

Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen

Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

F. Bott, A.-F. Lohrengel, M. Forbriger, M. Haller, C. Jensen, P. Löwe, A. Ganske, C. Herrmann



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

Zitiervorschlag

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-Expertenetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBF2020.2020.05

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:

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:

Corinna Jensen, Peter Löwe, Dr. Anette Ganske

Bundesanstalt für Straßenwesen:

Anne-Farina Lohrengel

Deutscher Wetterdienst:

Dr. Michael Haller

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung/ Eisenbahn-Bundesamt:

Frederick Bott, Carina Hermann, Markus Forbriger

Redaktionsschluss: April 2020

Titelbild: Sturmwurf an elektrifizierter Bahnstrecke, Quelle: Eisenbahn-Bundesamt

DOI: 10.5675/ExpNBF2020.2020.05

Inhalt

1	Kernbotschaften und Datengrundlage	1
	Starkwind über dem Binnenland.....	2
	Extremwinde über See und potentielle Sturmfluten.....	2
	Umsetzung der Klimawirkungsanalyse.....	3
2	Hintergrund und Ziele	4
3	Einführung in die Forschungsarbeiten.....	7
3.1	Wirkungsketten – Bezug zum Leitfaden der IMA-A.....	7
3.2	Beiträge zur Klimawirkungsanalyse im Themenfeld 1.....	9
3.2.1	Klimawirkung.....	9
3.2.2	Expositionsanalyse.....	9
3.2.3	Sensitivitätsanalyse.....	9
3.2.4	Kritikalitätsanalyse.....	10
4	Aktuelle und zukünftige Klimadaten und -szenarien.....	11
4.1	Datengrundlage.....	11
4.2	Starkwind über dem Binnenland.....	13
4.2.1	Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes).....	13
4.2.2	Ergebnisse aus windbasierten Analysen von COSMO-CLM Simulationen für 1971–2100.....	14
4.3	Extremwinde über See und potentielle Sturmfluten.....	19
4.3.1	Windgeschwindigkeit in Nord- und Ostseeregionen.....	20
4.3.2	Stürme: Klassen und Häufigkeiten.....	22
5	Umsetzung der Klimawirkungsanalyse.....	25
5.1	Identifizierung relevanter Infrastrukturelemente.....	25
5.1.1	Ingenieurbauwerke.....	25
5.1.2	Strecke.....	28
5.1.3	Verkehrsfluss.....	30
5.2	Expositionsanalyse Straße/Schiene.....	32
5.2.1	Sturmwurfgefahren (Vegetation) Straße/Schiene.....	33
5.2.2	Anpassungsoptionen für Sturmwurf und Seitenwindgefährdung auf Brücken.....	41
5.3	Sensitivitätsanalyse.....	43
5.3.1	Schiene/Oberleitung.....	43
6	Fazit und Ausblick	46
6.1	Wesentlicher Erkenntnisgewinn.....	46
6.2	Offene Forschungsfragen.....	47
6.3	Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase.....	48
6.3.1	Erweiterung des Klimaprojektionsensembles.....	48
6.3.2	Ausblick LiDAR-Forschungsprojekte.....	48

6.3.3	Aufbau des Themenfelds 1 in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks.....	49
7	Literaturverzeichnis	51
8	Abkürzungsverzeichnis.....	55
9	Anhang.....	57

1 Kernbotschaften und Datengrundlage

Das Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" setzt sich aus insgesamt neun Schwerpunkten zusammen (Abbildung 2-1). In diesem Abschnitt werden zusammenfassend die Kernaussagen aus den Untersuchungen im Schwerpunkt *Sturmgefahren* dargestellt und, sofern möglich, konkrete Hinweise auf die Art, die Größe als auch den Zeitpunkt absehbarer Risiken von Stürmen auf das Bundesverkehrssystem gegeben.

In Themenfeld 1 des Expertennetzwerks wurden verschiedene Datengrundlagen für die klimatischen Modellierungen genutzt. Im Binnenbereich wurden zwei verschiedene Datensätze verwendet. Zum einen wurde das Bezugsensemble des Deutschen Wetterdiensts (DWD), das im BMVI-Expertennetzwerk aus EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment) Projektionen bias-adjustiert und auf 5 km Gitterweite regionalisiert wurde, für den mittleren Wind ausgewertet. Zusätzlich wurden Windböendaten einer hochauflösenden, nicht bias-adjustierten COSMO-CLM (Consortium for Small Scale Modelling; Climate Limited-area Model) Simulation mit 2,8 km Gitterweite für weitere Auswertungen genutzt. Details sind im Abschlussbericht *Szenarienbildung* beschrieben (Brienen et al. 2020).

Im Küstenbereich wurden die im Rahmen des Projekts „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“ (KLIWAS; BMVI 2015) genutzten gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre-Modelle MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 ausgewertet.

Dabei wurden folgende RCP-Szenarien (IPCC 2019) untersucht:

- Das *Klimaschutzszenario* (RCP2.6) zeichnet ein optimistisches Bild, dessen Emissionspfad nur durch einen baldigen weltweiten Stopp aller Treibhausgasemissionen zu erreichen wäre.
- Das *moderate Szenario* (RCP4.5) geht von einer moderaten Entwicklung aus und ist ressourcenschonend orientiert.
- Das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5) entspricht einer Welt, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Verbrennung fossiler Energieträger fußt.

Änderungssignale werden im Folgenden entweder für den kompletten Untersuchungszeitraum der Modellsimulationen oder über Zeitscheibenanalysen bestimmt. Folgende Zeitscheiben wurden ausgewertet:

<i>Bezugszeitraum</i>	1971–2000
<i>nahe Zukunft</i>	2031–2060
<i>ferne Zukunft</i>	2071–2100 (Binnen) sowie 2070–2099 (Küste)

Da einige der gekoppelten Modellläufe bereits im Jahr 2099 enden, weicht die Zeitscheibe der *fernen Zukunft* an der Küste von den Untersuchungen im Binnenland ab. Die Nutzung gekoppelter Modellläufe wurde aber als notwendig erachtet, um physikalische Konsistenz zwischen ozeanischen und atmosphärischen Parametern für die durchgeführten Untersuchungen gewährleisten zu können.

Starkwind über dem Binnenland

- Generell sind Aussagen im Bezug auf den Einfluss des Klimawandels mit Vorsicht zu behandeln, da der Wind auf allen Skalen hoch variabel ist und die Wahl der betrachteten Zeiträume ebenfalls einen Einfluss haben kann. Bei der hochaufgelösten Klimasimulation ist zudem nur eine Realisierung verfügbar, was die Aussagekraft verringert.
- Die räumliche Verteilung der mittleren und extremen Windgeschwindigkeiten bleibt in Zukunft sehr ähnlich wie im *Bezugszeitraum* (1971–2000). Die Unterschiede zwischen den Perzentilen des Ensembles sind sehr gering und zeigen eine geringe Varianz zwischen den Ensemblemitgliedern. Es sind auch keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Szenarien zu erkennen.
- Eine leichte Abnahme der mittleren und extremen Windgeschwindigkeiten ist im Ensemble vor allem im Sommer festzustellen, bei der hochaufgelösten Klimasimulation auch in den anderen Jahreszeiten. Die Änderungen sind aber in fast allen Fällen kleiner als $\pm 5\%$.

Extremwinde über See und potentielle Sturmfluten

- Die Änderungen in der Häufigkeit und Intensität extremer Windgeschwindigkeiten wurden für 7 Gebiete der Nord- und Ostsee anhand der 2 % Fraktion der höchsten Geschwindigkeiten der regionalen Windgeschwindigkeitsverteilungen analysiert. Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität ergaben sich nennenswerte Änderungen nur für die *ferne Zukunft* des *Weiter-nie-bisher Szenarios*. Auf Basis von 8 Realisierungen nahmen Häufigkeit und Intensität in 43 von 56 Fällen (7 Regionen x 8 Realisierungen) zu. Mehrheitlich signifikante Anstiege konnten für die südöstliche Nordsee und die Ostsee festgestellt werden.
- Eine punktuelle Untersuchung der 2 % Fraktion extremer Effektivwindgeschwindigkeiten bei Cuxhaven ergab keine signifikanten Änderungen hinsichtlich der Stärke, Dauer und Anzahl potentieller Sturmflutereignisse.
- Im Rahmen der Wetterlagenanalyse für die Nordseeregion wurden Stürme identifiziert und nach Stärke klassifiziert: Sturm, starker Sturm und sehr starker Sturm. Auf Basis von 8 verfügbaren *Weiter-nie-bisher* Realisierungen und der drei Sturmklassen wurden für die Zeitscheibe *ferne Zukunft* in insgesamt 18 von 24 Fällen höhere relative Sturmhäufigkeiten festgestellt. Davon entfielen 5 Fälle auf die Klasse Sturm, 6 Fälle auf starker Sturm und 7 Fälle auf sehr starker Sturm. Für die Zeitreihen jährlicher relativer Häufigkeiten der Sturmklassen von 1961–2099 ergaben sich signifikant positive Trends in 8 von 24 Fällen, die sich auch durch starke Anstiege im Zeitscheibenvergleich auszeichneten. Weitergehende statistische Analysen sind erforderlich und geplant.

Umsetzung der Klimawirkungsanalyse

- Stürme gehören zu den Extremwetterereignissen, die bereits heute große Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur zeigen. Der Fokus des Schwerpunkts *Sturmgefahren* wurde auf die Klimawirkung Sturmwurf gelegt. Zudem wurde das Thema Sturmgefahren in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks hauptsächlich für die Verkehrsträger Straße und Schiene betrachtet.
- Die Exposition der Verkehrsinfrastruktur gegenüber Sturmwurf wird maßgeblich durch die Verfügbarkeit von Vegetation bestimmt. Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundesschienennetzes durch bewaldetes Gebiet und sind somit potenziell durch Sturmwurf gefährdet.
- Das elektrifizierte Bundesschienennetz ist besonders sensitiv gegenüber Sturmwurf und -bruch. Aufgrund der geplanten weiteren Erhöhung des Elektrifizierungsgrades der Schiene sollte dieser Aspekt zunehmend betrachtet werden.
- Der Anteil elektrifizierter Bahnstrecken in bewaldeten Gebieten liegt aktuell bei 12 %.
- Da aus den Klimaprojektionsdaten keine klare Veränderung in der Gefährdung des Landverkehrs durch Stürme und Windböen erkennbar ist, sollte die Bewertung des Anpassungsbedarfs auf der aktuellen räumlichen Differenzierung der Sturmgefährdung über Deutschland basieren.
- Veränderungen in den Klimaparametern, die die Vitalität und die Vegetationsperiode der Bäume beeinflussen, können zukünftig die Wirkung von Sturmereignissen modifizieren und sollten weiterhin betrachtet werden.

2 Hintergrund und Ziele

Stürme gehören zu den Extremwetterereignissen, die Verkehr und Infrastrukturbetreiber bereits heute vor Herausforderungen stellen. Wind besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten: Aus einem sich langsam ändernden und einem turbulenten Anteil. Für die Betrachtung des Risikopotentials von Starkwind und Sturm auf die Straßen- und Schieneninfrastruktur bzw. ihrer unmittelbaren Umgebung ist die Windintensität (Spitzenwindgeschwindigkeit) von größerer Bedeutung als die dauerhafte Einwirkung einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit. Der Staudruck des Windes, der auf einen umströmten Körper wirkt, wird beeinflusst durch die Topografie, die betrachtete Höhe über dem Gelände, die Querschnittsgeometrie der Konstruktion, die Höhe über dem Meeresspiegel, die Luftdichte und den Umweltverhältnissen am Standort (Straßen.NRW 2018). Der turbulente Anteil von Wind verursacht die Entstehung von Windböen, die kurzzeitig mit einer Erhöhung der Windlast einhergehen. Hohe Windgeschwindigkeiten können sowohl großräumig auf synoptischer Skala auftreten, zum Beispiel bei Stürmen und ausgeprägten Kaltfronten, aber auch auf lokaler Ebene im Zusammenhang mit Gewittern oder hochsommerlichen Konvergenzzonen. Während großräumige, an Wetterfronten gebundene Stürme auch von weniger fein aufgelösten Modellen gut simuliert werden können, ist das lokale Auftreten von Starkwinden bei Gewittern immer noch sehr begrenzt simulierbar und wird oftmals unterschätzt.

Beispiele für die Auswirkungen von solchen Sturmereignissen auf den Verkehr sind zahlreich. Die Stürme der vergangenen Jahre haben den Verkehr auf der Schiene und der Straße in ganzen Regionen unterbrochen (Haeseler et al. 2019, Lefebvre et al. 2018). Die Auswirkungen des Sturmtiefs *Kyrrill* 2007 oder des Orkans *Friederike* im Januar 2018 unterstreichen die Bedeutung und Aktualität dieser Thematik besonders im Hinblick auf den Schienenverkehr (BABS-CH 2015). Aufgrund großer Schäden an der Bahninfrastruktur infolge des Sturms *Friederike* mussten der Nahverkehr in den Bundesländern Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen sowie der gesamtdeutsche Fernverkehr zeitweise komplett eingestellt werden. Auch seitens der Straße waren die Auswirkungen des Sturmereignisses erheblich. In den Pressemitteilungen vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW 2018) wurden eine Vielzahl an Straßensperrungen gemeldet, die im Zusammenhang mit Sturmwurf oder umgekippten Fahrzeugen standen.

Den wohl größten Umweltrisikofaktor bei Stürmen bildet die Vegetation entlang der Gleise und Straßen. Durch das Umstürzen von Bäumen oder herabstürzende Äste können Streckenblockierungen oder Schäden an der Infrastruktur verursacht werden. Im Bahnverkehr können die umgestürzten Bäume sowohl die Oberleitungen oder Züge und Personen direkt beschädigen als auch die Gleise blockieren und dadurch zu Zugausfällen und Verspätungen führen. Neben Bäumen auf den Gleisen führen im Schienenverkehr auch umgeknickte Signal- und Oberleitungsmasten oder Sturmwurf von Bäumen auf eben diese zu erheblichen Beeinträchtigungen (BABS-CH 2015). Somit erhöhen Oberleitungen mitsamt den verbundenen Einrichtungen bei elektrifizierten Strecken die Sensitivität der Bahn gegenüber Sturmwirkungen durch Baumwurf. Hinsichtlich der Tatsache, dass die Elektrifizierung der Bahnstrecken in Zukunft voraussichtlich weiter zunehmen wird, ist dies von besonderer Bedeutung.

Neben den geschilderten mittelbaren Windwirkungen durch Sturmwurf gefährden starke Seitenwinde und Windböen Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer auch direkt – insbesondere auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. Züge sind aufgrund ihrer hohen Windresistenz in der Regel nicht direkt durch Stürme beeinträchtigt. Einer möglichen direkten Einwirkung durch Seitenwind wird im Bahnsystem bereits durch konstruktive Maßnahmen im Fahrzeugbau, z. B. Ballastierung in Verbindung mit einem niedrigen Schwerpunkt, begegnet. Auf hohen Talbrücken kann die Seitenwindwirkung zusätzlich durch Schutzwände minimiert werden. Die Windresistenz von Fahrzeugen im Straßenverkehr ist hingegen deutlich geringer ausgeprägt, sodass starke Seitenwinde vor allem auf windexponierten Strecken wie Großbrücken einen bedeutenden Wirkungspfad darstellen.

Ein zentraler Aspekt des Themenfeldes 1 des BMVI-Expertennetzwerks ist es, zu einer integrierten Sicht auf Gefährdungen des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur zu kommen, die sich durch den Klimawandel und extreme Witterungsbedingungen ergeben könnten. Hierfür sollen unterschiedliche Klimawirkungen auf die einzelnen Verkehrsträger vergleichbar gemacht werden. Die Projektstruktur des Themenfeldes 1 des BMVI-Expertennetzwerks ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Bei der Analyse der Klimawirkungen auf das Verkehrssystem erfolgte in der ersten Förderphase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019) eine Konzentration auf die potenzielle Betroffenheit durch *Sturmgefahren* (dieser Bericht), *Hochwasser* (Rauthe et al. 2020) und *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) sowie auf wasserstraßenspezifische Aspekte der *Schiffbarkeit* (z. B. Niedrigwasser) und *Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020). Im Schwerpunkt *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) werden meteorologische, hydrologische und ozeanische Daten für einen Beobachtungszeitraum und die Projektionszeiträume generiert und den anderen Schwerpunkten bereitgestellt.

Die Ergebnisse dieser *Klimawirkungsanalysen* wurden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengestellt und in vergleichbarer Weise visualisiert. Dabei war grundsätzlich das Ziel, mit unterschiedlichen Daten und Methoden die räumliche Betroffenheit des Verkehrssystems (**Exposition**), die Anfälligkeit des Verkehrssystems aufgrund seiner Eigenschaften (**Sensitivität**; soweit Datengrundlagen für Bewertung vorliegend) und die verkehrliche (und ökologische) Bedeutung der Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente (**Kritikalität**) zu bewerten (Hänsel et al. 2020b).

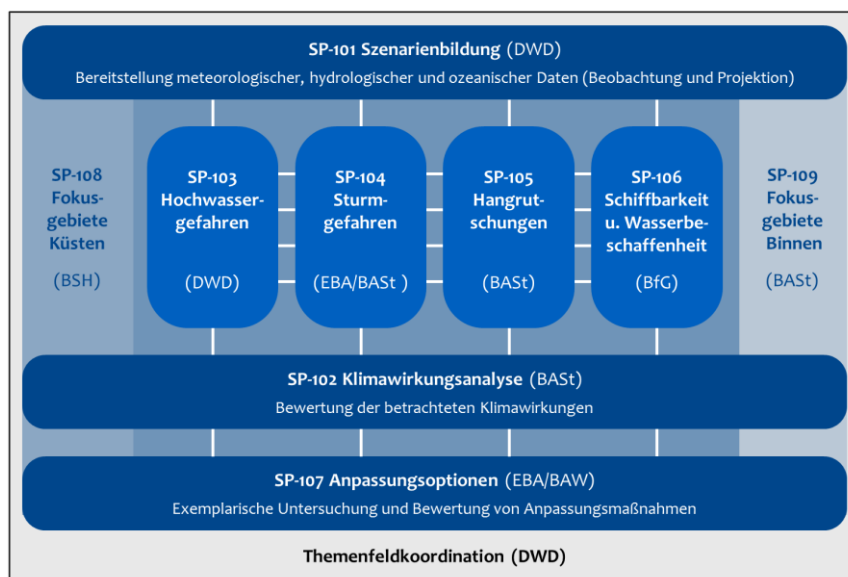


Abbildung 2-1: Projektstruktur von Themenfeld 1 *Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen* (Förderphase 2016–2019) mit seinen neun Forschungsschwerpunkten (SP: Schwerpunkt). In Klammern ist jeweils die den Schwerpunkt koordinierende Behörde angegeben.

Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt *Sturmgefahren* war es zu prüfen, inwieweit der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur von Stürmen schon heute beeinflusst werden und inwiefern der Betrieb unter möglicherweise veränderten klimatischen und hydrologischen Rahmenbedingungen langfristig und nachhaltig gesichert werden kann. Zudem sollte untersucht werden, welche Gefährdungen es gibt, welche Gegenmaßnahmen und Anpassungsoptionen ggf. ergriffen werden können und wie deren Auswahl durch geeignete Informationen (Indikatoren, Kennwerte) unterstützt werden kann.

Die nachfolgend in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse des Schwerpunkts *Sturmgefahren* konzentrieren sich vorwiegend auf Elemente der Verkehrsinfrastruktur und solche in unmittelbarer Umgebung, die Stürmen in besonderem Maße ausgesetzt sind. Zur Identifizierung möglicher Risikoelemente des Landverkehrs wurde zunächst unter Berücksichtigung gängiger Normen und Regelwerke eine Übersicht erstellt. Zu sturmexponierten Infrastrukturelementen gehören beispielsweise Ingenieurbauwerke und Objekte an Streckenabschnitten. Zudem sind auch mobile Risikoelemente wie Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge diesen Windlasten ausgesetzt. Im Laufe der Arbeiten hat sich jedoch herausgestellt, dass sowohl für die Schienen- als auch für die Straßeninfrastruktur die Sturmwurfproblematik von besonderer Relevanz ist. Der Fokus dieses

Berichts liegt somit auf dem Sturmwurf in Zusammenhang mit der Vegetation entlang des Bundesschiene- und -fernstraßennetzes.

Für die Exposition der Verkehrsträger Straße und Schiene wurden Analysen durchgeführt, welche die Bezifferung der Anteile der Verkehrswege mit und ohne unmittelbar angrenzende Vegetation ermöglichen. Hierbei wurde neben der Unterscheidung von Vegetation und Nichtvegetation auch eine Unterscheidung der Waldtypen vorgenommen. Im Anschluss daran wurden bereits erste Analysen im Hinblick auf die Sensitivität der Strecken gegenüber Sturmwurf vorgenommen. Ausschlaggebend ist hierbei vor allem die Elektrifizierung der Schieneninfrastruktur. Die Arbeiten im Schwerpunkt *Sturmgefahren* fokussierten dabei in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks hauptsächlich die Exposition der Verkehrsträger Straße und Schiene. Auch ohne ein derzeit eindeutig projizierbares Änderungssignal für die Zukunft, stellen Starkwinde bereits heute Verkehr und Infrastruktur vor große Herausforderungen. Ein für die Wasserstraße bedeutender Wirkungspfad in Zusammenhang mit Starkwindereignissen sind Sturmfluten. Das Thema Sturmflut wird detailliert im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* (Rauhe et al. 2020) beschrieben und daher im Rahmen dieses Berichts nicht weiter behandelt.

Bei den Arbeiten der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks ergaben sich einige Synergien und ein intensiver Austausch zwischen den einzelnen Schwerpunkten in Themenfeld 1. In Bezug auf den Schwerpunkt *Sturmgefahren* sind hier vor allem die Schwerpunkte *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) und *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) zu nennen. Der integrierende Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* stellt dabei den methodischen Rahmen der Klimawirkungsanalyse dar. Dieser methodische Rahmen ist auch im Kapitel „Umsetzung der Klimawirkungsanalyse“ dieses Berichtes wiederzufinden. Zudem wurden sturmgefahrenspezifische Produkte für *Klimawirkungsanalyse* genutzt. Im Schwerpunkt *Anpassungsoptionen* wurden zudem Ansätze zu Anpassungsoptionen im Bereich Sturmgefahren untersucht. Da vor allem der Wirkungspfad Sturmwurf bereits heute eine Herausforderung für die Verkehrsträger darstellt, können hier umfassende regulatorische und operative Ansätze des Vegetationsmanagements betrachtet werden. Exemplarische Anpassungsmaßnahmen, die bereits heute für die Straße und Schiene vorgesehen sind, werden ebenfalls in diesem Bericht diskutiert, denn Aufräum- und Instandsetzungsarbeiten bei Schadensereignissen können oftmals viel Zeit in Anspruch nehmen. Auch die häufig schwierige Zugänglichkeit der Strecke, insbesondere im Schienenverkehr, erhöht den Aufwand zur Wiederaufnahme des Betriebes. Diesem Umstand kann durch ein angepasstes und konsequent durchgeführtes Vegetationsmanagement begegnet werden, wobei naturschutzfachliche und -rechtliche Bestimmungen sowie lokale Gegebenheiten Berücksichtigung finden müssen. Detaillierte Analysen zu möglichen operativen und regulatorischen Anpassungsmaßnahmen im Vegetationsmanagement finden sich im Bericht *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020).

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt: Grundlagen und Synergien zu bestehenden Forschungsarbeiten und dem IMA-A-Leitfaden werden in Kapitel 3 dargestellt und mit einer Darstellung der betrachteten Wirkungszusammenhänge von Sturmgefahren abgerundet. Das daran anschließende Kapitel 4 betrachtet aktuelle und zukünftige Klimadaten und -szenarien. Diesem Aspekt kommt aufgrund der Komplexität der Simulation des Auftretens von Starkwinden eine zentrale Bedeutung zu. Die Wirkungszusammenhänge von Stürmen und Verkehr finden sich in Kapitel 5 wieder. Ein Fazit zum erzielten Sachstand und ein Ausblick auf die weiteren Arbeiten schließen in Kapitel 6 den Bericht ab.

3 Einführung in die Forschungsarbeiten

3.1 Wirkungsketten – Bezug zum Leitfaden der IMA-A

Die Interministerielle Arbeitsgruppe – Anpassung an den Klimawandel – der Bundesregierung (IMA-A) veröffentlichte im Jahr 2017 methodische Empfehlungen zur Durchführung von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen auf regionaler und nationaler Ebene und verweist auf weiterführende Materialien und Informationen.

Zur Durchführung dieser Analysen wird in Buth et al. (2017) empfohlen, Klimawirkungsketten zu erstellen. In einer separaten Studie veröffentlicht das Umweltbundesamt (UBA 2016) in Anlehnung hieran Klimawirkungsketten für 14 Handlungsfelder¹. Die für *Sturmgefahren* relevante Wirkungskette wird im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ beschrieben (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Handlungs- und Themenfelder des IMA-A-Leitfadens und Bezug zur Klimawirkungsanalyse im Schwerpunkt *Sturmgefahren*.

Handlungsfeld	Themenfeld	Betrachtete Klimawirkung
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Analyse der Exposition/Sensitivität gegenüber klimatischer Einflussgrößen zur Ermittlung der potenziellen Betroffenheit von Verkehr und Infrastruktur

Die Notationsform für die Wirkungszusammenhänge der betrachteten Naturgefahren im Themenfeld 1 ist an diese Wirkungsketten angelehnt. Demnach lassen sich die Klimawirkungsketten im Bezug auf *Sturmgefahren* für die Verkehrsinfrastruktur wie in Abbildung 3-1 zusammenfassen.

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ resultieren die Auswirkungen von Starkwinden in einer Einschränkung des Verkehrsablaufs (Behinderung bzw. Verzögerung des Verkehrs sowie Unterbrechungen und Streckensperrungen von Verkehrswegen). Die Auswirkung von Schäden an Fahrzeugen wurde in dieser Studie nicht adressiert. Das Thema *Sturmgefahren* wurde in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks hauptsächlich für Straße und Schiene und hier mit dem Fokus auf Sturmwurf betrachtet. Die Wirkungskette Sturmflut wurde im Bereich der *Hochwassergefahren* adressiert. In Kapitel 4.3 werden extreme Windgeschwindigkeiten in Seegebieten der Nord- und Ostsee untersucht, die potentiell Sturmfluten hervorrufen können.

Die Wirkungskette Schäden durch Windwurf resultiert in den Klimawirkungsketten des UBA in Hindernissen auf Straßen- und Schienenwegen und der damit zusammenhängenden Unfallgefahr. Letztendlich führen diese Wirkungen zu Behinderungen und Verzögerungen sowie zu Unterbrechungen und Streckensperrungen. Um im Schwerpunkt Sturmgefahren die potentielle Gefährdung durch Sturmwurf zu beurteilen, wurde eine Expositionsanalyse durchgeführt. Nähere Informationen hierzu sind dem Kapitel 5.2 zu entnehmen. Als zentrales Ergebnis wurden Übersichtskarten generiert, die mögliche betroffene Streckenabschnitte kennzeichnen.

¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf

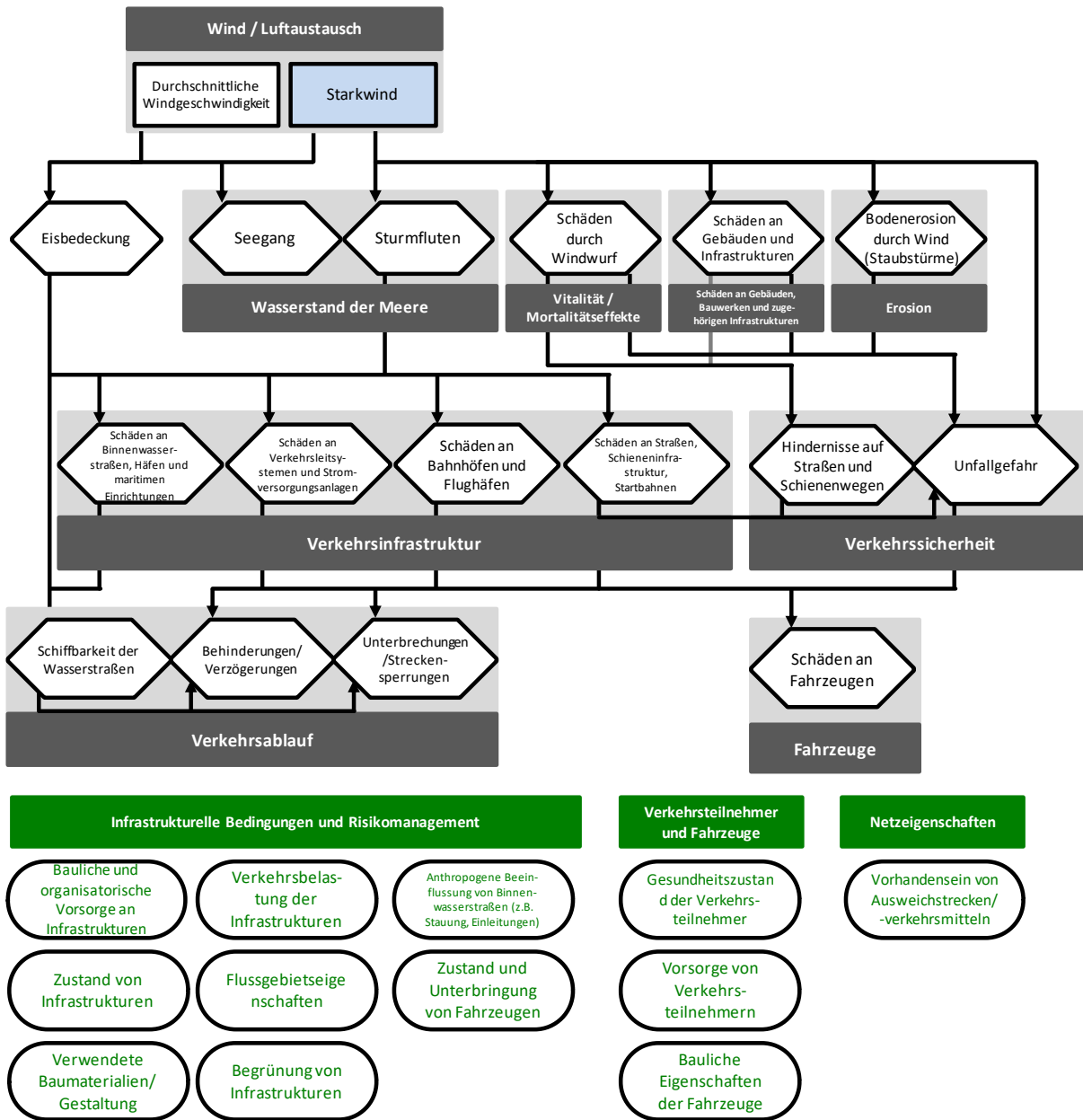


Abbildung 3-1: Allgemeines Schema der Klimawirkungsketten für Starkwinde aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, verändert nach UBA (2016).

Ebenfalls wurden erste Überlegungen zur Sensitivitätsanalyse im Zusammenhang mit der Sturmwurfgefährdung vorgenommen. Hierbei wurde u. a. Schäden an der Schieneninfrastruktur adressiert. In Kapitel 5.3 wird die Problematik der Beschädigung von Oberleitungen durch Sturmwurf beschrieben.

Ein weiterer Wirkungspfad, der im Schwerpunkt *Sturmgefahren* beachtet wurde, ist die direkte Wirkung von Starkwind auf die Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge. Insbesondere für Straßen stellen starke Seitenwinde eine Unfallgefährdung dar. Das Kapitel 5.1.3 fasst die Problematik der Seitenwindgefährdung insbesondere für Lkw zusammen. In Kapitel 5.2.2 wird diesbezüglich exemplarisch auf gängige Anpassungsoptionen hingewiesen.

3.2 Beiträge zur Klimawirkungsanalyse im Themenfeld 1

Der im BMVI-Expertennetzwerk entwickelte methodische Ansatz der Klimawirkungsanalyse bietet einen geeigneten Rahmen, um Naturgefahren und auf sie wirkende klimatische Einflüsse nach einem einheitlichen Vorgehen zu analysieren und zu bewerten.

Ziel der Klimawirkungsanalysen ist es zunächst solche Streckenabschnitte in den Netzen der Verkehrsträger zu identifizieren, die derzeit und zukünftig von Naturgefahren betroffen sein können (Exposition). Im nächsten Schritt sollen Streckenabschnitte identifiziert werden, die aufgrund ihrer Eigenschaften anfällig gegenüber potenziellen Einwirkungen sind (Sensitivität). Schließlich verfolgen die Analysen das Ziel, die Bedeutung (Kritikalität) von Streckenabschnitten aus verkehrlicher und ökologischer Sicht zu bewerten.

3.2.1 Klimawirkung

Die betrachteten Klimawirkungen basieren auf Analysen, die direkt aus Reanalysedatensätzen (COSMO-REA6), einem hochaufgelösten (2,8 km) COSMO-CLM-Lauf und den Klimaprojektionsensembles für den Binnen- und für den Küstenbereich abgeleitet wurden. Da keine spezifischen Wirkungsmodelle oder Auswertemethoden zur Anwendung kamen, ist kein Schema zur technischen Umsetzung der Wirkungskette *Sturmgefahren* erstellt worden.

3.2.2 Expositionsanalyse

Hochwasser, Sturm und Hangrutschungen können den Verkehr auf Schiene und Straße beeinträchtigen. Die Beeinträchtigung beschränkt sich dabei nicht nur auf das meteorologische bzw. (boden-) hydrologische Ereignis selbst. Auch die Beseitigung von Schäden kann erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Die Schadensbilder sind vielfältig und hängen vom spezifischen Zusammenwirken klimatischer (oder hydrologischer) Einflüsse und Objekteigenschaften (Sensitivität aufgrund von Bemessung und Zustand) ab. Die Zeiten, die zu ihrer Beseitigung erforderlich sind, schwanken zwischen wenigen Stunden, z. B. bei der Beseitigung von umgestürzten Bäumen auf Fahrbahnen oder Gleisanlagen, bis Monaten im Fall von Unterspülungen oder anderen gravierenden Schäden am Unterbau einer Trasse. Spezifische, flächendeckende und strukturierte Informationen lagen dem BMVI-Expertennetzwerk weder zu Schäden noch zu den genannten Objekteigenschaften vor. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich daher fast ausschließlich auf das veränderte Auftreten möglicher Gefährdungen durch den zukünftigen Klimawandel und damit einhergehende Verkehrsbeeinträchtigungen sowie mögliche Schäden – d. h. es werden Änderungen in der Exposition beschrieben (Hänsel et al. 2020b).

Aus den in Kapitel 3.1 beschriebenen Wirkungsketten wird ersichtlich, dass der Verkehr und die Infrastruktur in verschiedener Hinsicht gegenüber Stürmen exponiert sein können. Die Exposition der Verkehrsträger wurde in der ersten Phase des Expertennetzwerks aufgrund seiner besonderen Relevanz hauptsächlich im Bezug auf Sturmwurf bearbeitet. Hierbei lag der Fokus auf der Identifizierung des Vorkommens von Vegetation entlang der Bundesschienen- und Bundesfernstraßenwege. Die Methodik und die Ergebnisse der Expositionsanalyse Sturmwurfgefahren werden in Kapitel 5.2 detailliert dargestellt und erläutert.

3.2.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse bezieht sich auf Eigenschaften der Infrastruktur und erfordert Indikatoren, anhand derer sich die Anfälligkeit von Streckenabschnitten wirkungsspezifisch operationalisieren lässt. Bislang beschränken sich die Sensitivitätsanalysen auf die Aspekte Sturmwurf/Schiene sowie das Niedrigwasser/Wasserstraße (Hänsel et al. 2020b).

Die Anfälligkeit der Verkehrsinfrastruktur gegenüber der Klimawirkung Sturm wird in Kapitel 5.3 beschrieben. Der Fokus der Bearbeitung lag dabei auf der Identifizierung von elektrifizierten Schienenstrecken im Zusammenhang mit Sturmwurf.

Elektrifizierte Schienennetze weisen im Gegensatz zu nicht elektrifizierten Strecken zusätzliche Infrastruktur und Bauwerke auf, die bei Sturmwurf beschädigt werden können. Durch die Beschädigung dieser Infrastrukturelemente sind häufig längere Reparaturmaßnahmen notwendig, sodass die Beseitigung der Schäden längere Zeit in Anspruch nehmen kann als auf nicht elektrifizierten Strecken.

3.2.4 Kritikalitätsanalyse

Der Teilschritt der Kritikalitätsanalyse ist in erster Annäherung unabhängig von der betrachteten Naturgefahr zu beurteilen, da die verkehrliche (und ökologische) Bedeutung einzelner Streckenabschnitte untersucht wird. Datengrundlage der Kritikalitätsanalyse sind die Ergebnisse der Bundesverkehrswegeplanung. Dazu zählen auf die Jahre 2010 bzw. 2030 bezogene Ist- bzw. Prognosedaten zu den Verkehrsbelastungen im gegenwärtigen (2010) bzw. zukünftigen (2030) Straßen- bzw. Schienennetz. Für die erste Phase des BMVI-Expertenetzwerks ist der durchschnittliche werktägliche Verkehr (DTVw) ein wesentlicher Indikator in der aktuellen Fassung der Kritikalitätsanalyse für die Bundesfernstraßen (Ingenieurgruppe IVV 2019). Er beschreibt die durchschnittliche Anzahl an Kfz pro Werktag auf Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes. Der Eisenbahnverkehr lässt sich in drei große Bereiche unterteilen, den Schienengüterverkehr, den Schienenpersonenfernverkehr und den Schienenpersonennahverkehr. Zur Bewertung der Kritikalität wurde der Indikator „Anzahl der Züge pro Tag“ herangezogen (Hänsel et al. 2020b). Die wirtschaftliche Bedeutung (Aspekt der Kritikalität in der Klimawirkungsanalyse) einer möglicherweise klimawandelbedingt eingeschränkten Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur hängt u. a. vom Verkehrsaufkommen ab. Die Korridore der transeuropäischen Verkehrsnetze (TEN-V-Korridore) sind für den Güterverkehr auf Schiene, Straße und Wasserstraße prioritar, die Ballungsräume zusätzlich für den Personenverkehr auf Schiene und Straße (Hänsel et al. 2020b).

4 Aktuelle und zukünftige Klimadaten und -szenarien

4.1 Datengrundlage

Für die Simulation des zukünftigen Klimas werden vorwiegend globale und regionale Klimamodelle eingesetzt. Aktuelle globale Klimamodelle (GCMs) setzen sich aus einem allgemeinen Zirkulationsmodell für die Atmosphäre, den Ozean und zusätzliche Module für einzelne Komponenten des Klimasystems zusammen (Roeckner 2003).

Um konkrete Auswirkungen des globalen Klimawandels auf einzelne Regionen bzw. Fragestellungen der Klimafolgenforschung genauer zu untersuchen, reicht die räumliche Auflösung eines GCM zumeist nicht aus. Deshalb werden seit einigen Jahren systematisch regionale Klimasimulationen mit dem sogenannten dynamischen Downscaling durchgeführt (s. Auswerterahmen, Hänsel et al. 2020a). Das Downscaling wird unter der Annahme verwendet, dass das Klima auf lokaler Ebene aus einer Kombination von großräumiger Zirkulation bzw. globaler atmosphärischer Zusammenhänge und den lokalen Bedingungen besteht.

A Verwendete Daten für die Gegenwart

Der Wind setzt sich als vektorielle Größe aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit zusammen und wird an ca. 350 Stationen des DWD gemessen. Die Windgeschwindigkeit wird meist in 10 m Höhe über Grund erfasst, dieser Wert kann allerdings je nach Umgebung eines Standorts variieren.

Da der Wind in der bodennahen Schicht höchst variabel ist und das horizontale Windfeld mitunter starke Schwankungen aufweist, sind Stationsmessungen nur für ein sehr kleines Gebiet um die Stationen repräsentativ. Die Anforderungen zur Erzeugung eines Rasterdatensatzes für Windgeschwindigkeiten und Windrichtung aus Stationsmessungen sind daher hoch. Walter et al. (2006) wendeten ein Zweischrittverfahren zur Interpolation von Windmessdaten an, um einen Winddatensatz auf monatlicher Basis zur Verfügung zu stellen.

Im Rahmen des TRY-Projektes (Test Reference Years) wurde ein Winddatensatz erzeugt, der die Jahre 1995 bis 2012 umfasst (Krähenmann et al. 2018). TRY-Daten fassen dabei auf statistische Weise den charakteristischen Witterungsverlauf eines Jahres zusammen. Hierfür wird Deutschland in mehrere unterschiedlich große Klimaregionen eingeteilt, deren typische klimatische Verhältnisse durch in der Region liegende Stationen repräsentiert werden (siehe Abbildung 4-1). Der Datensatz enthält Daten aus Klimamodellsimulationen, die mit Stationsmessungen regionalisiert wurden. Im ersten Schritt wurden Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM durchgeführt.

Für den TRY-Datensatz wurde COSMO-CLM von außen mittels dynamischem Downscaling von ECMWF ReAnalysen (ERA-Interim) (Berrisford et al. 2009, Dee et al. 2011) angetrieben. ERA-Interim ist ein globaler Reanalyse-Datensatz mit 80 km Gitterweite, der von 1979 bis 2019 verfügbar ist. Das COSMO-CLM ist ein nicht-hydrostatisches regionales Klimamodell, das für Langzeitsimulationen optimiert ist und seit über 10 Jahren stetig weiterentwickelt wurde (Rockel et al. 2008). Es kann mit verschiedenen Gitterweiten von 50 km bis zu 1 km verwendet werden. Das Modell prognostiziert und diagnostiziert die verschiedensten Variablen und gibt diese in einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Stunde aus. Auch die Windgeschwindigkeiten werden vom Modell in der gewählten zeitlichen Auflösung ausgegeben. Dabei wird der sogenannte Mittelwind zum jeweiligen Zeitpunkt als instantaner Wert berechnet.

Windböen werden im COSMO-CLM nicht direkt prognostiziert, sondern über eine empirische Formel diagnostisch berechnet. Sie basiert auf der turbulenten kinetischen Energie in der bodennahen Grenzschicht

der Atmosphäre und enthält die Schubspannungsgeschwindigkeit als Größe. Damit liegt der Wert der Windböen immer über dem Mittelwind, sodass der sogenannte Böenfaktor² stets > 1 ist. Je nach Gelände kann er für niedrige Geschwindigkeiten < 10 m/s den Wert 5 erreichen. Für hohe Windgeschwindigkeiten nähert er sich einem Wertebereich von 1,2-1,5 an (Born et al. 2012).

Weitere Informationen zum COSMO-CLM sind im Auswerterahmen (Hänsel et al. 2020a), im Schwerpunkt *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) sowie unter <http://www2.cosmo-model.org/> und <http://www.clim-community.eu/> zu finden.

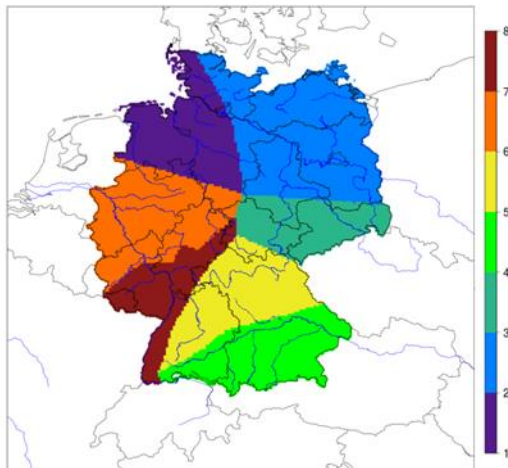


Abbildung 4-1: Einteilung von Deutschland in sieben verschiedene Klimaregionen (TRY-Projekt).

Regionale Reanalysen haben typischerweise eine Auflösung von einigen Kilometern und stündliche Werte. Sie werden über deren Rand von globalen Reanalysen angetrieben und erhöhen deren räumliche Auflösung. Im, durch den DWD geförderten, Hans-Ertel-Zentrum wurden hochauflösende, mehrjährige Reanalysen mit einer Gitterweite von 6 km unter Verwendung des COSMO-Modells erstellt (COSMO-REA6, Bollmeyer et al. 2015). Der DWD hat die Fortsetzung der Produktion für Europa übernommen. Kaiser-Weiss et al. (2015) und Borsche et al. (2016) zeigten, dass die COSMO-REA6 Reanalysefelder die gemessene Variabilität der Windgeschwindigkeiten auf 10 m und 100 m recht gut wiedergeben. Ausgewählte Daten für die Jahre 1995 bis 2015 sind über das Climate Data Center des DWD frei verfügbar. Die COSMO-REA6 Daten wurden im BMVI-Expertennetzwerk für die Bias-Adjustierung von Klimamodellenssembledaten verwendet.

B Verwendete Daten für die Zukunft

Während globale und regionale Klimamodelle in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht haben, besteht weiterhin das Dilemma der geringen Prognostizierbarkeit zukünftiger Emissionsszenarien. Um daraus resultierende Unsicherheiten zu adressieren, formulieren die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Weltklimarat) unterschiedliche Szenarien der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung der Welt als Grundlage für sich teils stark unterscheidende Emissionsszenarien (van Vuuren et al. 2011). Im BMVI-Expertennetzwerk werden Klimaszenarien der folgenden drei Szenarien verwendet: Das *Klimaschutzszenario*, das *moderate Szenario* und das *Weiter-nie-bisher-Szenario*.

Für das BMVI-Expertennetzwerk wurden zusätzlich Daten für Windböen aus einer hochaufgelösten, konvektionserlaubenden Klimaprojektion mit dem COSMO-CLM für den *Bezugszeitraum* von 1971–2100 unter dem *Weiter-nie-bisher-Szenario* zur Verfügung gestellt. Diese Simulation hat eine Gitterweite von 2,8 km, wurde jedoch nicht bias-adjustiert, da in dieser hohen Auflösung keine adäquaten Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen.

² Der Böenfaktor (engl. gust factor) ist definiert als der Quotient zwischen Böenwindgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit.

In Abbildung 4-2 ist das Modellgebiet der COSMO-CLM Simulationen für das BMVI-Expertennetzwerk sowie die Geländehöhe in m ü NN mit der Gitterweite von 2,8 km dargestellt. Ganz Deutschland ist darin enthalten, aber auch Teile der umliegenden Länder sowie von Nord- und Ostsee. Dadurch können Randeffekte für das Gebiet der Bundesrepublik fast ganz ausgeschlossen werden.

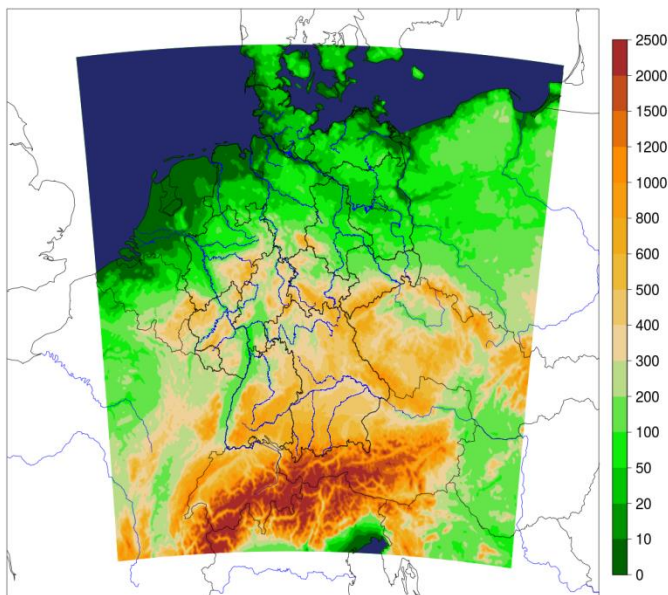


Abbildung 4-2: Modellgebiet und Orographie in m ü NN des COSMO-CLM für hochauflösende Simulationen (2,8 km).

4.2 Starkwind über dem Binnenland

Für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels und von Extremwetterereignissen auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur in Deutschland werden verschiedene Klimavariablen benötigt, aus denen dann Kennwerte auf monatlicher, jahreszeitlicher und/oder jährlicher Basis berechnet werden.

Eine wesentliche Klimawirkung auf die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ist das Auftreten von sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Diese können sowohl auf synoptischer bzw. mesoskaliger Skala auftreten, wie zum Beispiel bei Stürmen, als auch auf lokaler Ebene im Zusammenhang mit Gewittern oder hochsommerlichen Konvergenzonen. Während mesoskalige Stürme auch von weniger fein aufgelösten Modellen gut simuliert werden können, ist das lokale Auftreten von Starkwinden bei Gewittern immer noch sehr begrenzt simulierbar. Das Ziel ist es, durch die explizite Berechnung von Konvektion bei hochaufgelösten Regionalmodellen zu besseren Ergebnissen zu gelangen.

Eine weitere Erschwernis auf dem Weg zu besseren Simulationsergebnissen für Starkwindereignisse ist das Fehlen eines belastbaren Beobachtungsdatensatzes für Windgeschwindigkeiten.

Für die Erfassung der Häufigkeit von Starkwindereignissen eignet sich der TRY-Datensatz nur bedingt, da der Mittelwind über Land selten hohe Windgeschwindigkeiten enthält. Dafür werden die Daten zu Windböen aus den konvektionserlaubenden Simulationen mit 2,8 km Gitterweite verwendet, wobei berücksichtigt werden muss, dass es sich dabei nur um eine Realisierung einer Klimaprojektion handelt und Windböen mit einer empirischen Formel aus den mittleren Windverhältnissen abgeleitet werden.

4.2.1 Kenntage (tageswertbasierte Klimaindizes)

Für die Bewertung der Klimawirkung auf die Verkehrsinfrastruktur ist es besonders hilfreich, mit sogenannten Kennzahlen (oder Klimaindizes) zu arbeiten. Sie fassen eine oder mehrere Variablen in anschaulicher Weise zusammen und stellen klimatologische Eigenschaften dar. Ein bekanntes Beispiel ist die Anzahl der Sommertage pro Jahr. Bedingung dafür ist die Überschreitung der 25° C-Marke. Besonders viele Tage wurden beispielsweise im Jahr 2018 in Deutschland verzeichnet.

Auch für Windgeschwindigkeiten gibt es entsprechende Kennzahlen, allerdings sind diese gegenüber anderen Variablen nicht so zahlreich. Die im BMVI-Expertennetzwerk verwendeten Kennzahlen für Windgeschwindigkeiten an Land sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Übersicht über windbasierte Kennwerte, die im BMVI-Expertennetzwerk verwendet werden.

Bezeichnung	Definition	Einheit
Mittlere Windgeschwindigkeit	30-Jahresmittel	m/s
Starkwind	98. Perzentil des Windes	m/s
Beaufort-8	Anzahl der Tage mit Überschreitung des Tagesmittels von 17,2 m/s	1
Beaufort-10	Anzahl der Tage mit Überschreitung des Tagesmittels von 24,5 m/s	1

Ein wichtiger Parameter für die Beschreibung der Windverhältnisse in Deutschland ist die mittlere Windgeschwindigkeit. Die Mittelung von Windgeschwindigkeiten kann auf vielen Skalen erfolgen. Im BMVI-Expertennetzwerk werden die Modelldaten aus dem COSMO-CLM von Stundenwerten auf Tageswerte gemittelt. Von dieser Basis ausgehend, können dann weitere Mittelwerte berechnet werden, so z. B. das 30-Jahresmittel. Damit lassen sich insbesondere verschiedene Zeitscheiben unmittelbar miteinander vergleichen. Aus den Ergebnissen lässt sich dann ermitteln, in welchen Regionen generell höhere Windgeschwindigkeiten auftreten und wie sich die geographische Verteilung der Windgeschwindigkeiten in der Zukunft ändern könnte.

Starkwinde werden im BMVI-Expertennetzwerk definiert über die Quantile der Verteilung. Auf Basis der Tagesdaten wird der Wert des 98. Perzentils der Häufigkeitsverteilung des Windes und der Windböen ermittelt. Dadurch kann analysiert werden, in welchen Regionen besonders hohe Windgeschwindigkeiten vermehrt auftreten. Ähnliche Aussagen kann man mit der Angabe Beaufort-8 bzw. Beaufort-10 machen. Der Wert, der dazu angegeben wird, zeigt an, wie oft die dazugehörige Windgeschwindigkeit im betrachteten Zeitraum des Datensatzes überschritten wird. Ab einer Windstärke von Beaufort-8 können bereits Zweige und Äste von Bäumen abbrechen (DWD 2020), was unter Umständen Auswirkungen auf die Verkehrswege haben kann. Daher wurde dieser Wert gewählt, obgleich die Festlegung der Beaufort-Skala unter empirischen Gesichtspunkten gemacht wurde (Garbett 2007). Aussagen hieraus zur Häufigkeit von hohen Windgeschwindigkeiten sind mit größter Vorsicht zu behandeln, da diese mit Hilfe von absoluten Schwellwerten und nicht mit Hilfe von Quantilen ermittelt wurden. Die Simulationen mit COSMO-CLM wurden nicht bias-adjustiert und sind damit weiterhin fehlerbehaftet, gerade auch was die absolute Höhe der Windgeschwindigkeit angeht. Jedoch gibt es keine anderen Datenquellen, die flächenhaft über einen langen Zeitraum Windböendaten liefern.

4.2.2 Ergebnisse aus windbasierten Analysen von COSMO-CLM Simulationen für 1971–2100

Die im BMVI-Expertennetzwerk bereitgestellten Daten des Klimamodellensembles auf 5 km Gitterweite wurden auch für Wind und Sturmgefahren ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Analysen sind im Endbericht des Schwerpunkts *Szenarienbildung* zu finden (Brien et al. 2020).

Dagegen sind im Folgenden die Ergebnisse des einen COSMO-CLM Modelllaufs auf konvektionserlaubender Skala (2,8 km) gezeigt. In Abbildung 4-3 ist das 30-Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten für den Bezugszeitraum in 2,8 km Gitterweite für Deutschland gezeigt. Es ist die feineräumigere Verteilung der Windgeschwindigkeiten zu erkennen im Vergleich zu den Windfeldern der Ensembledaten (s. Endbericht SP-101), allerdings basiert Abbildung 4-3 nur auf einem einzigen Modelllauf des COSMO-CLM. Die höchsten Windgeschwindigkeiten sind im Umfeld der Nordseeküste zu finden. Sie erreichen bis zu 8 m/s. Weite Teile

von Norddeutschland bis in die Mitte Deutschland weisen Windgeschwindigkeiten von 5 bis 7 m/s auf. Im Süden liegen die Werte noch darunter.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für das 98. Perzentils des Windes und der Windböen in Abbildung 4-4 ist zunächst eine ähnliche räumliche Verteilung wie schon in Abbildung 4-3 zu erkennen. Für die Analyse der Änderungen in der Zukunft ergibt sich ein ähnliches Bild wie schon für die Ensembleergebnisse: Wesentliche Änderungen der Windgeschwindigkeiten in der Zukunft sind nicht zu identifizieren. In den Abbildungen der Differenzen des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeiten (Mitte und rechts) sind alle Änderungen im Bereich von $\pm 8\%$.

Beim 98. Perzentil der Windböen sind ebenfalls nur Änderungen bis zu 8 % zu verzeichnen. Im Süden Deutschlands sind auch Gebiete mit einer Zunahme der Windböen zu erkennen, während im Norden Deutschlands generell von einer Abnahme des 98. Perzentils zu sprechen ist. Diese ist aber kleiner als -5 %. Auch für andere Perzentile der extremen Windgeschwindigkeiten sind Änderungen sehr klein und übersteigen das $\pm 5\%$ Level nicht.

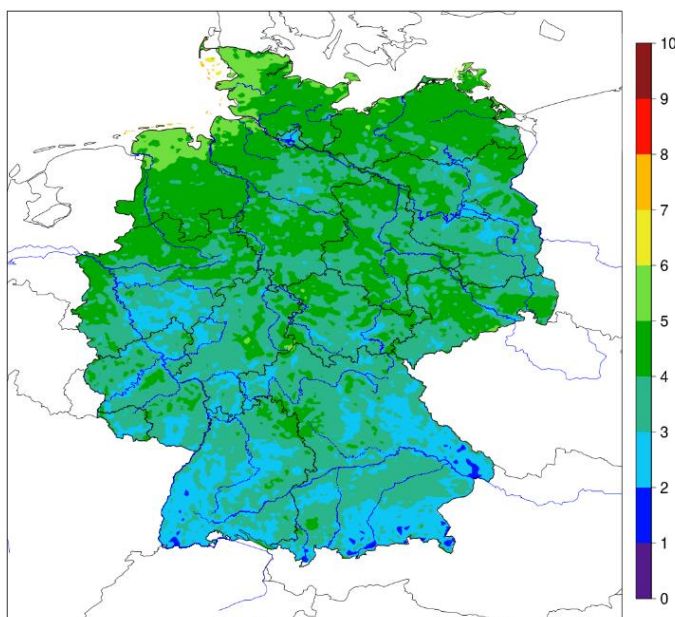


Abbildung 4-3: 30-Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten in m/s der historischen Simulation mit COSMO-CLM für den *Bezugszeitraum*.

Schwellwertüberschreitungen leisten im BMVI-Expertennetzwerk einen wichtigen Beitrag zur Expositionsanalyse, so auch für Sturmgefährdungen. Es wurden zwei Schwellwerte für Extremwindereignisse definiert, der Beaufort-8 und Beaufort-10 Schwellwert (siehe Tabelle 4-1). In Abbildung 4-5 ist die relative Häufigkeit von Beaufort-8 Überschreitungen und die relativen Änderungen in der Zukunft dargestellt. Insbesondere an der Nordseeküste und entlang der Ostseeküste treten an bis zu 20 % aller Tage im betrachteten Zeitraum Windböengeschwindigkeiten oberhalb von 17,2 m/s (Beaufort-8) auf. Auch auf exponierten Mittelgebirgszügen (Harz, Erzgebirge, Rhön und Schwarzwald) werden ähnliche Überschreitungshäufigkeiten erreicht. In Teilen Norddeutschlands beträgt die Schwellwertüberschreitung bis zu 10 % aller Tage. Im übrigen Land liegen die Überschreitungen deutlich darunter, vor allem in bewaldeten Gebieten. Windböengeschwindigkeiten von Beaufort-10 treten deutlich seltener auf. An den Küsten und auf exponierten Gipfeln der Mittelgebirge werden Werte von über 0,05 % erreicht (entspricht etwa 18 Tage pro Jahr), im übrigen Gebiet liegen die Werte noch darunter (nicht gezeigt).

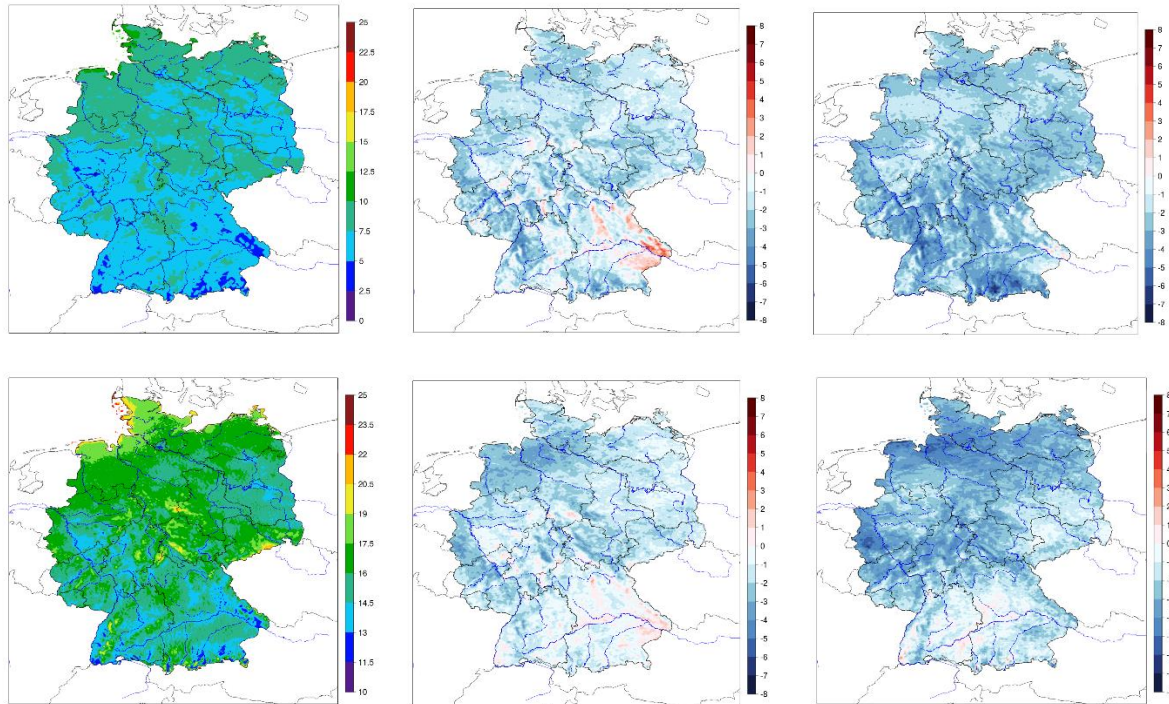


Abbildung 4-4: 98. Perzentil der mittleren Windgeschwindigkeit (oben) und der Windböen (unten) in m/s simuliert mit COSMO-CLM für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 (links), sowie die Änderungen des 98. Perzentils in der Zukunft in Prozent [%] für den Zeitraum *nahe Zukunft* 2031–2060 (Mitte) und *ferne Zukunft* 2071–2100 (rechts).

Die Änderungen in der *nahen* und *fernen Zukunft* sind für Beaufort-8 überwiegend negativ. In der *nahen Zukunft* überschreiten die Änderungen nicht den Bereich von ± 40 %. In der *fernen Zukunft* gibt es vereinzelt stärkere Zunahmen von Beaufort-8. In diesen Gebieten ist allerdings das Auftreten von hohen Windböengeschwindigkeiten generell sehr niedrig, sodass große relative Änderungen keine besonders große Aussagekraft haben. Ähnliche Ergebnisse liefert auch die Analyse der Schwellwertüberschreitung von Beaufort-10. Hier sind die Änderungsraten sehr viel höher, haben aber angesichts des sehr geringen Auftretens dieser hohen Windböengeschwindigkeiten so gut wie keine Aussagekraft, da die Stichprobe zu klein ist für eine profunde statistische Auswertung. Sie werden daher hier nicht präsentiert.

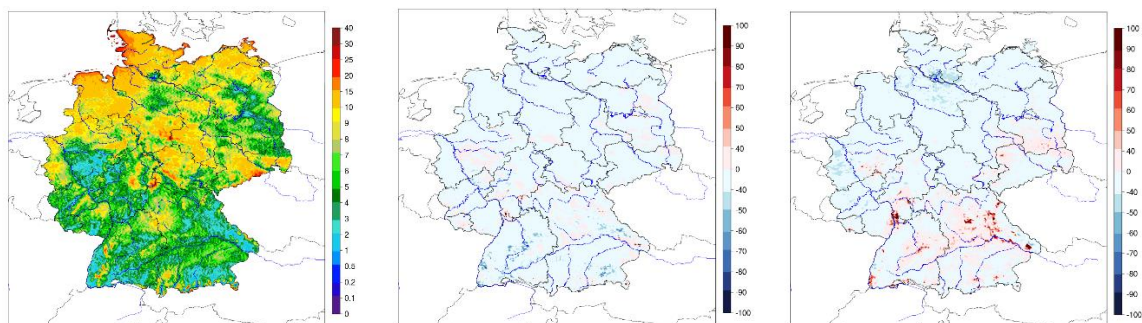


Abbildung 4-5: Relative Häufigkeit in Prozent [%] von Tagen mit Windböengeschwindigkeiten \geq Bft 8 im *Bezugszeitraum* (links) und Änderung der Häufigkeit in Prozent [%] für die *nahe Zukunft* 2031–2060 (Mitte) und *ferne Zukunft* 2071–2100 (rechts) aus COSMO-CLM Simulationen mit 2,8 km Gitterweite.

Auch für die Analyse der Windböen aus COSMO-CLM Simulationen wurde Deutschland in die verschiedenen TRY-Regionen eingeteilt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-6 als einzelne Zeitreihen für 1971–2100 präsentiert. Die Region Nordseeküste verzeichnet die höchsten Windgeschwindigkeiten mit über

17 m/s und einer kontinuierlichen Abnahme bis Ende des 21. Jahrhunderts. Im Vergleich mit dem Mittelwert des *Bezugszeitraums* nehmen die Windgeschwindigkeiten für diese Region um etwa 3 % ab. Alle anderen Regionen verzeichnen niedrigere Windgeschwindigkeiten. Das Alpenvorland (Region 4) weist die niedrigsten Werte auf. Süddeutschland und Südwestdeutschland (Regionen 5 und 7) zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf und sind daher kaum voneinander zu unterscheiden. Ostdeutschland (Region 3) und das Alpenvorland (Region 4) verzeichnen nur eine minimale Änderung der Werte zum Ende des Jahrhunderts. Während in Ostdeutschland die mittleren Windgeschwindigkeiten im Verlauf abnehmen und bis 2100 wieder leicht ansteigen, verändern sich die mittleren Windgeschwindigkeiten im Alpenvorland über die ganze Zeitserie hinweg nicht.

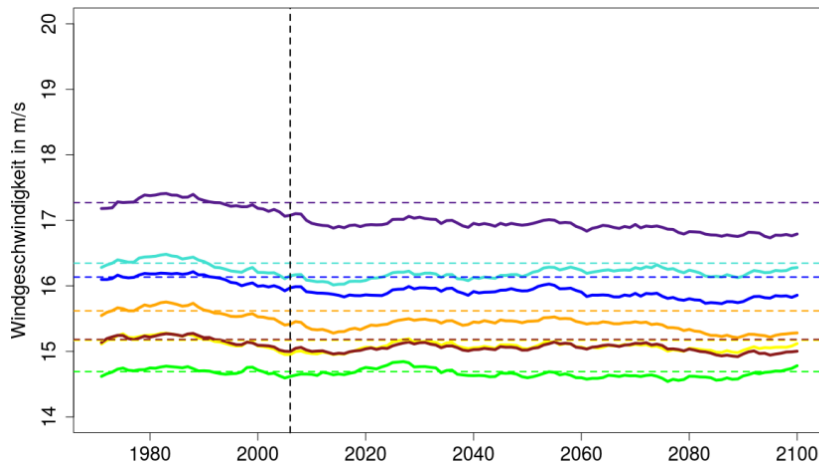


Abbildung 4-6: Zeitreihen der Windböen in m/s aus COSMO-CLM Simulationen von 1971–2100 für einzelne Regionen in Deutschland (TRY-Projekt, farblich markiert in der Abbildung oben rechts). Die Daten sind mit einem 30-jährigen gleitenden Mittel geglättet. Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen den Mittelwert des historischen Zeitraums von 1971–2005 (markiert durch die vertikale gestrichelte Linie).

In Abbildung 4-7 ist das 98. Perzentil der Windgeschwindigkeiten und Windböen für einzelne Jahreszeiten und für die verschiedenen Regionen im *Bezugszeitraum* gezeigt. Wie schon in der vorhergehenden Abbildung zu sehen ist, sind die Windgeschwindigkeiten und auch die Windböen in der Nordseeregion am höchsten. Dies gilt für alle Jahreszeiten. Bei den Windgeschwindigkeiten ist der Unterschied zu den übrigen Regionen deutlicher als bei den Windböen. Im Mittel liegt der Wind in der Nordseeregion etwa 20–30 % höher als in den südlichen Regionen 4–7. Bei den Windböen beträgt der Wert nur etwa 10–15 %. Das Maximum beider Variablen ist im Winter (DJF) in allen Regionen, das Minimum im Sommer (JJA). Die Regionen Ostseeküste und Ostdeutschland haben ähnliche jahreszeitliche Windgeschwindigkeiten. Noch ähnlicher sind sich die Regionen Süddeutschland und Südwestdeutschland.

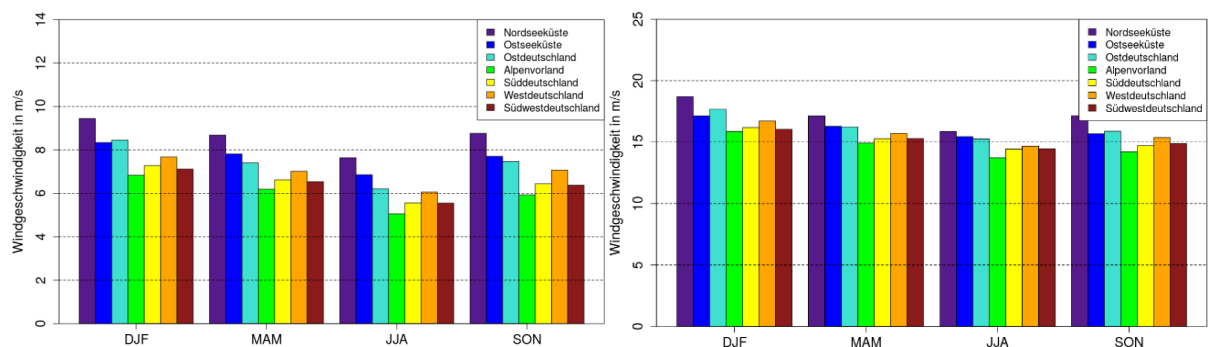


Abbildung 4-7: 98. Perzentil der jahreszeitlichen Windgeschwindigkeiten in m/s (links) und der jahreszeitlichen Windböen in m/s (rechts) als Mittel über sieben Regionen in Deutschland aus der COSMO-CLM Simulation mit 2,8 km Gitterweite für den *Bezugszeitraum*.

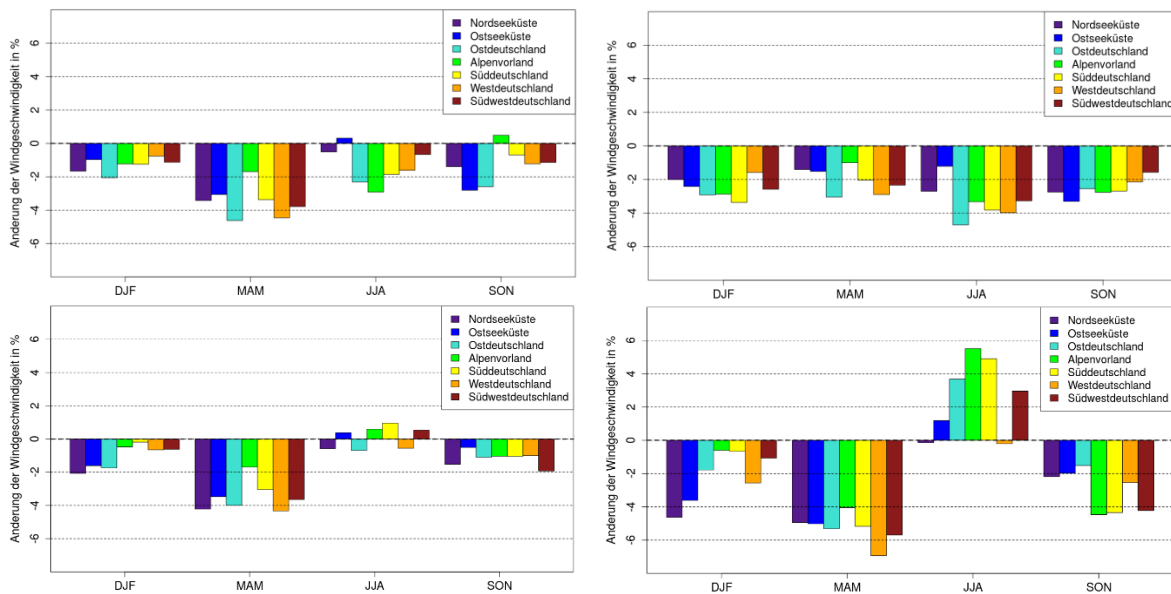


Abbildung 4-8: Mittlere jahreszeitliche Änderung des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeiten (oben) und der Windböen (unten) in Prozent [%] für die *nahe Zukunft* (links) und die *ferne Zukunft* (rechts) für sieben Regionen in Deutschland aus der COSMO-CLM Simulation mit 2,8 km Gitterweite.

Betrachtet man die Änderungen der Windgeschwindigkeiten über alle Jahreszeiten in der Zukunft (Abbildung 4-8 oben), so erkennt man in den meisten Fällen eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten, wie schon in den vorigen Abbildungen deutlich wurde. Die maximalen Änderungen der Windgeschwindigkeiten von ca. -4 % liegen in der *nahen Zukunft* eher im Frühling und in der *fernen Zukunft* eher im Sommer. Die Änderungen der Windböen sind im Sommer in der *fernen Zukunft* allerdings deutlich positiv mit über 5 % im Alpenvorland. Positive Änderungen der Windböen liegen auch für die Ostseeküste, Ostdeutschland, Süddeutschland und Südwestdeutschland vor. Nur an der Nordsee und in Westdeutschland liegen die Werte nahe bei null. In der *nahen Zukunft* bewegen sich dagegen die sommerlichen Änderungen der Windböen im Bereich von ± 1 %. In den anderen Jahreszeiten sind die Änderungen der Windböen dagegen im Mittel durchweg negativ. Besonders groß sind die Änderungen in der *fernen Zukunft* im Frühling mit bis zu -6 %.

Generell sind also die Änderungen der Windgeschwindigkeiten in der *fernen Zukunft* größer oder gleich groß wie in der *nahen Zukunft* und bewegen sich im Bereich von -1 % bis -4 %. Bei den Windböen ist eine größere Variabilität der Ergebnisse zu verzeichnen, sowohl in den Jahreszeiten als auch in beiden Zeitperioden.

Sowohl die mittlere Windgeschwindigkeit als auch das 98. Perzentil des Windes weisen eine deutliche Höhenabhängigkeit auf. Gezeigt sind in Abbildung 4-9 die gemittelten Windgeschwindigkeiten, sortiert nach Geländehöhe über NN. Enthalten sind in beiden Grafiken sowohl Daten der 2,8 km Simulationen (Evaluationslauf (Eval) und Historischer Lauf (Hist)), als auch Daten der beiden antreibenden Simulationen mit 12 km Gitterweite (ERA-Interim/ERA-40–COSMO-CLM sowie MIROC5–COSMO-CLM). Zusätzlich ist in schwarz auch die Höhenabhängigkeit der COSMO-REA6 Daten eingezeichnet. Es zeigt sich, dass alle Simulationen eine ähnliche Höhenabhängigkeit bis etwa 600 m ü NN aufweisen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten sind auf Meeresebene zu verzeichnen, was aufgrund der geographischen Verteilung in Deutschland für die Nord- und Ostseeküste sowie weite Teile Norddeutschlands bis zu den Mittelgebirgen zutrifft. Bei den 12 km Simulationen und bei COSMO-REA6 nehmen die Windgeschwindigkeiten mit größerer Höhe weiter ab, während bei den 2,8 km COSMO-CLM Daten das Minimum bei 1.150 m Höhe erreicht und die Werte danach wieder ansteigen bis auf das Niveau der Windgeschwindigkeiten auf Meeresebene. Bei den gröber aufgelösten Simulationen gibt es auf dem Gebiet Deutschlands keine Modellpunkte, die auf 2.200 m Höhe liegen, daher sind dafür keine Punkte in der Grafik eingezeichnet. Generell zeigen die

Eval-Simulationen, die mit den Reanalysen ERA40/ERA-Interim angetrieben sind, höhere Windgeschwindigkeiten, unabhängig von der Höhenlage. Die Änderung in der nahen Zukunft ist leicht negativ, ebenfalls unabhängig von der Höhenlage.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Wind in Deutschland keinen und oder nur sehr geringen Änderungen in der Zukunft unterliegt. Analysen auf geographischer (lokal, regional, orographisch) und temporaler (Jahre, Jahreszeiten und Monate) Ebene verfestigen dieses Bild. Der Wind weist eine hohe dekadische Variabilität auf, was dazu führt, dass Analysen für einen bestimmten Zeitraum nicht unbedingt auf andere Zeiträume übertragbar sind. Dies ist bei den hier gezeigten Analysen zu berücksichtigen.

Die COSMO-CLM Simulation zeigt insgesamt eher abnehmende Windgeschwindigkeiten für die Zukunft. Ein Vergleich mit den Klimamodellenssembledaten auf 5 km zeigt, dass die Ergebnisse der COSMO-CLM Simulation im Rahmen der Schwankungsbreite liegt. Manche Modelle des Ensembles simulieren aber auch eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten. Allerdings deutet der Median des Ensembles insbesondere für den Sommer eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeiten und des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeiten an (*Szenarienbildung*, Brien et al. 2020). Die Abnahme ist besonders deutlich für den Süden Deutschlands. Allerdings bewegen sich alle Änderungen – im Ensemble wie auch bei der COSMO-CLM Simulation – im Rahmen von $\pm 8\%$. Im Vergleich mit anderen Variablen (Temperatur, Niederschlag) sind die Auswirkungen des Klimawandels für den Wind also verhältnismäßig klein.

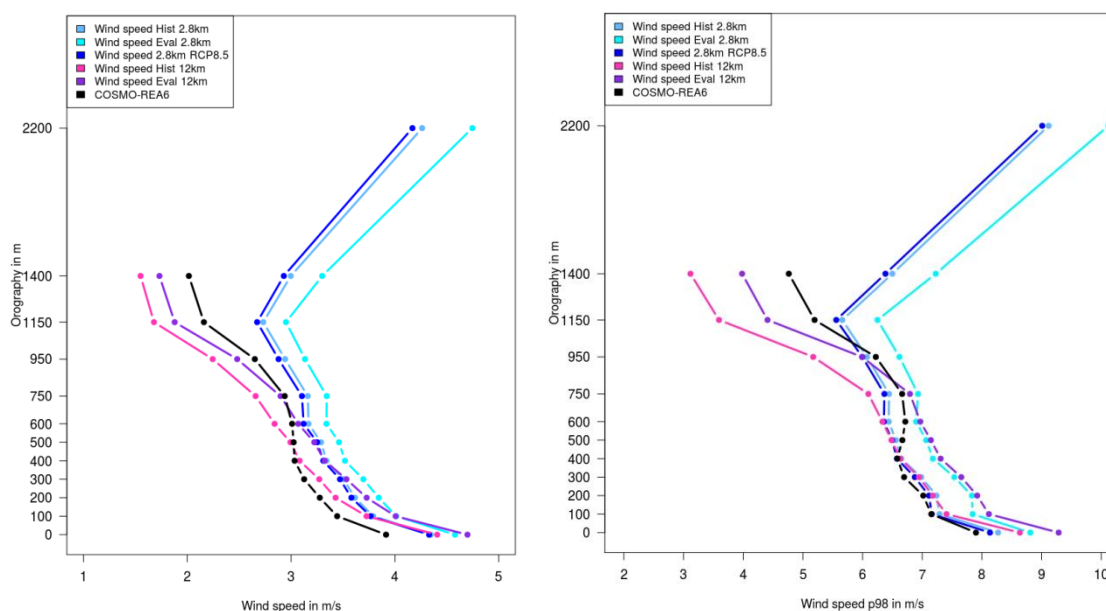


Abbildung 4-9: Nach Höhenstufen gemittelte 30-Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (links) und des 98. Perzentils (rechts) in m/s aus COSMO-CLM Simulationen mit 12 km und 2,8 km Gitterweite (historischer Lauf (Hist) und Evaluierungslauf (Eval)) für den *Bezugszeitraum* und die *nahe Zukunft* im *Weiter-wie-bisher-Szenario* und aus COSMO-REA6 mit 6 km Gitterweite. Als Grundlage für die Einsortierung nach Höhenstufen wurde die entsprechende Orographie des jeweiligen Datensatzes verwendet und die dazugehörigen Gitterpunkte gemittelt.

4.3 Extremwinde über See und potentielle Sturmfluten

Umfangreiche Untersuchungen zu möglichen künftigen Änderungen von Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen über der Nord- und Ostsee wurden im Bericht M104a-4 abgehandelt (Ganske 2019a). Der Bericht enthält Auswertungen für alle verfügbaren Realisierungen der drei Szenarien *Weiter-wie-bisher*, *moderat* und *Klimaschutz*, die mit den Ozean-Atmosphäre-Modellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 durchgeführt wurden (vgl. Tabelle 9-1).

An dieser Stelle werden in erster Linie Ergebnisse für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* präsentiert. Darüber hinaus liegt der Fokus auf der Entwicklung extremer Windgeschwindigkeiten, die u. a. für den Küstenschutz Relevanz haben. Da beide Modelle die landläufig mit Stürmen assoziierten Windgeschwindigkeiten erheblich unterschätzen (M104a-2, Ganske 2019b), sind realistische Sturmschwellwerte – etwa auf Basis der Beaufortskala – nicht geeignet, um Sturmhäufigkeiten aus den Datensätzen abzuleiten. Stattdessen werden hier Modellwindgeschwindigkeiten betrachtet, die das 98. Perzentil der Geschwindigkeitsverteilungen erreichen oder überschreiten. Auch im Rahmen der Analyse der atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee wird das 98. Perzentil verwendet, allerdings als Klassengrenze zwischen Stürmen und schweren Stürmen (Kapitel 4.3.2). Im klimatologischen Jahresmittel führen Stürme an etwa 7 Tagen ($7/365 \approx 2\%$) zu Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste (S. Müller-Navarra, pers. Mitteilung). Daher scheint das 98. Perzentil als Untergrenze für extreme Windgeschwindigkeiten plausibel. Es sind jedoch nicht notwendigerweise alle Sturmfluten verursachenden Stürme der 2 % Fraktion der höchsten Windgeschwindigkeitsverteilung zuzurechnen.

Die Verwendung des 98. Perzentils ist ein pragmatischer Ansatz für die nachstehende Untersuchung von Änderungen im rechten Rand regionaler Windgeschwindigkeitsverteilungen in Nord- und Ostseegebieten im Rahmen des Klimawandels. Natürlich unterscheiden sich die Gebiete sturmklimatologisch; die tatsächlichen (gegenwärtigen) Sturmhäufigkeiten und -intensitäten sind jedoch nicht hinreichend bekannt. Während die Beaufortskala global gültige Schwellwerte für Windstärken definiert, stellen die regional verschiedenen Schwellwertgeschwindigkeiten des 98. Perzentils offensichtlich kein einheitliches Intensitätsmaß dar und lassen gleichzeitig keine regionalen Häufigkeitsunterschiede zu. Deshalb verbietet es sich, die mitgeteilten Ergebnisse als Sturmhäufigkeiten und Sturmintensitäten zu interpretieren.

4.3.1 Windgeschwindigkeit in Nord- und Ostseeregionen

Über der Nord- und Ostsee wurden Extremwindgeschwindigkeiten (als Sturmproxy) für sieben Seegebiete (Abbildung 4-10) anhand verschiedener Projektionen zweier gekoppelter Atmosphäre-Ozean-Modelle untersucht (Ganske 2019a). Dazu wurde die 2 %-Fraktion der höchsten Windgeschwindigkeiten der regionalen Geschwindigkeitsverteilungen im *Bezugszeitraum* als Extremwind definiert. Detaillierte Ergebnisse werden hier zu den Analysen der 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* vorgestellt.

Für die Nord- und Ostseeregionen wurden die stündlichen Geschwindigkeitsbeträge der lokalen Windvektoren über die zur jeweiligen Region gehörigen Modellgitterpunkte gemittelt. Die räumliche Mittelung wurde für alle Stundenwerte im Zeitraum 1961–2009 durchgeführt. Aus jährlichen empirischen Häufigkeitsverteilungen wurden die zum 98. Perzentil gehörige Geschwindigkeit (P98-Windgeschwindigkeit) für jedes Jahr abgeleitet, um deren Entwicklung im Gesamtzeitraum zu beschreiben.

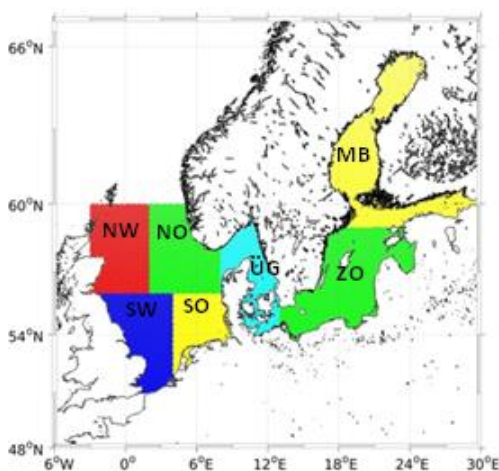


Abbildung 4-10: Teilgebiete der Nordsee (NW = Nord-West, NO = NordOst, SW = SüdWest, SO = SüdOst) und Ostsee (ÜG = Übergangsgebiet, ZO = Zentrale Ostsee, MB = Meerbusen), für die regionale Mittelwerte bestimmt wurden.

Alle Zeitreihen zeichnen sich durch eine erhebliche zwischenjährliche Variabilität aus, sodass sich die für den Gesamtzeitraum berechneten linearen Trends in vielen Fällen als nicht signifikant erwiesen. Obgleich die P98-Geschwindigkeiten in allen Regionen tendenziell ansteigen, ergaben sich mehrheitlich signifikante Trends lediglich für die südöstliche Nordsee (SO, 4 von 8) sowie für die zentrale (ZO, 5 von 8) und nördliche Ostsee (MB, 7 von 8). Nur 25 % der Zeitserien (alle Regionen) zeigten negative Tendenzen, die sich in nur 2 Fällen als signifikant erwiesen (Ganske 2019a).

Um extreme stündliche Windgeschwindigkeiten auf klimatologischen Zeitskalen zu vergleichen, wurden anstatt jährlicher P98-Geschwindigkeiten solche für die 30-jährigen Zeitscheiben 1971–2000 (Bezugszeitraum), 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*) betrachtet (Abbildung 4-11). Die Änderungen der klimatologischen Geschwindigkeiten in der fernen Zukunft belegen die aus der Zeitreihenanalyse abgeleiteten Erkenntnisse. Außer in der nördlichen Nordsee (NO, NW) nehmen die klimatologischen Geschwindigkeiten zu. Die Änderungen sind jedoch häufig so gering, dass sie sich nicht signifikant von der natürlichen Variabilität abheben. Dies gilt erst recht für Änderungen der klimatologischen P98-Geschwindigkeiten in der nahen Zukunft sowie für analog durchgeführte Analysen von Projektionen der gleichen Modelle für das moderate und das Klimaschutzszenario (vgl. Ganske 2019a).

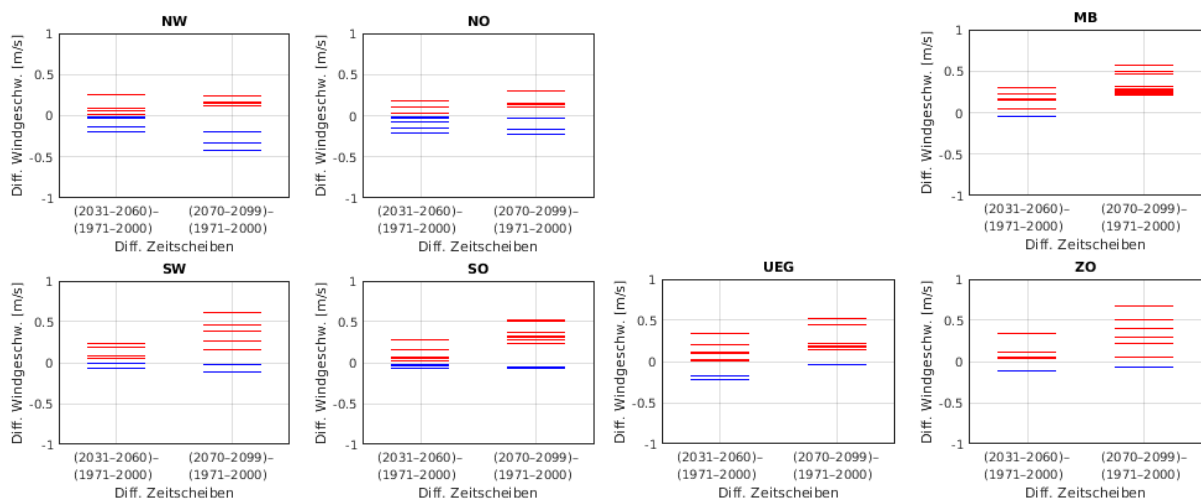


Abbildung 4-12: Abweichung der stündlichen regionalen P98-Windgeschwindigkeit für die nordwestliche (NW), nordöstliche (NO), südwestliche (SW) und südöstliche Nordsee (SO), die Meerbusen (MB) und die zentrale Ostsee (ZO) sowie das Übergangsgebiet (UEG) in der *nahen* (links) und *fernen Zukunft* (rechts) von derjenigen im *Bezugszeitraum* (1971–2000). Ausgewertet wurden 8 Realisierungen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* mit den Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Positive Differenzen sind in rot und negative in blau dargestellt.

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

Die klimatologischen relativen Häufigkeiten von Extremwinden in der *nahen* und *fernen Zukunft* steigen in allen 7 Seegebieten mehrheitlich an (Abbildung 4-13). Signifikante Anstiege ergaben sich für die *ferne Zukunft* in der südöstlichen Nordsee (SO) und der Ostsee (ZO, MB). Die relative Häufigkeit von Extremwinden erhöht sich hier im Median auf 2,4 (SO), 2,5 (ZO) bzw. 2,7 % (MB). Für die nördliche Nordsee (NW, NO) lieferten die Projektionen nur uneinheitliche Änderungen. Geringe Änderungssignale ergaben sich auch für alle Simulationen unter den Annahmen des *moderaten Szenarios* und des *Klimaschutzszenarios*.

Explizite Untersuchungen zu potentiellen Sturmfluthäufigkeiten wurden punktuell für Cuxhaven durchgeführt. Signifikante Änderungen waren aufgrund der hohen natürlichen Variabilität nicht feststellbar (Schade et al. 2020). Ähnliche Ergebnisse lieferten die Analysen der A1B-Szenarioläufe im Rahmen von KLIWAS (Bülow et al. 2014). Dabei sollte jedoch bedacht werden, dass heutige Sturmflutwasserstände im Zuge des Meeresspiegelanstiegs künftig bei geringeren Windgeschwindigkeiten und folglich häufiger eintreten werden.

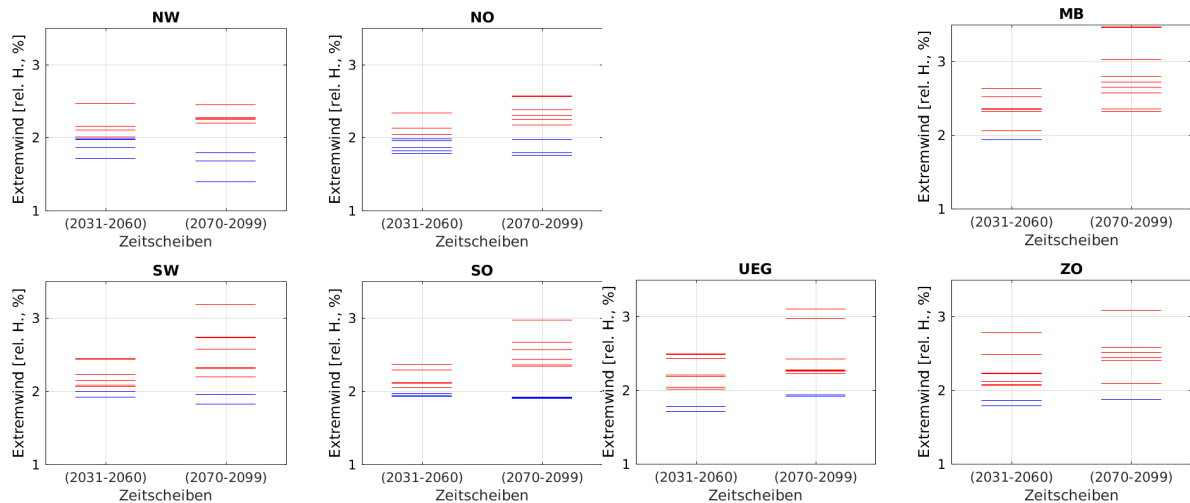


Abbildung 4-13: Relative Häufigkeiten von Extremwindgeschwindigkeiten für die nordwestliche (NW), nordöstliche (NO), südwestliche (SW) und südöstliche Nordsee (SO), die Meerbusen (MB) und zentrale Ostsee (ZO) sowie das Übergangsgebiet (UEG) in der *nahen* (links) und *fernen Zukunft* (rechts). Die Ergebnisse beruhen auf 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* mit den Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Die relative Häufigkeit von Extremwindgeschwindigkeiten im *Bezugszeitraum* (1971–2000) wurde für alle Seegebiete auf 2 % festgelegt. Projizierte Zunahmen sind in rot dargestellt und Abnahmen in blau.

4.3.2 Stürme: Klassen und Häufigkeiten

Sturmereignisse werden in den untersuchten Klimamodellen schlecht abgebildet, insofern, dass die simulierten Windgeschwindigkeiten die mit Stürmen assoziierten Windstärken der Beaufortskala erheblich unterschätzen. Deshalb wurde im Rahmen des Meilensteines M108-b2 „Wetterlagen über der Nordsee“ (Jensen 2019) das von Jenkinson und Collison (1977) vorgeschlagene Sturmidentifizierungs- und -klassifizierungsverfahren auf tägliche Luftdruckfelder im Nordseeraum angewendet. Der für die Nordseeregion repräsentative Sturmindex G^* ergibt sich über eine elliptische Beziehung zwischen Windindex V^* und Wirbelstärke (Vorticity) ζ^* :

$$G^* = \sqrt{V^{*2} + \frac{\zeta^{*2}}{4}}$$

Die Klassen *NUL* („No Gale“, kein Sturm), *G* („Gale“, Sturm), *SG* („Severe Gale“, starker Sturm) und *VSG* („Very Severe Gale“, sehr starker Sturm) sind im Gegenwartsklima (1971–2000) durch das 90., 98. und 99,73. Perzentil der G^* -Verteilung gegeneinander abgegrenzt (Loewe et al. 2013).

Die Schwellwerte für die einzelnen Sturmklassen wurden anhand dieser Perzentile für beide Regionalmodelle aus dem mit der Reanalyse ERA40 angetriebenen Validationslauf für den Zeitraum 1971–2000 bestimmt. Zur Veranschaulichung der Bedeutung der G^* -Schwellwertellipsen wurden die zugehörigen Halbachsen $V^*_{\max} = G^*$ und $\zeta^*_{\max} = 2G^*$ in adäquate physikalische Einheiten umgerechnet (Tabelle 4-2). Diese Werte stellen die maximal möglichen Geschwindigkeiten bzw. Wirbelstärken dar für den Fall, dass der jeweils andere Index identisch Null ist. Natürlich ist das Sturmkriterium für alle (V^*, ζ^*) -Kombinationen erfüllt, die auf (oder außerhalb) der Schwellwertellipse liegen.

Tabelle 4-2: Schwellwerte für den Sturmindex G^* mit der dazugehörigen maximal möglichen Windgeschwindigkeit (V_{\max}) in m/s und der maximal möglichen Wirbelstärke (ζ_{\max}) in Umdrehungen pro Tag (UPT) für die Modellkopplungen NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO (rechts) jeweils für den Zeitraum 1971–2000 im mit ERA40 angetriebenen Validationslauf.

NEMO/RCA4				MPI-OM/REMO			
Perzentil	G^* [hPa]	V_{\max} [m/s]	ζ_{\max} [UPT]	Perzentil	G^* [hPa]	V_{\max} [m/s]	ζ_{\max} [UPT]
90.	26,9	16,7	0,41	90.	28,1	17,4	0,43
98.	33,8	21,0	0,51	98.	36,7	22,8	0,56
99,73.	39,3	24,4	0,60	99,73.	46,1	28,6	0,70

In Abbildung 4-14 ist die relative Änderung der relativen Häufigkeiten (rH) der jeweiligen Sturmklasse als auf die rH der *Bezugszeitraum* (1971–2000) bezogene Differenz zwischen der rH in der *fernen Zukunft* (2070–2099) und der rH in der *Gegenwart* für die zwei Modellfamilien wiedergegeben. Innerhalb der NEMO/RCA4 Modellfamilie zeigen 4 von 5 Modellen im *Weiter-wie-bisher Szenario* für sehr starke Stürme (VSG) am Ende des Jahrhunderts (2070–2099) einen relativen Anstieg der relativen Häufigkeit von 18 bis 139 % gegenüber der relativen Häufigkeit im *Bezugszeitraum* (1971–2000). Lediglich für HadGEM2-ES ergab sich eine Abnahme von 11 %. Die Läufe des Klimamodells MPI-OM/REMO weisen alle ebenfalls eine positive relative Änderung der relativen Häufigkeit der höchsten Sturmklasse (VSG) von 56 bis 163 % auf.

Die höchste Sturmklasse ist dadurch gekennzeichnet, dass sie im klimatologischen Mittel der Gegenwart einmal pro Jahr auftritt. Für die stärkste relative Erhöhung um 163 %, die im MPI-OM/REMO Lauf 3 realisiert wurde, erhöht sich diese Eintrittswahrscheinlichkeit sehr starker Stürme auf 2,63/Jahr. Eine relative Erhöhung der relativen Häufigkeit der höchsten Sturmklasse (VSG) um 68 % (Ensemblemittel über alle 8 Läufe) entspricht einem Anstieg der Eintrittswahrscheinlichkeit auf 1,68/Jahr.

Hinsichtlich der relativen Änderung der relativen Häufigkeit starker Stürme (SG) im Zeitscheibenvergleich (Abbildung 4-14) ergaben sich für 6 der 8 Realisierungen Anstiege zwischen 10 und 48 %. Neben EC-Earth projizierte HADGEM2-ES auch in dieser Klasse einen Abfall. Im Ensemblemittel erhöht sich die relative Häufigkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit für starke Stürme von 1,7 % (6,3/Jahr) in der Zeitscheibe *Gegenwart* auf 2,1 % (7,5/Jahr) in der Zeitscheibe *ferne Zukunft*.

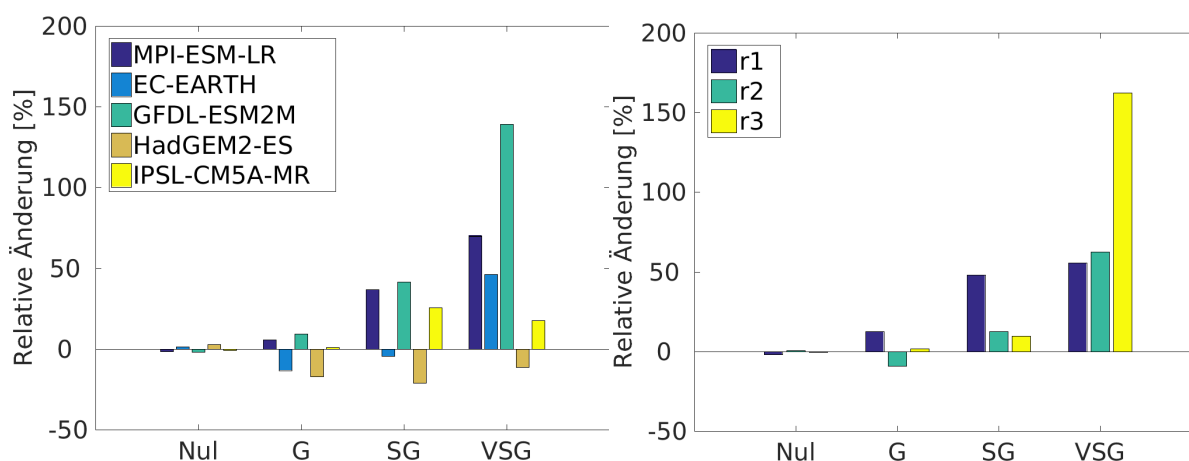


Abbildung 4-14: Änderung [%] der relativen Häufigkeiten der Sturmklassen (NUL (kein Sturm), G (Sturm), SG (starker Sturm), VSG (sehr starker Sturm)) von 1971–2000 zu 2070–2099 für die NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO (rechts) Läufe im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Die Farben kennzeichnen den Lauf des Modells. Eine positive Änderung bedeutet eine Zunahme der relativen Häufigkeit einer Sturmklasse zum Ende des Jahrhunderts.

Für die vollständigen Zeitreihen (1971–2099) der jährlichen relativen Häufigkeiten der sehr starken Stürme (VSG) ergab sich lediglich für zwei Läufe ein signifikant positiver Trend (Abbildung 4-15). Für starke Stürme (SG) wurden für 4 der 8 Zeitreihen positive Trends festgestellt. Diese Trends sind mit den stärksten Änderungen der relativen Häufigkeiten der Sturmklassen im Zeitscheibenvergleich assoziiert (Abbildung 4-14).

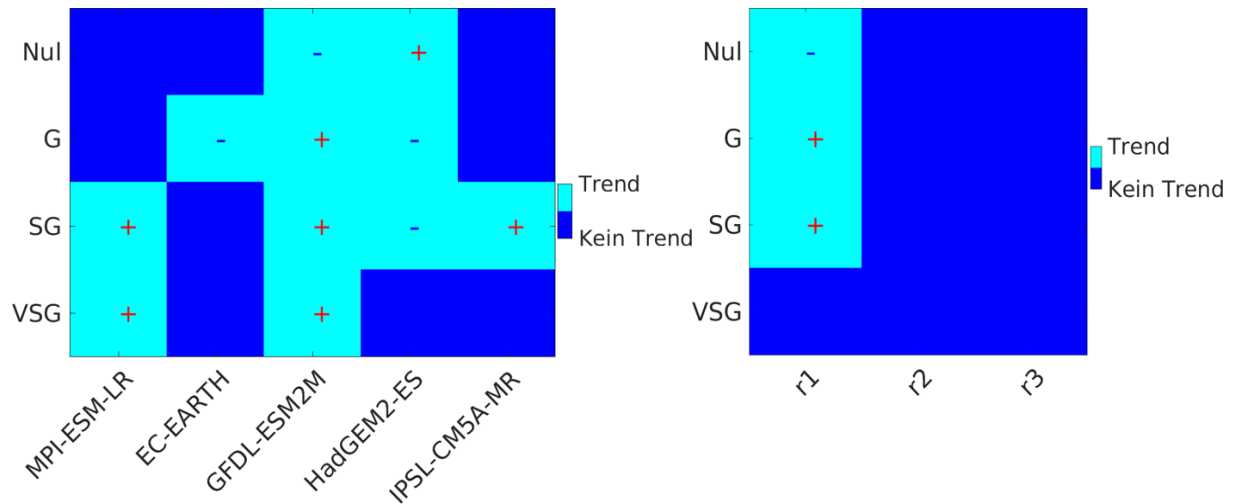


Abbildung 4-15: Trendanalyse der jährlichen relativen Häufigkeiten der Sturmklassen für den Zeitraum 1961–2099 aus den Projektionen im *Weiter-nie-bisber Szenario* mit den Modellfamilien NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO (rechts). In türkis sind die Sturmklassen dargestellt, für die sich signifikante Trends ergeben (Mann-Kendall-Test mit einer 5 % Signifikanzgrenze). Die Vorzeichen zeigen, ob es sich um einen positiven (+) oder einen negativen (-) Trend handelt.

5 Umsetzung der Klimawirkungsanalyse

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, setzt sich die Klimawirkungsanalyse aus den drei Teilschritten 1) Exposition 2) Sensitivität und 3) Kritikalität zusammen. Der Fokus der Arbeiten im SP-104 *Sturmgefahren* lag dabei auf der Expositionsanalyse des Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes.

5.1 Identifizierung relevanter Infrastrukturelemente

Um zunächst mögliche Elemente der Infrastruktur zu identifizieren, die potentiell durch Sturmgefahren beeinträchtigt werden könnten, wurde eine einfache Literaturstudie durchgeführt. Für die Straße finden sich wichtige Hinweise zum Thema Windeinwirkung im Bezug auf Bemessungsgrößen für Brücken- und Tunnelbauwerke im Forschungsprojekt FE 29.0332/2013 (Novák und Ensle 2013). Im Folgenden wird zusammengefasst, welche Elemente der Straßeninfrastruktur für eine Klimawirkungsanalyse von Sturmgefahren zu beachten sind (Tabelle 5-1). Dabei wird zwischen ortsfesten Risikoelementen (Ingenieurbauwerke und Strecke) und mobilen Risikoelementen (Verkehrsfluss) unterschieden.

Tabelle 5-1: Zu beachtende Elemente der Straßeninfrastruktur für eine integrierte Klimawirkungsanalyse im Schwerpunkt *Sturmgefahren* mit Bezug auf Novák und Ensle (2013).

Klimaeinwirkung "Sturm" auf ortsfeste Risikoelemente	Relevanz
1 Ingenieurbauwerke	
1.1 Brücken (Tragwerke)	X
1.2 Hohe Brückenpfeiler	X
1.3 Schwingungsanfällige Bauteile an Brücken	X
1.4 Verkehrszeichenbrücken	X
1.5 Bauwerksausstattung	X
1.6 Lärmschutzwände	X
2 Strecke	
2.1 Ausstattung (auch elektrisch)	X
2.3 Vegetation (Bäume)	XXX
2.4 Geologie/Böschungen	X
Klimaeinwirkung "Sturm" auf mobile Risikoelemente	
3 Verkehrsfluss	
3.1 Verkehrsteilnehmer/Fahrzeuge	XX

XXX von vorrangiger Bedeutung, XX von mittlerer Bedeutung, X von geringer Bedeutung

5.1.1 Ingenieurbauwerke

A Brücken

Brückenbauwerke sind in der Regel gegenüber klimatischer Einwirkung sehr exponierte Objekte. Daher sind nicht nur die Tragwerke selbst, sondern auch ihre dazugehörigen technischen Ausbauten einzubeziehen. Unter Berücksichtigung des Klimawandels und der vielleicht immer häufiger auftretenden Extremwetterereignisse, darunter auch Stürme, wird im Schlussbericht „Weiterentwicklung klimatischer Einwirkungsmodelle und Bemessungsgrößen für Brücken- und Tunnelbauwerke auf Basis klimatischer Prognoseberechnungen“ (FE 29.0332/2013, Novák und Ensle 2013) die bisherige Auslegung und Ausführung von Bauwerken und Ausstattung untersucht. Dabei wird angenommen, dass die Ausstattung stärker gefährdet ist, als das Tragwerk selbst.

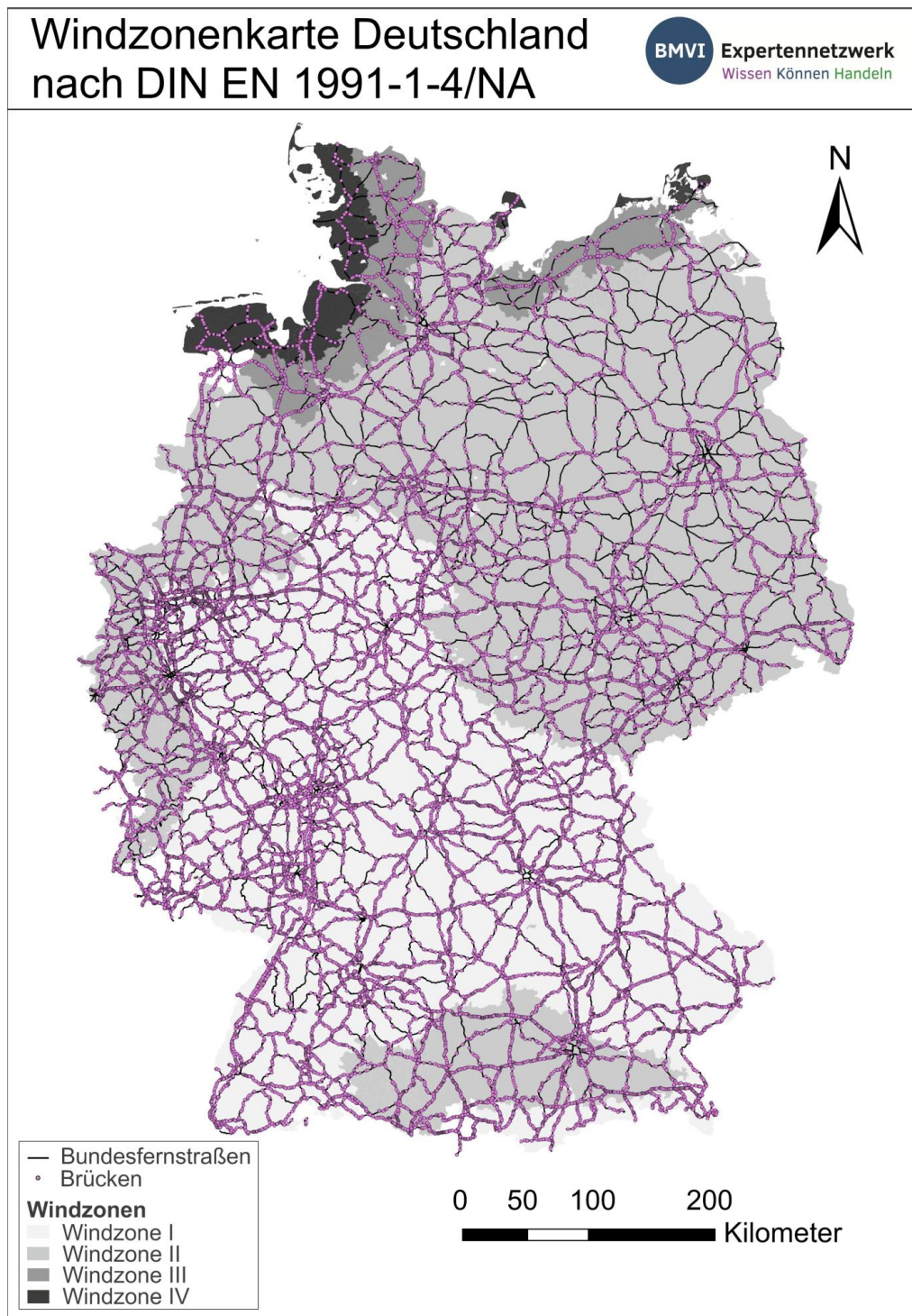


Abbildung 5-1: Windzonenkarte Deutschland nach DIN EN 1991-1-4 und Lage der Brücken des Bundesfernstraßennetzes. Datengrundlage: Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen nach DIBt (2019).

Bei der Bemessung von Brückenbauwerken findet die Windeinwirkung nach DIN EN 1991-1-4 (DIN EN 1991-1-4/NA 2010) Berücksichtigung (Goris und Heisel 2012). Die maßgebenden Windeinwirkungen sind nach Goris und Heisel (2012) außerdem entsprechend der Bemessungssituation nach DIN EN 1990 für jeden belastbaren Bereich zu ermitteln. Windeinwirkungen werden hier als über die Zeit veränderliche, freie Einwirkungen eingestuft. Dem nationalen Anhang zur DIN EN 1991-1-4 zufolge ist Deutschland in vier Windzonen eingeteilt (Abbildung 5-2), um die regional unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden unterschiedlichen Windbelastungen zu berücksichtigen (Goris und Heisel 2012). Eine

genaue Zuordnung der Verwaltungsgrenzen von Landkreisen und kreisfreien Städten zu den jeweiligen Windzonen kann unter www.dibt.de³ heruntergeladen werden.

Die Messwerte hierfür werden in m/s und kN/m² angegeben und beziehen sich auf 10 Minuten Windgeschwindigkeiten in 10 m über dem Grund. In den gültigen Regelwerken ist neben der Unterscheidung in küstennahe und küstenferne Gebiete ein Geländekriterium vorgegeben, welches Bebauung und Topographie als Windwiderstand beachtet. Für Brücken wird in DIN EN 1991-1-4/NA vereinfacht in den Windzonen 1+2 und 3+4 zusammengefasst. Die Bemessung findet innerhalb der beiden Klassen jeweils für den ungünstigeren Wert statt, also 2 und 4. Folglich sind Zone 1 und 3 zu hoch bemessen, was vorteilhaft für die Berücksichtigung der erhöhten Windeinwirkung in Folge des Klimawandels wäre.

Für Brücken gibt es eine Vielzahl an Regelwerken, die Einwirkungen bzw. das Sicherheitskonzept sowie die Bemessung berücksichtigen. Zur Betrachtung verschiedener klimatischer Einflüsse werden Brücken in ihre bauspezifischen Elemente unterteilt. Massivbrücken (Stahl- bzw. Spannbeton) sind aufgrund ihres hohen Eigengewichts bezüglich der erhöhten Windeinwirkung normalerweise nicht als problematisch einzustufen. Weitere Elemente bedürfen einer gesonderten Betrachtung und werden daher im Folgenden beschrieben.

B Hohe Brückenpfeiler

Bei der Bemessung von Brückenpfeilern werden lineare Berechnungen verwendet, die jedoch je nach geometrischen Randbedingungen stark von der Realität abweichen können (Novák und Ensle 2013, Abschnitt 3.4.2). Für eine realitätsgetreuere Anpassung werden Biegemomente in Folge von Verformung der Stützen berücksichtigt. Während vertikale Verformungen durch Lasteinwirkung des Überbaus entstehen, induzieren Winde eine horizontale Last. Schlanke Stützkonstruktionen sind von diesen Einwirkungen besonders betroffen. Die vorhandene Bewehrungsmenge könnte für den Lastabtrag unterdimensioniert sein. Zwar wirkt die Windlast nur zeitweise und die o. a. Verformung berücksichtigt in gewissem Umfang eine horizontale Ersatzkraft, jedoch sollte trotzdem zukünftig eine individuelle Überprüfung hinsichtlich der Windeinwirkungen getroffen werden.

C Schwingungsanfällige Bauteile an Brücken

Aus statischer Sicht stellen wirbelerzeugende Querschwingungen keine besondere Belastung für die Tragsicherheit von Brückenbauteilen dar. Jedoch führt diese Art von Belastung zu einer Dauerbeanspruchung im Sinne der Ermüdung (Novák und Ensle 2013). Zu schwingungsanfälligen Bauteilen von Brücken zählen beispielsweise Seile und Hänger. Die Folge von wirbelerzeugenden Schwingungen können Ermüdungsrisse/-brüche in Schweißnahtanschlüssen sein. Mithilfe von Klimaprojektionsdaten können die Eingangswerte, Lastwechselzahl und Beanspruchung aufgrund wirbelinduzierter Schwingungen für die Zukunft ermittelt werden. Diese Untersuchungen sollten objektspezifisch berücksichtigt werden. Für Schweißnahtanschlüsse sind die Schwingungen in statischer Hinsicht im Allgemeinen unproblematisch, solange diese nicht ständig auftreten und unterhalb bestimmter Schwingbreiten liegen. Jedoch sollte auch hier die Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten objektspezifisch überprüft werden.

D Verkehrszeichenbrücken

Bei Verkehrszeichenbrücken stellen die montierten Schilder eine sehr große Angriffsfläche gegenüber Wind dar. Die Belastung dieser Einwirkung wirkt hauptsächlich auf den Anschluss der Stiele am Fundamentkörper. Insbesondere Verbindungen, Schweißnähte, Schraubverbindungen und Anker sind von großer Bedeutung im Zusammenhang mit Materialeermüdung. Aus Analysen des Schlussberichts FE 29.0332/2013 (Novák und Ensle 2013) ergeben sich für Windzone 1 ausgelegte Strukturen mit hohen Ausnutzungsgraden in den Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen möglicherweise kritische Werte. Im Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf bestehende Spannbetonbrückenbauwerke“ (FE 89.0232/2009/AP,

³ https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/Windzonen_Formular_nach_Verwaltungsgrenzen.xlsx

Novák und Ensle 2012) zeigen Berechnungen, dass durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 30,9 % in Windzone 1 bereits die Reserve der Strukturen überschritten werden könnte. Bei dieser sehr starken Zunahme der Windeinwirkung mit erhöhter Eintrittswahrscheinlichkeit besteht zwar nicht akuter Handlungsbedarf, jedoch sollten sich die entsprechenden Normungsgremien dennoch mit der Thematik befassen, um bei Bedarf die Normen anzupassen.

Bei der Bemessung für alle Schilder/ Zeichengeber und Verkehrszeichenträger über oder neben dem Verkehrsraum gelten grundsätzliche Bestimmungen für die Berücksichtigung von Windlasten. Zur Berechnung der Belastung durch Wind werden die Windzonen 1 bis 4 berücksichtigt. Tabelle 5-2 umfasst die Werte des Winddrucks (w), der rechtwinklig auf eine Fläche (m^2), in Abhängigkeit der Windzonen 1 bis 4 wirkt. Für besonders exponierte Lagen müssen spezielle Windlasten beachtet werden. In dem Windlastansatz sind Formbeiwerte und Böeneinwirkung bereits berücksichtigt (BASt 2012). In Höhenlagen von 800-1.100 m über NN sind in Windzone 1 die Werte der Zone 2 anzusetzen und über 1.100 m ist in Zone 1 nach DIN EN 1991-1-4 zu verfahren. In Stadtbereichen mit geschlossener Bebauung darf der Winddruck (w) um 20 % gemindert werden.

Tabelle 5-2: Der rechnerische horizontale Winddruck (w), der auf eine Windangriffsfläche (in m^2) in Abhängigkeit der Windzone (1-4) unter Berücksichtigung von Formbeiwerten und Böeneinwirkungen wirkt (BASt 2012).

Zone 4:	$w = 3,0 \text{ kN/m}^2$
Zone 3:	$w = 2,0 \text{ kN/m}^2$
Zone 2:	$w = 1,5 \text{ kN/m}^2$
Zone 1:	$w = 1,2 \text{ kN/m}^2$
für Kragarme in Zone 1:	$w = 1,5 \text{ kN/m}^2$

E Bauwerksausstattung

Zu den Elementen der Bauwerksausstattung gehören beispielsweise Fahrbahnübergangskonstruktionen zwischen Straße und Brücke, Lager von Brückenbauwerken und Entwässerungssysteme. Für das Klimatelement Wind sind hier keine relevanten Auswirkungen zu befürchten. Hingegen sollten Verankerungen von Lärm- und Windschutzeinrichtungen auf Gesimsen und Kappen zukünftig aufgrund erhöhter Windeinwirkung dimensioniert werden, falls Prognosen Handlungsbedarf aufzeigen (Novák und Ensle 2013, Kapitel 6.4).

F Lärmschutzwände

Durch Windeinwirkung entstehen große Belastungen für die Tragstrukturen und Fundamente von Lärmschutzwänden. In den Regelwerken werden die Konstruktionen nach DIN EN 1991-1-4 bemessen. Der Widerstand ist objektabhängig zu betrachten, wobei die Einwirkung jeweils geringer als der Widerstand sein muss. Verbindungsmittel am Fußpunkt, wie Schrauben, Schweißnähte, etc., können sowohl in statischer Hinsicht, als auch hinsichtlich der Ermüdung problematisch sein.

5.1.2 Strecke

A Ausstattung (auch elektrisch)

Zu den Bestandteilen der Straßenausstattung zählen im Allgemeinen Verkehrszeichen, Wegweisung, Fahrzeugrückhaltesysteme, Lichtzeichenanlagen und Straßenbeleuchtung. Verkehrszeichen, insbesondere die wegweisende Beschilderung, bieten eine Windangriffsfläche und werden daher entsprechend dimensioniert. Anforderungen an die Bemessung von Verkehrszeichen sind in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbe-

dingungen und Richtlinien für vertikale Verkehrszeichen (ZTV VZ 2011) festgelegt. Fahrzeugrückhaltesysteme werden nach DIN EN 1317 hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei Fahrzeuganprall geprüft, woraus sich eine Wind-bezogene Dimensionierung erübrigt.

Der entsprechenden Bemessung zufolge ist die Ausstattung des Bundesfernstraßennetzes ausreichend gesichert und ist daher nur selten durch Stürme gefährdet. Bei der Sicherung mobiler Verkehrsschilder gegen Windbelastung gelten besondere Vorgaben. Für Straßenausstattungsgegenstände an Arbeitsstellen (z. B. Leitkegel, Leit- & Warnbaken) sind die Anforderungen bzw. Prüfungen, die heute durchgeführt werden, in den jeweiligen Technischen Lieferbedingungen verbindlich als Standard für die Ausführung gemäß den Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Sicherungsarbeiten an Arbeitsstellen an Straßen vorgeschrieben.

B Vegetation (Bäume)

Bäume entlang von Autobahnen und Bundesfernstraßen stellen eine besondere Gefährdung bei extremen Windereignissen dar. Häufig stellen abgeknickte oder entwurzelte Bäume, die auf die Fahrbahn stürzen, Unfallgefahren für Verkehrsteilnehmer dar. Per Definition nach der Beaufort-Skala (Tabelle 5-3) spricht man ab einer Windstärke 9 von einem Sturm, Windstärke 12 wird bereits als Orkan bezeichnet. Windstärke 9 entspricht einer Windgeschwindigkeit von 75-88 km/h. Jedoch zeigen aktuelle Unwetterereignisse, dass es bereits bei Windgeschwindigkeiten von knapp 70 km/h (Windstärke 8 = stürmischer Wind) zu Baumstürzen gekommen ist. Des Weiteren können zusätzliche Parameter wie Bodenart und Bodenvorfeuchte oder Alter und Gesundheitszustand das Sturzpotehtial von Bäumen begünstigen. Außerdem kann es zum Abbrechen von Ästen und Zweigen kommen, was ein enormes Unfallrisiko für Verkehrsteilnehmer darstellt.

Tabelle 5-3: Windstärken nach Beaufort und zugeordnete Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Einheiten.

Windstärke in Bft	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit			
		kn	m/s	km/h	mph
0	Windstille, Flaute	0 – <1	0,0 – <0,3	0 – 1	0 – <1,2
1	leiser Zug	1 – <4	0,3 – <1,6	1 – 5	1,2 – <4,6
2	leichte Brise	4 – <7	1,6 – <3,4	6 – 11	4,6 – <8,1
3	schwache Brise	7 – <11	3,4 – <5,5	12 – 19	8,1 – <12,7
4	mäßige Brise	11 – <16	5,5 – <8,0	20 – 28	12,7 – <18,4
5	frische Brise	16 – <22	8,0 – <10,8	29 – 38	18,4 – <25,3
6	starker Wind	22 – <28	10,8 – <13,9	39 – 49	25,3 – <32,2
7	steifer Wind	28 – <34	13,9 – <17,2	50 – 61	32,2 – <39,1
8	stürmischer Wind	34 – <41	17,2 – <20,8	62 – 74	39,1 – <47,2
9	Sturm	41 – <48	20,8 – <24,5	75 – 88	47,2 – <55,2
10	schwerer Sturm	48 – <56	24,5 – <28,5	89 – 102	55,2 – <64,4
11	orkanartiger Sturm	56 – <64	28,5 – <32,7	103 – 117	64,4 – <73,6
12	Orkan	≥ 64	≥ 32,7	≥ 117	≥ 73,6

Der Straßenunterhaltungsdienst überprüft regelmäßig im Rahmen der Baumschau die Straßenbäume, sodass augenfällige Gefahren beseitigt werden (z. B. abgestorbene Äste, Bäume mit verringerter Vitalität). Bei einem Wind der Windstärke 8 z. B. können aber Böen mit weit höheren Windgeschwindigkeiten auftreten, sodass auch völlig gesunde Bäume umstürzen können.

Fallbeispiel: Auswirkungen des Unwetterereignisses *Paul*2017 auf die Straße

Bei einem Unwetterereignis am 22.06.2017 kam es zu Orkanböen mit stellenweisen Windgeschwindigkeiten von bis zu 127 km/h (Mittelhessen, Spitzenwindgeschwindigkeit des Unwetterereignisses im Rahmen des

DWD-Messnetzes). Vor dem aus Westen herannahenden Tiefdruckgebiet *Paul* bildete sich in der feucht-warmen Luft eine sogenannte Konvergenzzone, in der sich ein Komplex aus mehreren kräftigen Gewitterzellen bildete. Besondere Auswirkungen hatte der Gewittersturm auf Ostdeutschland, Nordrhein-Westfalen (Ruhrgebiet) sowie auf Hamburg, Niedersachsen und Hessen. Insgesamt ging das Ereignis an diesem Tag mit zwei Todesopfern durch umgestürzte Bäume im Straßenverkehr einher. Eines der Opfer kam ums Leben, nachdem es durch das Geäst eines umgestürzten Baumes gefahren war. Der Baum musste unmittelbar vor ihm in Alt Isenbüttel auf die Bundesstraße 244 gekippt sein (NWZonline 2017). Auf der A7 zwischen Hamburg und Hannover warnte die Verkehrsmanagementzentrale vor Gefahr durch umgestürzte Bäume. Zwischen Hamburg und Bremen kam es auf der A1 ebenfalls zu entsprechenden Verkehrsbehinderungen. Auf der Bundesstraße 3 in Hann. Münden mussten Feuerwehrleute Räumarbeiten durchführen. Darüber hinaus kam es zusätzlich zu einem Unfall eines Lastwagens, der Ästen auf der der Bundesstraße 71 bei Groß Ellenberg ausgewichen war und dadurch von der Fahrbahn abkam.

C Geologie/Böschungen

Instabile Hänge und Böschungen stellen aufgrund ihres Rutschungspotentials ein erhöhtes Risiko entlang des Bundesfernstraßen- und Schienennetzes dar. Im Schwerpunkt *Hangrutschungen* wird diese Problematik bearbeitet. Einer der Parameter, die gravitative Massenbewegungen laut Gruner (2008) initiieren können sind Stürme, die z. B. Steinschläge verursachen können. Entsprechende Sicherungsmaßnahmen wie z. B. Fangzäune und -netze werden für diese Gefährdung vorgesehen. Stürme als Auslöser für gravitative Massenbewegungen wurden als eher untergeordneter Parameter gesehen und wurden daher in den Analysen nicht weiter betrachtet.

Nach Gruner (2008) kommt es häufig zu Sturzereignissen, die mit Sturmböen (evtl. verbunden mit Starkniederschlägen) in Verbindung stehen. Ein wichtiger Parameter ist hierbei der Winddruck, der im Wurzelbereich von schweren Bäumen zur Felsauflockerung führt. Dabei könnte es sich um eine dynamische Auflockerung durch die Wippbewegung der Bäume im Wind handeln.

Ein weiterer durch Wind beeinträchtigter Parameter ist die Bodenerosion. Wind begünstigt eine Austrocknung der Böden wodurch bei Feinsand, Grobsand, sandigem Lehm und entwässerten, für die Ackernutzung kultivierten Mooren, eine Verwehung möglich ist. Durch die Umlagerung entstehen Nachteile sowohl am Ort des Abtrags (Formveränderung der Erdbauwerke) als auch an den Ablagerungsstellen (Sandwehen auf der Fahrbahn, Verschüttung der Entwässerungseinrichtungen) (FGSV 1983).

Die Bodenerosion durch Wind (Staubstürme) wird auch als Wirkungspfad in der, in Kapitel 3.1 erwähnten, Studie des UBA 2016 aufgeführt. Die Klimawirkung wurde in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks zunächst aufgrund der Priorisierung der Sturmwurfproblematik nicht weiterverfolgt. Dennoch ist das Ereignis der Staubstürme nicht außer Acht zu lassen. Laut Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2014) können diese die Sichtweite von Verkehrsteilnehmern kurzzeitig stark beeinträchtigen. Abbildung 5-3 gibt einen Überblick zur Lage des Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes im Bezug auf die potentielle Erosionsgefährdung der Äckerböden durch Wind in Deutschland (BGR 2014).

5.1.3 Verkehrsfluss

Lkw-Anhänger bieten eine enorm große Angriffsfläche für Seitenwind. Im Juli 2016 führt die Unfallforschung der Versicherer (UDV) eine Studie zum Seitenwindrisiko von Leicht-Lkw-Gespanssen durch (GDV 2016). Ein voll beladenes Leicht-Lkw-Gespann ist laut UDV immer noch drei Tonnen leichter als ein gleich langer unbeladener 40-Tonner-Standard-Gliederzug. Die Kombination aus relativ geringem Gewicht und großer seitlicher Windangriffsfläche ist Grund für zahlreiche Unfälle, zumal die Unfallforscher bei Recherchen im Internet doppelt so viele Unfälle gefunden haben als in der amtlichen Statistik vermerkt waren. Allein in Sachsen-Anhalt habe zum Beispiel der Sturm *Niklas* am 31. März 2015 mindestens 31 Lkw oder deren Anhänger umgerissen.

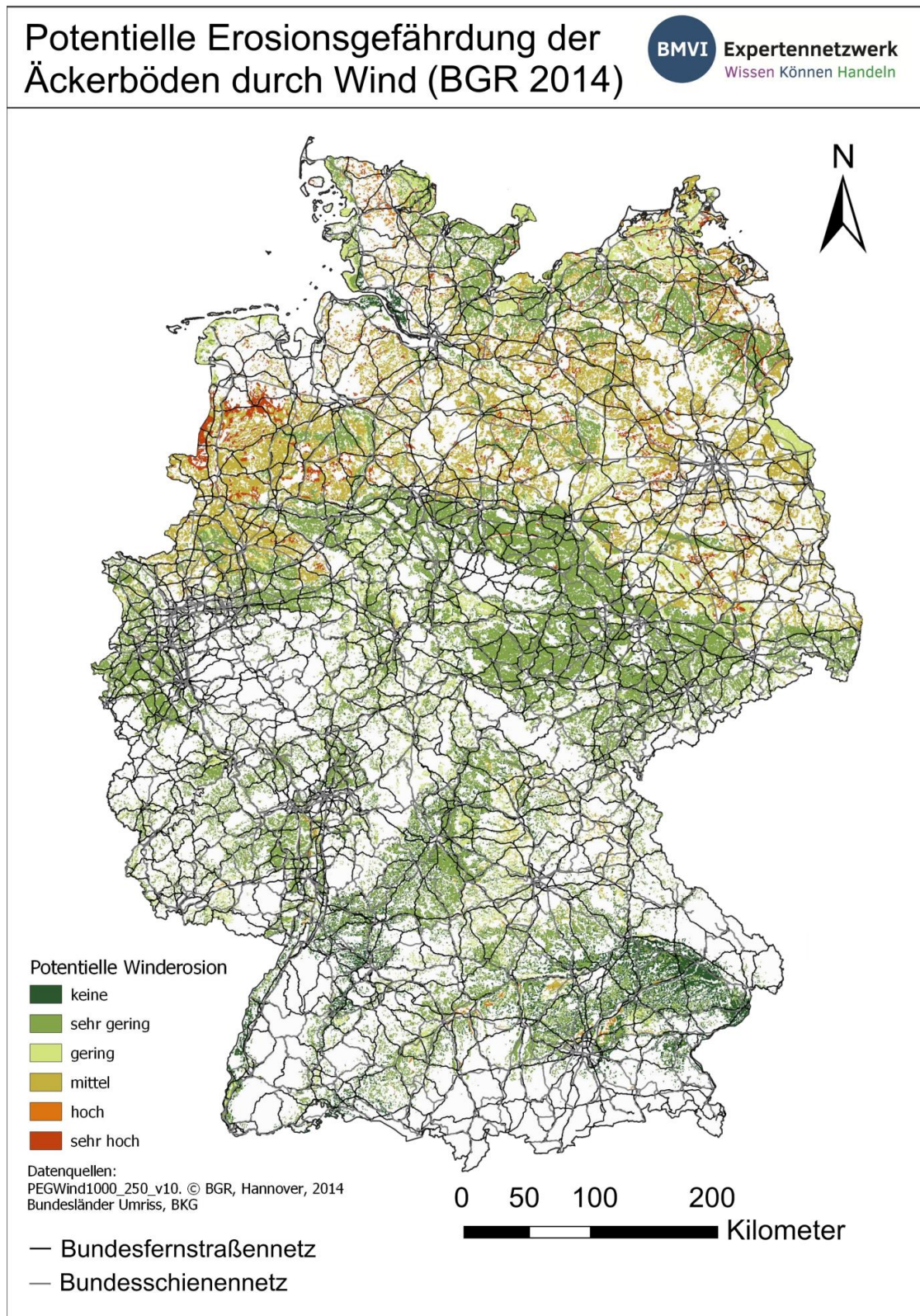


Abbildung 5-3: Potentielle Erosionsgefährdung der Äckerböden durch Wind nach BGR (2014) und Lage des Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetzes.

Die UDV hat festgestellt, dass ab einer Windstärke von 7 unbeladene Leicht-Lkw-Gespanne (bis 12 t) umkippen können. Voll beladene sind ab Windstärke 8 gefährdet. 40-Tonner-Gliederzüge sind weitaus weniger windanfällig, können jedoch unbeladen ab Windstärke 9 instabil werden. Unfälle durch umgekippte Leicht-Lkw gibt es laut UDV fast nur bei Sturmtiefs, meist auf Autobahnen oder Landstraßen ohne seitlichen Bewuchs. Der Leiter der UDV schlug im Jahr 2015 ein Fahrverbot für solche Gespanne ab einer entsprechenden Windstärke vor.

In FGSV (2010) wird auf den Einsatz von Windwarnanlagen insbesondere auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Täler oder Flussläufe verlaufen, hingewiesen. Windbedingte Unfälle treten häufig bei Lkw ohne Ladung, Pkw-Gespannen oder Wohnmobilen auf. Die Datenerfassung für Windwarnanlagen setzt sich aus Windrichtung, mittlerer Windgeschwindigkeit und Spitzenwindgeschwindigkeit zusammen. Mit Erreichen einer entsprechenden Windstärke soll im sogenannten Open-Loop-Betrieb (Operator bestätigt einen entsprechenden Schaltvorschlag) zu verkehrstechnischen Maßnahmen geraten werden. Diese beinhaltenen Geschwindigkeitsbegrenzungen, Teilableitungen von gefährdeten Fahrzeuggruppen oder Vollsperrungen. Bei geringeren Fahrtgeschwindigkeiten können z. B. seitenwindbedingte Spurabweichungen von Fahrzeugen verringert werden. Voraussetzung für die Teilableitung der hochgefährdeten Fahrzeuggruppen (Lkw ohne Ladung, Pkw-Gespanne und Wohnmobile) sind leistungsfähige Bedarfsumleitungen. Im Falle der Gefährdung aller Verkehrsteilnehmer bzw. Fahrzeuge wird zur Vollsperrung geraten.

Fallbeispiel A71: Talbrücke Reichenbach und Zahme Gera - Besonderheiten/Windböen

Auf den Talbrücken Reichenbach und Zahme Gera sind seit Eröffnung 2003 trotz vorhandenen Windsäcken schon mehrere Lkw oder deren Anhänger (jeweils ohne Ladung) durch starke Windböen umgerissen worden. In den nach Norden abfallenden Tälern kommt es immer wieder zur Herausbildung starker Fallwinde vom Kamm des Thüringer Waldes. Dies war schon vor dem Bau der Brücken bekannt, wurde aber nicht ausreichend berücksichtigt. Bei stürmischer Wetterlage wird daher mit Wechselverkehrszeichen auf einer Länge von drei Kilometern im Bereich der Talbrücken Reichenbach und Zahme Gera die Geschwindigkeit auf 60 km/h begrenzt und ein Überholverbot für Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t angezeigt. Im Januar 2007 gab es zwei Sperrungen der A 71 in beiden Richtungen – von AS Ilmenau-West bis AS Oberhof bzw. AS Gräfenroda – im Zusammenhang mit dem Sturmtief *Kyrrill*. Drei Jahre später folgte wegen des Sturmtiefs *Xynthia* eine Sperrung über fünf Stunden. Auf den Brücken ist der nachträgliche Bau von Windschutzwänden mit der erforderlichen Höhe für Lastkraftwagen aus statischen Gründen nicht möglich. Zum Windschutz wurde im Sommer 2009 das Brückengeländer auf der Südseite der Talbrücke Reichenbach durch eine 2,5 Meter hohe Windschutzwand mit Lamellen aus Plexiglas ersetzt⁴.

5.2 Expositionsanalyse Straße/Schiene

Sturmgefahren stellen bereits heute eine große Herausforderung für den sicheren Betrieb der Verkehrsinfrastruktur dar. Ein bedeutender Aspekt bezüglich der Auswirkungen von Stürmen ist der durch Vegetation hervorgerufene Sturmwurf. Hierzu können abbrechende Äste von Bäumen oder auch umstürzende Bäume gezählt werden (siehe Kapitel 5.1.2). Die Klimawirkungsketten von Sturmwurf werden mit den möglichen folgenden Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit, den Verkehrsablauf und die Sicherheit der Fahrzeuge umfassend in Kapitel 3 beschrieben.

Der erste Schritt der integrierten Klimawirkungsanalyse der Verkehrsträger Straße und Schiene hinsichtlich des Aspektes Sturmwurf ist die Expositionsanalyse. Die Exposition der Verkehrsträger gegenüber Sturmwurf ergibt sich hierbei maßgeblich aus dem Vorkommen von Vegetation entlang der Bundesverkehrswege. Die Methodik und die Ergebnisse der Expositionsanalyse Sturmwurfgefahren werden in Kapitel 5.2.1 detailliert dargestellt und erläutert.

⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Bundesautobahn_71#cite_ref-24

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in Zusammenhang mit den Verkehrsträgern Straße und Schiene und Starkwindereignissen auftritt, ist die Seitenwindgefährdung. Während die Exposition gegenüber Sturmwurf vor allem für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevant ist, betrifft der Themenkomplex „Seitenwind“ vor allem die Verkehrsteilnehmer. Besonders exponiert ist der Verkehr in diesem Zusammenhang auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. Sowohl Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (z. B. Lkw und Wohnwagengespanne) als auch Motorradfahrer sind auf solchen Brücken gefährdet. Um Personen- und/oder Sachschäden bei resultierenden Unfällen zu vermeiden, sind viele Brücken bereits mit Windschutz- und Windwarneinrichtungen ausgestattet. In Kapitel 5.2.2 wird dieser Aspekt der Seitenwindgefährdung näher beleuchtet. Bei dem Aspekt der Seitenwindgefährdung ist jedoch zu beachten, dass dieser vorwiegend in dem Schwerpunkt *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) hinsichtlich operativer und regulatorischer Anpassungsmöglichkeiten thematisiert wird. Somit wird die Seitenwindgefährdung in diesem Bericht zu Klimawirkungsanalysen des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen lediglich kurz skizziert. Weitere Ausführungen hierzu finden sich in dem Schwerpunktbericht *Anpassungsoptionen*.

5.2.1 Sturmwurfgefahren (Vegetation) Straße/Schiene

Im Rahmen der Klimawirkungsanalyse von Sturmwurfgefahren wurden unterschiedliche Konzepte entwickelt um die Exposition und Sensitivität der Verkehrsträger Straße und Schiene bundesweit einheitlich und flächendeckend zu analysieren. Das in Abbildung 5-4 dargestellte Schema zeigt unterschiedliche Herangehensweisen auf. Die ersten beiden Ansätze des räumlichen Verschnitts der Verkehrsnetze mit der CORINE (Coordination of Information on the Environment) Landbedeckung und dem Basis-DLM wurden bereits im Rahmen der 1. Phase des BMVI-Expertenetzwerks vorgenommen. Die dritte Option der Detailanalyse von Laserscandaten zeigt einen alternativen, hochauflösenden Ansatz auf. Dieser Ansatz konnte in der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks noch nicht realisiert werden. Da mithilfe dieser, auf Laserscandaten basierenden Analysen, die Exposition und Sensitivität der Verkehrsträger voraussichtlich noch detaillierter und vor allem auch mit Einbezug der jeweiligen Vegetationshöhen ermittelt werden kann, werden diese Analysen einen Teil der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks darstellen. Eine ausführlichere Beschreibung dieses weiterführenden Ansatzes wird im Ausblick auf die zukünftigen Forschungsvorhaben in Kapitel 6 gegeben.

Die beiden bereits durchgeführten und auf Netzebene angewendeten Ansätze können methodisch als grundsätzlich identisch angesehen werden. Bei beiden Ansätzen werden die Geodaten der jeweiligen Verkehrsnetze mit Grundlagendaten zu Landbedeckung und Landnutzung verschnitten. Der Unterschied beider Vorgehensweisen liegt vor allem in der Datengrundlage und der jeweiligen Datenqualität. Die CORINE Daten werden seit den 1990er Jahren im Rahmen eines Projektes der Europäischen Union erfasst und modelliert. In dem Projekt "Coordination of Information on the Environment" wird mithilfe von Satellitenfernerkundung europaweit die Landbedeckung und Landnutzung erfasst. Dieses Projekt stellt für den europäischen Maßstab eine bedeutende Datengrundlage dar, da es einheitliche und vergleichbare Daten der Landnutzung über einen langen Zeitraum bereitstellt und vergleichbar macht. Bei Analysen auf Ebene des deutschen Bundesgebietes stellt hingegen das vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung gestellte Basis-DLM, aufgrund der höheren Datenauflösung, eine bessere Datengrundlage dar. Die Mindestkartierfläche bei dem CORINE Modell liegt bei einem Hektar, wohingegen das Basis-DLM eine Mindestkartierfläche von 0,1 Hektar bei einer Lagegenauigkeit von 3 m aufweist (Abbildung 5-4). Folglich kann, aufgrund der höheren Datenauflösung, der Ansatz mithilfe des Basis-DLM als bevorzugt angesehen werden. In den folgenden Abschnitten werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Expositionsanalyse auf Basis des räumlichen Verschnitts der Bundesfernstraßen und des Bundesschienenetzes mit dem Basis-DLM detailliert dargestellt und erläutert.

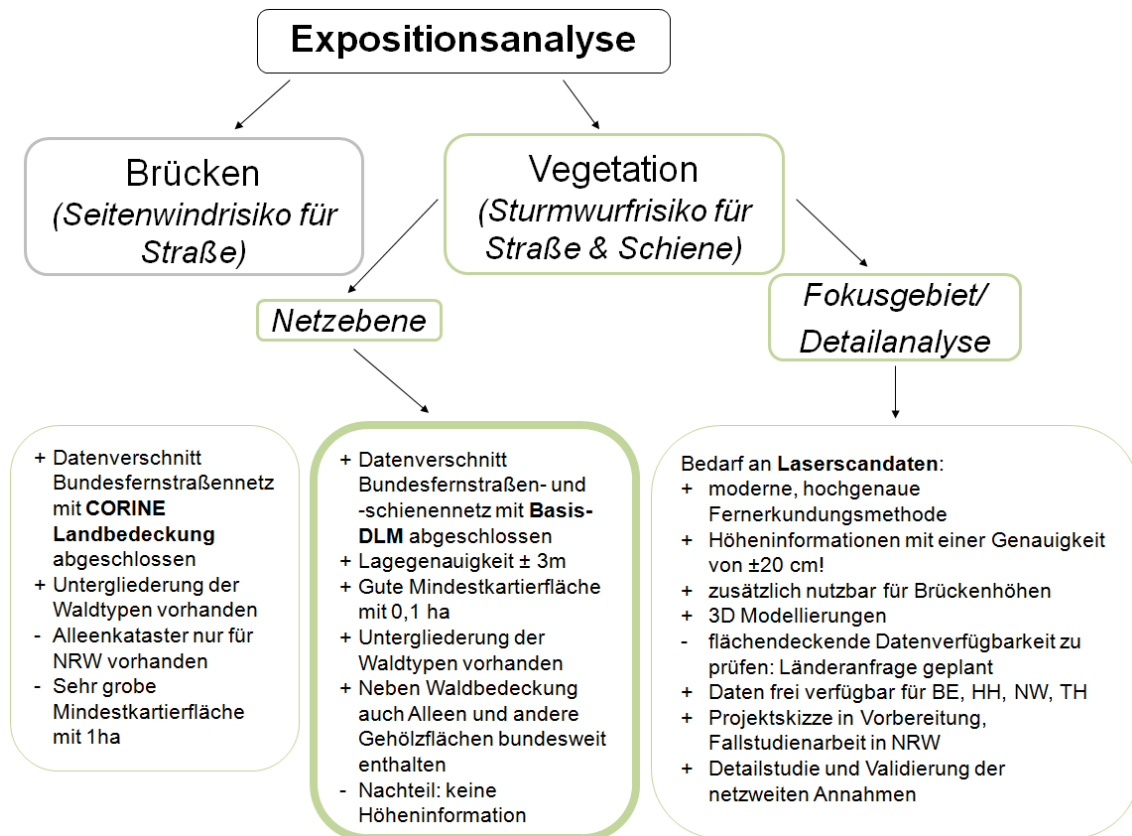


Abbildung 5-4: Schema der unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Wirkungsanalyse Sturmgefahren. In grün markiert ist die Expositionsanalyse der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks.

5.2.1.1 Datengrundlagen und Methodik

Mit der Expositionsanalyse Sturmwurf soll der Streckenanteil der jeweiligen Verkehrsträger, welcher gegenüber Sturmwurf exponiert ist abgeschätzt werden. Da zu dieser Exposition während der Arbeiten der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks sowohl für den Verkehrsträger Straße als auch die Schiene keine bundesweiten Informationen vorlagen, wurden diese Analysen auf Basis des folgend beschriebenen, verkehrsträgerübergreifenden Ansatzes vorgenommen und generiert. Hierdurch wird neben einer ersten Einschätzung der Exposition der einzelnen Verkehrsträger auch eine Vergleichbarkeit zwischen den Verkehrsträgern ermöglicht. Die für diese Expositionsanalysen genutzten Geodaten sind:

- Das **Bundesfernstraßennetz** aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra/BASSt 2017), bzw. im Nachhinein zur Auswertung herangezogen: das Netzmodell der Bundesfernstraßen (NEMOBFStr) nach Angleichung durch SSP Consult (2019).
 - Für die Expositionsanalyse ist es besonders wichtig ein möglichst lagegenaues Netz zu verwenden. Das BISStra-Netz weist eine solche Lagegenauigkeit auf.
 - Die Auswertung betroffener Streckenlängen wurde jedoch im NEMOBFStr-Netz durchgeführt, da dieses gleichzeitig die geplanten Strecken des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) enthält. Die Lagegenauigkeit des Datensatzes von NEMOBFStr entspricht allerdings aufgrund seiner bisherigen Anwendungsgebiete nicht der des BISStra. Im Rahmen der Kritikalitätsanalyse wurde daher für die *Klimawirkungsanalyse* die Geometrie des NEMOBFStr-Netzes an die des BISStra-Netzes angeglichen, um eine höhere Lagegenauigkeit zu erreichen. Dieser angepasste Datensatz wurde zu Auswertungszwecken den übrigen Schwerpunkten zur Verfügung gestellt.
 - Das NEMOBFStr-Netz enthält unter anderem keine Differenzierung in Fahrbahnen und Anweisung Straßeninformationsbank (ASB-)Äste bzw. Rampen, was die Ermittlung von Streckenlängen bei der Expositionsanalyse vereinfacht.

- Das **Bundesschiennetz**.
- Das **digitale Landschaftsmodell** (amtliches topographisch-karthographisches Informationssystem (ATKIS) Basis-DLM), zur Ermittlung des Versiegelungsgrades und Bewuchses der Oberfläche. Dieses Modell ist bundesweit frei verfügbar und kann über die Website des BKG heruntergeladen werden. Datenerheber dieser Daten sind die Vermessungsverwaltungen der Länder, die die jeweiligen Daten im vierteljährlichen Rhythmus dem BKG zur Verfügung stellen. Der Informationsumfang des Basis-DLM orientiert sich an der topographischen Karte 1:10.000 und 1:25.000, besitzt dabei jedoch eine höhere Lagegenauigkeit von ± 3 Meter. Denn die wesentlichen Quelle für die Erfassung des Basis-DLM sind Geobasisdaten der Katasterbehörden in Verbindung mit Digitalen Orthophotos (DOP), den Ergebnissen der örtlichen Felderkundung sowie weiteren Informationen des Topographischen Informationsmanagements.
Das ATKIS Basis-DLM basiert auf dem ATKIS-Objektartenkatalog welcher auf der ersten Ebene unterschiedliche Objektartengruppen wie Gebäude, Siedlungen, Verkehr, Gewässer oder auch Vegetation unterscheidet. Innerhalb der Objektartengruppe Vegetation wird die Objektart Wald ausgewiesen, die wiederum zwischen den Attributarten Laubholz, Nadelholz und Laub- und Nadelholz differenziert.
- Das **98. Perzentil der Windböen des *Bezugszeitraums* (1971–2000)** aus COSMO-CLM-Simulationen.

Während laut Geodatenzugangsgesetz alle geodatenhaltenden Stellen des Bundes sowie der Länder zur Bereitstellung von Geodaten verpflichtet sind, wird die Bereitstellung dieser Daten in der Praxis unterschiedlich gehandhabt. Insbesondere Daten mit hoher Auflösung (z. B. Digitales Geländemodell (DGM)1 oder DGM5 oder digitale Oberflächenmodelle (DOM)5) werden von den meisten Landesbehörden nur kostenpflichtig bereitgestellt. Mithilfe dieser digitalen Modelle wären beispielsweise detaillierte Analysen zu Einzelbäumen möglich (vgl. Light Detection and Ranging (LiDAR) Analysen Kapitel 6). Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass die Datenauflösung ein entscheidender Faktor dafür ist, wie präzise die Modellergebnisse ausfallen. Aufgrund des eingeschränkten Zeit- und Kostenrahmens der 1. Phase des Expertenetzwerks wurde in diesem Arbeitsschritt zunächst auf bundesweit einheitliche und frei verfügbare Geodaten zurückgegriffen. Daher kann es sich bei der vorliegenden Expositionsanalyse auch nur um eine erste Annäherung handeln, die dennoch die Grundlage für die Bewertung des Anpassungsbedarfs und weiterer Analysen darstellt. Die in Kapitel 5.2.1 und Abbildung 5-4 erwähnten umfassenden und hochauflösenden Ansätze der Einzelbaumerkennung sollen hingegen innerhalb der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführt werden. Dieser Ansatz wird im Kapitel „Fazit und Ausblick“ thematisiert.

Die beschriebenen Geodaten bilden die Grundlage für eine erstmalige bundesweite und verkehrsträgerübergreifende Expositionsanalyse von Straße und Schiene gegenüber Sturmwurfgefahren. Im Zuge dieser Expositionsanalyse werden die Basisinformationen des digitalen Landschaftsmodells mit den Vektordaten der jeweiligen Verkehrsträger räumlich verschnitten. Durch die Ausweisung der unterschiedlichen Objektarten entsprechend des ATKIS-Objektartenkatalogs, kann eine Unterscheidung zwischen Flächen ohne und mit Vegetation vorgenommen werden. Der ATKIS-Objektartenkatalog differenziert dabei zwischen Laub-, Nadel- und Mischwäldern. Zudem kann für den Verkehrsträger Straße die Objektart der Alleen einbezogen werden. Diese Unterscheidung der Vegetation nach unterschiedlichen Wachstumsformen ist insofern von Relevanz, als dass Nadelbäume grundsätzlich anfälliger gegenüber Sturmwurf sind. Dies liegt unter anderem daran, dass sie im Gegensatz zu den winterkahlen Laubbäumen bei Winterstürmen eine größere Angriffsfläche bieten (Segelwirkung; Albrecht (2009)). Des Weiteren sind die meisten Nadelhölzer flachwurzelnd, was ihre Standfestigkeit bei Starkwinden gegenüber tiefwurzelnden Laubbäumen zusätzlich verringert (Hetzel 2007).

Der räumliche Verschnitt der Grundlagendaten wurde mithilfe einer Geoanalyse durchgeführt. Hierbei wurden die relevanten Objektarten des Basis-DLM mit einem Puffer von beidseitig 20 Metern versehen und mit dem Bundesfernstraßennetz und dem Bundesschiennetz verschnitten. Durch diesen Vorgang können die räumlichen Attribute des Basis-DLM den jeweiligen Streckenabschnitten zugeordnet werden, sodass eine Ausweisung von Strecken mit und ohne angrenzende Vegetation erfolgen kann. Die Methode der Puf-

ferbildung um die Streckennetze ermöglicht, dass ebenfalls nah an die Strecken angrenzende Vegetationsflächen in die Expositionsanalyse eingebunden werden. Hierdurch wird demnach auch betrachtet, dass auch nah angrenzende Vegetation bei Sturmwurf eine Gefahr für die Verkehrsträger sein kann. So stellt beispielsweise ein umstürzender Baum mit einer Höhe von acht Metern und einer horizontalen Entfernung zur Strecke von sieben Metern ein potenzielles Risiko für die Infrastruktur dar.

5.2.1.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Expositionsanalyse Sturmwurf für die Verkehrsträger Schiene und Straße dargestellt. Die zentralen Ergebnisse bilden hierbei die ermittelten jeweiligen Streckenanteile je Verkehrsträger mit angrenzender Vegetation ab. Des Weiteren wird die Exposition regional differenziert und entsprechend des Vorkommens der unterschiedlichen Waldtypen betrachtet und untersucht.

Einen Überblick über die aufgrund des Vegetationsvorkommens gegenüber Sturmwurf exponierten Bundesfernstraßen und -schienenabschnitte gibt Tabelle 5-4. Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßen- und ca. 23 % des Bundesschienennetzes durch bewaldetes Gebiet mit einem Abstand von ≤ 20 Metern zur Vegetation. Diese Anteile ergeben in Bezug auf das Bundesfernstraßennetz, welches eine Gesamtlänge von 51.150 km aufweist, eine Streckenlänge von 12.660 km. Das Bundesschienennetz, welches eine Gesamtlänge von 34.140 km besitzt, zeigt 7.690 exponierter Streckenkilometer auf. Während sich die Anteile der Laub- und Mischwälder entlang der Straße und Schiene lediglich um einen Prozentpunkt unterscheiden, weist die Straße hingegen einen erhöhten Anteil an unmittelbar angrenzenden Nadelbäumen auf (Tabelle 5-4). Nadelbäume werden aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften als generell sturmurfanfälliger angesehen als Laubbäume (vgl. Kapitel 5.2.1.1).

Die gesamte Streckenlänge der Bundesfernstraßen entlang von Nadelwäldern beläuft sich auf 8.220 km, wohingegen die gegenüber Nadelbäumen exponierte Schienenstrecke mit lediglich 4.130 km fast halb so lang ist. Der Anteil an Sturmwurf exponierter Streckenabschnitte, die mit der Objektart Nadelbaum ausgewiesen werden (jeder Streckenabschnitt kann mit mehreren Waldtypen attribuiert werden), kann in folge der Analysen mit 64,9 % beziffert werden. Dieser Anteil liegt beim Bundesschiennetz mit 53,7 % mehr als zehn Prozentpunkte niedriger. Bei dem Verkehrsträger Straße muss zudem die Exposition gegenüber der ATKIS-Objektart der Baumreihen mitbetrachtet werden. So sind die Anteile der gegenüber Baumreihen (Alleen) exponierten Bundesfernstraßen mit 6.710 km und 13 % der Gesamtlänge sogar höher als die gegenüber Laub- (5.870 km; 12 %) und Mischwald (5.820 km; 11 %) exponierten Streckenabschnitte. Diese Auswertung lässt auf die Relevanz von Baumreihen für die Straße zurückschließen.

Bei der Auswertung auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM sind die Erfassungskriterien laut ATKIS-Objektkatalog zu berücksichtigen⁵. Die drei verwendeten Waldtypen liegen als Flächenpolygone vor, die mit einer Fläche von $\geq 0,1$ ha im Datensatz erfasst wurden. Für die Baumreihen gilt eine vollzählige Erfassung ≥ 200 m Länge an Verkehrswegen sowie in der freien Landschaft, wenn sie landschaftsprägend sind. Für Expositionsanalysen mit einem höheren Detaillierungsgrad sind Einzelbaumerfassungen geplant. In Kapitel 6.3 werden die Inhalte der hierzu geplanten Forschungsprojekte für die Straße und Schiene vorgestellt.

⁵ https://www.google.com/url?sa=t&rcct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEWjH5aHcz8LqAhXLR5oKHTqwBjwOFjAAegOIBhAB&url=https%3A%2F%2Fsg.geodatenzentrum.de%2Fweb_public%2Fgdz%2Fdokumentation%2Fdeu%2FATKIS-OK%2520Basis-DLM%25206_0.pdf&usg=AOvVaw03CFZwYDBsEGbQ8wS_1rBG

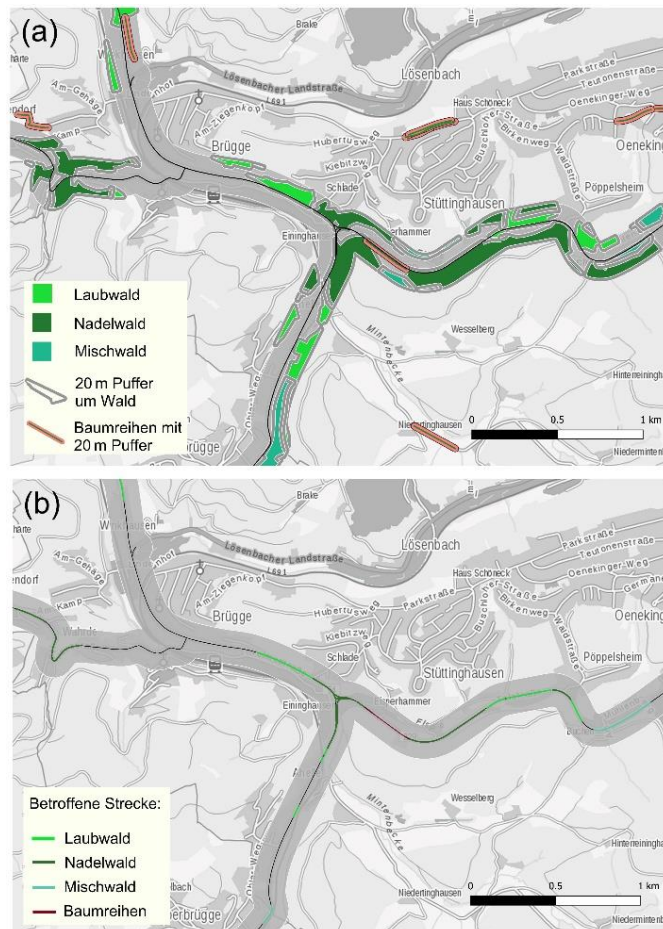
Tabelle 5-4: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m (Exposition) und erhöhter Schädigung an elektrifizierten Bahnstrecken (Sensitivität).

Potenzielle Gefährdung durch Sturmwurf Gegenwart (Exposition)				
Verkehrsträger	Straße		Schiene	
Gesamtlänge	51.150 km		34.140 km	
Strecke in der Nähe zu	[km]	[%]	[km]	[%]
▪ Laubbäumen	5.870	12	4.450	13
▪ Nadelbäumen	8.220	16	4.130	12
▪ Mischwald	5.820	11	3.430	10
▪ Bäumen (insgesamt) ⁶	12.660	25	7.690	23
▪ Baumreihen	6.710	13	nicht zutreffend	

In Abbildung 5-5, Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 sind die Ergebnisse der Expositionsanalyse kartographisch dargestellt. Während in Abbildung 5-5 Detailansichten der Lage der bewaldeten Gebiete im Verhältnis zu dem Streckennetz der Straße beispielhaft im Bereich des Ortes Brügge dargestellt sind, kann in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 die räumliche Verteilung der exponierten Gebiete bundesweit für beide Verkehrsträger nachvollzogen werden. In der Detailansicht ist die Funktionalität des beschriebenen Puffers von 20 m um die bewaldeten Flächen zu erkennen. Diese Methode ist von Bedeutung, da das Basis-DLM die Verkehrsinfrastruktur als eigene Objektarten ausweist und somit eigentlich keine Überschneidung von bewaldeten Gebieten mit der Verkehrsinfrastruktur möglich ist. Zum anderen wird mit dieser Methode auch die bereits in Kapitel 5.2.1.1 erwähnte Eigenschaft integriert, dass im Falle eines Sturmwurfs nicht die Position eines Baumes, sondern die Position mit einem Radius der Höhe des Baumes von Interesse für die Expositionsanalyse ist.

Anhand der in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 dargestellten Karten kann man die räumliche Differenzierung der Exposition für beide Verkehrsträger nachvollziehen. Die Karten stellen die jeweilige Exposition des Schienen- und Straßennetzes gegenüber Laubwald, Nadelwald, Mischwald und allen Waldtypen in Kombination dar. Sowohl für das Bundesfernstraßennetz als auch das Bundesschienennetz wird durch diesen visuellen Vergleich die räumlich ungleiche Verteilung der Waldtypen entlang der Verkehrsinfrastruktur über große Teile des Bundesgebietes deutlich. Gegenüber Laubwäldern exponierte Streckenabschnitte sind bis auf wenige Ausnahmen im Bereich der Nordseeküste, im mittleren Baden-Württemberg und Bayern sowie in Hessen nahezu im gesamten Bundesgebiet zu erkennen. Die Exposition gegenüber Nadelwäldern hingegen weist eine deutlich höhere räumliche Konzentration auf (Abbildung 5-6, Abbildung 5-7). Anhand der Abbildungen kann man eine deutliche Konzentration von exponierten Strecken in Brandenburg, dem östlichen Niedersachsen und dem nördlichen und südlichen Bayern erkennen. In einigen Bereichen des Landes sind bei beiden Verkehrsträgern hingegen nur wenige Strecken mit angrenzendem Nadelwald vorzufinden. Als Beispiele hierfür können das Ruhrgebiet oder große Teile Sachsen-Anhalts genannt werden. Eine etwas gleichmäßigere Ausbreitung ist in Bezug auf die Mischwälder festzustellen, wobei die Gebiete mit geringem Nadelwaldvorkommen ebenfalls eine geringe Exposition gegenüber Mischwäldern vorweisen. Bei einem Blick auf die kombinierte Darstellung aller Waldtypen wird deutlich, dass sich das Waldvorkommen entlang der Bundesfernstraßen und des Bundesschienennetzes insgesamt sehr gleichmäßig verteilt und nahezu keine großräumigen, nicht exponierten Streckenabschnitte zu verzeichnen sind.

⁶ Teilweise befinden sich unterschiedliche Waldtypen (Laub-, Nadel- und Mischwald) entlang beider Seiten der Strecke. Um diese nicht doppelt zu zählen, wurden Überlappungen der Waldtypen in der Kategorie „Bäume (insgesamt)“ entfernt, sodass die insgesamt betroffene Strecke nicht der Summe von Laub-, Nadel- und Mischwald entspricht.



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

Abbildung 5-5: Lage bewaldeter Gebiete innerhalb eines 100 m Betrachtungsraumes um das Bundesfernstraßennetz (a) und die daraus abgeleitete Exposition im Abstand von 20 m gegenüber Sturmwurf (b) an einem Fallbeispiel.

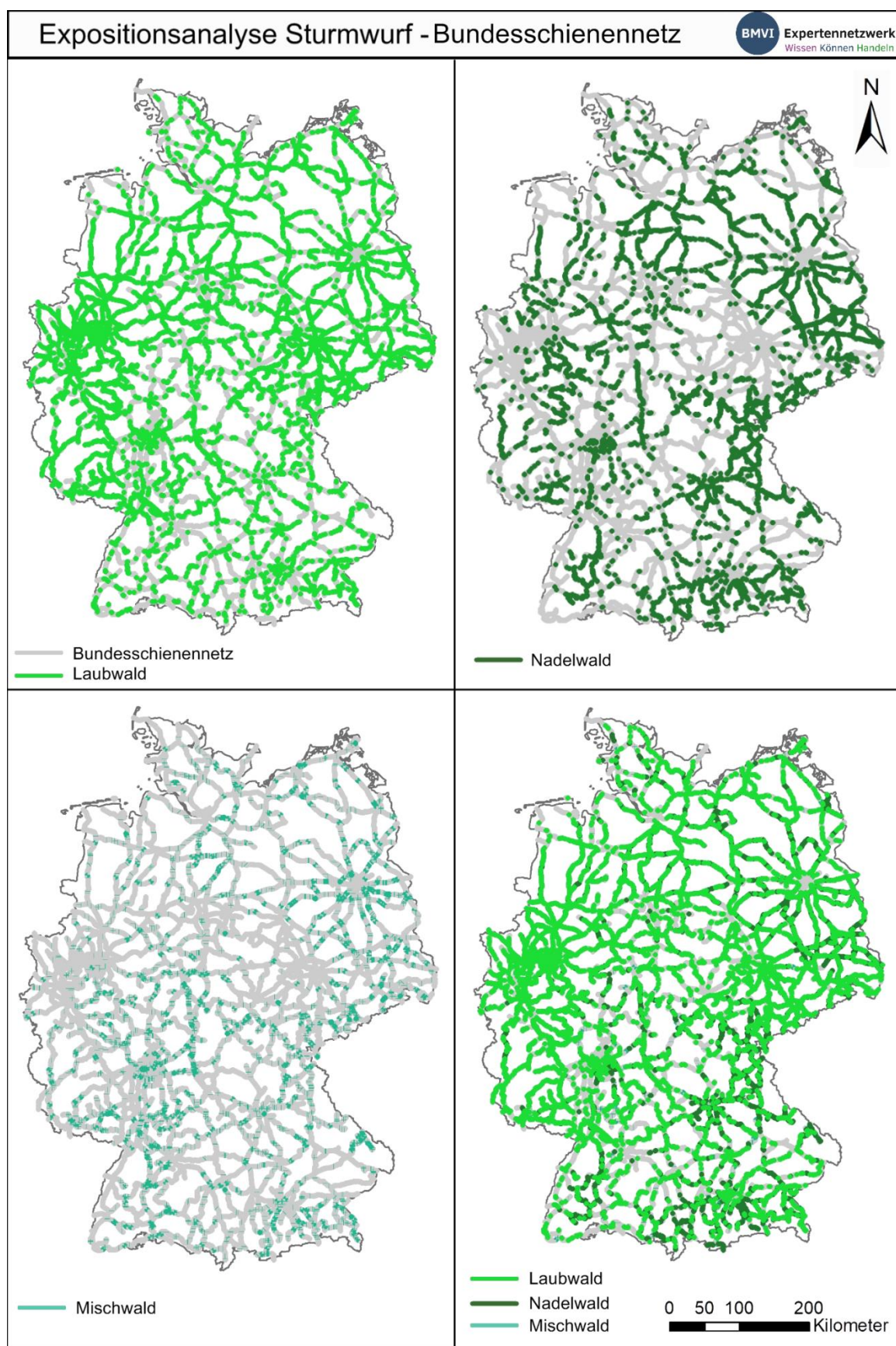


Abbildung 5-6: Exposition des Bundesschiennetzes gegenüber Laubwald (oben links), Nadelwald (oben rechts) und Mischwald (unten links), die potentiell zu einer Sturmwurfgefährdung führen können. Insgesamt führen ca. 23 % des Bundesschiennetzes durch bewaldetes Gebiet mit einem Abstand von ≤ 20 Metern (unten rechts, differenziert nach Waldtypen).

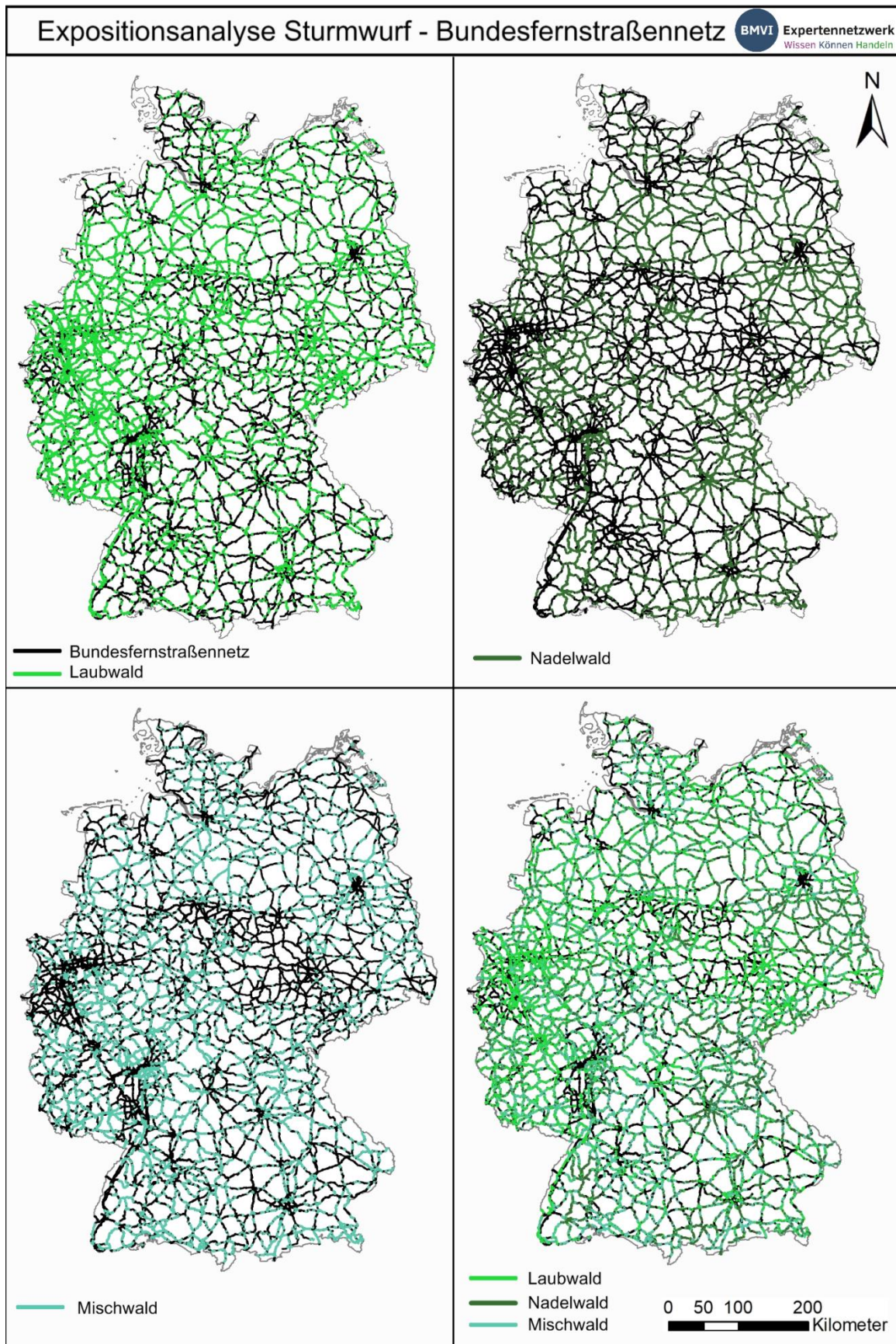


Abbildung 5-7: Exposition des Bundesfernstraßennetzes gegenüber Laubwald (oben links), Nadelwald (oben rechts) und Mischwald (unten links), die potentiell zu einer Sturmwurfgefährdung führen können. Insgesamt führen ca. 25 % des Bundesfernstraßennetzes durch bewaldetes Gebiet mit einem Abstand von ≤ 20 Metern (unten rechts, differenziert nach Waldtypen).

5.2.2 Anpassungsoptionen für Sturmwurf und Seitenwindgefährdung auf Brücken

Sowohl für die Bundesschienen als auch für die Bundesfernstraßen sind hinsichtlich der Beeinträchtigung bzw. Schädigung der Infrastruktur durch Stürme die Aspekte Sturmwurf und Seitenwind besonders relevant. Die Sturmwurfproblematik kann für beide Verkehrsträger ein Risiko in Bezug auf Verkehrsbehinderungen und Unfallgefahren darstellen. Bereits bestehende Maßnahmen zur Prävention und Risiko-Minderung betreffen verschiedene Aspekte der Grünflächenpflege. Für den Verkehrsträger Straße ist vor diesem Hintergrund ein entsprechendes Vegetationsmanagement in Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) vorgesehen. Im Abschlussbericht *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) wird exemplarisch ein Überblick über ein gängiges Vorgehen nach dem „Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege“ (FGSV 2006) gegeben. Tabelle 5-5 gibt einen Überblick über weitere Regelwerke, die den Vegetationsraum entlang der Straße berücksichtigen.

Wie bereits im Kapitel 5.2.1.2 erwähnt, sind für die Straße neben Waldflächen auch Straßenbäume im Sinne von Alleen und einseitigen Baumreihen von besonderer Relevanz. Aus diesem Grund ist ein effektives Vegetationsmanagement essentiell. Derzeit wird durch die FGSV und die FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) das „Merkblatt für Bäume an Straßen“ erstellt⁷. Hierin wird sowohl die Schutzwürdigkeit als auch die potentielle Unfallgefährdung im Zusammenhang mit Straßenbäumen diskutiert.

Tabelle 5-5: Maßgebliche technische Vorgaben für die Planung, den Entwurf, den Bau und den Betrieb im Zusammenhang mit der Vegetation entlang der Straßeninfrastruktur.

Richtlinien für die landschaftspflegerische Begleitplanung (RLBP)	FGSV
Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil: Landschaftspflege (RAS -LP4)	FGSV
Richtlinie zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen - Baumkontrollrichtlinie	FLL
Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen (DIN 18920)	DIN
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflegearbeiten im Straßenbau (ZTV Baum-StB)	FLL
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege (ZTV-Baumpflege)	FLL
Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege	FGSV
Merkblatt für Baumpflegearbeiten an Straßen	FGSV
Merkblatt Bäume unterirdische Leitungen und Kanäle	FGSV
Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M Uko)	FGSV
Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken (MV Mot)	FGSV
Empfehlungen zur Einbindung der Straßen in die Landschaft (ESLa)	FGSV
Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1 und Teil 2	FLL
Empfehlungen für die landschaftspflegerische Ausführung im Straßenbau (ELA)	FGSV
Hinweise zur Wirksamkeit landschaftspflegerischer Maßnahmen im Straßenbau (HRLBP)	FGSV
Leitfaden für Sonderlösungen zum Baum- und Objektschutz an Landstraßen	BASSt
Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen	BMVI

Während die Exposition gegenüber Sturmwurf vor allem für das Verkehrsinfrastrukturmanagement relevant ist, betrifft der Themenkomplex "Seitenwind" in erster Linie die Verkehrsteilnehmer. Besonders exponiert

⁷ https://www.institut-fuer-baumpflege.de/de_de/news-154-376/%E2%80%9EM+BaS%E2%80%9C+-+das+%E2%80%9EMerkblatt+f%C3%BCr+B%C3%A4ume+an+Stra%C3%9Fen%E2%80%9C+in+Arbeit.html

ist der Verkehr in diesem Zusammenhang auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen. In Bezug auf die Straße sind bei starkem Seitenwind sowohl Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (z. B. Lkws) als auch Motorradfahrer auf solchen Brücken gefährdet. Im Schienenverkehr sind die Auswirkungen von Seitenwind auf die Fahrzeuge von etwas geringerer Bedeutung, da Züge aufgrund ihrer hohen Windresistenz in der Regel nicht direkt beeinträchtigt werden.

Da eine intensive Klimawirkungsanalyse zu Seitenwindgefährdung der Verkehrsträger Straße und Schiene in dem Schwerpunkt *Sturmgefahren* in der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks nicht erfolgen konnte, werden in diesem Abschnitt kurz mögliche, innerhalb des Schwerpunkts *Anpassungsoptionen* erarbeitete, operative Anpassungsmöglichkeiten der Verkehrsträger dargestellt. Die Zielsetzung bei diesen Analysen war zu überprüfen, welche Anpassungsmaßnahmen bereits in der Praxis angewendet werden und ob sie den Einflüssen des Klimawandels auch zukünftig gerecht werden können. Detaillierte Ausführungen hierzu sind dem Schwerpunktbericht *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) zu entnehmen.

Ein angepasstes Management ist insbesondere bei prozessabhängigen Wirkungsweisen von Bedeutung, da vor allem äußere Prozessen, wie zum Beispiel Vegetationswuchs oder Änderungen der klimatischen Bedingungen, die wiederkehrend oder periodisch auf die Verkehrsinfrastruktur wirken, begegnet werden muss. Im Unterschied zu anderen Maßnahmen kann das Management vergleichsweise kurzfristig angepasst werden. Anpassungen im Management erfordern jedoch aufgrund der Vielfältigkeit der Prozesse einer kontinuierlichen Überprüfung ihrer Wirksamkeit. Hierfür ist ein umfassendes Verständnis der Prozesse (wie z. B. Vorhersagen relevanter klimatischer Parameter), der Verkehrsträger und ihrer Funktions- und Betriebsfähigkeit vonnöten.

Wie in diesem Bericht umfassend dargestellt, lässt sich bereits heute eine Vielzahl von Verkehrsbehinderungen und Schäden an Verkehrsinfrastruktur auf die direkte sowie indirekte Wirkung hoher Windgeschwindigkeiten zurückführen. Im Vergleich zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) zeigen aktuelle Projektionen sowohl für den Mittelwind als auch für Starkwinde nur sehr geringfügige Änderungen von $\pm 5\%$ ohne konkrete regionale Differenzierung. Jedoch zeigen Stürme auch heute schon durch zum Teil massive Schäden einen verstärkten Anpassungsbedarf vor allem in Hinblick auf Sturmwurfgefahren, aber auch in Bezug auf Seitenwindgefährdungen, insbesondere im Straßenverkehr.

Einer möglichen direkten Einwirkung durch Seitenwind wird im Bahnsystem bereits durch konstruktive Maßnahmen im Fahrzeugbau z. B. Ballastierung in Verbindung mit einem niedrigen Schwerpunkt begegnet. Auf hohen Talbrücken kann die Seitenwindwirkung zusätzlich durch Schutzwände minimiert werden. Eine generelle Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit ist nicht vorgesehen, jedoch können Infrastrukturunternehmen lokal Langsamfahrstellen einrichten, wenn die Bedingungen dies erforderlich machen.

Auch für die Bundesfernstraßen ist der Aspekt Seitenwind bereits heute von großer Relevanz. Insbesondere auf Brücken stellt die Seitenwindgefährdung für Verkehrsteilnehmer eine besondere Gefahrenquelle dar. Üblicherweise ist ein baulicher Windschutz die wohl valideste Maßnahme, um seitenwindbedingte Unfälle zu reduzieren oder gar zu vermeiden. Jedoch kann es sein, dass aus konstruktiven Gründen die Anbringung von Windschutzeinrichtungen auf den betroffenen Brücken gar nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (vgl. Kapitel 5.1.3). In diesen Fällen kann die Realisierung einer sogenannten Windwarnanlage sinnvoll sein. Über Geschwindigkeitsbeschränkungen, Teibleitungen gefährdeter Fahrzeuggruppen und Vollsperrungen können windbedingte Unfälle vermieden werden. Die Analyse der Anpassungsoptionen zu Seitenwindgefährdungen zeigt, dass die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch eine dynamische Reaktion auf aktuelle Verkehrs- und Umfeldbedingungen in dem Bericht „Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen“ (FGSV 2017) bereits thematisiert wird. Ferner werden detailliert der Einsatzbereich, die Funktionsweise und mögliche aus dem Nutzen von Windwarnanlagen folgende verkehrstechnische Maßnahmen beschrieben. Somit können Windwarnanlagen als Beispiel für eine dynamische operative Anpassungsoption des Straßenverkehrs gegenüber eventuell sich verstärkenden Starkwindereignissen dienen und diskutiert werden.

5.3 Sensitivitätsanalyse

5.3.1 Schiene/Oberleitung

Während die Exposition der Verkehrsträger durch das Vorkommen von Bäumen entlang der Strecken beschrieben werden kann, spielen bei der Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur gegenüber Sturmwurf weitere Aspekte eine wichtige Rolle. Diese weiteren Aspekte beschreiben die Anfälligkeit der Verkehrsinfrastruktur gegenüber der Klimawirkung Sturmwurf. In Bezug auf den Schienenverkehr kann hierbei die Elektrifizierung als bedeutende Eigenschaft hervorgehoben werden. Elektrifizierte Schienenabschnitte weisen im Gegensatz zu nicht elektrifizierten Strecken zusätzliche Infrastruktur und Bauwerke auf, die bei Sturmwurf beschädigt werden können und den entstandenen Schaden bei einem Ereignis erhöhen, den Instandhaltungsaufwand vergrößern und somit die Dauer der Instandhaltungsmaßnahmen erheblich verlängern. Aufgrund dessen wurden im Rahmen der Klimawirkungsanalyse Sturmwurf Analysen zur Sensitivität der Schieneninfrastruktur durchgeführt und analog zu der Expositionsanalyse durch Anteile und räumliche Verteilungen analysiert.

Die Elektrifizierung des bundesweiten Schienennetzes führt zu einem erhöhten Vorkommen von freistehenden Strukturen wie Oberleitungen, Masten, Stromversorgungsanlagen oder Verkehrsleitsystemen. Diese Infrastrukturelemente haben eine hohe Relevanz für die Funktionalität des Verkehrssystems. Wetterbedingte Beschädigungen an Oberleitungen können zum zeitweiligen Ausfall des Schienenverkehrs und somit zu Einschränkungen im Personen- und Güterverkehr führen (Mahammadzadeh und Biebler 2009). Sogar zu Kaskadeneffekten, die Teilbereiche des gesellschaftlichen Lebens beeinträchtigen sind möglich (BMI 2009). Eine angestrebte, zukünftig höhere Elektrifizierung des Schienennetzes würde die Sensitivität des Schienennetzes somit zusätzlich erhöhen.

In Tabelle 5-6 sind die Gesamtlängen und Anteile der gegenüber Sturmwurf exponierten und elektrifizierten Bahnstrecken dargestellt. Diese machen insgesamt rund 12 % des Gesamtnetzes aus (Tabelle 5-6). Damit ist etwas mehr als die Hälfte der Schienenstrecken, welche durch bewaldetes Gebiet führen (23 % des Gesamtnetzes; vgl. Tabelle 5-4) elektrifiziert und somit durch die potenzielle Beschädigung von Oberleitungen und andern Infrastrukturelementen besonders anfällig gegenüber Sturmwurf.

Tabelle 5-6: Gesamtlängen der potenziell durch Sturmwurf gefährdeten Bundesschienenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m (Exposition) an elektrifizierten Bahnstrecken (Sensitivität).

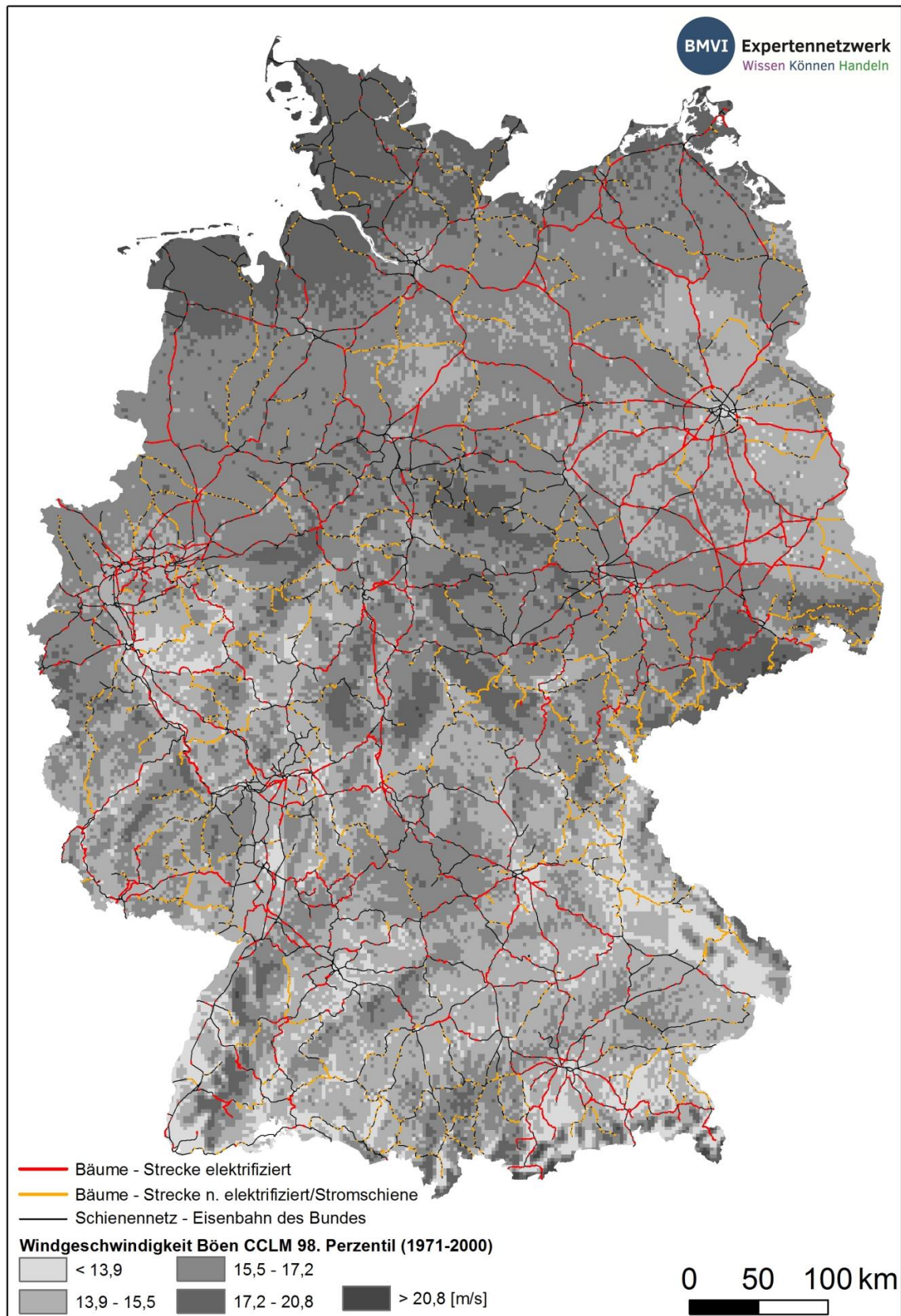
Potenzielle Gefährdung an elektrifizierten Bahnstrecken durch Sturmwurf (Sensitivität)		
Gesamtlänge der elektrifizierten Bahnstrecken	20.450 km	60 %
Strecke in der Nähe zu	[km]	[%] des gesamten Schienennetzes
▪ Laubbäumen	2.490	7
▪ Nadelbäumen	2.000	6
▪ Mischwald	1.870	6
▪ Bäumen (insgesamt) ²	4.130	12

Der Anteil elektrifizierter Strecke des Bundesschienennetzes liegt bei 60 %, was einer Gesamtlänge von 20.450 km entspricht. Somit kann bundesweit kein erheblicher Unterschied bei der Elektrifizierung der Strecken im Verhältnis zu den für Sturmwurf exponierten elektrifizierten Strecken festgestellt werden. So liegt die gesamte Länge gegenüber Sturmwurf sensitiver Strecken mit 4.130 km bei 54 % im Vergleich zu

der Streckenlänge der Expositionsanalyse. Dies impliziert, dass der Anteil elektrifizierter Strecken in Waldgebieten etwas niedriger ist als außerhalb von bewaldeten Gebieten. Vergleicht man die Anteile entsprechend der einzelnen Waldtypen wird deutlich, dass der Anteil der sensitiven Strecken entlang von Nadelwäldern mit lediglich 48 % gegenüber den exponierten Strecken am geringsten ist (Laubwald 56 %; Mischwald 55 %).

In Abbildung 5-8 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse kartographisch dargestellt. Neben den elektrifizierten und gegenüber Sturmwurf exponierten Strecken sind ebenfalls die nicht elektrifizierten und exponierten Strecken dargestellt. Die Grundkarte stellt die regional unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten der Windböen des 98. Perzentils aus dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 dar.

In Bezug auf die Sensitivität des Schienennetzes erkennt man eine relativ gleichmäßige Verteilung im Bundesgebiet. Gebiete die gegenüber Sturmwurf exponiert, jedoch nicht elektrifiziert sind, sind vor allem entlang der Nordseeküste, der Mitte Deutschlands, sowie in Sachsen-Anhalt und Sachsen und dem östlichen Bayern vorzufinden (Abbildung 5-8). Die Grundkarte der Windgeschwindigkeit des 98. Perzentils von Windböen zeigt die höchsten Windgeschwindigkeiten an der Nordseeküste sowie in der Mitte des Landes. Der räumliche Vergleich der Windgeschwindigkeiten mit den gegenüber Sturmwurf sensitiven Streckenabschnitten des Schienennetzes zeigt, dass die größten Windgeschwindigkeiten in Regionen zu verzeichnen sind in denen das Schienennetz einen geringen Elektrifizierungsgrad aufweist. Diese Gebiete betreffen vor allem die Nordseeküste, die Mitte Deutschlands und die Grenzregion zu Tschechien in Sachsen (Abbildung 5-8).



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

Abbildung 5-8: Hinweiskarte zur Sensitivität des Bundesschienennetzes gegenüber Sturmwurf vor dem Hintergrund des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeit (Böen) einer hochaufgelösten Klimamodellsimulation mit COSMO-CLM für den *Bezugszeitraum* (1971–2000).

6 Fazit und Ausblick

Die Modellierung von Stürmen, die Einflussnahme des Klimawandels auf Stürme und Klimawirkungsanalysen von Sturmgefahren auf die Verkehrsinfrastruktur sind sehr weitläufig und komplex. Im vorliegenden Schwerpunktbericht wurden ausgewählte Klimawirkungsketten der Sturmwurfgefährdung und der Seitenwindgefährdung dargestellt. Zudem erfolgten Analysen zu Extremwinden über Binnenland und See, sowie Modellierungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Windgeschwindigkeiten und Häufigkeiten von Starkwindereignissen. Die einzelnen Methoden wurden hierfür aufbereitet, konzeptionell zusammengeführt und erfolgreich angewandt. Dabei konnten auch geeignete Schritte für weitere Entwicklungen, Anpassungsoptionen und zukünftige Projekte identifiziert werden. Mit den entwickelten Datenprodukten, Methoden und Ergebnissen zur Einschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung, deren zu erwartenden Auswirkungen auf das Bundesverkehrssystem sowie der Forschung zu exemplarischen Anpassungsoptionen leistet das BMVI-Expertennetzwerk einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung der DAS an den Klimawandel.

6.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn

In der zurückliegenden Phase des BMVI-Expertennetzwerks wurde erstmalig ein integrierender, gemeinsamer Ansatz zur Abschätzung von Klimawirkungen der verschiedenen Verkehrsträger gewählt, um die derzeit bestehenden Unterschiede soweit zu überbrücken, dass kohärente Entscheidungen und Planungen bzgl. einer Anpassung des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur möglich werden. Im Kontext der Sturmgefahren konnten wesentliche Erkenntnisse in Bezug auf das Vorkommen von Vegetation als Potenzial für Sturmwurfgefährdung (Exposition) ermittelt werden. Für die Schiene konnte zudem die Elektrifizierung der Strecken als weiterführende Informationen für die potenzielle (Schadens-)Anfälligkeit der Verkehrsinfrastruktur gegenüber Sturmwurf (Sensitivität) in die Klimawirkungsanalyse eingebunden werden. Im Wesentlichen lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den bisherigen Untersuchungen ziehen:

- Die Auflösung der Klimamodelle (räumlich wie zeitlich) ist bisher oft unzureichend für lokale bis regionale Untersuchungen, insbesondere in Bezug auf Extreme der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags. Derzeit existieren beispielsweise kaum konvektionserlaubende Modelle, die zeitlich und räumlich begrenzte extreme Ereignisse wiedergeben können. Somit müssen weitere methodische Schritte unternommen werden. Die Nutzung von Wetterklassen, die ihrerseits Informationen z. B. über Sturmlagen (Lamb-Wetterlagen) beinhalten, könnte sich hier als zielführend erweisen.
- Als besonders bedeutende Klimawirkungen von Stürmen für die Verkehrsträger Schiene und Straße werden Sturmwurf und Seitenwindgefährdung identifiziert.
- In der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks konnten erstmalig die Anteile der gegenüber Sturmwurf exponierten Strecken für die Verkehrsträger Straße und Schiene bundesweit und mithilfe eines verkehrsträgerübergreifenden Ansatzes beziffert werden. Die Exposition der Verkehrsträger Schiene und Straße gegenüber Sturmwurf kann grundsätzlich durch das Vorkommen von Waldflächen entlang der Verkehrswege definiert werden. Diesbezüglich liegen die Anteile der gegenüber Sturmwurf exponierten Strecken für Schiene (23 %) und Straße (25 %) in vergleichbarer Höhe. Für die Straße lassen sich laut der im Basis-DLM enthaltenen Baumreihen zudem 13 % des Bundesferstraßennetzes als exponiert identifizieren.
- Die Sensitivität des Verkehrsträgers Schiene kann vor allem durch die Elektrifizierung der Strecken und das dadurch bedingte Vorkommen von zusätzlichen Infrastrukturelementen wie Oberleitungen oder Strommasten beschrieben werden. Elektrifizierte Streckenabschnitte mit unmittelbar angrenzender Vegetation machen 12 % des Bundesschienennetzes aus.
- Die Seitenwindgefährdung betrifft vor allem die Verkehrsteilnehmer des Verkehrsträgers Straße. Hier können verschiedene Anpassungsoptionen, wie das Nutzen von Windwarnanlagen angewandt werden.

6.2 Offene Forschungsfragen

Die Forschungsarbeiten der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks im Schwerpunkt *Sturmgefahren* haben gezeigt, dass die Kenntnisse zu der Exposition der Verkehrsträger zwar relativ grobskali, jedoch weitgehend zu ermitteln sind. Somit konnten umfassende Aussagen darüber getroffen werden, wie groß die Exposition des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur gegenüber der Klimawirkung Sturmwurf ist, und inwiefern der Klimawandel einen Einfluss darauf besitzt. Auch in Bezug auf die Sensitivität konnten bereits erste Erkenntnisse gewonnen werden. Fehlende Daten sind jedoch stets limitierende Faktoren von Forschungsarbeiten. So hat sich in der zurückliegenden Phase insbesondere das Fehlen von ereignis- und infrastrukturbezogenen Daten sowohl auf der Strecken- als auch der Objektebene als Defizit herausgestellt. In Bezug auf Sturmgefahren sind hierbei vor allem Geometrie von Straßen (z. B. Fahrbahnbreiten) und Schienen, die Sensitivität von Straßen- und Schienenkörpern (z. B. Höhenlagen der Strecken) oder auch detaillierte Informationen zur infrastrukturnahen Vegetation (Höhe, Vitalität, Bodenart, Bodenfeuchte) und der Topografie (Sturmereignisse) zu nennen. Zur genaueren Modellierung von Sturmereignissen sind weiterführende, hochaufgelöste Daten notwendig. Die Akquise und Auswertung dieser Daten bilden eine weitere Aufgabe in den folgenden Jahren, um über einen räumlichen Verschnitt mit Windgeschwindigkeiten und Sturmereignissen bei extremen Witterungsbedingungen, mögliche Gefährdungsbereiche ableiten zu können. Derzeit kann nur in Einzelfällen (z. B. anhand von lokalen Detailstudien) oder sehr pauschal eine Aussage zu den zu erwartenden Verkehrseinschränkungen, -ausfällen oder Schäden an der Infrastruktur getroffen werden. Somit konnten einige Themen im Rahmen der 1. Phase des Expertennetzwerks nicht in vollem Umfang untersucht und bearbeitet werden. Dazu gehören:

A Klimadaten

- Die Forschung zum Einfluss der vorherrschenden Großwetterlage auf Extremereignisse sollte fortgesetzt werden.
- Für extreme Windgeschwindigkeiten liefern die Klimamodelle bisher unzureichende Ergebnisse. Eine neue, ab Ende 2020 vorliegende, Modellsimulation wird in zukünftige Betrachtungen einbezogen.
- Der Forschungsfortschritt ist durch die Verkehrsträger zu beobachten und in der Expositionsanalyse zu berücksichtigen.

B Weiterentwicklung der Wirkungskette Sturmwurf

- Während in der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks erstmalig die Exposition der Verkehrsträger Straße und Schiene gegenüber Sturmwurf ermittelt werden konnte, fehlen vor allem in Hinblick auf die Straße detaillierte Informationen zur Sensitivität. Hier sind weitere Datengrundlagen zu den potentiell exponierten Streckenabschnitten einzuholen.
- Ein bedeutender und bisher nicht betrachteter Aspekt für die Expositionsanalyse – Sturmwurf – ist die Vegetationshöhe in Verbindung mit der jeweiligen Entfernung zur Verkehrsinfrastruktur. Die Vegetationshöhe konnte auf Basis der Analysen mithilfe des Basis-DLM bisher nicht einbezogen werden, dies soll nun nachgeholt werden (vgl. LiDAR Forschungsprojekte Kapitel 6.3).
- Die Ermittlung von Exposition und Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur gegenüber Sturmwurf sollte durch weitere Faktoren angereichert werden. So spielen neben dem Vorkommen der Vegetation entlang der Strecken auch deren Eigenschaften eine wichtige Rolle. Weitere wichtige Aspekte wären beispielsweise: lokale Windgeschwindigkeiten, Baumarten, Bodenart und -feuchte und Vitalität.

C Weitere Wirkungsketten

- Die Wirkungsketten Seitenwind (siehe Kapitel 5.1.3) und Bodenerosion durch Wind (Staubstürme) (s. Kapitel 5.1.2) sind weiterhin auf ihre Relevanz zu prüfen und je nach Ergebnis weiterzuentwickeln

6.3 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase

Die begonnenen Arbeiten des Themenfeldes 1 des BMVI-Expertennetzwerks zur Zielvorstellung der Gestaltung eines klimaresilienteren Verkehrssystems werden ab 2020 in einer zweiten Bearbeitungsphase weitergeführt und vertieft. Die fachliche Ausgestaltung orientiert sich dabei an der Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln einschließlich der thematischen Roadmap des Themenfeldes 1 (BMVI-Expertennetzwerk 2018). Während in der 1. Phase die Potenziale von Forschungs- und Fachdaten sowie technischen Neuentwicklungen identifiziert wurden, steht in der 2. Phase das Fortentwickeln der vorliegenden Ergebnisse und das Integrieren weiterer wissenschaftlicher Daten und Methoden im Vordergrund.

Die Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase liegen zum einen in der Beantwortung bzw. tiefgreifenderen Untersuchung der offenen Forschungsfragen. Ferner sollen zusätzlich Schwerpunkte in die Untersuchungen aufgenommen werden, die nicht nur technische und methodische Fragen zum Umgang mit Klimaprojektionen beinhalten, sondern auch verstärkt den Fokus auf Anpassungsmaßnahmen legen. Die dabei erzielten Ergebnisse sollen dann wieder in die Forschungsschwerpunkte zurückgespiegelt werden, um den Bedürfnissen der Anwender gerecht zu werden.

6.3.1 Erweiterung des Klimaprojektionsensembles

Regionalisierte Simulationen aus CMIP6 werden vermutlich nicht vor 2021/2022 zur Verfügung stehen, sollen dann aber verstärkt ausgewertet werden. Insbesondere soll der Einfluss der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modelle (hochaufgelöste Regionalmodelle vs. grob aufgelöste Globalmodelle) auf die Ergebnisse vertieft untersucht werden. Daraus soll jeweils abgeleitet werden, welche Mindestanforderungen für räumliche Analysen (offene See, Küste, Ästuar) und Risikoabschätzungen notwendig sind.

6.3.2 Ausblick LiDAR-Forschungsprojekte

Um auf Basis der in der 1. Phase vorgenommenen, generellen Expositionsanalyse mit Bezug zur Sturmwurfgefährdung (mit einem Abstand der Strecken von 20 m zu den bewaldeten Gebieten) eine detailliertere Gefährdung durch Sturmwurf zu ermöglichen, müssen die Vegetationshöhen berücksichtigt werden. Da diese Information nicht aus dem Landschaftsmodell (Basis-DLM) abzuleiten ist, werden für die Verkehrsträger Straße und Schiene in der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks externe Forschungsprojekte initiiert, die mittels Laserscan-Daten (LiDAR) die Expositionsanalyse verfeinern. Um einen Gesamtüberblick über die Baumbestände entlang des Bundesfernstraßennetzes zu erhalten, wird das Projekt FE 01.0201/2018/NRB „Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten (LiDAR) zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes von Nordrhein-Westfalen“ bearbeitet. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines GIS-gestützten Verfahrens, welches es ermöglicht, Einzelbäume, die eine potenzielle Gefährdung für das Bundesfernstraßennetz darstellen, aus frei verfügbaren Laserscan-Daten zu identifizieren. Außerdem müssen alle identifizierten Bäume mit ihrer Position und Höhe in einer Geodatenbank inventarisiert und gleichzeitig den entsprechenden Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes zugeordnet werden können. Dieses Projekt wird aufgrund der freien Datenverfügbarkeit exemplarisch für Nordrhein-Westfalen (NRW) durchgeführt. Dabei soll das Verfahren so entwickelt werden, dass es später für die gesamte Bundesrepublik Deutschland anwendbar ist. Entlang der Schiene wird ein vergleichbares Projekt 2019-U-5-1217 „Ableitung Baumbestand entlang des deutschen Schienennetzes“ innerhalb der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Thüringen durchgeführt. Innerhalb dieses Projektes sollen neben der Identifizierung der Bäume, ihrer Position und Höhen auch die jeweiligen Gefährdungen für die Gleisinfrastruktur auf Basis dieser Informationen sowie weiterer Faktoren wie der Elektrifizierung der Gleise, der Windgeschwindigkeit, der Topographie oder der Bodenfeuchte ermittelt werden.

Durch diese Projekte werden somit nicht nur weitere Erkenntnisse und neue Detailgrade der Expositionsanalyse erwartet, sondern bereits umfassende Analysen im Bezug auf die Sensitivitätsanalyse generiert. Diese digitalen Analyseverfahren sollen nicht die Vor-Ort-Begehungen im Rahmen der regelmäßigen Baumschau

ersetzen, können diese aber u. a. zur Vorselektion von Streckenabschnitten unterstützen. Bei verbesserter Datengrundlage (flächendeckende Verfügbarkeit von DGM1 und DOM1 Daten) und bundesweiter Verfügbarkeit der Laserscan-Daten können diese Analysen auf Basis der Forschungsprojekte auch auf das gesamte Bundesgebiet ausgeweitet werden.

6.3.3 Aufbau des Themenfelds 1 in der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks

Die für eine erfolgreiche Klimaanpassung des Verkehrssystems notwendigen Analyse- und Bewertungsschritte werden in vier – im Vergleich zur 1. Forschungsphase neu strukturierten – Schwerpunktthemen bearbeitet (Abbildung 6-1). Die Forschungsarbeiten umfassen weiterhin die Generierung und Bewertung von Zukunftsszenarien und Daten als Grundlage für die Analyse spezifischer Klimafolgen für das deutsche Verkehrssystem und die Bewertung der Sensitivität und Kritikalität der Infrastrukturen. Außerdem werden Anpassungsmaßnahmen und -strategien abgeleitet sowie von Handlungserfordernisse priorisiert. Die Schwerpunktthemen orientieren sich nicht mehr an den einzelnen Naturgefahren, sondern nehmen die Komponenten der Klimawirkungsanalyse in den Fokus. Durch diese Bündelung soll der Charakter der einheitlichen, verkehrsträger- und gefahrenübergreifenden Bearbeitung gestärkt werden.

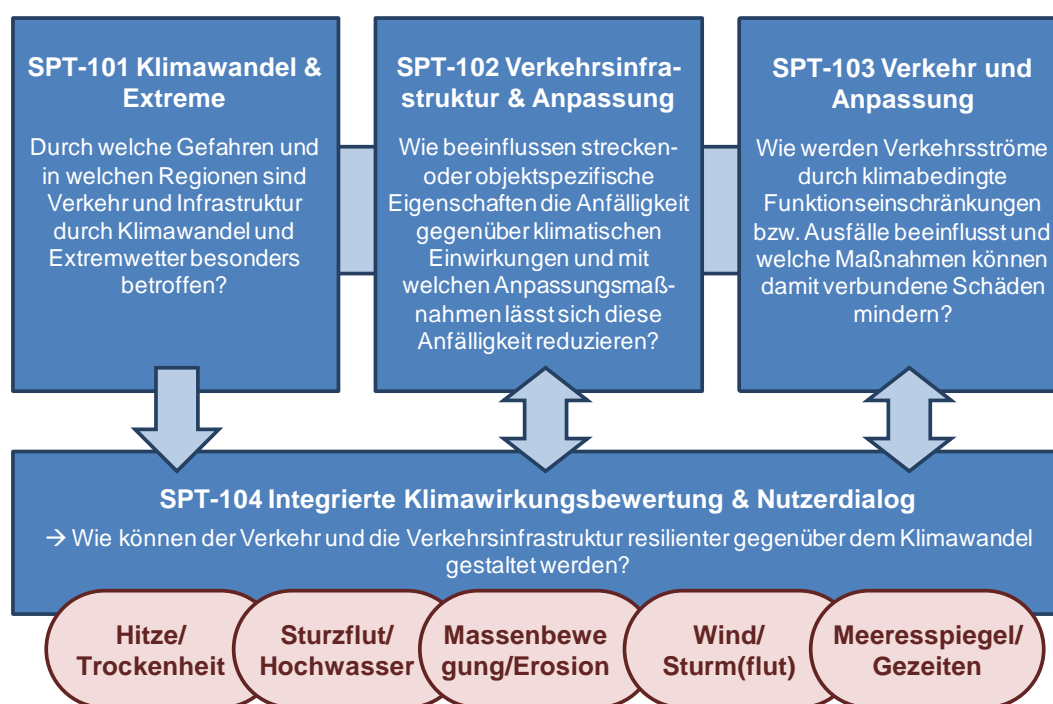


Abbildung 6-1: Organisationsstruktur, Schwerpunktthemen und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase 2020–2025 des BMVI-Expertennetzwerks (BMVI-Expertennetzwerk 2020).

Konkret werden folgende Schwerpunktthemen bearbeitet:

- *SPT-101 Klimawandel & Extreme* beinhaltet alle Analyseschritte von der Szenarienbildung bis zur **Expositionsanalyse** für Verkehrsinfrastrukturen (i. S. v. Klimafolgenbetrachtungen).
- *SPT-102 Verkehrsinfrastruktur & Anpassung* untersucht die **Sensitivität** der Verkehrsinfrastrukturen bezüglich Klimawandel und Extremereignissen sowie Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung von deren Sensitivität.
- *SPT-103 Verkehr & Anpassung* bewertet die **Kritikalität** von klimawandel- und extremwetterbedingten Ausfällen bzw. Funktionseinschränkungen und untersucht Maßnahmen zur Minderung negativer Klimawandelwirkungen auf den Verkehr.

- *SPT-104 Integrierte Klimawirkungsbewertung & Nutzerdialog* integriert die Ergebnisse von SPT-101 bis 103 in eine verkehrsträgerübergreifende **Klimawirkungsbewertung** und stellt im Dialog mit den Betreibern der Verkehrsinfrastruktur Produkte, die zur Erhöhung der **Klimaresilienz** des Verkehrssystems dienen können, bereit.

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

7 Literaturverzeichnis

- Albrecht A (2009) Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, 42.
- BABS-CH (2015) Nationale Gefährdungsanalyse – Gefährdungsdossier Sturm, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS-CH), Bern.
- BASSt (2012) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. ZTV-ING Teil 9 Bauwerke., Bundesanstalt für Straßenwesen (BASSt).
https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING-Teil-9-Bauwerke-Baudurchfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&cv=6
- Berrisford P, Dee D, Poli P, Brugge R, Fielding K, Fuentes M, Kallberg P, Kobayashi S, Uppala S und Simmons A (2009) The ERA-Interim Archive, Version 1.0. <https://www.ecmwf.int/node/8174>
- BGR (2014) Potentielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wind in Deutschland, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung/Bodenerosion/Wind/PEGWind1000_A0.pdf
- 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-Expertenetzwerk (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertenetzwerks Wissen – Können – Handeln, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn. <https://www.bmvi-expertenetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Forschungsstrategie.pdf>
- BMVI-Expertenetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. https://www.bmvi-expertenetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSP/IBerichte/TF1_2Auflage.pdf;jsessionid=5D56BB9ECDBDD8678AB6094618596470.live21301?__blob=publicationFile&cv=4
- BMVI (2015) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S und Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 141(686), 1-15. DOI:10.1002/qj.2486
- Born K, Ludwig P und Pinto JG (2012) Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography 64(1). DOI:10.3402/tellusa.v64i0.17471
- Borsche M, Kaiser-Weiss AK und Kaspar F (2016) Wind speed variability between 10 and 116 m height from the regional reanalysis COSMO-REA6 compared to wind mast measurements over Northern Germany and the Netherlands. Advances in Science and Research 13, 151-161. DOI:10.5194/asr-13-151-2016
- Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Krähenmann S, Möller J, Nilson E, Rauhe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- 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, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas_27/2014
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N und Vitart F

- (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656), 553-597. DOI:10.1002/qj.828
- DIBt (2019) Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/Windzonen_nach_Verwaltungsgrenzen.xlsx
- DIN EN 1991-1-4/NA (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen-Windlasten.
- DWD (2020) Beaufort-Skala, Wetterlexikon. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100310&lv3=100390>
- FGSV (1983) Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS). Teil: Landschaftsgestaltung (RAS-LG), Abschnitt 3: Lebendverbau., Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.
- FGSV (2006) Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst: Teil: Grünpflege. Ausgabe 2006. 9783937356013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.
- FGSV (2010) Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.
- FGSV (2017) Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.
- Ganske A (2019a) 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-Expertenetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A (2019b) Validation von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphären-Klimamodellen, Bericht zum Meilenstein M104a-2 des SP-104 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Garbett LG (2007) Admiral Sir Francis Beaufort and the Beaufort Scales of wind and weather. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 52(218), 161-172. DOI:10.1002/qj.49705221807
- GDV (2016) Unfallforschung der Versicherer (UDV): Gefahr durch kippende Leicht-Lkw-Gespanne – Studie zeigt großes Seitenwindrisiko. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Berlin. https://www.google.com/url?sa=t&rc=1&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewj2tf6P1pfrAhXO2aQKHTA_BU0QFjAAegQIBRAB&url=http%3A%2F%2Fm.udv.de%2Fsystem%2Ffiles_force%2Fmedia%2F160712_udv_seitenwind.pdf%3Fdownload%3D1&usq=AOvVaw0_2fqDrFkKLHlslcExzoX4
- Goris A und Heisel JP (2012) Schneider Bautabellen für Architekten. 20. Auflage. Werner Verlag, Köln.
- Gruner U (2008) Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. *Conference Proceedings, Interpraevent*, pp. 147-158. http://www.interpraevent.at/palmcms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008_2_147.pdf
- Haeseler S, Bissolli P, Lefebvre C, Daßler J und Zins V (2019) Serie von Sturmtiefs im März 2019 über Europa mit Orkanböen in Deutschland. Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20190320_sturmtiefs_europa.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- 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, Lohregel 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
- Hetzl G (2007) Handbuch Eisenbahninfrastruktur. In: Fendrich L (ed), Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Springer, Berlin.
- Ingenieurgruppe IVV (2019) Kritikalitätsanalyse, Beschreibung des indikatorenbasierten Bewertungsansatzes, Zwischenstand. Bericht zum Zwischenstand des Forschungsprojektes Kritikalitätsanalyse für das Bundesfernstraßennetz, Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG, Aachen (unveröffentlicht).

- IPCC (2019) Summary for Policymakers. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/download-report>
- Jenkinson AF und Collison FP (1977) An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic climatology branch memorandum 62, 18.
- Jensen C (2019) Charakteristische Wetterlagen über der Nordsee, Bericht zum Meilenstein M108b-2 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Kaiser-Weiss AK, Kaspar F, Heene V, Borsche M, Tan DGH, Poli P, Obregon A und Gregow H (2015) Comparison of regional and global reanalysis near-surface winds with station observations over Germany. *Advances in Science and Research* 12(1), 187-198. DOI:10.5194/asr-12-187-2015
- 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
- Lefebvre C, Bissolli P, Hafer M und Roček M (2018) Sturmtief FABIENNE bringt am 23. September 2018 Sturm und Regen. Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20180923_sturm_fabienne.pdf
- Loewe P, Klein H und Weigelt-Krenz S (2013) System Nordsee - 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-49.pdf>
- Lohregel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNLAf2020.2020.06
- Mahamadzadeh M und Biebeler H (2009) Anpassung an den Klimawandel, Köln. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Analysen/PDF/Bd._57_Anpassung_an_den_Klimawandel.pdf
- 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 Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschitz E, Lohregel 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
- Novák B und Ensle A (2012) Auswirkungen des Klimawandels auf bestehende Spannbetonbrückenbauwerke. FE 89.0232/2009/AP Schlussbericht., Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.
- Novák B und Ensle A (2013) Weiterentwicklung klimatischer Einwirkungsmodelle und Bemessungsgrößen für Brücken- und Tunnelbauwerke auf Basis klimatischer Prognoseberechnungen. FE 29.0332/2013 Schlussbericht., Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.
- NWZonline (2017) Heftiges Unwetter und seine Folgen: Zwei Tote durch umgestürzte Bäume. Nordwest Zeitung online (NWZonline). https://www.nwzonline.de/blaulicht/zwei-tote-durch-umgestuerzte-baeume_a_31,3,1254723205.html
- Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohregel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deutschländer T, Fleischer C, Forbriger M, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J und Seiffert R (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- Rödel B, Will A und Hense A (2008) The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17(4), 347-348. DOI:10.1127/0941-2948/2008/0309

- Roedner E (2003) Allgemeine Zirkulationsmodelle, Atmosphäre. ProMet 29(1-4), 6-14.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/29_1_4_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 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 Fokusegebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- Straßen.NRW (2018) Auswirkungen von „Friederike“ auf den Straßen von NRW. Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen. Straßen.NRW. <https://www.strassen.nrw.de/de/presse/meldungen/2019/pi2017-2-3022.html>
- UBA (2016) Erläuterungen zu den Klimawirkungsketten, Umweltbundesamt (UBA).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ und Rose SK (2011) The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109(1), 5-31. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z
- Walter A, Keuler K, Jacob D, Knoche R, Block A, Kotlarski S, Müller-Westermeier G, Rechid D und Ahrens W (2006) A high resolution reference data set of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results. Meteorologische Zeitschrift 15(6), 585-596. DOI:10.1127/0941-2948/2006/0162

8 Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	A mtliches T opographisch- k arthographisches I nformationssystem
Basis-DLM	D igitales B asis- L andschafts m odell
BASt	B undes a nstalt für S traßen w esen
BGR	B undes a nstalt für Geowissenschaften und R ohstoffe
BISStra	B undes i nformationssystem S traße
BfG	B undes a nstalt für G ewäss e r k unde
BKG	B undes a mt für K arthographie und G eodäsie
BMVI	B undes m inisterium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BSH	B undes a mt für S eeschiff f ahrt und H ydro g raphie
CORDEX	C oordinated D ownscaling E xperiment – regionale Initiativen für das Herun- t erska- lieren der globalen Klimamodelle
CORINE	C oordination of I nformation on the E nvironment
COSMO	C onsortium for S mall S cale M odelling – Konsortium für kleinskalige Modellierung
COSMO-CLM	COSMO C limate L imited-area M odel – von der CLM-Community betriebenes regi- onales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell COSMO hervorgegangen ist
COSMO-REA6	COSMO R egional R eanalysis – regionale Reanalyse erstellt mit dem COSMO-Modell
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
DGM	D igitales G eländ e modell
DLM	D igitales L andschafts m odell
DOP	D igitales O rtho p hoto
DTVw	d urchschnittlicher w erk t äglicher K fz- V erkehr
DWD	D eutscher W etter d ienst
DZSF	D eutsches Z entrum für S chienen v erkehr s forschung
EBA	E isenbahn- B undes a mt
EC-EARTH	E uropean C ommunity E arth-System Model – von einem europäischen Konsortium entwickeltes ESM
EN	E uropäische N ormen
ERA	E CMWF R e- A nalysis – Reanalysedaten vom ECMWF
ExpN	E xp e rten n etzwerk des BMVI
FGSV	F orschung s gesellschaft für S traßen- und V erkehr s wesen e. V.
FLL	F orschung s gesellschaft L andschaft s entwicklung L andschaftsbau
G	Sturm (g ale)
GCM	G eneral C irculation M odel – globales Klimamodell
GFDL-ESM2M	G eophysical F luid D ynamics L aboratory - E arth S ystem M odel – ESM des geophy- sischen Strömungsdynamiklabors beim Nationalen Ozean- und Atmosphärenbehörde der USA
GIS	G eographisches I nformationssystem
HadGEM2-ES	H adley Centre G lobal E nvironmental M odel - E arth S ystem – vom Hadley-Zentrum entwickeltes ESM

IMA-A	I nter m inisterielle A rbeitsgruppe – A npassung an den Klimawandel
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimara
IPSL-CM5A	I nstitut P ierre S imon L aplace Model CMIP5 – Klimamodell des in Frankreich basierten Modellierungszentrums
KLIWAS	Auswirkungen des K limawandels auf W asserstraßen und S chiffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (Projekt des BMVI)
LiDAR	L ight D etection and R anging
MIROC5	M odel for I nterdisciplinary R esearch on C limate – von in japanischen Forschungsinstituten entwickeltes regionales Klimamodell
MPI-ESM LR	M PI- E SM low resolution – grob aufgelöstes Earth System Model (ESM) des M ax- P lanck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
MPI-OM	O zeanmodell des M ax- P lanck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
NEMO	N ucleus for E uropean M odelling of the O cean – von einem europäischen Konsortium von Forschungsinstituten entwickeltes regionales Ozeanmodell
NEMOBFStr	N etzmodell der B undesfernstraßen
NUL	kein Sturm (no gale)
OARCM	regionales gekoppeltes O zean- A tmosphären- M odell
RACE	R egional A tlantic C irculation and Global Change – Verbundprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über die regionale Atlantikzirkulation im globalen Wandel
RCA4	R ossby C entre regional a tmospheric model – beim SMHI entwickeltes regionales Klimamodell
RCM	R egional C limate M odel – regionales Klimamodell
RCP	R epresentative C oncentration P athway – Emissionsszenarien (Repräsentative Konzentrationspfade) des 5. IPCC Sachstandsberichts
REMO	E uropäische N ormen
rH	relative H äufigkeit
SP	S chwerpunkt
TEN	T rans- E uropean N etworks - Transeuropäische Verkehrsnetze
TRY	T est R eference Y ears
SG	starker Sturm (severe gale)
SP	S chwerpunkt
UBA	U mwelt b undesamt
UdV	U nfallforschung d er V ersicherer
VSG	sehr starker Sturm (very severe gale)

9 Anhang

Tabelle 9-1: Übersicht über die verfügbaren gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Klimamodelle (OARCM) und die atmosphärischen RCMs nach ihrem Globalmodellantrieb und ihrer Herkunft (C: EURO-CORDEX, K: KLIWAS, R!: RACE!, S: SMHI).

RCM oder OARCM GCM	<i>Klimaschutzszenario</i>			<i>moderates Szenario</i>			<i>Weiter-nie-bisher-Szenario</i>		
	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/ REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO
MPI-ESM_LR		S	C	R!	S	C	R!	K	C
EC-EARTH		S			S			S	
GFDL-ESM2M		S			S			S	
HadGEM2-ES		S			S			S	
IPSL-CM5A					S			S	

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 Bundesverkehrssystems 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