebben im Zusammenhang mit niedrigem Binnenabfluss
 - Kombination von Sturmereignissen und Vorfeuchtebedingungen im Binnenbereich sowie in tiefliegenden Küstengebieten
- Einbeziehung von saisonalen Abflussvorhersagen für ein angepasstes Sedimentmanagement im Klimawandel.
- Weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von topografischen Veränderungen auf Sturmflut-scheitelwasserstände.

Neben den großräumigen und langandauernden Hochwasserereignissen sind Verfahrensentwicklungen für den Umgang mit kleinräumigen Starkregenereignissen und Sturzfluten, die sich auf kürzeren Zeitskalen abspielen geplant. Dies betrifft sowohl die Herangehensweise im meteorologischen als auch hydrologischen Bereich, bei der eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung unabdingbar sind. Zur weiteren Untersuchung hydrologischer und hydrodynamischer Aspekte der Modellierung hochauflösender Abflussprozesse soll ein Projekt angestoßen werden, das teilweise die entwickelte Methodik der Blue-Spot-Analyse aufgreift. Konkret sollen Reliefanalysen und bodenhydrologische bzw. hydrogeologische Analysen kombiniert werden, um Informationen über die Überflutungsanfälligkeit verschiedener Räume zu gewinnen. So soll auch die räumliche Ausdehnung der Blue-Spot-Analyse für die Straße und die Schiene, wenn möglich, auf das gesamte Bundesgebiet erweitert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss mittels Detailanalysen und dem Vergleich mit historischen Starkregenereignissen validiert.

Zur Steigerung der Resilienz von Infrastrukturen gegenüber ereignisbezogenen Einwirkungen (Hochwasser) sollen schadensrelevante Wirkmechanismen identifiziert und typisiert werden. Mittels physikalischer Modellversuche und numerischer Simulationen sollen so Empfehlungen zu klimaadaptierten Bauweisen abgeleitet werden. Um diese Entwicklungen zu unterstützen wird eine Methodik zur systematischen Schadenserfassung an der Verkehrsinfrastruktur nach (Hochwasser-) Ereignissen entwickelt, die die turnusmäßigen Straßenzustandserfassungen erweitern soll. Eine solche Schadensdatenbank kann auch in Bezug auf weitere Expositionen, wie Sturm oder Hangrutschungen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der entsprechenden Wirkungsketten und der Anfälligkeit, des Verkehrs oder der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen oder indirekten Klimawirkungen leisten.

Um zu bewerten, wie bedeutend die Auswirkungen der verschiedenen klimatischen Einflüsse für die einzelnen Verkehrsnetze sind, soll in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung der verkehrlichen Bedeutung von potenziell gefährdeten Abschnitten durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Bewertung werden die entsprechenden Verkehrsachsen im Hinblick auf mögliche Einschränkungen oder Ausfälle untersucht. 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.

6 Literatur

- Arns A, Dangendorf S, Jensen J, Talke S, Bender J und Pattiaratchi C (2017) Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Scientific Reports* 7, 40171. DOI:10.1038/srep40171; <https://www.nature.com/articles/srep40171#supplementary-information>
- Asenkerschbaumer M, Skublics D und Rutschmann P (2012) Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau. Projektbericht der TU München, München. https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_aktionsprogramm_2020_plus/hw_schutz_technisch/doc/tum_abschlussbericht_retention_donau.pdf
- BAFU (2019) Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser), Rhein – Basel (EDV: 2289), Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU). https://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq_studien/hq_statistics/2289hq.pdf
- BAW (2010) BAW-Merkblatt Bauwerksinspektion (MBI). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Bauwerksinspektion_MBI_2010.pdf
- BAW (2015a) BAW-Bildatlas Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD Band 2: Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg bei Sturmflut im Elbe-Ästuar. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, 216 pp., <https://izw.baw.de/e-medien/bawbildatlas-band2-2015/index.html>
- BAW (2015b) BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Schadensklassifizierung_an_Verkehrswasserbauwerken_MSV_2018.pdf
- BAW (2020) EXTREMENESS–C Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkung – Abschlussbericht EXTREMENESS-C (in Vorbereitung), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg.
- Below M, Fischer R, Hetzel G, Ahlers C und Pommerening J (2008) Ergebnisse der Untersuchungen zum Abflussverhalten von Niederschlägen in Gleisanlagen, Eisenbahningenieurkalender (EIK), Frankfurt.
- Berrisford P, Dee DP, Fielding K, Fuentes M, Källberg P, Kobayashi S und Uppala S (2009) The ERA-Interim archive, version 1.0, ERA Report Series 1, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Shinfield Park, Reading. <https://www.ecmwf.int/node/8173>
- BfG (2013) FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG. Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz - Veranstaltungen 4/2013, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). DOI:10.5675/BfG-Veranst_2013.4
- BfG (2014) Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. http://doi.bafg.de/BfG/2014/BfG_Mitteilungen_31.2014.pdf
- BinSchStrO (2016) Binnenschiffverkehrsstraßen-Ordnung (BinSchStrO) (BGBl. I Seite 1666). https://www.elwis.de/DE/Schiffverkehrsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze-Richtlinien/BinSchStrO.pdf?__blob=publicationFile&v=24
- BinSchUO (2018) Verordnung über die Schiffssicherheit in der Binnenschiffahrt (Binnenschiffsuntersuchungsordnung - BinSchUO) (BGBl. I Seite 1398). https://www.elwis.de/DE/Untersuchung-Eichung/Untersuchung/BinSchUO/BinSchUO.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Blöschl G, Hall J, Viglione A, Perdigão RAP, Parajka J, Merz B, Lun D, Arheimer B, Aronica GT, Bilibashi A, Boháč M, Bonacci O, Borga M, Čanjevac I, Castellarin A, Chirico GB, Claps P, Frolova N, Ganora D, Gorbachova L, Gül A, Hannaford J, Harrigan S, Kireeva M, Kiss A, Kjeldsen TR, Kohnová S, Koskela JJ, Ledvinka O, Macdonald N, Mavrova-Guirguinova M, Mediero L, Merz R, Molnar P, Montanari A, Murphy C, Ošuch M, Ovcharuk V, Radevski I, Salinas JL, Sauquet E, Šraj M, Szolgay J, Volpi E, Wilson D, Zaimi K und Živković N (2019) Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573(7772), 108-111. DOI:10.1038/s41586-019-1495-6
- 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) Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen. Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße, Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI (2015b) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S und Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(686), 1-15. DOI:10.1002/qj.2486
- Bott F, Lohrengel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- Brahmer G, Brinkmann M, Busch N, Creusot R, Diezig R, Friese R, Hammer M, Lammersen R, Mehlig B, Plonka B, Schmid-Breton A, Schulte-Wülwer-Leidig A, Vogt R, Wagner J-P und Willkomm M (2015) Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsänderung durch die hochwasserreduzierenden Maßnahmen entlang des Rheins., Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz., https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0229.pdf
- Bremicker M (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. In: Leibundgut C, Demuth S und Vondersträß I (Eds.), *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br., <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/FSH-Bd11-Bremicker.pdf>
- Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Krähenmann S, Möller J, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Büche K, Assmann A, Huber D und Henrichs T (2019) Lokale Analyse und Kartierung von potenziellen Überflutungsflächen im Bundesfernstraßennetz von Nordrhein-Westfalen in Folge von Starkregenereignissen (Blue-Spot-Analyse). Zwischenbericht für das BMVI-Expertennetzwerk (unveröffentlicht), geomer GmbH, Heidelberg, geomer GmbH (ed),
- Bülow K, Dietrich C, Elizalde A, Gröger M, Heinrich H, Hüttl-Kabos S, Klein B, Mayer B, Meier HEM, Mikolajewicz U, Narayan N, Pohlmann T, Rosenhagen G, Schimanke S, Sein D und Su J (2014) Comparison of three regional coupled ocean atmosphere models for the North Sea under today's and future climate conditions. *KLIWAS Schriftenreihe*, KLIWAS-27/2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, 265 S. pp. DOI:10.5675/Kliwas_27/2014
- Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf
- Busch N und Rost W (2000) Aktualisierte Bemessungswasserspiegellagen mit gewässerkundlichen Grundlagen für den Main in Hessen (Main-km 0 bis 77.1). BfG-Bericht 1261, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Buth M, Kahlenborn W, Greiving S, Fleischhauer M, Zebisch M, Schneiderbauer S und Schauer 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-Analysen KOMPAKT, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2015/DL_06_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Casulli V und Lang G (2004) Technical Report Mathematical Model UnTRIM Validation Document, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg. http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf
- Dalelane C und Deutschländer T (2013) A robust estimator for the intensity of the Poisson point process of extreme weather events. *Weather and Climate Extremes* 1, 69-76. DOI:10.1016/j.wace.2013.07.003

- DB (1979) DS 836/2 – Vorläufige Richtlinien für die Planung und Erstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h, Heft 2 der DS 836 Erdbaurichtlinien, DS 836/2.
- DB Netz AG (2008) Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Fassung vom 20.12.1999 mit 1. Aktualisierung vom 01.10.2008.
- RIL 836 Modul 4601 – Entwässerungsanlagen, Grundsätze
- 4602 – Streckenentwässerung
 - 4603 – Sonstige Entwässerungsanlagen.
- Deutschländer T und Dalelane C (2012) Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremwertverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- DKKV (2015) Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland, DKKV-Schriftenreihe, Nr. 53. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV), Bonn. https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/Publikationen/DKKV_53_Hochwasser_Juni_2013.pdf
- DonauSchPV (2017) Donauschiffahrtspolizeiverordnung (DonauSchPV) (BGBl. I Seite 741). https://www.elwis.de/DE/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze-Richtlinien/DonauSchPV.pdf?__blob=publicationFile&v=12
- DR (1976) EVDR Automatisierte Projektierung – Zentrale Erneuerung und Wiederaufbau 2. Gleise - Richtlinie Tiefenentwässerung, Teil 1a, 2. Fassung, Berlin.
- DWA (2012) Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 552. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef.
- DWD (2010) Climate Data Center (CDC). Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD). Version 2010R. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main.
- DWD (2013) Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013. Wetterentwicklung und Warnmanagement des DWD. Hydrometeorologische Rahmenbedingungen, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/presse/hintergrundberichte/2013/Hochwasser_Juni2013_PDF
- EBA (2019) Beurteilung der Bemessung von Gleisentwässerungsanlagen und Durchlässen von Fließgewässern, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn. https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSE/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2019-05.html
- EU (2007) Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, 288/27. Europäische Union (EU).
- Fröhlings B, Steinrück J und Belz J (2012) Datenqualität in der Gewässerkunde: Das Projekt HYMOG – Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet. Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung 56(6). DOI:10.5675/HyWa_2012,6_1
- Ganske A, Tinz B, Rosenhagen G und Heinrich H (2016) Interannual and Multidecadal Changes of Wind Speed and Directions over the North Sea from Climate Model Results. Meteorologische Zeitschrift 25(4), 463-478. DOI:10.1127/metz/2016/0673
- Ganske A und Schade NH (2017) Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979-2015, Bericht zum Meilenstein M108b-1 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A (2019) Analyse von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen, Bericht zum Meilenstein M104a-4 des SP-104 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Gerber M, Ganske A, Müller-Navarra S und Rosenhagen G (2016) Categorisation of meteorological conditions for storm tide episodes in the German Bight. Meteorologische Zeitschrift 25(4), 447-462. DOI:10.1127/metz/2016/0660
- Golz S, Bohnenkamp C und Heyer T (2017) Überflutungsbedingte Schäden an Straßenverkehrsinfrastrukturen. WasserWirtschaft (5), 12-19.

- 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
- Groisman PY, Karl TR, Easterling DR, Knight RW, Jamason PF, Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev VN, Douglas A, Forland E und Zhai PM (1999) Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change* 42(1), 243-283. DOI:10.1023/a:1005432803188
- Haag I, Aigner D, Krumm J, Regenauer J, Steinbrich A, Weiler M, Sieber A und Bremicker M (2019) Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM - ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Heft 41.19.
- 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, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020b) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.03
- Hänsel S, Nilson E, Patzwahl R, Forbriger M und Klose M (2020c) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- Hatz M, Busch N, Belz J und Larina-Pooth M (2018) Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren. BfG-Bericht 1938, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Heinrich G und Gobiet A (2012) The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *International Journal of Climatology* 32(13), 1951-1970. DOI:10.1002/joc.2421
- Helms M, Mikovec R, Ihringer J und Büchele B (2008) Methoden zur Erhebung und hydrologischen Auswertung historischer Hochwasserinformation für große Flussgebiete am Beispiel der Elbe/Labe, DWA-Themen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, e. V. (DWA), Hennef.
- Helms M, Ihringer J und Mikovec R (2016) Überarbeitung der Abflussreihen und Abflusstafeln für die Elbe (Zeitraum 1890-2006). Bericht zum gleichnamigen Projekt, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- HLNUG (2017) Hochwasserportal Hessen. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). <https://www.hochwasser-hessen.de/>. Ergänzend mündliche Mitteilung durch M. Löw, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- HLNUG (2019) Hochwasserrisikomanagementplan Main. Anlagenreihe A – Hydrodynamisch-numerische Berechnungen, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). <https://www.hlnug.de/themen/wasser/hochwasser/hochwasserrisikomanagementplaene/main/hn-berechnung.html>
- Höntsch J (2003) Untersuchungen zur Bahngleisentwässerung auf Grundlage der Richtlinie 836 der Deutschen Bahn Netz AG. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- HPA (2017) Sperrungen im Sturmflutfall. Hamburg Port Authority (HPA), Hamburg. <http://www.hamburg-port-authority.de/de/der-hafen-hamburg/hochwasser/sperrungensturmflut/Seiten/default.aspx>
- HTG e. V. (2012) Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2012. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co., Hamburg. DOI:10.1002/9783433602430
- 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.
- Huntington T (2006) Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis. *Journal of Hydrology* 319, 83-95. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003

- IKSD (2015) Flood Risk Management Plan for the Danube Basin River District. Bericht der IKSD, Internationale Kommission zum Schutz der Donau (IKSD), Wien.
<https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/nodes/documents/1stdfrmp-final.pdf>
- IKSE (2015) Internationaler Hochwasserrisikomanagementplan für die Flussgebietseinheit Elbe, Teil A. Bericht der IKSE, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg. https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/02_Hochwasserschutz/2015_IKSE-IHWRMP.pdf
- IKSR (2012) Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein zu zitieren. Bericht der IKSR 199, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz.
http://www.naturschutztagamrhein.de/fileadmin/naturschutztage/pdf-dokumente/IKSR_Minderung_Hochwasserstaende_Rhein-AktionsplanHW1995-2010.pdf
- 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). Abschlussbericht der IKSR, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz. https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Rheinkarten/HWRM-RL-2_Bericht.pdf
- IKSR (2015) International koordinierter Hochwasserrisikomanagementplan für die Internationale Flussgebietseinheit Rhein, Teil A. Bericht der IKSR, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Rheinkarten/HWRM-PLAN_2015.pdf
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.,
- Jacob D, 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
- Jensen J, Mudersbach C, Müller-Navarra S, Bork S, Koziar C und Renner V (2006) Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. Die Küste (71), 123-167. <https://izw.baw.de/die-kueste/0/k071106.pdf>
- Jensen J (2009) MUSTOK: Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste: Eine Einführung. Die Küste (75). https://izw.baw.de/die-kueste/0/k075_MUSTOK_2009.pdf
- Junghänel T, Ertel H und Deutschländer T (2017) KOSTRA-DWD-2010R - Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_revision_kostra_dwd_2010.pdf?_blob=publicationFile&v=7
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC und Senior CA (2014) Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. Nature Climate Change 4(7), 570-576.
DOI:10.1038/nclimate2258
- Köhler MA und Linsley RKJ (1951) Predicting runoff from storm rainfall, US Weather Bureau, Washington D.C.,
- 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.
- Krähenmann S, Walter A, Brienen S, Imbery F und Matzarakis A (2018) High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. Theoretical and Applied Climatology 131(3-4), 899-926.
DOI:10.1007/s00704-016-2003-7
- Larsen M, Pihl KA, Hansson K, Hellman F und Grauert M (2010a) The Blue Spot Concept. Methods to predict and handle flooding on highway systems in lowland areas. Report Nr. 181, Road Directorate, Danish Road Institute, Copenhagen. https://en.klimatilpasning.dk/media/297917/the_blue_spot_concept_report_181.pdf
- Larsen M, Pihl KA, Nielsen NH und Rasmussen SF (2010b) The Blue Spot Model. Development of a screening method to assess flood risk on national roads and highway system. Report Nr. 183, Road Directorate, Danish

- Road Institute, Copenhagen.
<https://pdfs.semanticscholar.org/6381/828d612c364ba5ecb22ac8cd5cb3f39ce2bf.pdf>
- LARSIM-Entwicklergemeinschaft (2019) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Modelldokumentation der LARSIM-Entwicklergemeinschaft und der Hochwasservorhersagezentralen LUBW, BLfU, LfURP, HLNUG und BAFU.
- LAWA (1997) Pegelvorschrift - Stammtext. 4. überarbeitete Auflage. Kulturbuchverlag, Berlin/Bonn.
- 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.
- LfLUG (2017) Hochwassergefahrenkarte. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfLUG). <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/8843.htm>
- LfU (2017) Umsetzung des Hochwasserrisikomanagements in Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_risikomanagement_umsetzung/index.htm
- LfU (2019) Gewässerkundlicher Dienst Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). <https://www.gkd.bayern.de/>
- LHW (2017) Hochwassergefahrenkarten. Landesbetrieb Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW). <http://www.geofachdatenserver.de/de/lhw-hochwassergefahrenkarten.html>
- LUBW (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe. https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/leitfaden_kommunales_starkregenrisikomanagement.pdf
- LUBW (2017) Hochwassergefahrenkarten. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. <https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/hochwassergefahrenkarten>
- LUBW (2019) HVZ-Pegelkarte. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. <https://hvz.lubw.baden-wuerttemberg.de/>
- Malcherek A, Piechotta F und Knoch D (2005) Technical Report Mathematical Module SediMorph Validation Document, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg. http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf
- Martel J-L, Mailhot A, Brissette F und Caya D (2018) Role of Natural Climate Variability in the Detection of Anthropogenic Climate Change Signal for Mean and Extreme Precipitation at Local and Regional Scales. Journal of Climate 31(11), 4241-4263. DOI:10.1175/JCLI-D-17-0282.1
- MDI (2019) Rahmen-Alarm und Einsatzplan Hochwasser, Ministerium des Innern und für Sport, Rheinland-Pfalz (MDI). <https://bks-portal.rlp.de/sites/default/files/og-group/57/dokumente/RAEP%20Hochwasser%20Stand%2022%2005%202019.pdf>
- MFV (1985) TGL 12 098, Anlagen des Straßenwesens, Entwässerung von Straßen, Gräben, Regenwasserleitungen und Versickerungsanlagen. Ministerium für Verkehrswesen (MFV), Berlin.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, (2016) Das Integrierte Rheinprogramm - Hochwasserschutz und Auenrenaturierung am Oberrhein. Informationsheft des Ministeriums. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart. https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/WasserBoden/IRP/Rueckhalteraum/irp_de.pdf
- MLUK (2017) Hochwasserrisikomanagementrichtlinie: Gefahren- und Risikokarten. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUL). <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/hochwasserschutz/hochwasserrisikomanagementrichtlinie/gefahren-und-risikokarten/>
- MoselSchPV (2017) Moselschiffahrtspolizeiverordnung (MoselSchPV) (BGBl. II Seite 1670). <https://www.elwis.de/DE/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze-Richtlinien/MoselSchPV.pdf?blob=publicationFile&v=12>
- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard K, Jones R, Kainuma M, Kelleher J, Lamarque JF, Manning M, Matthews B, Meehl J, Meyer L, Mitchell J, Nakicenovic N, O'Neill B, Pichs R, Riahi K, Rose S, Runci P, Stouffer R, van Vuuren D, Weyant J, Wilbanks T, van Ypersele JP und Zurek M (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response

- strategies. IPCC Expert Meeting Report, 19–21 September, 2007, Noordwijkerhout, Niederlande. 0028-0836, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Genf, Schweiz. DOI:10.1038/nature08823
- MUEEF (2017) Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten. Ergänzend mündliche Mitteilung durch Ch. Iber, LfU Rheinland-Pfalz. . Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (MUEEF). <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/8662/>
- Müller-Navarra SH und Giese H (1999) Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. Deutsche Hydrografische Zeitschrift 51(4), 385-405. DOI:10.1007/bf02764162
- MULNV (2017) Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. Ergänzend mündliche Mitteilung durch E. Buschhüter, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV). <https://www.flussgebiete.nrw.de/hochwassergefahrenkarten-und-hochwasserrisikokarten-203>
- MULNV (2018) Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement. Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV), Düsseldorf. https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/arbeitshilfe_kommunales_starkregenrisikomanagement_2018.pdf
- Nilson E, Breitung V, M. B, Fischer H, Fleischer C, Helms M, Haurert G, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Lifschiz E, Patzwahl R, Rasquin C, Riedel A, Schröder M, Seiffert R, Vollmer S, Wachler B, Winkel N und Winterscheid A (2017a) Vorschläge für Komponenten einer integrierten Wirkungsanalyse (ehemals Gefahrenszenarien): Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge, Bericht zum Meilenstein M106b-1 des SP-106 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.
- Nilson E und Helms M (2017) Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten "Hochwasser" für die Binnenschiffahrtsstraßen im Kontext der Klimafolgenanalyse, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Nilson E, Kirsten J, Herrmann C, Schade N, Helms M, Rauthe M und Brendel C (2017b) Bundesweite Karten der hochwasser- und sturmflutgefährdeten Schienen- und Straßenbereiche für Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit – Akquise und Verschneidung von Hochwassergefahrenkarten nach HWRM-RL und Verkehrsnetzen. Bericht zum Meilenstein M103b-1 des SP-103 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.
- 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-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- NLWKN (2017) Gefahren- und Risikokarten. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). https://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/eghochwasserrisikomanagementrichtlinie/gefahren_und_risikokarten/gefahren-und-risikokarten-116763.html
- 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-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- Quante M und Colijn F (2016) North Sea region climate change assessment. SpringerOpen. DOI:10.1007/978-3-319-39745-0
- RAS-Ew (2005) Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung. Heft 539. FGSV Verlag, Köln.
- Rauthe M, Steiner H, Riediger U, Mazurkiewicz A und Gratzki A (2013) A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorologische Zeitschrift 22(3), 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436
- Razafimaharo C, Höpp S, Krähenmann S, Rauthe M und Deutschländer T (2020) New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS) (einngereicht). Theoretical and Applied Climatology.

- Reinhold F (1940) Regenspenden in Deutschland: (Grundwerte für die Entwässerungstechnik, GE 1940). Archiv für Wasserwirtschaft des Reichsverbandes der Deutschen Wasserwirtschaft, 56. Reichsverband der Deutschen Wasserwirtschaft. <https://books.google.de/books?id=uVuAHAAACAAJ>
- RheinSchPV (2016) Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV) (BGBl. II Seite 3816). <https://www.elwis.de/DE/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze-Richtlinien/RheinSchPV.pdf?blob=publicationFile&v=17>
- Rudolph E (2014) Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. *Die Küste*, 291-300.
- Sartor J, Zimmer K-H und Busch N (2010) Historische Hochwasserereignisse der deutschen Mosel. *Wasser und Abfall* 10. https://www.hochschule-trier.de/fileadmin/Hauptcampus/Fachbereich_BL/BI/Personen/Sartor/Veroeffentlichungen/Fachzeitschriften/35_Mosel-HW-Sartor-W_A10.pdf
- Schade N, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrsnetzsystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- Schade NH (2017) Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany. *Earth Syst. Dynam.* 8(2), 405-418. DOI:10.5194/esd-8-405-2017
- Schröter K, Kunz M, Elmer F, Mühr B und Merz B (2015) What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1), 309-327. DOI:10.5194/hess-19-309-2015
- Seiffert R, Hesser F, Büscher A, Fricke B, Holzwarth I, Rudolph E, Sehili A, Seiß G und Winkel N (2014) Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02: Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. DOI:10.5675/Kliwas_36/2014_3.02
- Sein DV, Mikolajewicz U, Gröger M, Fast I, Cabos W, Pinto JG, Hagemann S, Semmler T, Izquierdo A und Jacob D (2015) Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 7(1), 268-304. DOI:10.1002/2014MS000357
- Skublics D (2014) Großräumige Hochwassermodellierung im Einzugsgebiet der bayerischen Donau - Retention, Rückhalt, Ausbreitung, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München. <https://www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/wb/Publikationen/Berichtshefte/Band131.pdf>
- Stendel M, van den Besselaar E, Hannachi A, Jaagus J, Kent E, Lefebvre C, Rosenhagen G, Rutgersson A, Schenk F, van der Schrier G und Woollings T (2016) Two centuries of extreme events over the Baltic Sea and North Sea regions, 1st Baltic Earth Conference "Multiple drivers for Earth system changes in the Baltic Sea region". *International Baltic Earth Secretariat Nida, Lithuania*, pp. 222.
- Taylor KE, Stouffer RJ und Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4), 485. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- The BACC II Author Team (2015) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Regional Climate Studies*. Springer International Publishing, 501 pp. DOI:10.1007/978-3-319-16006-1
- Treiber B (1975) Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH)* (5).
- UBA (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität, Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>
- UBA (2017) Anhang zum Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. *Klimawirkungsketten*, Umweltbundesamt (UBA).
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Bechtold VDC, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, Berg LVD, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf JF, Morcrette JJ, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P und Woollen J (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131(612), 2961-3012. DOI:10.1256/qj.04.176
- Van Goor MA, Zitman TJ, Wang ZB und Stive MJF (2003) Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202(3-4), 211-227. DOI:10.1016/S0025-3227(03)00262-7

- Westra S, Alexander LV und Zwiers FW (2013) Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate* 26(11), 3904-3918. DOI:10.1175/jcli-d-12-00502.1
- Westra S, Fowler HJ, Evans JP, Alexander LV, Berg P, Johnson F, Kendon EJ, Lenderink G und Roberts NM (2014) Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics* 52(3), 522-555. DOI:10.1002/2014rg000464
- Woldemeskel F und Sharma A (2016) Should flood regimes change in a warming climate? The role of antecedent moisture conditions. *Geophysical Research Letters* 43(14), 7556-7563. DOI:10.1002/2016gl069448
- Wolf-Schumann U, Richter K-G, Buchholz O, Dorp M, Hellbach C, Bürvenich T, Hunger M, Elpers C, Vollmer S und Krauter G (2013) LARSIM Mitteleuropa - Aufbau eines WHM LARSIM-Mitteleuropamodells - Projektbericht, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aquantec Gesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen / Karlsruhe.
- Zijl F, Verlaan M und Gerritsen H (2013) Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. *Ocean Dynamics* 63. DOI:10.1007/s10236-013-0624-2
- Zijl F, Sumihar J und Verlaan M (2015) Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea. *Ocean Dynamics* 65(12), 1699-1716. DOI:10.1007/s10236-015-0898-7

7 Abkürzungsverzeichnis

API	A ntecedent P recipitation I ndex
BACC	A ssessment of C limate C hange for the B altic Sea basin Report
BAFU	Schweizer B undesamt für U mwelt
BAW	B undesanstalt für W asserbau
BBSR	B undesinstitut für B au-, S tadt- und R aumforschung
BfG	B undesanstalt für G ewässerkunde
BMVI	B undesministerium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BSH	B undesamt für S eeschifffahrt und H ydrographie
CanESM2	C anadian Centre for Climate Modelling and Analysis E arth S ystem M odel – vom kanadischen Zentrum für Klimamodellierung und Analyse entwickeltes ESM
CCLM	C OSMO- CLM (COSMO Modell im Klimamodus)
CLM	C limate L imited-area M odel – von der CLM-Community betriebenes regionales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell COSMO hervorgegangen ist
CMIP5	C oupled M odel I ntercomparison P roject - internationaler Klimamodell-Vergleich
CNRM-CM5	C entre N ational de R echerches M étéorologiques C irculation M odel – Klimamodell des beim französischen Wetterdienst basierten Klimaforschungsinstituts
CORDEX	C oordinated D ownscaling E xperiment – regionale Initiativen für das Herunterskalieren der globalen Klimamodelle
COSMO	C onsortium for S mall Scale M odelling – Konsortium für kleinskalige Modellierung
COSMO-REA6	C OSMO R egional R eanalysis – regionale Reanalyse erstellt mit COSMO
DAS	D eutsche A npassungsstrategie
DB	D eutsche B ahn
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
DJF	D ezember, J anuar, F ebruar – meteorologischer Winter
DWD	D eutscher W etterdienst
EBA	E isenbahn B undesamt
EC-EARTH	E uropean C ommunity E arth-System Model – von einem europäischen Konsortium entwickeltes ESM
EN	E uropäische N ormen
ESGF	E arth S ystem G rid F ederation – ESM-Grid-Verbund von Wissenschaftsinstituten
ESM	E arth S ystem M odel – Erdsystemmodell (integriert die Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean, Land, Kryosphäre, und Biosphäre)
EURO-CORDEX	C oordinated D ownscaling E xperiment – European Domain
ExpN	E xpertennetzwerk des BMVI
EXTREMENESS	E xtrême N ordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen (Forschungsprojekt)
FONA	F orschung für n achhaltige E ntwicklungen
FLYS	F lusshydrologischer W ebdienst
GCM	G eneral C irculation M odel / G lobal C irculation M odel – globales Klimamodell

GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model – ESM des geophysischen Strömungsdynamiklabors beim Nationalen Ozean- und Atmosphärenbehörde der USA
GIS	Geoinformationssystem
GKD	Gewässerkundlicher Dienst
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model - Earth System – vom Hadley-Zentrum entwickeltes ESM
HF	Hohe Flut
HHQ	höchster jemals gemessener Abfluss
HN Modelle	Hydrodynamisch-numerische Modelle
HQ	höchster Durchfluss (Gewässer)
HQ ₁₀	zehnjährliches Hochwasser
HQ ₁₀₀	hundertjährliches Hochwasser
HQ-T	T-jährlicher Hochwasserabfluss
HSQ	HSW zugehöriger Abflusswert
HSW	Höchster Schifffahrtswasserstand
HThw	höchstes Tidehochwasser gleichartiger Zeitabschnitte einer bestimmten Zeitspanne gemäß des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuchs
HWGK	Hochwassergefahrenkarte
HydroRAS	hydrologische Prozessierungssoftware für Starkregenmodellierung
HYRAS	Hydrologische Rasterdatensätze verschiedener hydrometeorologischer Größen für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace Model CMIP5 Medium Resolution – Klimamodell des in Frankreich basierten Modellierungszentrums mittlerer Auflösung
JJA	Juni, Juli, August – meteorologischer Sommer
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (Projekt des BMVI)
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut – niederländischer Wetterdienst
KOSTRA-DWD	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung – Auswertung DWD (neueste Version 2010R)
LARSIM-ME	Large Area Runoff Simulation Model - Mitteleuropa – Wasserhaushaltsmodell für Mitteleuropa
LF	Lange Flut
MAM	März, April, Mai – meteorologischer Frühling
MOHC	Met Office Hadley Centre
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate – von in japanischen Forschungsinstituten entwickeltes regionales Klimamodell

MK	Modelkette
MOS	Model Ouput Statistics
MPI-ESM	ESM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MPI-ESM_LR	MPI-ESM low resolution – grob aufgelöstes ESM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MPI-OM	Ozeanmodell des Max-Plank-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MQ	Mittlerer Abfluss
MUSTOK	Modellgestützte Untersuchung zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (Projekt des KFKI)
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean – von einem europäischen Konsortium von Forschungsinstituten entwickeltes regionales Ozeanmodell
NHN	Normalhöhennull
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
NOSCCA	North Sea Region Climate Change Assessment
OARCM	regionales gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell
PD	Produktionsführung
ProWaS	Pilot projekt zum DAS-Basisdienst „Klima und Wasser “
RACE	Regional Atlantic Circulation and Global Change –Verbundprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über die regionale Atlantikzirkulation im globalen Wandel
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model – vom KNMI und dem dänischen Wetterdienst entwickeltes regionales Klimamodell
RAS-Ew	Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Entwässerung
RCA4	Rossby Centre regional atmospheric model – beim SMHI entwickeltes regionales Klimamodell
RCM	Regional Climate Model – regionales Klimamodell
RCP	Representative Concentration Pathway – Emissionsszenarien (Repräsentative Konzentrationspfade) des 5. IPCC Sachstandsberichts
REGNIE	Regionalisierte Niederschlagshöhen (Niederschlagsprodukt des DWD mit täglichen Niederschlagssummen für Deutschland)
ReKlies-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland – Erweiterung des regionalen Klimaprojektionsensembles aus EURO-CORDEX
REMO	Regional Modell – in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell
RIL	Regelwerke (Richtlinien) der Deutschen Bahn
RIVA	Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels
SFS	Sturmflutserie
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut – schwedisches meteorologisches und hydrologisches Institut
SON	September, Oktober, November – meteorologischer Herbst
SP	Schwerpunktthema im Expertennetzwerk

TF	T hemen f eld im BMVI-Expertennetzwerk
TRY	T est R eference Y ears
UNECE	U nited N ations E conomic C ommission for E urope – Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
VerkNet	bundeseinheitliches V erkehr s netz (z.B. der Bundeswasserstraßen VerkNet-BWaStr)
WADABA	W asserstraßen d aten b ank der WSV
WISKI	W asserwirtschaftliches I nformationssystem K ister
WRF	W eather R esearch and F orecasting Model – mesoskaliges numerisches Modell
WSV	W asserstraßen- und S chiff f ahrts v erwaltung

8 Anhang

8.1 Verfügbare regionale Klimasimulationsläufe

Tabelle 8-1: Übersicht über das DWD Referenzensemble v2018 und das DWD Kernensemble v2018 (gekennzeichnet mit *) mit den verwendeten Global- und Regional-Modell Paaren pro RCP-Szenario und Illustration ihrer Herkunft (blau: EURO-CORDEX, grün: ReKliEs-De). In roter Schrift sind Modellketten die für die Variable „maximal stündlicher Niederschlag pro Tag“ nicht zur Verfügung standen. Schraffiert sind Modellketten die für die Wasserhaushaltssimulation mit LARSIM-ME berücksichtigt wurden.

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

Tabelle 8-2: Übersicht über die gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Klimamodelle und die atmosphärischen RCMs und ihren Globalmodellantrieb pro RCP-Szenario, ihre Herkunft (C: EURO-CORDEX, K: KLIWAS, R: RACEI, S: SMHI) und ihre Verfügbarkeit (Grün = verfügbar).

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

8.2 Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME

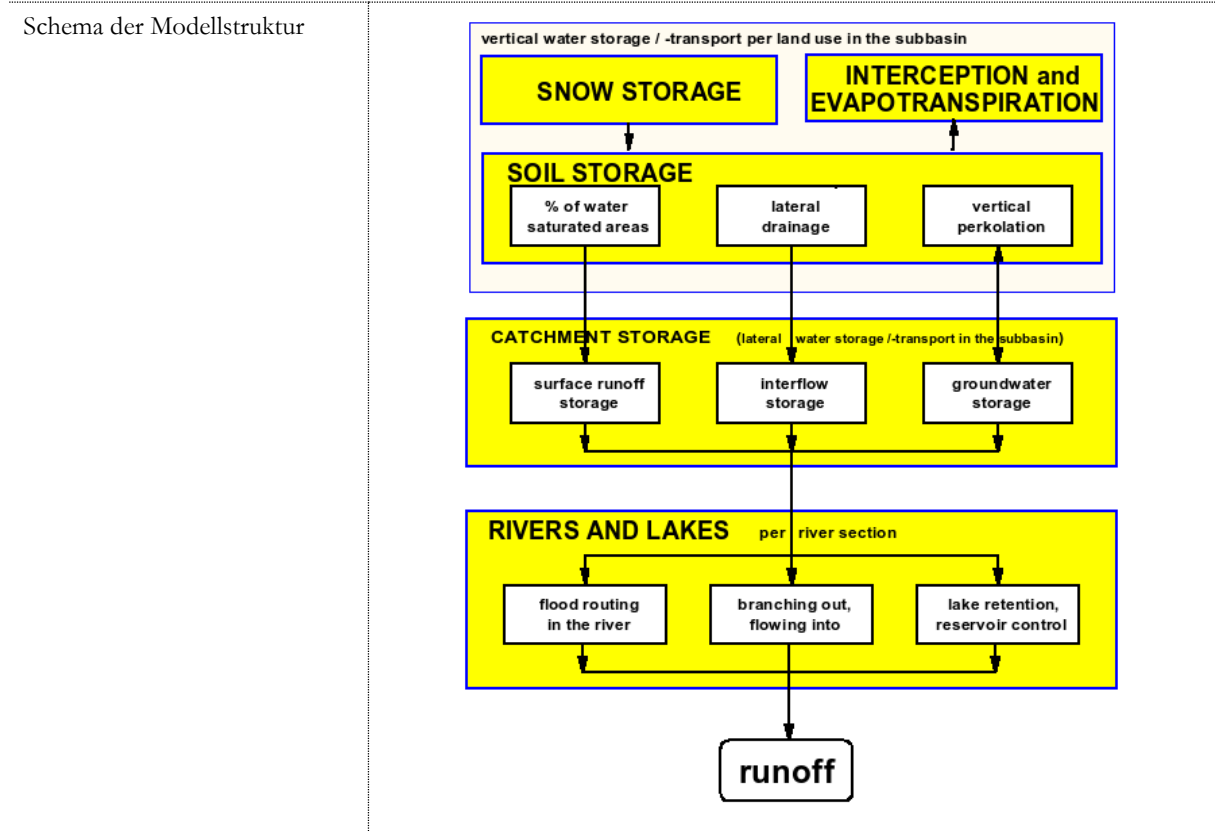
LARSIM-ME ist eine für die großen Flussgebiete Deutschlands (mit internationalen Einzugsgebietsanteilen) entwickelte Variante des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Bremicker 2000). Der nachfolgende Steckbrief fasst wesentliche Charakteristika zusammen.

Die Simulation, einschließlich anthropogener Einflüsse (z. B. durch Talsperren), erfolgt mit täglichem Zeitschritt und räumlich verteilt in einem Raster (Zellengröße 5 km x 5 km, kongruent zu den meteorologischen Rasterdaten HYRAS sowie den aufbereiteten Klimaprojektionsdaten aus dem Schwerpunkt *Szenarienbildung*). Durch die räumlich verteilte Modellstruktur können tägliche Abflussreihen an einer Vielzahl von Flusstandorten simuliert werden. LARSIM-ME liegt als sparsam kalibrierte, regionalisierte Modellvariante vor und liefert damit begründete und überregional vergleichbare Modellaussagen. Diese Modellvariante wurde im Rahmen des ExpN-TF1 einer vertieften Validierung unterzogen und weiterentwickelt. Diese Arbeiten bezogen sich u. a. auf die Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers, auf die verbesserte Modellierung von Verdunstungs-, Schnee- und Abflussbildungsprozessen, auf die erweiterte Berücksichtigung anthropogener Einflüsse auf die Abflussverhältnisse sowie auf die verbesserte Simulation des Wellenablaufs im Gewässernetz.

Tabelle 8-3: Modell-Faktenblatt LARSIM-ME

1. Allgemeine Information	
Modell Name	LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model)
Version	Revision 996
Autor(en) und erste Publikation	Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
Kontakt (Name, E-mail)	Dr. M. Bremicker, bremicker@lubw.de
Institut	LUBW Baden-Württemberg
Webseite	http://larsim.sourceforge.net/
genereller Anwendungsbereich	Hochwasservorhersage, Wasserhaushaltsmodellierung
Geltungsbereich/ Anwendungsgebiete (räumlich)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LARSIM für Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen (Mittelgebirge, Alpen und Alpenvorland, Flachland) ▪ LARSIM-ME für Mitteleuropa (einschl. int. Gebiete von Rhein, Ems, Weser, Elbe und Donau (bis österreichisch-ungarische Grenze)
Ansprechpartner (Behörde, Name, E-Mail)	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Dr. Enno Nilson, nilson@bafg.de
Modellanpassung in laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten der BfG	<ol style="list-style-type: none"> 1) Hydromet. Antriebsdaten (ExpN-TF1, IMPREX) 2) Schneemodellierung (ASG-Rhein, ExpN-TF1), 3) Verdunstungsansätze (ExpN-TF1), 4) Abflusskomponenten (ExpN-TF1) 5) Wellenablauf, Hochwasser (ExpN-TF1), 6) Wasserbewirtschaftung (WaWi2050, ElbeRegime)
Modellkopplung	FEWS@BfG, ProWaS@BfG, Input Daten aus Klimamodellketten und saisonalen Vorhersagen, Output Daten für SOBEK, Qsim, usw.
2. Modellbeschreibung	
Modelltyp	Konzeptionell, teilweise auch prozessorientiert
Zeitliche Diskretisierung	kontinuierlich

Zeitliche Auflösung	variabel: 5min - 1mon (LARSIM-ME: 1 Tag)
Räumliche Diskretisierung	Teileinzugsgebiets- und rasterbezogen, meteorologische Daten auch stationsbezogen möglich
Räumliche Auflösung	variabel (LARSIM-ME: 5 km x 5 km Lambertraster)
kurze Beschreibung der Modellstruktur und der Komponenten	Simulation von Evapotranspiration, Interzeption, Schneeaufbau und -schmelze, Bodenfeuchte, Abflusskomponenten (Direkt-, Zwischen-, Basisabfluss), anthropogenen Maßnahmen (z. B. Talsperren, Überleitungen), Wellenablauf (im Gerinne, Seeretention)



Verfahren der Parameterbestimmung Kalibrierung	Sowohl manuell als auch automatisch möglich; LARSIM-ME-reg: Regionalisierungsverfahren nach Gebietsclustering durchgeführt.
--	---

3. Modell Input / Modell Output

Übersicht und Charakteristik der Input-Variablen	<p><u>Meteorologische Daten:</u> Beobachtete oder simulierte Zeitreihen von Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftdruck (mindestens erforderlich: Niederschlag und Lufttemperatur)</p> <p><u>Hydrologische Daten:</u> Beobachtete Abflüsse, Überleitungen, Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen (Talsperren, gesteuerte Seen, Rückhaltebecken)</p> <p>Bei Verwendung in der operationellen Hochwasservorhersage können beobachtete Schneehöhen und Spezifikationen des Schneewasseräquivalents zur automatischen Optimierung des Schneemodells verwendet werden.</p>
--	---

Übersicht und Charakteristik der Output-Variablen	<p><u>Pegelbezogen</u> [m³/s]: Basisabfluss, Zwischenabfluss, Direktabfluss, Gesamtabfluss</p> <p><u>Flächenbezogen</u> [mm]: potenzielle u. aktuelle Verdunstung, Schneewasseräquivalent, Bodenwasserkomponenten, Niederschlag, Abflusskomponenten</p>
---	--

4. Beispiel(e) für Modellanwendungen

Einzugsgebiete, Anwendungsbereiche etc.	Ijssel, Maas, Rhein, Weser, Ems, Elbe, Oder, Donau, Ostsee-einzugsgebiet (LARSIM-ME)
---	--

Existierende Vergleichsstudien mit anderen Modellen	<p>Herbst, M., Casper, M. C., Grundmann, J., Buchholz, O. (2009): Comparative analysis of model behaviour for flood prediction purposes using Self-Organizing Maps, <i>Nat. Hazards Earth Syst. Sci.</i>, 9, 373-392</p> <p>Casper, M. C., Herbst, M., Grundmann, J., Buchholz, O., Bliefernicht, J. (2009): Einfluss der Niederschlagsvariabilität auf die Simulation extremer Abflüsse in kleinen Einzugsgebieten, <i>Hydrologie und Wasserbewirtschaftung</i>, 53. Jahrgang, Heft 3</p> <p>Helms, M., Nilson, E., Krahe, P. (2018): Analyse und Bewertung von mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME simulierten Abflüssen und Abflusskomponenten in drei ausgewählten Flussgebieten Mitteleuropas. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-XXXX (bisher unveröffentlicht), Koblenz.</p>
Anwendungen in BfG	Wasserhaushaltsmodellierung und Klimasignalberechnungen für Wasserhaushaltsgrößen und schifffahrtsrelevante hydrologische Parameter

5. Liste ausgewählter Referenzen

- Bremicker, M., Homagk, P., Ludwig, K. (2006): Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft*, 7/8: 46-50.
- Luce, A., Haag, I., Bremicker, M. (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (2): 58-66.
- Ludwig, K., Bremicker, M. (Eds.) (2006): *The Water Balance Model LARSIM*. (<https://hydro.uni-freiburg.de/publ/fsh>), Band 22 Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- LARSIM-Entwicklergemeinschaft – Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU (2017): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Stand 29.8.2017. <http://www.larsim.info/das-modell/dokumentation/>

8.3 Serien jährlicher Häufigkeiten der HSW-Überschreitung

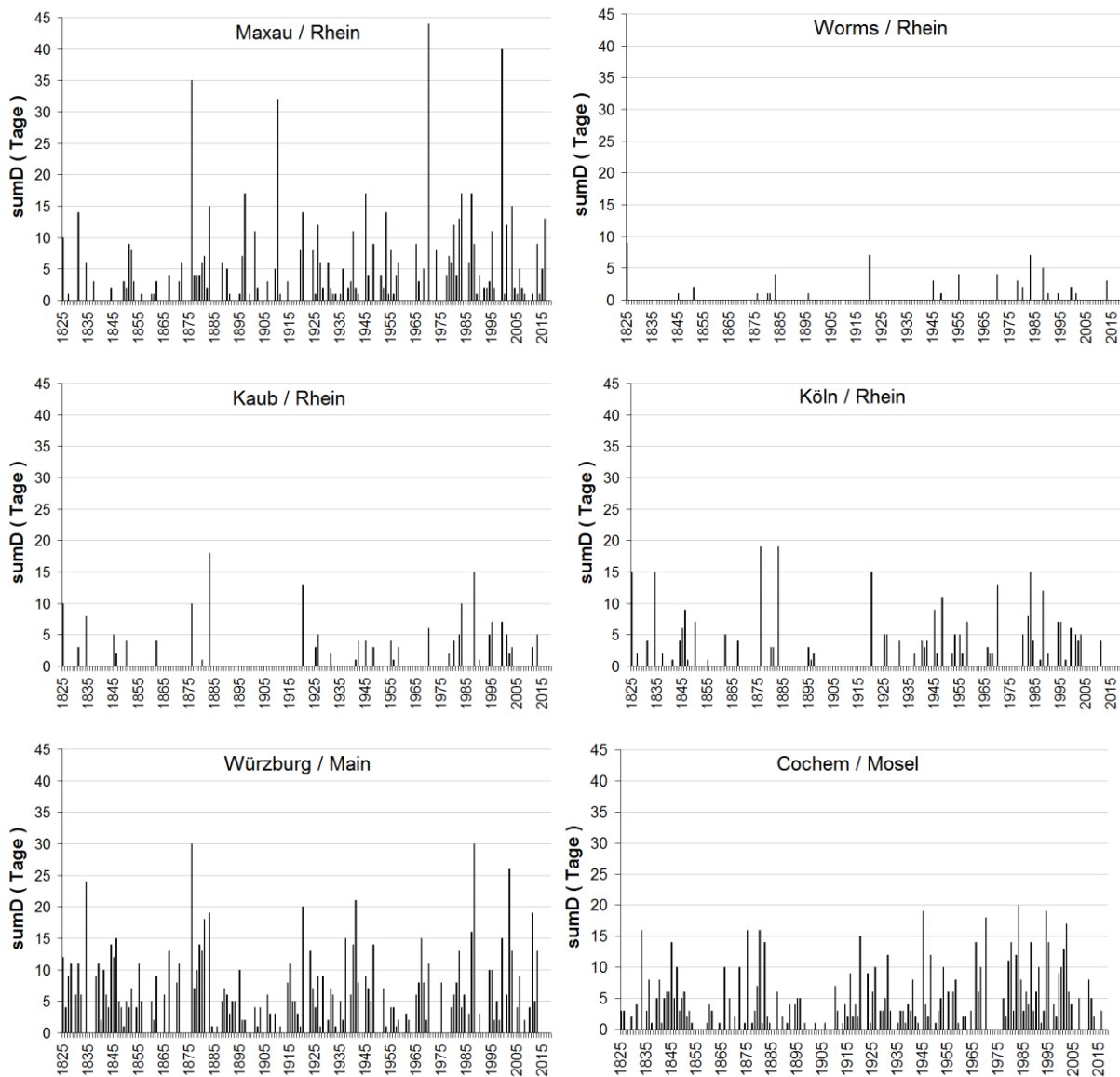


Abbildung 8-1: Jährliche Überschreitungshäufigkeiten des HSQ (Abfluss bei HSW für heutigen Gewässerzustand) im Zeitraum 1825–2016 an ausgewählten Pegeln des Rheins, des Mains und der Mosel.

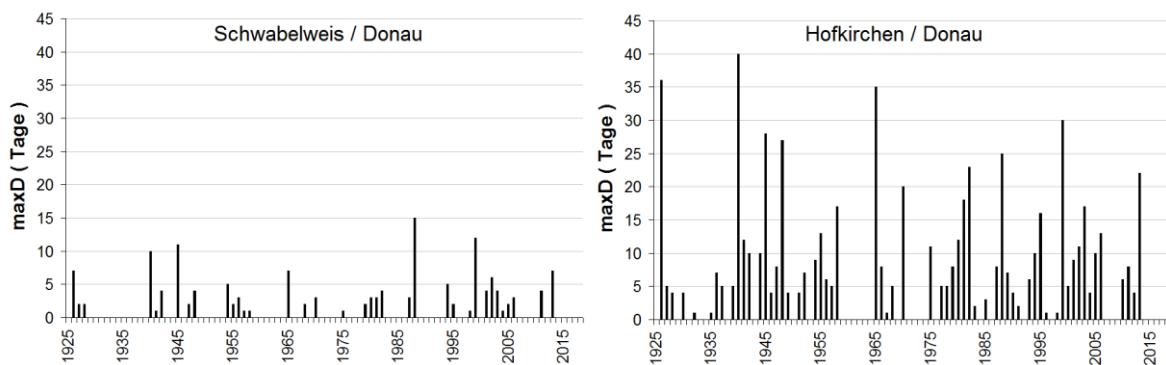


Abbildung 8-2: Jährliche Überschreitungshäufigkeiten des HSQ (Abfluss bei HSW für heutigen Gewässerzustand) im Zeitraum 1925–2016 an zwei Pegeln der Donau.

8.4 Übersicht über die Hochwassergefahrenkarten ausgewählter Bundesländer

Tabelle 8-4: Zusammenstellung dokumentierter Jährlichkeiten der Abflüsse der Szenarien, die den Hochwassergefahrenkarten ausgewählter Bundesländer zugrunde liegen. Detailliertere Angaben zur Quelle (URL, mündliche Auskünfte) finden sich im Literaturverzeichnis.

Bundesland	Flüsse	T [a] (häufiges HW)	T [a] (mittleres HW)	T [a] (extremes HW)	Quelle
Baden-Württemberg	Rhein, Neckar, Main, Donau	10	100	200 bis meist 1000	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (LUBW 2017)
Rheinland-Pfalz	Rhein, Mosel	10 - 25	100	>> 100	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (MUEEF 2017)
Hessen	Rhein, Main	10	100	> 1,3*HQ ₁₀₀ , nach anderen Angaben HQ ₂₀₀ zzgl. 50 cm Freibord.	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG 2017); DKKV (2015)
Bayern	Main, Donau	5 - 20	100	entsprechend 1,5*HQ ₁₀₀	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU 2017)
Nordrhein-Westfalen	Rhein, Weser	10 - 20	100	250 bis meist 1000	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV 2017)
Niedersachsen	Weser, Elbe	20 - 25	100	entsprechend 1,3*HQ ₁₀₀	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN 2017)
Sachsen	Elbe	20 - 25	100	200 bis 300, nach anderen Angaben 300 bis 500	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfLUG 2017); DKKV (2015)
Sachsen-Anhalt	Elbe, Saale	10 - 20 (Elbe 20)	100	200	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW 2017)
Brandenburg	Elbe, Oder, (Havel)	10 - 20 (Elbe 20)	100	200	Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUK 2017)

8.5 Hochwasserstatistiken aus beobachteten Abflussreihen für ausgewählte Pegel

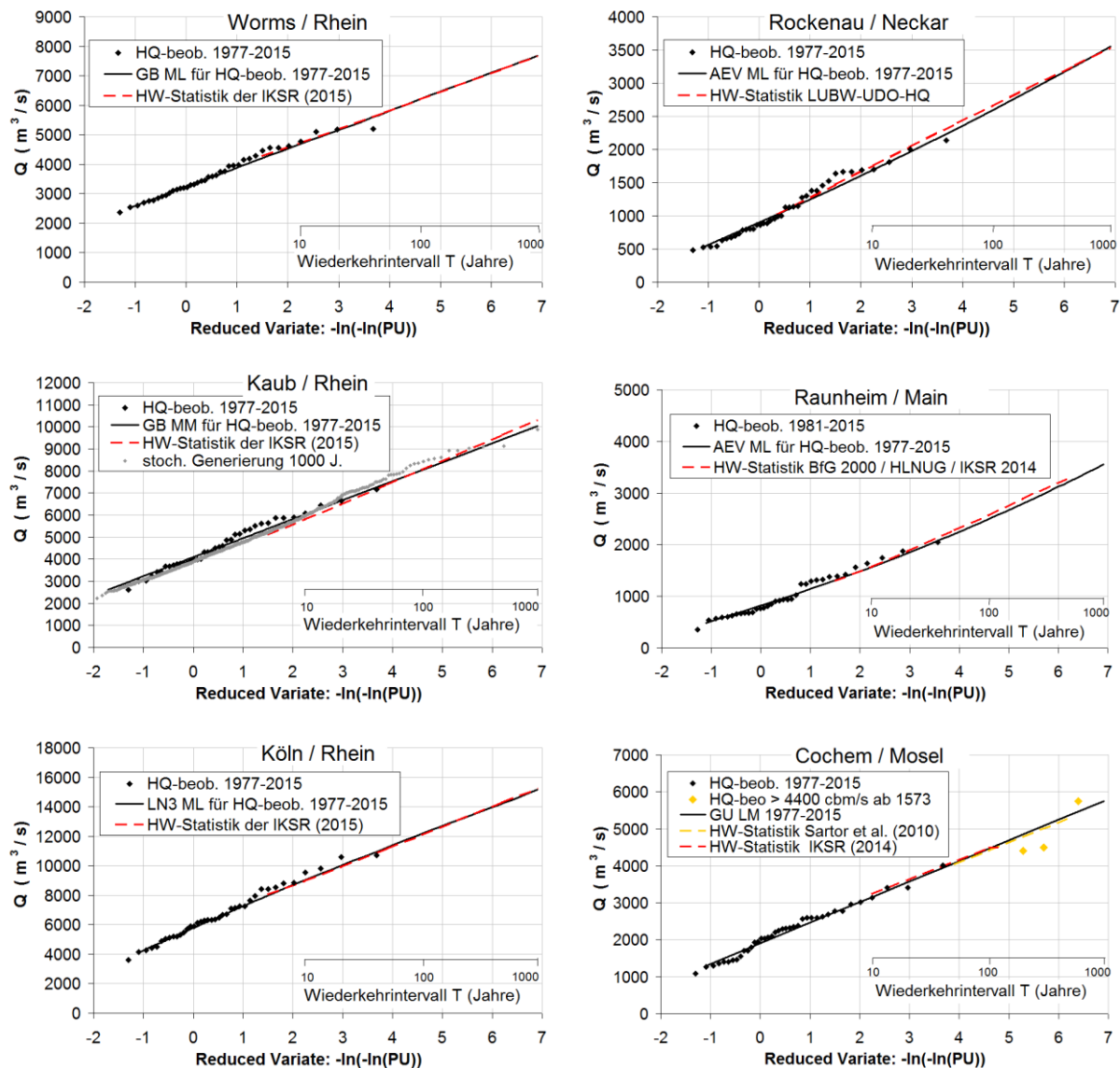


Abbildung 8-3: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (beobachtete Tagesmittel) sowie daran angepasste theoretische Verteilungsfunktionen im Vergleich zu aktuell gültigen Hochwasserstatistiken der jeweils genannten Quellen an ausgewählten Pegeln des Rheins, des Neckars, des Mains und der Mosel. Für den Pegel Kaub wird exemplarisch zusätzlich die Serie einer mit dem stochastischen Modell nach Treiber 1975 generierten 1000-jährlichen Abflussreihe gezeigt, mit der die Hochwasserstatistik zusätzlich abgesichert wird.

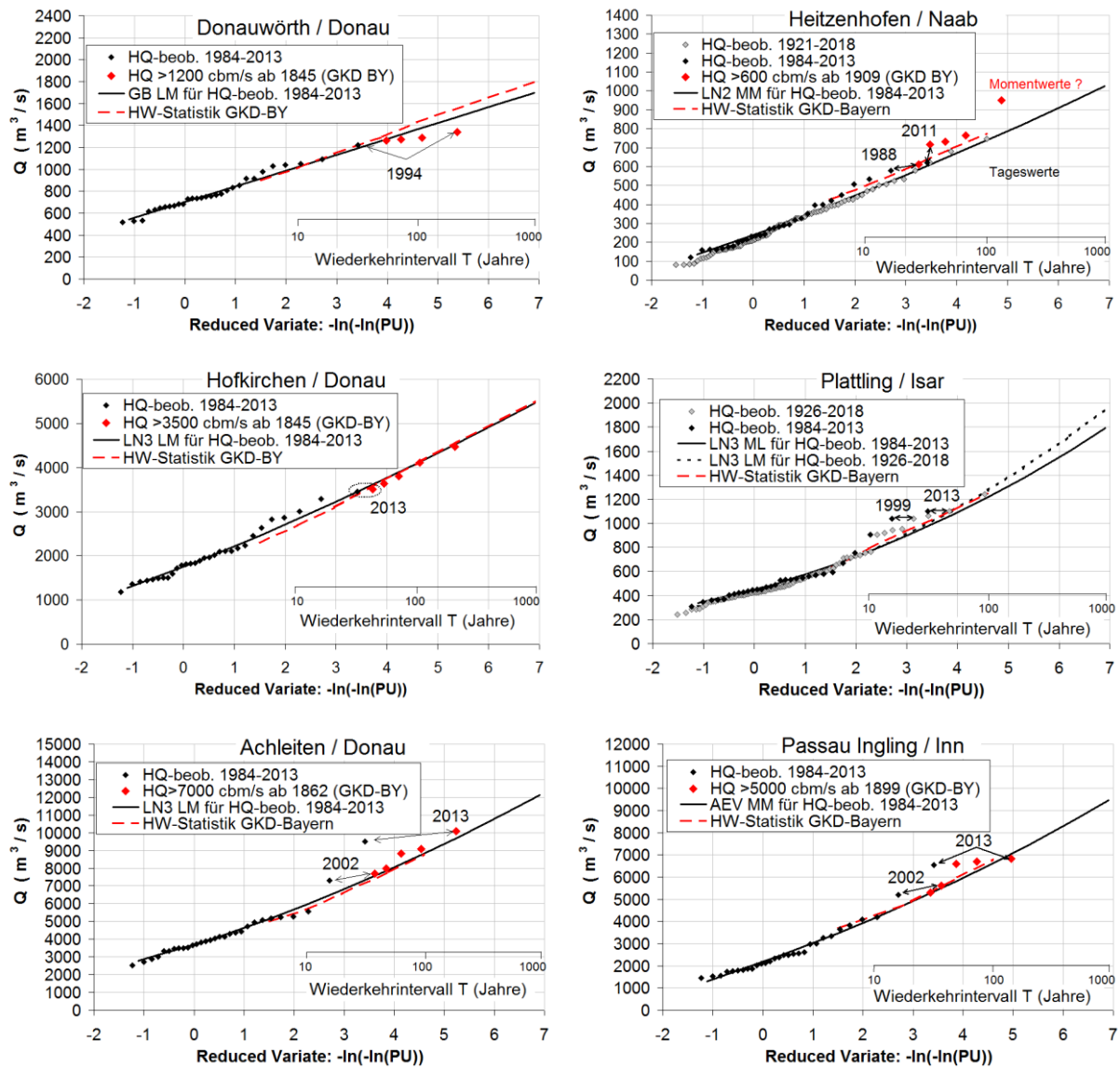


Abbildung 8-4: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (beobachtete Tagesmittel) sowie daran angepasste theoretische Verteilungsfunktionen im Vergleich zu aktuell gültigen Hochwasserstatistiken der jeweils genannten Quellen an ausgewählten Pegeln der Donau, des Naab, der Isar und des Inn. Bei der Auswahl der anzupassenden Verteilungsfunktionen wurden empirische Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse (Scheitel oberhalb der genannten Schwellenwerte) in Bezug auf die genannten, erweiterten Zeiträume berücksichtigt.

8.6 Hochwasserstatistiken aus simulierten Abflussreihen für ausgewählte Pegel

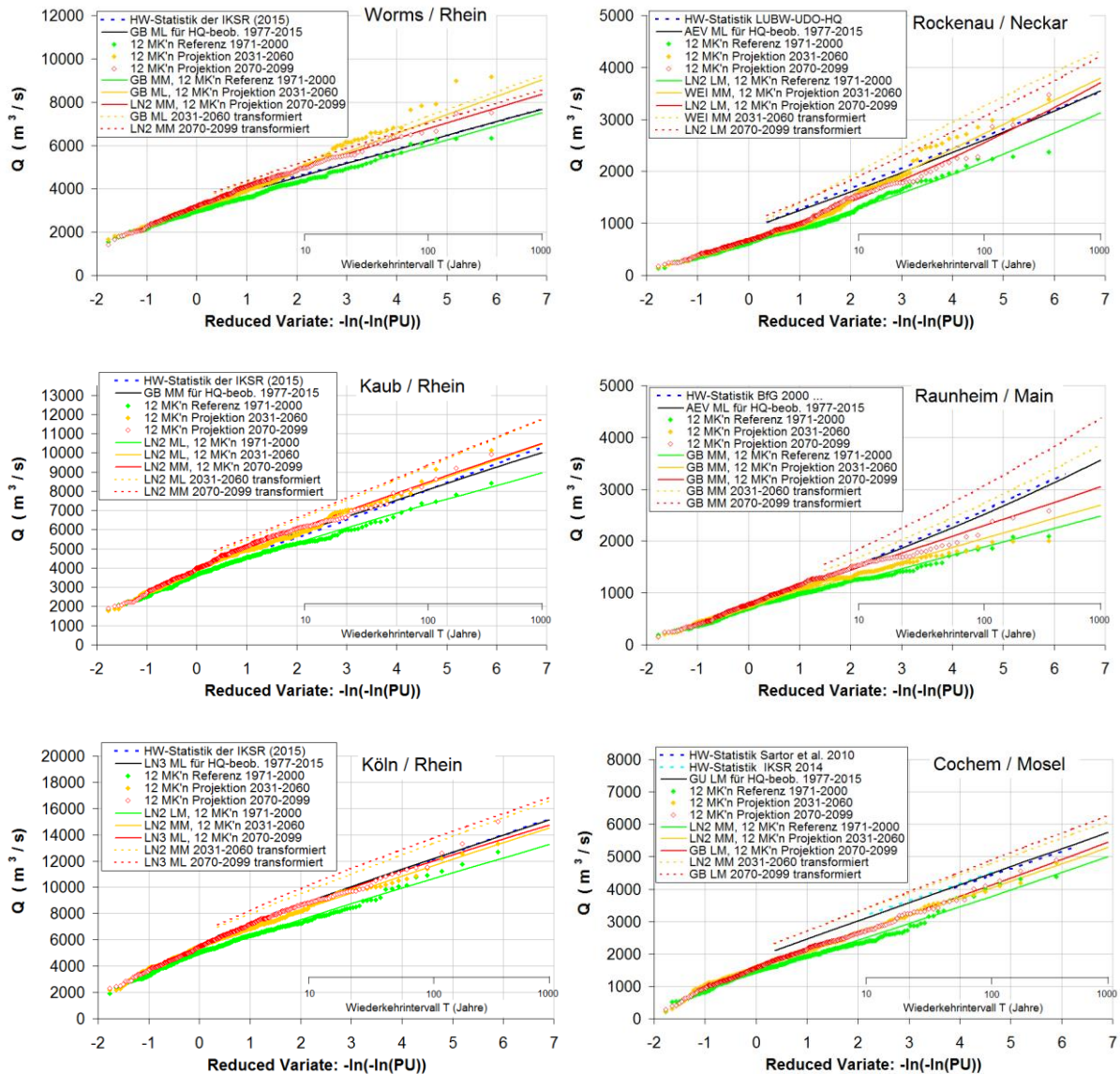


Abbildung 8-5: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (Tagesmittel) sowie daran angepasste theoretische Verteilungsfunktionen für vereinigte Ensembleserien von aus Modellketten für das *Weiter-wie-bis-her-Szenario* an ausgewählten Pegeln des Rhein Einzugsgebiets und für die in den Legenden genannten Zeiträume. Als Referenz sind auch die aus Beobachtungen abgeleiteten Verteilungsfunktionen des Istzustands dargestellt. Für die simulierten Zukunftszeiträume wurden die Verteilungsfunktionen auch transformiert, um sie auf die beobachteten Verteilungsfunktionen zu beziehen (vgl. Abschnitt 3.5.3.3).

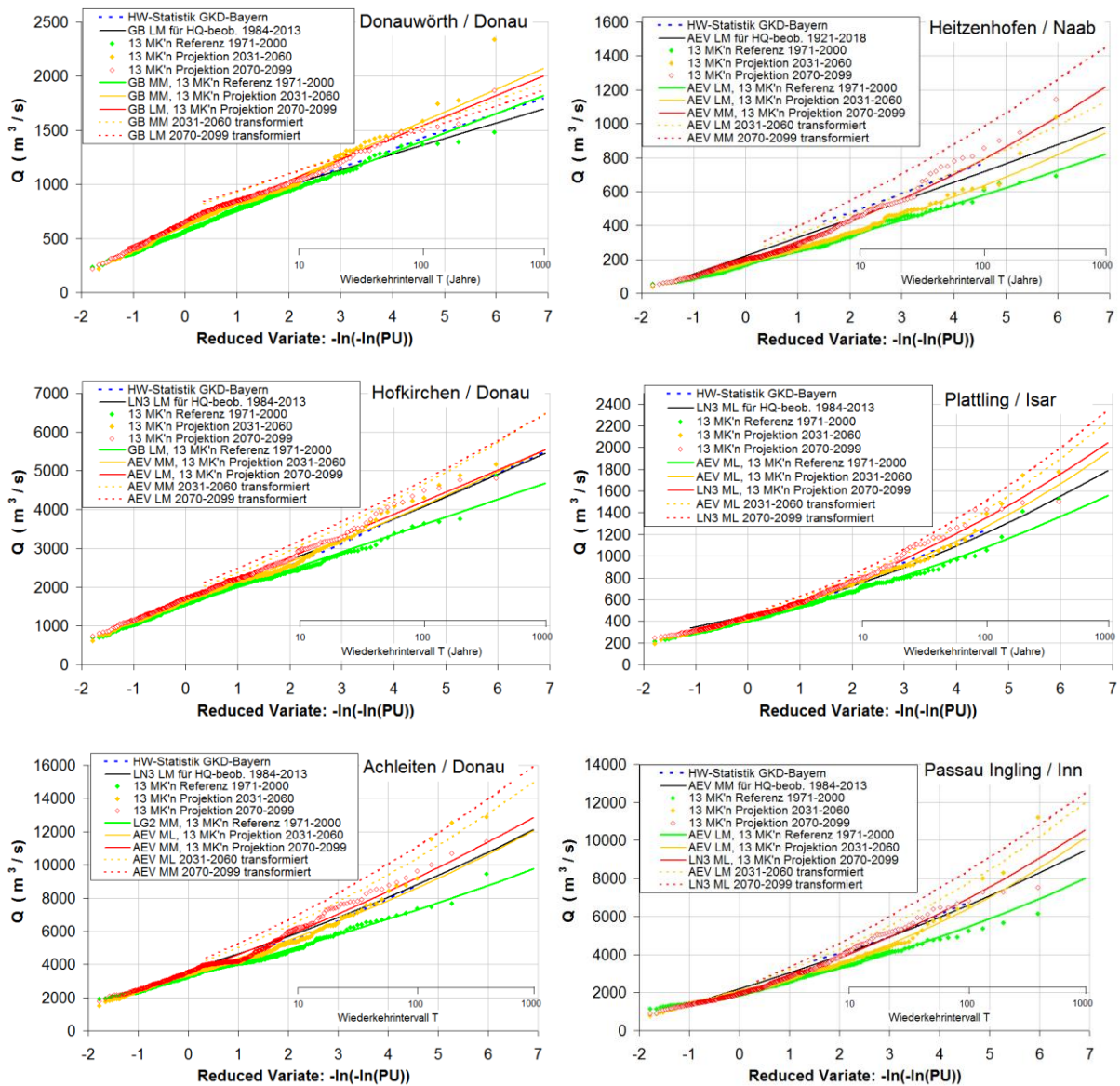


Abbildung 8-6: Serien jährlicher Scheitelabflüsse (Tagesmittel) sowie daran angepasste theoretische Verteilungsfunktionen für vereinigte Ensembleserien von aus Modellketten für das *Weiter-wie-bis-her-Szenario* an ausgewählten Pegeln des Donau-Einzugsgebiets und für die in den Legenden genannten Zeiträume. Als Referenz sind auch die aus Beobachtungen abgeleiteten Verteilungsfunktionen des Istzustands dargestellt. Für die simulierten Zukunftszeiträume wurden die Verteilungsfunktionen auch transformiert, um sie auf die beobachteten Verteilungsfunktionen zu beziehen (vgl. Abschnitt 3.5.3.3)

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/ExpNLAf2020.2020.06
- 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