

Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen

Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

A.-F. Lohrengel, C. Brendel, C. Herrmann, J. Kirsten, M. Forbriger, K. Stube



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

Zitiervorschlag

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. 47 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNLAf2020.2020.06

Impressum

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

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

Internet: www.bmvi-expertennetzwerk.de

Autoren:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Anne-Farina Lohrengel, Jens Kirsten, Martin Klose, Kathrin Stube

Deutscher Wetterdienst

Christoph Brendel

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung/ Eisenbahn-Bundesamt

Carina Herrmann, Markus Forbriger

Redaktionsschluss: April 2020

Titelbild: Foto: Auf B53 gespültes Gesteinsmaterial in Folge eines Niederschlagsereignisses,
Quelle: Gerald Volkmer

DOI: 10.5675/ExpNLAf2020.2020.06

Inhalt

1	Kernbotschaften.....	1
2	Hintergrund und Zielstellung.....	2
3	Einführung in die Forschungsarbeiten.....	4
3.1	Forschungsstand und Begleitprojekte	4
3.2	Bezug zum Leitfaden der IMA.....	5
3.3	Beiträge zur Klimawirkungsanalyse im Themenfeld 1.....	7
3.3.1	Expositionsanalyse.....	8
3.3.2	Sensitivitätsanalyse.....	8
3.3.3	Kritikalitätsanalyse.....	8
4	Hinweiskarten für die Bundesfernstraßen und die Bundesschienenwege	9
4.1	Datengrundlagen.....	9
4.1.1	Geodaten.....	9
4.1.2	Klimadaten.....	11
4.2	Methodik.....	20
4.2.1	Expertenwissensbasierter Modellansatz (Ansatz 1).....	20
4.2.2	Datenbasierter Modellansatz (Ansatz 2).....	27
4.3	Ergebnisse (Ansatz 1).....	29
4.4	Validierung der Hinweiskarten.....	31
5	Digitale Erfassung und Inventarisierung von gravitativen Massenbewegungen	33
5.1	Datengrundlagen.....	33
5.2	Methodik.....	33
5.3	Ergebnisse.....	35
6	Fazit & Ausblick.....	37
7	Literatur.....	40
8	Abkürzungsverzeichnis.....	42

1 Kernbotschaften

- Gravitative Massenbewegungen können die Straßen- und Schieneninfrastruktur in verschiedener Hinsicht beeinträchtigen.
- Zwar hängt die Hangstabilität maßgeblich von der Zusammensetzung bzw. Beschaffenheit des Untergrundes und der Hangneigung ab, jedoch können Klima und extreme Wetterereignisse einen zusätzlich negativen Einfluss haben.
- Auslösende Klimaparameter für gravitative Massenbewegungen können Dauerniederschlag, Starkniederschlag und Frost-Tau-Wechsel darstellen. Um den Einfluss klimatischer Änderungen abzuschätzen, wurden für die Parameter „mittlerer Jahresniederschlag“, „mittlerer Sommerniederschlag“, „mittlerer Winterniederschlag“, „Anzahl der Tage mit Starkniederschlagsereignissen“ (Niederschlag ≥ 20 mm) und „Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel“ Änderungssignale für die *nabe* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2071–2100) in Form von Klimamodifikatoren berücksichtigt.
- Unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* ist von einer Zunahme der potenziell durch gravitative Massenbewegungen betroffenen Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitten auszugehen.
- Basierend auf einem ingenieurgeologischen Modellansatz wurde unter Einbeziehung der genannten Klimamodifikatoren eine Expositionsanalyse für das Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz durchgeführt.
- Demnach waren im *Bezugszeitraum* (1971–2000) rund 2.590 km (ca. 5 %) des Bundesfernstraßen- und 1.900 km (ca. 6 %) des Bundesschiennetzes gegenüber gravitativen Massenbewegungen unter Berücksichtigung der Klimamodifikatoren exponiert.
- In der *nahen Zukunft* (2031–2060) können weitere ca. 390 km des Bundesfernstraßennetzes bzw. zusätzliche 370 km des Bundesschiennetzes potenziell exponiert sein (also jeweils ca. 1 Prozentpunkt mehr).
- In der *fernen Zukunft* (2071–2100) beträgt die Zunahme gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1.060 km für das Bundesfernstraßen- (ca. 2 Prozentpunkte) und 900 km für das Bundesschiennetz (3 Prozentpunkte).

2 Hintergrund und Zielstellung

Das Ziel des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk besteht in der Entwicklung von Grundlagen zur Erhöhung der Resilienz des Verkehrssystems gegenüber Klimaänderungen und Extremereignissen. Basierend auf der Analyse von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden gezielte Anpassungsmaßnahmen entwickelt bzw. bewertet und somit negative Klimawandelfolgen auf das Verkehrssystem minimiert (BMVI-Expertennetzwerk (2020)).

Bei der Analyse der Klimawirkungen auf das Verkehrssystem erfolgte in der ersten Förderphase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019; Projektstruktur siehe Abbildung 2-1) eine Konzentration auf die potenzielle Betroffenheit durch *Hochwasser* (Rauthe et al. 2020), *Stürme* (Bott et al. 2020) und *Hangrutschungen* (dieser Bericht) sowie auf wasserstraßenspezifische Aspekte der *Schiffbarkeit* (z. B. Niedrigwasser) und *Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020).

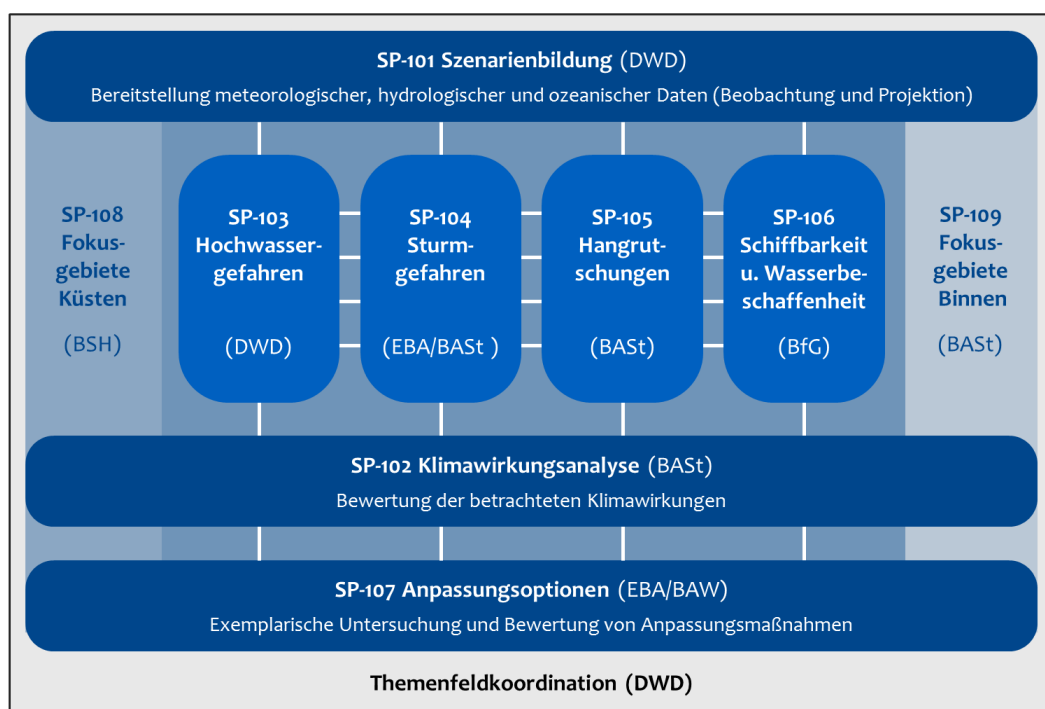


Abbildung 2-1: Projektstruktur von Themenfeld 1 *Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen* (Förderphase 2016–2019) mit seinen neun Forschungsschwerpunkten (SP: Schwerpunkt). In Klammern ist jeweils die den SP koordinierende Behörde angegeben.

Die verkehrsträgerspezifischen Ergebnisse dieser *Klimawirkungsanalysen* wurden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengestellt und in vergleichbarer Weise visualisiert. Dabei wurden die räumliche Betroffenheit der Verkehrsträger (Exposition), dessen Anfälligkeit aufgrund ihrer Eigenschaften (Sensitivität; soweit Datengrundlagen für Bewertung vorliegend) und die verkehrliche (und ökologische) Bedeutung der Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente (Kritikalität) bewertet (Hänsel et al. 2020b).

Im Schwerpunkt *Hangrutschungen* wurden erste Methoden zur Expositionsanalyse für die Straße und Schiene entwickelt. Hierbei wurden zunächst allgemeine gravitative Massenbewegungen in einem Modellansatz betrachtet.

Unter gravitativen Massenbewegungen werden „hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fest- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft“ verstanden (Glade und Dikau 2001). Dabei wird im Allgemeinen zwischen Rutschungen, Gleit-, Sturz- und Fließprozessen unterschieden. Die Hangstabilität hängt maßgeblich von der Zusammensetzung bzw. Beschaffenheit des Untergrundes und der Hangneigung ab. Unterschiedliche Witterungen und extreme Wetterereignisse wie Dauerniederschlag, Starkniederschlag oder Frost-Tau-Wechsel können auslösende Faktoren für gravitative Massenbewegungen darstellen (Krauter et al. 2012).

Rutschungen bzw. Gleitprozesse werden als Massenbewegungen auf einer Gleitfläche definiert, die sowohl Fest- als auch Lockergestein betreffen können. Die hydrogeologischen Bedingungen beeinflussen die Aktivität einer Rutschmasse, wobei die Wassersättigung im Untergrund und an der Oberfläche maßgeblich den Mechanismus und die Aktivität beeinflusst (BAFU 2016). Oft haben Rutschungen eine längerfristige Vorlaufzeit bis es zum Ereignis kommt. Witterungsbedingte Auslöser können hier Dauerniederschläge oder Frost-Tau-Wechsel darstellen, welche zur Verringerung der Kohäsionskräfte im Untergrund führen und somit Gesteinsverbände destabilisieren können (Krauter et al. 2012).

Sturzprozesse stellen hingegen schnelle und plötzlich auftretende Massenbewegungen dar, die häufig an steilen Hängen zur Gefährdung werden können (BLfU 2017). Sie werden insbesondere durch die Struktur der Felsmasse (Klüftung, etc.) bestimmt. Frost-Tau-Wechsel können hierbei als auslösende Parameter gelten. Neben Fels- bzw. Bergstürzen zählen sogenannte Murgänge zu den schnellen Massenbewegungen (Glade und Dikau 2001). Häufig treten diese Prozesse periodisch und in den meisten Fällen in Folge von Niederschlägen oder Schneeschmelzen auf (BLfU 2017).

Es ist davon auszugehen, dass die Hangstabilität maßgeblich von der Zusammensetzung bzw. Beschaffenheit des Untergrundes und der Hangneigung abhängt. Jedoch können das Klima und extreme Wetterereignisse einen zusätzlich negativen Einfluss haben. Um eine Aussage zum Einfluss des Klimawandels treffen zu können, muss zunächst die Grunddisposition unter derzeitigen Bedingungen als Referenz identifiziert werden. Entsprechende Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen werden z. B. durch die geologischen Dienste der Bundesländer erstellt. Eine verwendbare, bundesweit flächendeckende Hinweiskarte, die mit dem Bundesfernstraßen- bzw. Bundesschiennetz in Verbindung gebracht werden kann, lag zum Projektbeginn im Jahr 2016 nicht vor. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks ein ingenieurgeologischer Modellansatz unter Einbeziehung von Klimamodifikatoren zur Expositionsanalyse für das Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz entwickelt.

Im Schwerpunkt *Hangrutschungen* wurde zunächst eine allgemeine Betrachtung gravitativer Massenbewegungen vorgenommen. Im Verlauf der 1. Projektphase wurden weiterhin unter Verwendung des ingenieurgeologischen Modellansatzes methodische Ansätze zur prozessspezifischen Differenzierung untersucht. Gravitative Massenbewegungen können die Straßen- und Schieneninfrastruktur in verschiedener Hinsicht beeinträchtigen. Durch Hindernisse auf Verkehrswegen kann es zu Unfällen kommen, woraus wiederum Behinderungen und Verzögerungen im Verkehrsablauf resultieren können. Auch sind Schäden an der Verkehrsinfrastruktur möglich, die weitere, durch die Instandsetzung verursachte Beeinträchtigungen zur Folge haben können. Aus diesem Grund ist es wichtig, zu untersuchen, wie sich klimatische Parameter im Hinblick auf den Klimawandel verändern und zukünftig auf die Hangstabilität auswirken können.

3 Einführung in die Forschungsarbeiten

3.1 Forschungsstand und Begleitprojekte

Von 2011-2014 wurde das Forschungsprogramm „Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ (AdSVIS) seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchgeführt. Ziel war es, ähnlich wie im TF1 des BMVI-Expertenetzwerks, relevante Auswirkungen des Klimawandels zu identifizieren, die Verwundbarkeit einzelner Objekte der Straßenverkehrsinfrastruktur zu bewerten und Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln¹. In Abbildung 3-1 wird der Arbeitsprozess und dessen Begleitprojekte zum Thema „Anpassung an den Klimawandel“ seit 2011 dargestellt. Eines der 15 AdSVIS-Teilprojekte befasste sich mit der „Weiterentwicklung eines Modells zur Abschätzung rutschungsgefährdeter Gebiete entlang des Bundesfernstraßennetzes und Erstellung einer bundesweiten Gefahrenhinweiskarte“ (Kumerics et al. (2015); FE 05.0170/2011/MRB). Grundlage hierfür war das Pilotprojekt „Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen“ (Krauter et al. (2012); FE 89.238/2009/AP), in dem ein ingenieurgeologisch-klimatischer Modellansatz zur ersten Abschätzung des zukünftigen Gefährdungspotenzials für Rutschungen in ausgewählten Gebieten entwickelt wurde.

Für den Schwerpunkt *Hangrutschungen* (SP-105) des BMVI-Expertenetzwerks konnte somit bereits auf die Vorarbeiten der zwei genannten Projekte des AdSVIS-Programms bezüglich der Erstellung von Hinweiskarten zurückgegriffen werden. Seitens des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) wurde der ingenieurgeologische Modellansatz, der in AdSVIS erarbeitet wurde, in dem Forschungsprojekt „Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes“ (EBA 2018) weiterentwickelt. Im Anschluss hieran wurde seitens der BASt nach demselben ingenieurgeologischen Modellansatz das Forschungsprojekt "Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz“ (Schipek Schipek und Kallmeier (2019); FE 89.0338/2017/) durchgeführt. Zusätzlich wurde in diesem Projekt ein erster Ansatz erarbeitet, der es ermöglicht, Klimaprojektionsdaten in das Modell zu integrieren. Weiterhin wurden Modellansätze erprobt, die eine Prozessdifferenzierung von allgemeinen gravitativen Massenbewegungen ermöglichen.

In dem Zusatzprojekt „Digitale Erfassung und Inventarisierung von gravitativen Massenbewegungen entlang von Bundesfernstraßen“ (Steffen und Schipek (2019); FE 89.0337/2017/) wurden außerdem die Möglichkeiten digitaler Technologien zur Inventarisierung gravitativer Massenbewegungen aus verfügbaren Geländemodellen untersucht.

Die bundesweiten Modelle und die dazugehörigen Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen dienen im ersten Analyseschritt zur Vorselektion von potenziell gefährdeten Streckenabschnitten. Um die Modellansätze zukünftig als Planungsgrundlage nutzen zu können, sind in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks weitere Validierungen geplant. Der Grundgedanke ist hierbei von dem bundesweiten, grob aufgelösten Ansatz in Detailanalysen überzugehen. Hierzu sind bisher vier Projektthemen geplant:

- „Standsicherheitsberechnungen“
- „Schwellenwertanalysen“
- „Kameraüberwachung/Monitoring“
- „Detailanalysen in Fokusgebieten“
- „Untersuchungen zu gravitativen Massenbewegungen anhand von Erosionsrinnen“

¹ https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Strassenbau/Fachthemen/s1-klimawandel.html

Weitere Ausführungen zu den geplanten Arbeiten sind in Kapitel 4.4 (Validierung der Hinweiskarten) nachzulesen. Die Ergebnisse sollen mit dem bundesweiten Ansatz abschließend abgeglichen werden, um möglichen Anpassungsbedarf der Hinweiskarten zu identifizieren.

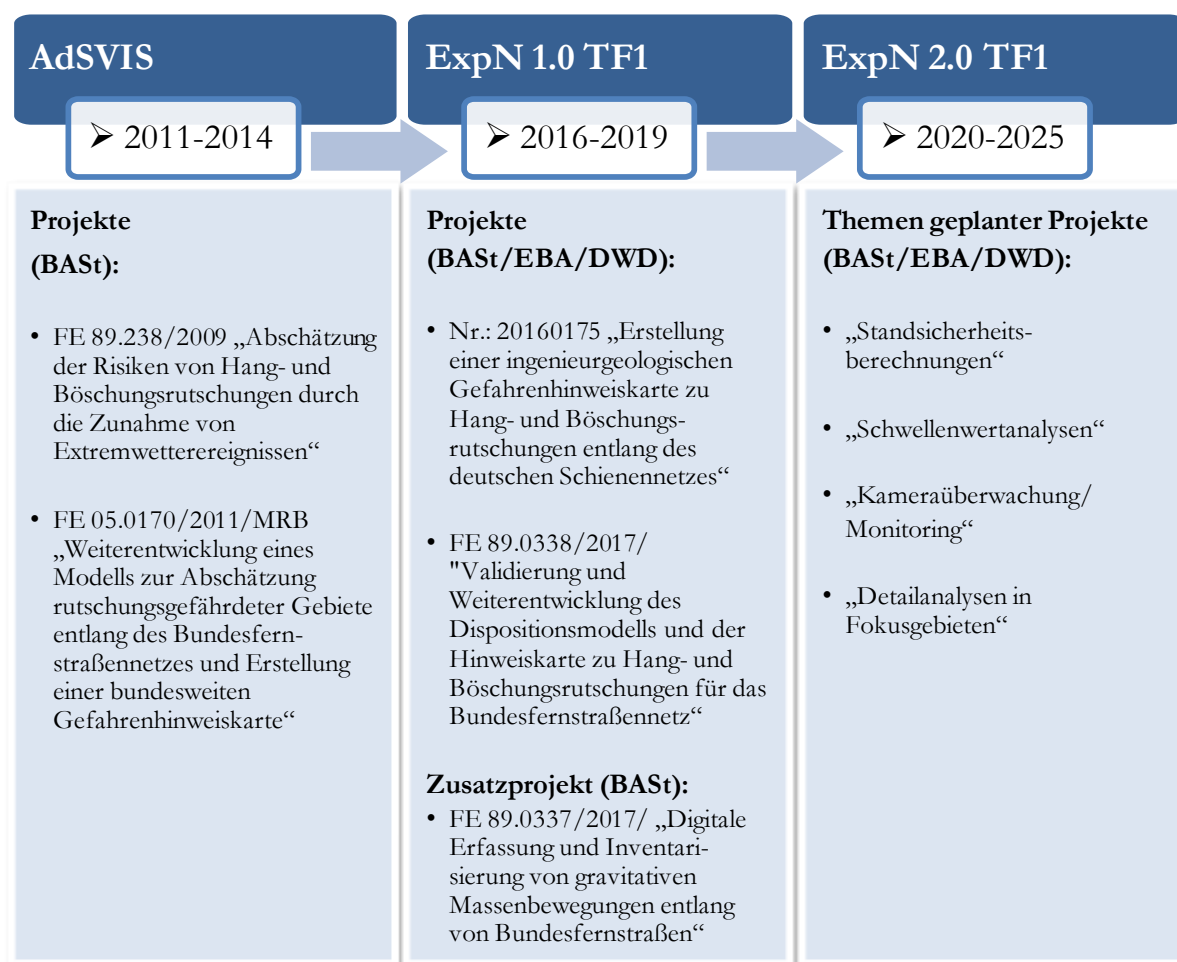


Abbildung 3-1: Arbeitsablauf und Projektübersicht im Bereich gravitative Massenbewegungen seit 2011.

3.2 Bezug zum Leitfaden der IMA

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 von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen 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 Handlungsfelder. Die für den Schwerpunkt *Hangrutschungen* relevanten Wirkungsketten werden in den beiden Handlungsfeldern „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Boden“ beschrieben.

Die Notationsform für die Wirkungszusammenhänge der betrachteten Naturgefahren im Themenfeld 1 ist an diese Wirkungsketten angelehnt. Demnach lassen sich die Klimawirkungsketten in Bezug auf gravitative Massenbewegungen für die Verkehrsinfrastruktur von Schiene und Straße wie in Abbildung 3-2 dargestellt zusammenfassen.

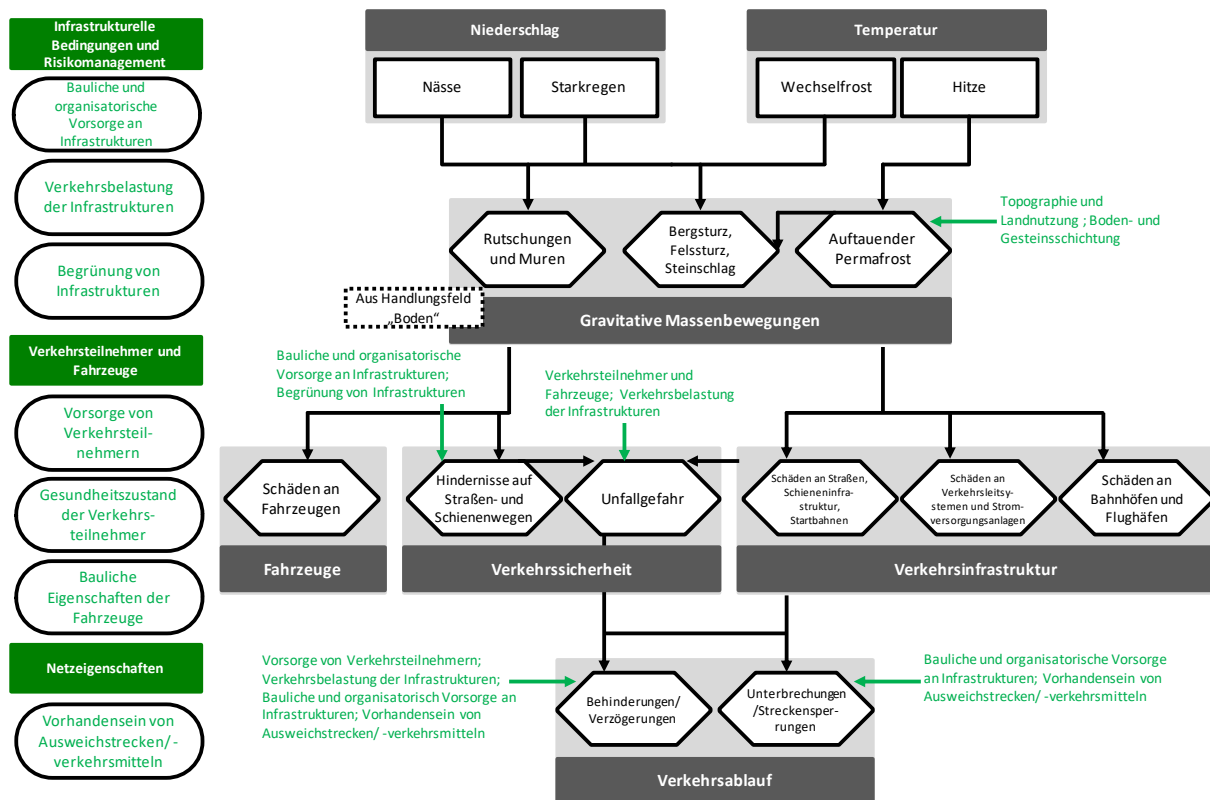


Abbildung 3-2: Allgemeines Schema der Klimawirkungsketten für gravitative Massenbewegungen aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, verändert nach UBA 2016.

In beiden Handlungsfeldern werden jeweils die Wirkungsketten klimatischer Auslöser für gravitative Massenbewegungen dargestellt. Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ resultieren die Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen in einer Einschränkung des Verkehrsablaufs (Behinderung bzw. Verzögerung des Verkehrs sowie Unterbrechungen und Streckensperrungen von Verkehrswegen).

Im Schwerpunkt *Hangrutschungen* des Themenfeldes 1 werden die klimatischen Auslöser hingegen nicht separat von einer grundsätzlichen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen betrachtet. Über einen ingenieurgeologischen Modellansatz wird zunächst die potenzielle Betroffenheit durch geologische Einflussgrößen (z. B. Hangneigung, Gesteinsklassen, Landnutzung) identifiziert und im Anschluss mit möglichen klimatischen Auslösern kombiniert. Über Hinweiskarten wird ein Lagebezug des landgebundenen Verkehrsnetzes zur Naturgefahr hergestellt (Expositionsanalyse).

Tabelle 3-1: Handlungs- und Themenfelder des IMA-Leitfadens und Bezug zur Klimawirkungsanalyse im SP *Hangrutschungen*.

Handlungsfeld	Themenfeld	Klimawirkung im SP <i>Hangrutschungen</i>
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Verknüpfung geologischer und klimatischer Einflussgrößen zur Ermittlung der potenziellen Betroffenheit von Verkehr und Infrastruktur
Boden	Gravitative Massenbewegungen	

3.3 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 (Hänsel et al. 2020b). Mithilfe der Klimawirkungsanalyse sollen Erkenntnisse über die potenziellen Auswirkungen von Naturgefahren auf die Bundesverkehrswege gewonnen werden. Die entsprechenden Ergebnisse der Analysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße sind in den Kapiteln 3.3 bis 3.5 des TF1-Abschlussberichtes dargestellt.

Die im Themenfeld 1 entwickelte Klimawirkungsanalyse setzt einen methodischen Rahmen für die Analyse der Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur durch Klimawandel und Extremwetterereignisse.

Ziel der Klimawirkungsanalysen ist es, zunächst solche Streckenabschnitte in den Netzen der Verkehrsträger zu identifizieren, die räumlich 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 (Hänsel et al. 2020b).

Tabelle 3-2: Betrachtung der Naturgefahr „gravitative Massenbewegung“ bezüglich der betroffenen Verkehrsträger. Ebenso dargestellt: relevante klimatische Einflüsse inklusive ihrer Operationalisierung anhand von Indikatoren (verändert nach Hänsel et al. (2020b)).

Klimaereignis bzw. Naturgefahr	Betroffener Verkehrsträger	Unter kategorie	Aktuelle Gefährdung	Bewertung von Änderungen in der zukünftigen Gefährdung	
			Datengrundlage	Klimatischer Einfluss	Genutzte Kenngröße (basierend auf Projektionsdaten)
Gravitative Massen- bewegung	Straße, Schiene	Gravitative Massen- bewegungen (allgemein)	Ingenieur- geologische Gefährdung	Starkniederschlag	Anzahl Tage mit einer Niederschlagshöhe von ≥ 20 mm
				Frost-Tau-Wechsel	Anzahl Tage mit Frost-Tau-Wechsel
				Niederschlag	Jahresniederschlag sowie mittlerer Winter- und Sommerniederschlag

Für die Ermittlung von Exposition, Sensitivität und Kritikalität als den drei Zielgrößen von Klimawirkungsanalysen auf Basis des methodischen Rahmens ist die Durchführung von folgenden Teilanalysen vorgesehen: 1) Expositionsanalyse, 2) Sensitivitätsanalyse und 3) Kritikalitätsanalyse. Jede dieser drei Teilanalysen kann als eigenständige Analyse behandelt und ausgewertet werden. Eine vollständige Analyse und Bewertung von Klimawirkungen setzt jedoch die Durchführung und inhaltliche Verknüpfung aller Teilanalysen voraus. Da sich hierfür Geoinformationssysteme (GIS) besonders eignen, bezieht sich das beschriebene Vorgehen auf Klimawirkungsanalysen, die zumeist GIS-basiert durchgeführt wurden (Hänsel et al. 2020b).

Für den Schwerpunkt *Hangrutschungen* wurde ein verkehrsträgerübergreifender Ansatz zur Identifikation potenziell betroffener Streckenabschnitte nach Vorbild des methodischen Rahmens der Klimawirkungsanalyse für das Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz entwickelt.

3.3.1 Expositionsanalyse

Um die Exposition des Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetzes gegenüber gravitativen Massenbewegungen zu identifizieren, wurden Hinweiskarten entwickelt. Die Expositionsanalyse wurde dabei in zwei Teilschritten durchgeführt. Im Rahmen externer Forschungsprojekte wurden zunächst für das Bundesfernstraßen- (Schipek und Kallmeier 2019) und das Bundesschiennetz (EBA 2018) Hinweiskarten erstellt, welche die ingenieurgeologische Grunddisposition, jedoch noch keine klimatischen Einflüsse beinhalten. Im Anschluss wurde eine Methode zur Integration von Klimadaten jeweils untergliedert in den Klimateinfluss *Stand heute*, *nahe Zukunft* und *ferne Zukunft* entwickelt. Neben den Untersuchungen zu allgemeinen gravitativen Massenbewegungen wurden ebenfalls prozessspezifische Modellansätze aufgebaut. So liegen prototypische Hinweiskarten auch für Sturz- und Fließprozesse vor. Die prozessspezifischen Hinweiskarten stellen vorläufige Modellansätze dar und wurden in der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks noch nicht mit den Klimadaten gekoppelt. In Kapitel 1 wird der Modellansatz zur Entwicklung der Hinweiskarten genauer beschrieben.

3.3.2 Sensitivitätsanalyse

Allgemein lässt sich zusammenfassen, dass die Bauweise der Straße bzw. der Schiene (anders als in den anderen Naturgefahrenschwerpunkten) nicht ausschlaggebend für die Sensitivität gegenüber gravitativer Massenbewegungen ist. Vielmehr steht im Fokus, ob die potentiell exponierten Streckenabschnitte bereits mit vorhandenen Sicherungsbauwerken ausgestattet sind oder nicht. Um diesbezüglich eine möglichst realitätsnahe Gefährdungsabschätzung vornehmen zu können, sind ebenfalls die Zustände der Sicherungsbauwerke zu berücksichtigen.

In dem Programmsystem SIB-Bauwerke (Straßeninformationsbank) ist eine Vielzahl von Sicherungsbauwerken erfasst. Die dort hinterlegten Daten konnten jedoch bisher nicht in die entwickelten Hinweiskarten integriert werden, weil eine Georeferenzierung dieser Bauwerke nicht gegeben ist. Daher ist zu beachten, dass vermutlich bei der Expositionsanalyse viele betroffene Streckenabschnitte ausgewiesen werden, die in Realität bereits mit Sicherungsmaßnahmen versehen sind.

Für die Schiene lagen Daten für Sicherungsbauwerke zu Projektbeginn ebenfalls nicht in einer georeferenzierten Form vor und konnten daher bisher nicht in die entwickelten Hinweiskarten für gravitative Massenbewegungen integriert werden.

Neben der rein theoretischen Analyse und technischen Modellentwicklung der Hinweiskarte für gravitative Massenbewegungen wurde eine umfangreiche Geländebegehung durchgeführt. Hierbei wurden die realen Gegebenheiten mit den Modellergebnissen abgeglichen. Außer der Untersuchung geologischer Gegebenheiten wurde auch vermerkt, wenn Sicherungsmaßnahmen an den untersuchten Streckenabschnitten vorhanden waren.

3.3.3 Kritikalitätsanalyse

Der Teilschritt der Kritikalitätsanalyse ist in erster Annäherung unabhängig von der betrachteten Naturgefahr zu beurteilen, da die Bedeutung einzelner Streckenabschnitte untersucht wird. Datengrundlage der Kritikalitätsanalyse sind die Ergebnisse der Bundesverkehrswegeplanung. Dazu zählen auf die Jahre 2010 bzw. 2030 bezogene Ist- und Prognosedaten zu den Verkehrsbelastungen im gegenwärtigen bzw. zukünftigen Straßen- bzw. Schiennetz. Für die erste Phase des BMVI-Expertennetzwerks ist der DTVw ein wesentlicher Indikator in der aktuellen Fassung der Kritikalitätsanalyse für die Bundesfernstraßen. 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).

4 Hinweiskarten für die Bundesfernstraßen und die Bundesschienenwege

Um potenzielle Gefährdungen durch gravitative Massenbewegungen zukünftig besser abschätzen zu können, wurde im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks ein verkehrsträgerübergreifender Modellansatz zur Erstellung von Hinweiskarten für die Bundesfernstraßen und Bundesschienenwege entwickelt.

In zwei externen Forschungsprojekten „Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes“ (EBA (2018), Nr.: 20160175) und "Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz“ (Schipek und Kallmeier (2019), FE 89.0338/2017/) wurden bundesweit anwendbare Modellansätze basierend auf Expertenwissen erarbeitet und mithilfe eines GIS-Tools unter Einbeziehung zahlreicher frei verfügbarer Daten als Hinweiskarten visualisiert.

Diese Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen im Kontext des Klimawandels können mit Bezug auf die jeweiligen Verkehrsträger und zukünftig verkehrsträgerübergreifend beispielsweise als Grundlage für die erste Indikation und Ableitung des Handlungsbedarfs verwendet werden. Der bundesweite Ansatz soll nicht die in ihrem Detaillierungsgrad höher aufgelösten Hinweiskarten der Länder ersetzen, sondern ist viel mehr als Hilfestellung für einen Gesamtüberblick über das Bundesgebiet zu verstehen. Darüber hinaus bietet der entwickelte Modellansatz eine technische Grundlage für zukünftige Analyseverfahren mittels GIS. Im Rahmen der sowohl verkehrsträgerspezifischen als auch künftig verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertennetzwerks sollen die potenziell durch Klimawandel und Extremwetterereignisse betroffenen Streckenabschnitte identifiziert und im Hinblick auf ihre verkehrliche Bedeutung bewertet werden.

Die im Schwerpunkt *Hangrutschungen* entwickelten Hinweiskarten dienen zur Identifikation der Streckenabschnitte, die aufgrund der sich verändernden klimatischen Bedingungen (z. B. Zunahme des Starkregens) durch gravitative Massenbewegungen in der *nahen* oder *fernen Zukunft* betroffenen sein könnten.

In der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks sind einige weiterführende Forschungsprojekte geplant, u. a. Detailstudien mittels höherer Datenauflösung oder Überprüfung des Schwellenwerts für den Starkregen, um die Aussagekraft des bundesweiten Ansatzes zu bestimmen bzw. zu erhöhen.

4.1 Datengrundlagen

4.1.1 Geodaten

Insbesondere Daten mit hoher Auflösung (z. B. DGM1/DGM2) werden von den meisten Landesbehörden nur kostenpflichtig bereitgestellt. Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass die Datenauflösung ein entscheidender Faktor dafür ist, wie präzise die Modellergebnisse ausfallen. Aufgrund des eingeschränkten Zeit- und insbesondere Kostenrahmens der durchgeführten Projekte zur Erstellung von Hinweiskarten für das Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetz wurde auf bundesweit frei verfügbare Geodaten zurückgegriffen. Um jedoch einen ersten, bundesweiten Überblick über potenziell betroffene Streckenabschnitte zu erhalten, stellt die genutzte Auflösung der Geländedaten von 10 x 10 m zunächst eine ausreichende Größe dar. Bei der Verwendung einer höheren Datenauflösung sind weitaus größere Speicherkapazitäten und Rechenzeiten zu erwarten. Detailstudien sind daher, wie im weiteren Berichtsverlauf beschrieben, nur in potenziellen Gefährdungsgebieten vorgesehen.

Verwendete Geodaten:

- Das **Bundesfernstraßennetz** aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra; BAST (2017)), bzw. im Nachhinein zur Auswertung herangezogen: das Netzmodell der Bundesfernstraßen (NEMOBFStr) nach Angleichung durch SSP Consult (2019).
 - Für die Expositionsanalyse gegenüber den betrachteten Naturgefahren ist es besonders wichtig, ein möglichst lagegenaues Netz zu verwenden. Das BISStra-Netz der BAST weist eine solche Lagegenauigkeit auf. Für die Auswertung betroffener Streckenlängen ist BISStra jedoch nachteilig, da viele Strecken des Netzes doppelt ausgewiesen sind (Hin- und Rückrichtung pro Streckenabschnitt). Dadurch beträgt die über GIS ermittelte Netzlänge des BISStra, 81.128,5 km. Laut der offiziellen Angabe des BMVI (Stand 2020) beträgt die Länge des Bundesfernstraßennetzes 51.020 km².
 - Beim Datensatz des NEMOBFStr besteht diese Problematik nicht, jedoch entspricht seine Lagegenauigkeit aufgrund seiner bisherigen Anwendungsgebiete nicht der des BISStra-Netzes. Im Rahmen der Kritikalitätsanalyse wurde im Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* die Geometrie des NEMOBFStr an die des BISStra-Netzes angeglichen, um eine Lagegenauigkeit des NEMOBFStr herzustellen (Hänsel et al. 2020b).
 - Nach Abschluss des Forschungsprojektes zur Entwicklung einer Hinweiskarte bezüglich gravitativer Massenbewegungen für die Bundesfernstraßen wurde mit dem angeglichenen Netz eine neue Auswertung potenziell gefährdeter Streckenlängen vorgenommen (Ergebnisse: Tabelle 4-4).
- Das Bundesschienennetz (DB Netz AG 2017)
- Das **digitale Geländemodell** DGM10/DGM20, welches zur Ableitung der Hangneigung, Fließrichtung beziehungsweise der Fließakkumulation und der Oberflächenwölbung verwendet wurde.
 - Derzeit ist das DGM10 das höchst aufgelöste digitale Geländemodell, welches bundesweit flächendeckend frei verfügbar vorliegt. Das DGM10 stellt grundsätzlich eine geeignete Datenbasis für eine bundesweite Betrachtung dar. Nur in Ausnahmefällen kommt es durch dessen Verwendung im Modellansatz zu einer Unterschätzung der potenziellen Gefährdung, da die Hangneigung auf das 10 qm Raster gemittelt wird. Kleinräumige, eventuell steile Hänge werden somit unterrepräsentiert. Um die Datenmengen in einem angemessenen Rahmen zu halten, wurde das DGM20 aus dem DGM10 abgeleitet und zur weiteren Verwendung aufbereitet.
- Die **Geologische Übersichtskarte** (GÜK200), aus welcher die Parameter Gesteinsklasse (GK) Verformungsempfindlichkeit (VE) und Korngrößenverteilung (KG) für Lockergesteine sowie die Parameter Klüftung (KL) und Trennflächengefüge (TF) für Festgesteine generiert wurden.
- Das **digitale Landschaftsmodell** (ATKIS Basis-DLM), zur Ermittlung des Versiegelungsgrades und Bewuchses der Oberfläche.

Zusätzlich wurde ein **Ereignisdatenkataster** bezüglich gravitativer Massenbewegungen mit insgesamt 11.658 Ereignissen auf Grundlage von Zuarbeiten und Datenlieferungen der geologischen Dienste der Bundesländer zusammengestellt.

Für die Erstellung der Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen wurden zwei unterschiedliche Modellansätze entwickelt (siehe Kapitel 0 für Details). Für den Ansatz 1 (auch „expertenwissensbasierter Ansatz“ genannt) wurde das Kataster zur Validierung der Ergebnisse herangezogen. Die potenziell gefährdeten Bereiche in der generierten Hinweiskarte wurden hier mit der Lage der Ereignisdaten abgeglichen. Für den Ansatz 2 (datenbasierter Ansatz) dienen die Ereignisdaten als Datengrundlage zur Generierung der Hinweiskarte.

² <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/aus-und-neubau-von-strassen.html>

4.1.2 Klimadaten

Klimatische Einflussfaktoren für gravitative Massenbewegungen wurden bereits im BAST-Projekt „Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen“ (Krauter et al. 2012) untersucht. In Schipek und Kallmeier (2019) wurde ergänzend hierzu eine ausführliche Literaturstudie zur Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes und der Identifikation von relevanten klimatologischen/meteorologischen Parametern durchgeführt.

Die Ergebnisse der Literaturstudie sind sehr heterogen, es konnten aber übergeordnet relevante klimatologische/meteorologische Parameter für unterschiedliche Prozesstypen identifiziert werden (Schipek und Kallmeier 2019):

- Bergsturz (Niederschlag, Starkniederschlag)
- Felssturz und Steinschlag (Starkniederschlag, Frost-Tau-Wechsel)
- Rutschung (Niederschlag, Starkniederschlag)
- Mure (Niederschlag, Starkniederschlag, Temperatur)

Da der klimatische Einfluss generalisiert in den Modellansatz zur Entwicklung der Hinweiskarten für allgemeine gravitative Massenbewegungen eingeht, d. h. keine Differenzierung nach Prozesstyp (Sturz- und Fließprozessen) vorgenommen wurde sowie keine spezielle Differenzierung nach Landnutzung und Untergrund vorgenommen werden konnte, wurden sowohl Parameter der Temperatur wie auch des Niederschlags berücksichtigt.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen einer ersten Bewertung zu unterziehen, wurden schließlich folgende fünf klimatische Parameter aus den ausgewerteten Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten zusammengestellt und verwendet:

- mittlerer Jahresniederschlag
- mittlerer Winterniederschlag
- mittlerer Sommerniederschlag
- Anzahl der Tage mit Starkniederschlagsereignissen (Tagesniederschlag ≥ 20 mm)
- Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel

Es folgt eine kurze allgemeine Einführung in die verwendeten Klimaprojektionsdaten und gemeinsamen Festlegungen zur Auswertung im BMVI-Expertenetzwerk. Anschließend werden die durch den Klimawandel verursachten Änderungen der aufgelisteten Klimaparameter im 21. Jahrhundert ausführlicher beschrieben.

Klimaprojektionsdaten und gemeinsame Festlegungen

Während globale (GCMs) und regionale Klimamodelle (RCMs) in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht haben (z. B. Verbesserung der Modellphysik, höhere räumliche und vertikale Auflösung, Berücksichtigung der relevanten Komponenten des Klimasystems), besteht weiterhin die Problematik der geringen Prognostizierbarkeit zukünftiger Emissionsszenarien. Um diese Unsicherheiten zu bewältigen, formulieren die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Weltklimarat) unterschiedliche Szenarien der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung der Welt als Grundlage für sich teils stark unterscheidende Emissionsszenarien (repräsentative Konzentrationspfade (RCP); van Vuuren et al. (2011)). Die RCPs stellen mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaertrieb³ im Jahr 2100 dar. Im BMVI-Expertenetzwerk stehen drei Pfade im Fokus, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. Nachfolgend werden diese Pfade als *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaertrieb von

³ Der Klimaertrieb – oder wissenschaftlich Strahlungsantrieb – beschreibt den Einfluss externer Faktoren (z. B. Konzentration von Treibhausgasen und Aerosol, veränderte Erdoberflächen-Albedo, Sonneneinstrahlung) auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde.

2,6 W/m² in 2100), *Moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaantrieb von 4,5 W/m² in 2100) und *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5; Klimaantrieb von 8,5 W/m² in 2100) bezeichnet. Bei Vergleichen zwischen den unterschiedlichen Szenarien sind die Klimaänderungssignale zumeist im *Klimaschutzszenario* deutlich weniger ausgeprägt als im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dies ist durch den geringeren Klimaantrieb zu erklären. Systematische Vergleiche zwischen den Szenarien und den mit ihnen verbundenen Bandbreiten an Klimaänderungssignalen werden durch die unterschiedliche Anzahl der pro Szenario vorhandenen Klimamodellsimulationen erschwert.

Für die Bewertung von Klimawirkungen auf das Verkehrssystem werden beobachtete Änderungen relevanter Klimakenngrößen der jeweils zu erwartenden Entwicklung gegenübergestellt. Die Bewertung der jüngsten Klimaentwicklung basiert dabei auf im BMVI-Expertennetzwerk neu- bzw. weiterentwickelten Referenzdatensätzen (s. Auswerterahmen, Hänsel et al. (2020a)) für den *Beobachtungszeitraum* (1951–2015). Hingegen wird die Zeitscheibe 1971–2000 als *Bezugszeitraum* für die Berechnung der Klimaänderungssignale verwendet, da ein Teil der Klimaprojektionsdaten erst ab 1970 vorliegt.

Die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland wird mittels regionaler Klimaprojektionen (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014) bewertet. Diese werden durch die internationale und nationale Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt und verfeinern die aktuellen globalen Klimasimulationen (Taylor et al. 2012) räumlich. Die regionalen Klimaprojektionen wurden im BMVI-Expertennetzwerk bezüglich systematischer Modellfehler adjustiert und für die nachfolgende Verwendung in Klimawirkungsmodellen optimiert (s. Auswerterahmen Hänsel et al. (2020a) und Schlussbericht des Schwerpunktthemas 101 *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020)).

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

Als Auswerteziträume werden der *Bezugszeitraum* (1971–2000), die *nabe Zukunft* (2031–2060) und die *ferne Zukunft* (2071–2100) herangezogen und miteinander verglichen. Im Folgenden wird die gegenwärtige Situation (*Bezugszeitraum*) sowie die projizierten Änderungssignale für die *nabe* und *ferne Zukunft* bezüglich der im Schwerpunkt *Hangrutschungen* relevanten Klimaindikatoren beschrieben.

Mittlerer Jahresniederschlag

Abbildung 4-1 (oben links) zeigt die räumliche Verteilung des mittleren Jahresniederschlags über Deutschland. Grundsätzlich verteilt sich der **Jahresniederschlag** relativ gleichmäßig auf die einzelnen Jahreszeiten. Im Flächenmittel beträgt der **mittlere Jahresniederschlag** über Deutschland rund 774 mm (*Bezugszeitraum* 1971–2000). Differenziert nach Regionen tritt der höchste **mittlere Jahresniederschlag** an den Alpen auf und beträgt bis über 2.000 mm. Im Gegensatz dazu bleibt der **Jahresniederschlag** im Osten und in einzelnen Flusstälern sowie Beckenlagen im Mittel unter 600 mm. Die Mittelgebirge heben sich mit einem **mittleren Jahresniederschlag** von 1.000-1.500 mm, und bis zu 2.000 mm im Schwarzwald, von den umliegenden niedrigeren Gebieten ab. In einzelnen Jahren und an bestimmten Standorten können die Niederschläge auch sehr stark von den mittleren Verhältnissen abweichen. Auch im Flächenmittel über Deutschland weisen einzelne Jahre große Unterschiede zum langjährigen Mittel auf. So war 2002 mit 1.018 mm Niederschlag das nasseste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, während 1959 mit nur 551 mm Niederschlag das trockenste Jahr verzeichnet werden konnte. Für den **mittleren Jahresniederschlag** lässt sich im Zeitraum von 1951–2015 für Deutschland eine leichte Zunahme beobachten (ca. +4,5 %). Im Flächenmittel traten dabei einzelne Jahre auf, die mehr bzw. weniger als 20 % Niederschlag gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 aufwiesen. Während das bisher trockenste Jahr 1959 vor allem im Nordwesten sehr starke negative

Anomalien des **mittleren Jahresniederschlags** aufwies, gab es vereinzelt auch etwas zu nasse Gebiete im Osten und Süden Deutschlands. Nicht selten kommt es auch zu deutlich gegensätzlichen Anomalien zwischen Nord und Süd bzw. Ost und West, wie 2011 und 2015 mit zu nassem Norden und zu trockenem Süden oder 1982 mit zu trockenem Osten und zu nassem Westen. Regional kann hierbei zum Teil nur die Hälfte bzw. auch teilweise das Doppelte der Menge des **mittleren Jahresniederschlags** fallen.

Für den Projektionszeitraum ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und des Klimaszenarios, generell von einer weiteren Zunahme der **durchschnittlichen Niederschlagsmengen** für das Flächenmittel über Deutschland auszugehen (*nabe Zukunft*: -1,5 % bis +10 %; *ferne Zukunft*: -3,7 % bis +15 %). In Abbildung 4-1 (oben rechts) ist zu sehen, dass zunächst für alle drei Klimaszenarien ein kontinuierlicher Anstieg des **mittleren Jahresniederschlags** projiziert wird. Erst ab dem Jahr 2050 wird ein stärkerer Anstieg des mittleren Jahresniederschlags für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* im Vergleich zum *Klimaschutzszenario* durch die Klimamodellsimulationen gezeigt. In der *fernen Zukunft* könnten somit für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* und das 50. Perzentil des Klimamodellensembles 839 mm im Flächenmittel über Deutschland über das gesamte Jahr verteilt fallen.

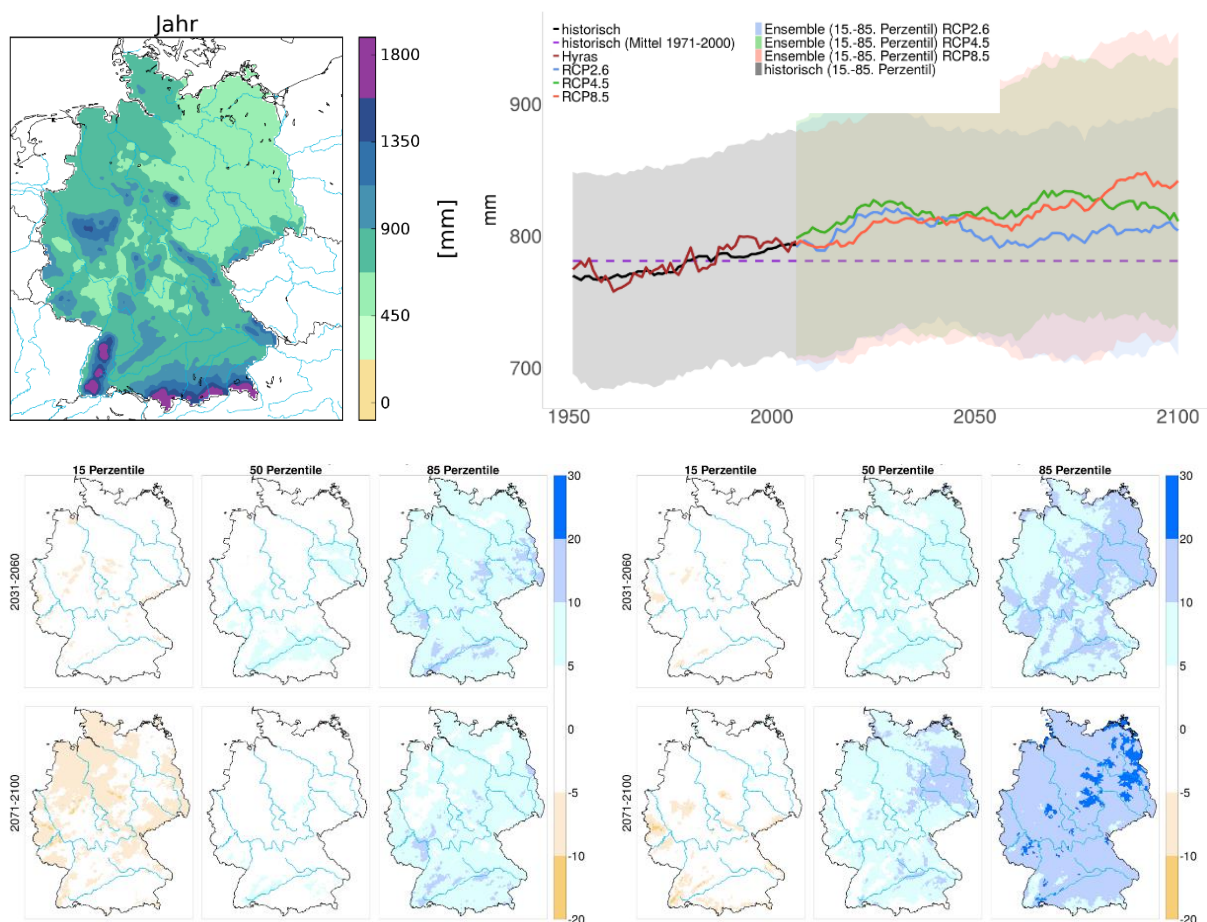


Abbildung 4-1: Mittlerer Jahresniederschlag (1971–2000) über Deutschland (oben links); relative Änderung in Prozent des mittleren Jahresniederschlags in Bezug zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) für das *Klimaschutzszenario* (unten links) bzw. *Weiter-nie-bisher-Szenario* (unten rechts) in der *naben* und *fernen Zukunft* für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles; Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für den mittleren Jahresniederschlag des Klimamodellensembles mit *Klimaschutzszenario* (blau), *moderatem Szenario* (grün), *Weiter-nie-bisher-Szenario* (rot) sowie Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland (oben rechts). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum.

Regional differenzierte Änderungen auf relativer Basis sind für die *nabe* und *ferne Zukunft* in Abbildung 4-1 für das *Klimaschutzszenario* (unten links) und das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (unten rechts) dargestellt. Für das im Rahmen des externen Forschungsprojektes (Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz) herangezogene *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit der oberen Bandbreite (85. Perzentil) des Klimamodellensembles sind in der *fernen Zukunft* Zunahmen des **mittleren Jahresniederschlags** zwischen +20 % und +30 % in einigen Gebieten im Osten Deutschlands und zwischen +5 % und +10 % am Alpenrand und Schwarzwald möglich. Für das *Klimaschutzszenario* mit der unteren Bandbreite (15. Perzentil) des Klimamodellensembles wären im Gegensatz dazu auch leichte Abnahmen des **mittleren Niederschlags** mit bis zu -10 % in der *fernen Zukunft* in weiteren Teilen Deutschlands möglich.

Mittlerer Winterniederschlag

In den Monaten Dezember, Januar, Februar fallen im Flächenmittel über Deutschland etwa 181 mm Niederschlag (*Bezugszeitraum* 1971–2000). Regional fällt der meiste Niederschlag im Schwarzwald mit bis über 600 mm sowie in den restlichen Mittelgebirgen und Alpen mit 300-600 mm (Abbildung 4-2 oben links). Östlich des Harzes und im Thüringer Becken treten dagegen vereinzelt weniger als 100 mm Niederschlag auf. Für den **mittleren Winterniederschlag** konnte im Zeitraum 1951-2015 im Vergleich zu den restlichen Jahreszeiten die deutlichste Zunahme für Deutschland mit +16 % beobachtet werden.

Für den Projektionszeitraum ist im Winter, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und des Klimaszenarios, von einer weiteren Zunahme der **durchschnittlichen Niederschlagsmenge** für das Flächenmittel über Deutschland auszugehen (*nabe Zukunft*: -0,6 % bis +18,7 %; *ferne Zukunft*: -5,3 % bis +30,1 %). Während sich etwa bis zum Jahr 2040 der mittlere Winterniederschlag weiterhin für alle drei *Klimaszenarien* erhöht, ändert sich im weiteren Verlauf bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für das *Klimaschutzszenario* und das *moderate Szenario* der mittlere Winterniederschlag für das 50. Perzentil des Klimamodellensembles kaum noch bzw. nimmt für das *Klimaschutzszenario* sogar noch leicht ab (Abbildung 4-2 rechts oben). Für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* wird dagegen auch bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein deutlich ansteigender Trend projiziert. In der *fernen Zukunft* könnten somit für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* und das 50. Perzentil des Klimamodellensembles 219 mm im Flächenmittel über Deutschland in den Wintermonaten fallen.

Die Auswertungen für die regionalen Änderungen des **mittleren Winterniederschlags** auf relativer Basis zeigen ebenfalls die deutlichen Unterschiede zwischen dem *Klimaschutzszenario* (Abbildung 4-2 links unten) und *Weiter-wie-bisher-Szenario* (Abbildung 4-2 rechts unten). Für das im Rahmen des externen Forschungsprojektes herangezogene *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit der oberen Bandbreite (85. Perzentil) des Klimamodellensembles sind in der *fernen Zukunft* Zunahmen des **mittleren Winterniederschlags** bis zu +50 % beispielsweise in Rheinhessen, Thüringer Becken und östlich des Harzes möglich. In den Mittelgebirgen und Alpen dagegen liegen die Zunahmen des **mittleren Winterniederschlags** zwischen +10 % und +30 %. Die geringen relativen Zunahmen in diesen Gebieten lassen sich durch die bereits hohen Niederschlagsmengen in der Beobachtungsperiode erklären. Für das *Klimaschutzszenario* mit der unteren Bandbreite (15. Perzentil) des Klimamodellensembles werden im Gegensatz dazu Abnahmen des **mittleren Winterniederschlags** bis zu -20 % in den Mittelgebirgen und Alpen sowie 0 % bis -10 % in den restlichen Gebieten Deutschlands projiziert.

Mittlerer Sommerniederschlag

In den Monaten Juni, Juli, August fallen im Flächenmittel über Deutschland etwa 231 mm Niederschlag (*Bezugszeitraum* 1971–2000) (Abbildung 4-3 oben rechts). Im Gegensatz zum Winter, wo ein deutlicher Unterschied zwischen den Mittelgebirgen sowie den Tallagen und dem Flachland vorliegt, ist im Sommer auch ein ausgeprägter Nord-Süd Unterschied zu erkennen. Die höchsten mittleren Sommerniederschläge treten mit 600-800 mm an den Alpen sowie mit 400-600 mm im Alpenvorland und Schwarzwald auf. Mit 100-200 mm treten dagegen die geringsten Niederschläge im Nordosten Deutschlands auf. Auswertungen für

den Trend des mittleren Sommerniederschlags zeigen, dass der Sommer die einzige Jahreszeit ist, wo es im Beobachtungszeitraum von 1951–2015 mit -7 % zu einer Abnahme der Niederschlagssummen kam.

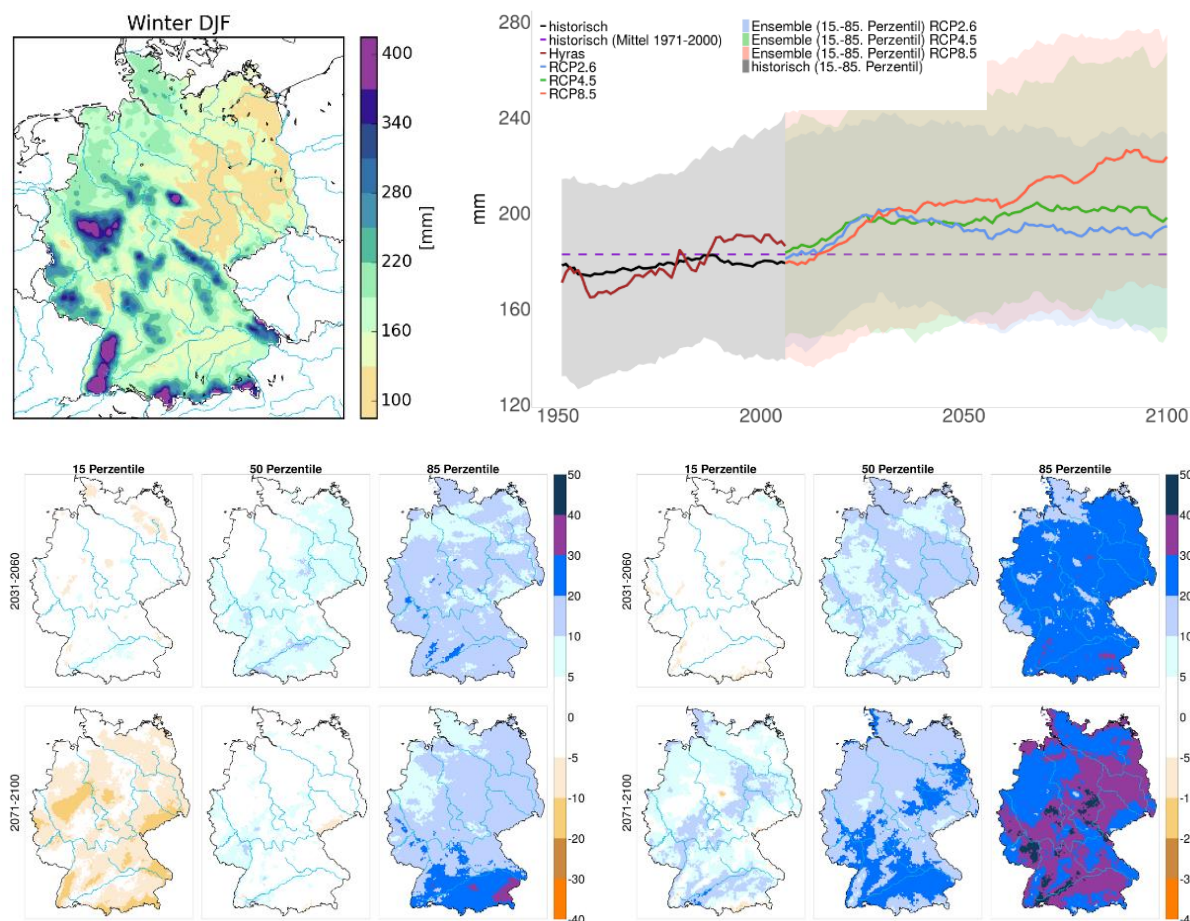


Abbildung 4-2: Mittlerer Niederschlag im Winter (DJF) (1971–2000) über Deutschland (oben links); relative Änderung in Prozent des mittleren Niederschlags im Winter in Bezug zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) für das *Klimaschutzszenario* (unten links) bzw. *Weiter-nie-bisher-Szenario* (unten rechts) in der *nahen* und *fernen Zukunft* für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles; *Zeitreihe* (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für den mittleren Niederschlag im Winter des Klimamodellensembles mit *Klimaschutzszenario* (blau), *moderatem Szenario* (grün), *Weiter-nie-bisher-Szenario* (rot) sowie Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland (oben rechts). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum.

Für den **Projektionszeitraum** werden für den Sommer deutlich weniger eindeutige Änderungen für den mittleren Niederschlag projiziert als für den Winter. Die Änderungen liegen abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und des Klimaszenarios zwischen -11 % bis +9,5 % in der *nahen Zukunft* und -16 % bis +12,3 % in der *fernen Zukunft*. Für das 50. Perzentil des Klimamodellensembles sind dagegen überwiegend keine Änderungen der mittleren Sommerniederschläge zu erwarten, außer in der *fernen Zukunft* und dem *Weiter-nie-bisher-Szenario*, wo mit -6,2 % im Flächenmittel über Deutschland eine leichte Abnahme projiziert wird. Abbildung 4-3 (oben rechts) zeigt, dass bis zum Jahr 2050 für alle drei Klimaszenarios kein Trend für den mittleren Sommerniederschlag vorliegt, zwischen dem Jahr 2050 und dem Ende des 21. Jahrhunderts für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* werden aber verstärkt Abnahmen der Niederschlagssummen für das Flächenmittel über Deutschland in den Auswertungen der Klimaprojektionsdaten projiziert. In der *fernen Zukunft* könnten somit für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* und das 50. Perzentil des Klimamodellensembles 220 mm Niederschlag im Flächenmittel über Deutschland in den Sommermonaten fallen.

Die Auswertungen für die regionalen Änderungen des **mittleren Sommerniederschlags** auf relativer Basis zeigen weniger deutliche Unterschiede zwischen dem *Klimaschutzszenario* (Abbildung 4-3 links unten) und *Weiter-nie-bisher-Szenario* (Abbildung 4-3 rechts unten), dafür jedoch deutlichere Unterschiede zwischen der unteren (15. Perzentil) und oberen Bandbreite (85. Perzentil) der Klimamodellensembles. Für das im Rahmen des externen Forschungsprojektes herangezogene *Weiter-nie-bisher-Szenario* mit der oberen Bandbreite (85. Perzentil) des Klimamodellensembles werden in der *fernen Zukunft* Zunahmen des **mittleren Sommerniederschlags** zwischen +10 % und vereinzelt +30 % im Nordosten Deutschlands und Abnahmen von bis zu -10 % ganz im Südwesten Deutschlands projiziert. Im Gegensatz zum mittleren Jahresniederschlag und mittleren Winterniederschlag zeigt nicht die untere Bandbreite (15. Perzentil) des *Klimaschutzszenarios*, sondern die untere Bandbreite des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* den stärksten Rückgang des **mittleren Sommerniederschlags**. Dieser beträgt im Westen und vor allem im Südwesten zwischen -20 % und -40 %.

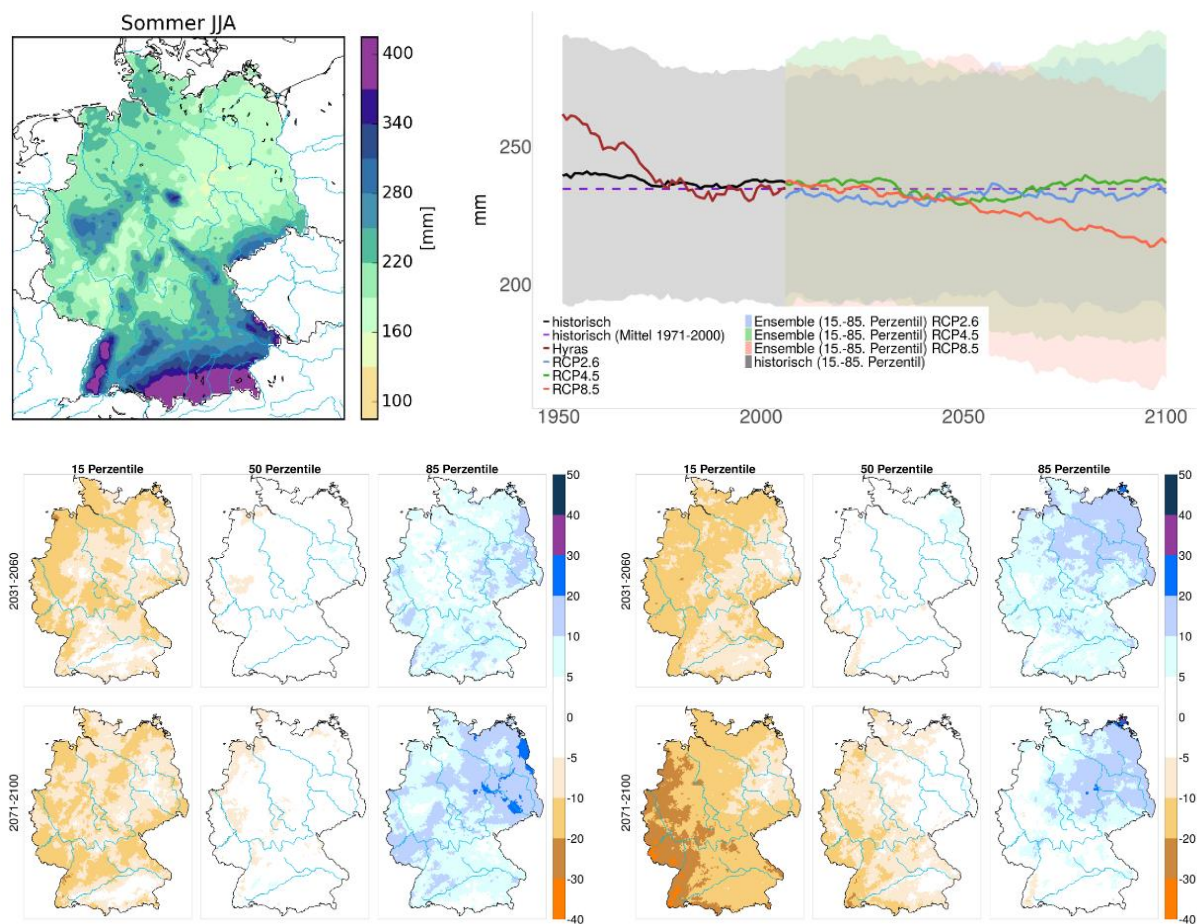


Abbildung 4-3: Mittlerer Niederschlag im Sommer (JJA) (1971–2000) über Deutschland (oben links); relative Änderung in Prozent des mittleren Niederschlags im Sommer in Bezug zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) für das *Klimaschutzszenario* (unten links) bzw. *Weiter-nie-bisher-Szenario* (unten rechts) in der *nahen* und *fernen Zukunft* für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles; Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für den mittleren Niederschlag im Sommer des Klimamodellensembles mit *Klimaschutzszenario* (blau), *moderatem Szenario* (grün), *Weiter-nie-bisher-Szenario* (rot) sowie Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland (oben rechts). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum.

Anzahl der Tage mit Starkniederschlagsereignissen

Tage mit Starkniederschlagsereignissen sind definiert über eine Niederschlagssumme von mindestens 20 mm. Diese Niederschlagssumme gilt aus der aktuellen Generation von regionalen Klimamodellensembles noch als statistisch robust für einzelne Gitterpunkte ableitbar. Diese Tage – im Weiteren auch als **Starkniederschlagstage** bezeichnet – weisen im Gegensatz zum **mittleren Niederschlag** deutlich größere Unterschiede zwischen den einzelnen Jahreszeiten auf. Im Jahresverlauf treten 4,4 Starkniederschlagstage pro Jahr für das Flächenmittel über Deutschland auf (*Bezugszeitraum 1971–2000*). Die meisten **Tage mit Starkniederschlag** treten im langjährigen Mittel im *Bezugszeitraum* (1971–2000) mit bis zu 40 Tagen pro Jahr in den Alpen auf (Abbildung 4-4 links oben). In den Mittelgebirgen besteht eine große Bandbreite zwischen 5 Tagen und bis ca. 30 Tagen im Schwarzwald. Im Flachland liegt die Anzahl pro Jahr dagegen verbreitet bei weniger als 5 Tagen und im Nordosten sowie einzelnen Flusstälern und Beckenlagen sogar unter 2 Tagen pro Jahr. Der Trend im Mittel über Deutschland beträgt hierbei zwischen 1951–2015 +0,1 Tage pro Dekade bzw. ein Anstieg von +9,1 % über diesen gesamten Zeitraum.

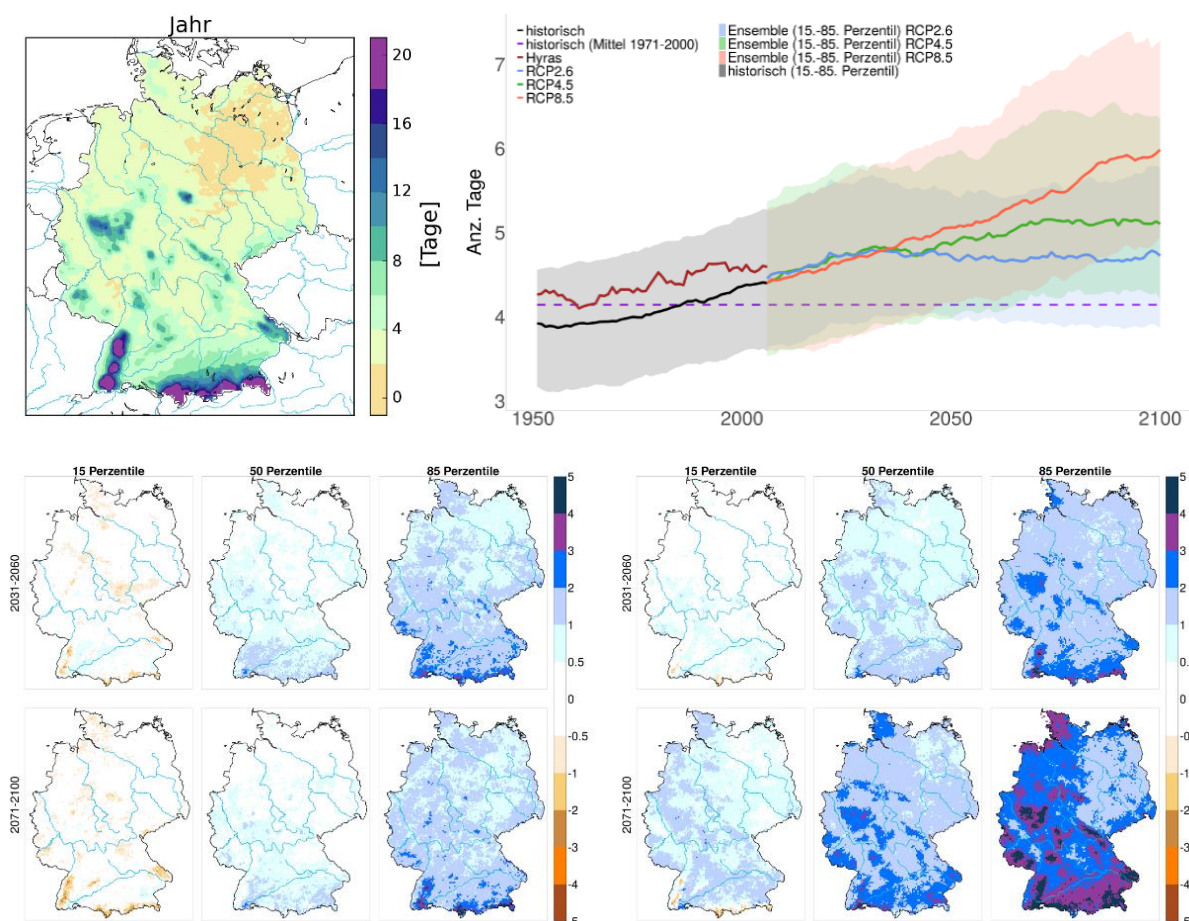


Abbildung 4-4: Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm (1971–2000) über Deutschland (oben links); absolute Änderung in Tagen für die Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm in Bezug zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) für das *Klimaschutzszenario* (unten links) bzw. *Weiter-wie-bisher-Szenario* (unten rechts) in der nahen und *fernen Zukunft* für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles; Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für die Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm des Klimamodellensembles mit *Klimaschutzszenario* (blau), *moderatem Szenario* (grün), *Weiter-wie-bisher-Szenario* (rot) sowie Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland (oben rechts). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den *Bezugszeitraum*.

Für den Projektionszeitraum ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer deutlichen Zunahme der Anzahl an **Tagen mit Starkniederschlag** zu rechnen (*nabe Zukunft*: -0,2 % bis +36,8 %; *ferne Zukunft*: -2 % bis +63,3 %). Die Abbildung 4-4 (oben rechts) zeigt bereits zu Beginn der Beobachtungsperiode einen kontinuierlich ansteigenden Trend für die **Starkniederschlagstage**, der sich zunächst für alle drei Klimaszenarien im Projektionszeitraum bis etwa zum Jahr 2040 fortsetzt. Im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts bleibt die Anzahl der **Starkniederschlagstage** für das *Klimaschutzszenario* im Mittel über Deutschland etwa konstant, während für das *moderate Szenario* weiterhin eine leichte Zunahme projiziert wird. Unter dem *Weiter-nie-bisher-Szenario* soll sich der deutlich ansteigende Trend hingegen auch bis zum Jahr 2100 ungebremst fortsetzen. In der *fernen Zukunft* könnten somit für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* und das 50. Perzentil des Klimamodellensembles 5,8 Starkniederschlagstage pro Jahr im Flächenmittel über Deutschland auftreten.

Die Auswertungen für die regionalen Änderungen von **Starkniederschlagstagen** zeigen ebenfalls die deutlichen Unterschiede zwischen dem *Klimaschutzszenario* (Abbildung 4-4 links unten) und *Weiter-nie-bisher-Szenario* (Abbildung 4-4 rechts unten). Für das in dieser Studie herangezogene *Weiter-nie-bisher-Szenario* mit der oberen Bandbreite (85. Perzentil) des Klimamodellensembles sind in der *fernen Zukunft* Zunahmen von **Starkniederschlagstagen** pro Jahr von mehr als +5 Tage in den Mittelgebirgen und Alpen und etwa +1 bis +2 Tage im Osten Deutschlands zu erwarten. Diese regionale Verteilung, jedoch mit einer geringeren Zunahme der **Starkniederschlagstage** lässt sich auch für die untere Bandbreite (15. Perzentil) und das 50. Perzentil des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* erkennen, wobei für die untere Bandbreite sogar eine leichte Abnahme der **Starkniederschlagstage** im Schwarzwald und an den Alpen gezeigt wird. Für die untere Bandbreite (15. Perzentil) des *Klimaschutzszenarios* ist dagegen verbreiteter mit einer leichten Abnahme bzw. keiner Änderung der **Starkniederschlagstage** über Deutschland in der *fernen Zukunft* zu rechnen.

Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel

Tage mit **Frost-Tau-Wechsel** treten auf wenn die Lufttemperatur im Tagesverlauf den Gefrierpunkt mindestens einmal überschreitet. Im Flächenmittel kommt dies im über Deutschland an 64,5 Tagen pro Jahr vor (*Bezugszeitraum* 1971–2000). Die meisten **Frost-Tau-Wechsel-Tage** treten hierbei in den Alpen mit mehr als 120 Tagen pro Jahr auf (Abbildung 4-5 oben links). Im Schwarzwald und Bayerischen Wald liegt die Anzahl zwischen 100 und 120 Tagen sowie zwischen 70 und 90 Tagen in den übrigen Mittelgebirgen. Am Niederrhein und an der Nordseeküste hingegen treten weniger als 40 **Frost-Tau-Wechsel-Tage** pro Jahr auf. Im Zeitraum von 1951–2015 nahm die Anzahl der **Frost-Tau-Wechsel-Tage** bereits um ca. 3,2 Tage pro Dekade ab bzw. um 13,6 % über den gesamten Zeitraum.

Für den Projektionszeitraum ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer deutlichen Reduzierung der Anzahl an **Tagen mit Frost-Tau-Wechsel** zu rechnen (*nabe Zukunft*: -36 % bis -11 %; *ferne Zukunft*: -65 % bis -8 %). Abbildung 4-5 (oben rechts) zeigt bereits zu Beginn der Beobachtungsperiode einen kontinuierlich absteigenden Trend für die **Frost-Tau-Wechsel-Tage**, der sich zwischen den Jahren 1980-2000 deutlich intensiviert. Während sich für das *Klimaschutzszenario* die Anzahl der **Frost-Tau-Wechsel-Tage** etwa ab dem Jahr 2040 nicht weiter verringert, verlangsamt sich der negative Trend für das *moderate Szenario* etwa ab dem Jahr 2050. Unter dem *Weiter-nie-bisher-Szenario* bleibt der deutlich negative Trend jedoch bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erhalten. In der *fernen Zukunft* könnten somit für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* und das 50. Perzentil des Klimamodellensembles nur noch 32 **Frost-Tau-Wechsel-Tage** pro Jahr im Flächenmittel über Deutschland auftreten.

Die Auswertungen für die regionalen Änderungen von **Frost-Tau-Wechsel-Tagen** zeigen sowohl für das *Klimaschutzszenario* (Abbildung 4-5 unten links), als auch für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* (Abbildung 4-5 unten rechts) den deutlichsten Rückgang in Regionen mit den häufigsten **Frost-Tau-Wechsel-Tagen** im *Bezugszeitraum*. Eine Ausnahme bildet hier nur das 50. Perzentil und die obere Bandbreite (85. Perzentil) des *Klimaschutzszenarios* sowie die *nabe Zukunft* bis auf die untere Bandbreite (15. Perzentil) des *Weiter-nie-bisher-Szenarios*, bei denen es in diesen Regionen in Zukunft zu keiner deutlicheren Abnahme an **Frost-Tau-**

Wechsel-Tagen kommen soll, als im Rest Deutschlands. Für das in dieser Studie herangezogene *Weiter-nie-bisher-Szenario* mit der unteren Bandbreite (15. Perzentil) des Klimamodellensembles der Frost-Tau-Wechsel-Tage ist in der *fernen Zukunft* eine deutliche Reduktion zu erwarten. Im Nordwesten und am Oberrhein wird eine Abnahme von 30–40 Tagen pro Jahr projiziert, sodass nur noch vereinzelt **Frost-Tau-Wechsel-Tage** in diesen Regionen auftreten würden. In den Mittelgebirgen und Alpen wäre ein Rückgang von 50–75 Tagen zu erwarten. Im Gegensatz dazu zeigt die obere Bandbreite (85. Perzentil) des *Klimaschutzszenarios* in der *fernen Zukunft* fast keine Änderung gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000). In der Nordhälfte Deutschlands wird eine Abnahme von 5–10 Tagen für den **Frost-Tau-Wechsel** projiziert, während in der Südhälfte überwiegend keine Änderung gezeigt wird.

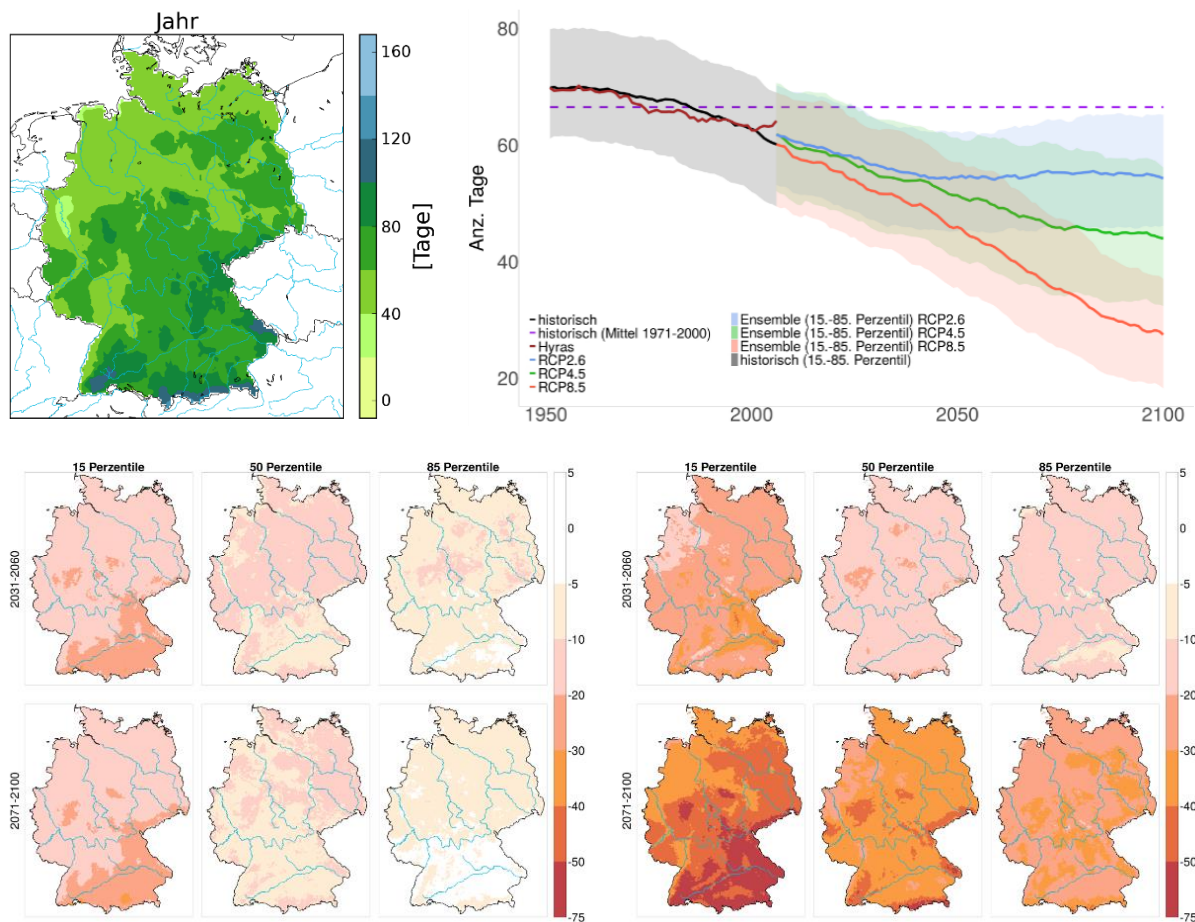


Abbildung 4-5: Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel (1971–2000) über Deutschland (oben links); absolute Änderung in Tagen für die Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel in Bezug zum *Bezugszeitraum* (1971–2000) für das *Klimaschutzszenario* (unten links) bzw. *Weiter-nie-bisher-Szenario* (unten rechts) in der nahen und *fernen Zukunft* für das 15., 50. sowie 85. Perzentil des Klimamodellensembles; Zeitreihe (1951–2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) für die Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel des Klimamodellensembles mit *Klimaschutzszenario* (blau), *moderatem Szenario* (grün), *Weiter-nie-bisher-Szenario* (rot) sowie Beobachtungsdaten (HYRAS-2015) im Flächenmittel über Deutschland (oben rechts). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum.

4.2 Methodik

Für die Entwicklung der Hinweiskarten zu gravitativen Massenbewegungen wurden zwei unterschiedliche Modellansätze entwickelt. Ansatz 1, auch im weiteren Verlauf als expertenwissensbasierter Ansatz bezeichnet, basiert auf der Berechnung mittels Algorithmen/Entscheidungsbäumen. Bei diesem Ansatz wurden zunächst Hauptgefährdungsklassen auf Grundlage der Hangneigung und Gesteinsklassifikation gebildet, die schrittweise durch Einbeziehung weiterer Einflussfaktoren verfeinert wurden.

Beim Ansatz 2 handelt es sich um einen datenbasierten Ansatz, bei dem die Modellierung mittels künstlicher neuronaler Netze (KNN) unter Anwendung der *advangeo*® Prediction Software⁴ der Beak Consultants GmbH erfolgte. Die Software ist in der Lage eine selbständige (vom Expertenwissen unabhängige) Gewichtung und Verknüpfung von verschiedenen Einflussfaktoren (Ausgangsdaten) durchzuführen. Der Trainingsprozess ist dabei iterativ.

4.2.1 Expertenwissensbasierter Modellansatz (Ansatz 1)

Bei diesem Ansatz handelt es sich um einen ingenieurgeologischen Modellansatz, der zunächst für allgemeine Massenbewegungen entwickelt wurde. Im weiteren Projektverlauf wurde eine Prozessdifferenzierung in Fließ- und Sturzprozesse vorgenommen. Anschließend wurde eine Methode entwickelt, die eine Integration von Klimadaten ermöglicht. Diese Methode wurde zunächst nur auf den Modellansatz für allgemeine Massenbewegungen angewendet. Im Rahmen der Arbeiten des Schwerpunktes *Hangrutschungen* wurde der Ansatz 1 als Hauptmethodik verwendet und ausgearbeitet.

Allgemeine gravitative Massenbewegungen

Im ersten Teil der Expositionsanalyse wurde ein ingenieurgeologischer Modellansatz zur Generierung von Hinweiskarten für die Verkehrsträger Straße und Schiene zunächst ohne den Einfluss des Klimawandels in einem Geographischen Informationssystem (GIS) entwickelt. Zur Ermittlung potenzieller Gefährdungen wurden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht. Bei Ansatz 1 handelt es sich um einen expertenwissensbasierten Ansatz, bei dem stufenweise die relevanten Parameter miteinander kombiniert werden, um eine endgültige Gefährdungsklassifizierung zu generieren. Zur Visualisierung der Ergebnisse wurde ein 1 km breiter Ausschnitt jeweils links und rechts der Straßen- und Schienenwege festgelegt.

Im ersten Analyseschritt erfolgte die Berechnung von Hauptgefährdungsklassen. Hierfür wurde ein Verschnitt der Gesteinsklasse auf Grundlage der GÜK200 und der Hangneigungsklasse auf Grundlage des DGM20 vorgenommen. Die Gesteinsklasse ist dabei grundsätzlich in Locker- und Festgestein unterschieden worden. Das Lockergestein wurde zusätzlich in die Eigenschaften gemischtkörnig, rollig und bindig untergliedert. Für die Gesteinsklassen wurde im Anschluss auf Grundlage von Expertenwissen jeweils eine Hangneigungsklasse für insgesamt fünf Hauptgefährdungsklassen festgelegt. Für diese fünf Hauptgefährdungsklassen von potenziell „nicht/kaum gefährdet“ bis „sehr stark gefährdet“ erfolgte eine Untergliederung, sodass letztlich 15 Gefährdungsklassen zur Weiterverarbeitung generiert wurden (Tabelle 4-1).

In der GÜK200 wird die regionale Verbreitung von mehr als 3.800 geologischen Einheiten dargestellt⁵. Die geologischen Einheiten enthalten Informationen zur Stratigraphie (Alter), Genese (Entstehung) und Petrographie (Zusammensetzung) der Gesteine. Aus der GÜK200 wurden die Parameter Gesteinsklasse (GK), Verformungsempfindlichkeit (VE) für Lockergesteine, Korngröße (KG) für Lockergesteine, Klüftung (KL) für Festgesteine und Trennflächen (TF) für Festgesteine abgeleitet und klassifiziert.

⁴ Informationen zur *advangeo*® Prediction Software der Beak Consultants GmbH sind auf der Webseite https://www.beak.de/beak/en/products_advangeo_prediction nachzulesen

⁵ Weitere Informationen zur GÜK siehe Webseite https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Deutschland/GUEK200/guek200_inhalt.html

Tabelle 4-1: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteins- und der Hangneigungs-kategorie (Quelle: verändert nach EBA (2018)).

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

In der GÜK200 sind die Lockergesteinseinheiten in Teilen als Einzel-Lithologien, zum Teil als zusammengefasste Einheiten erfasst. Den Einzel-Lithologien wurde die Begrifflichkeit „rollig“ oder „bindig“ zugewiesen und somit kann eine relative Abschätzung der Stabilität (Schüttungswinkel) erfolgen. Bei den zusammengefassten Einheiten, hier als „gemischtkörnig“ bezeichnet, ist dies nicht eindeutig möglich. Allerdings ist davon auszugehen, dass gemischtkörnige Sedimente eine höhere Stabilität aufweisen im Vergleich zu rolligen Sedimenten.

Zur Spezifizierung der Hauptgefährdungsklassen wurden aus den weiteren Parametern „Landnutzung“, „Trennflächen (TF)“, „Klüftung (KL)“, „Verformungsempfindlichkeit (VE)“ und „Fließakkumulation“ jeweils Modifikatoren entwickelt (Abbildung 4-6). Den einzelnen Parametern wurden zunächst Werte bezüglich ihres positiven (-1), negativen (+1) oder neutralen (0) Einflusses auf die Hangstabilität zugeordnet (Bewertung der Ausgangsdaten). Zum Beispiel kann die Art der Landnutzung in unterschiedlicher Weise auf die Hangstabilität einwirken. Dabei wurde davon ausgegangen, dass Wald- und Gehölzflächen wegen ihrer Durchwurzelung des Untergrundes einen positiven Einfluss auf die Stabilität haben. Dementsprechend wurde diesen Flächen ein Modifikator von -1 zugewiesen. Da Gewässerflächen einen negativen Einfluss auf die Hangstabilität haben, wurde hier im Umkehrschluss der Modifikator +1 festgelegt.

Aus der Kombination aller Einflussparameter ist ein Ergebnismodifikator berechnet worden (Kombination 1). Dem Parameter „Fließakkumulation“ wurde hierbei eine größere Gewichtung zugeordnet als den anderen Einflussgrößen (maximal +2). Zur Berechnung der endgültigen Gefährdungsklassen wurde der Ergebnismodifikator auf die Hauptgefährdungsklassen angewendet. Im Ergebnis ist hierbei eine Änderung der Gefährdungsklassen von -1 (positiver Einfluss) bis +1 (negativer Einfluss) möglich.

Im letzten Analyseschritt wurde für die potenziellen Gefährdungsbereiche ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetz hergestellt. Zur Auswertung wurden die Gefährdungsklassen ≥ 10 (starke bis sehr starke Gefährdung) betrachtet (Abbildung 10A). Um einen Überblick über die Streckenabschnitte zu erhalten, die direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m oder 200 m um Bereiche mit einer Gefährdungsklasse ≥ 10 liegen, wurden entsprechende Pufferzonen gebildet (Abbildung 4-7B). Zuletzt wurde das Straßen- bzw. Schienennetz mit diesen Zonen verschnitten (Abbildung 4-7C).

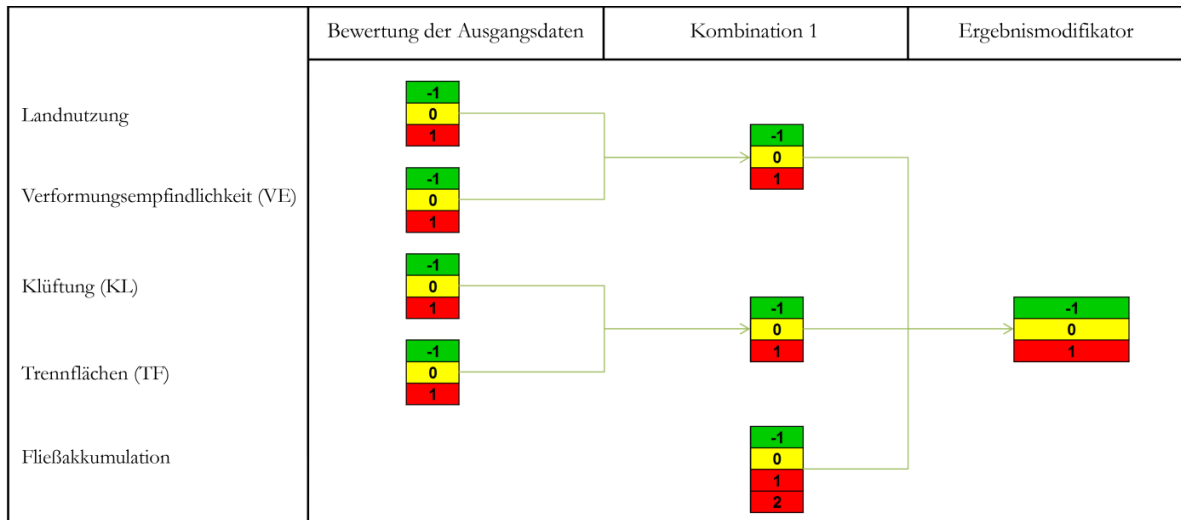


Abbildung 4-6: Fließschema (Algorithmus) zur Berechnung der resultierenden Modifikation (Spezifizierung) der Hauptgefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen (Quelle: verändert nach EBA (2018)).

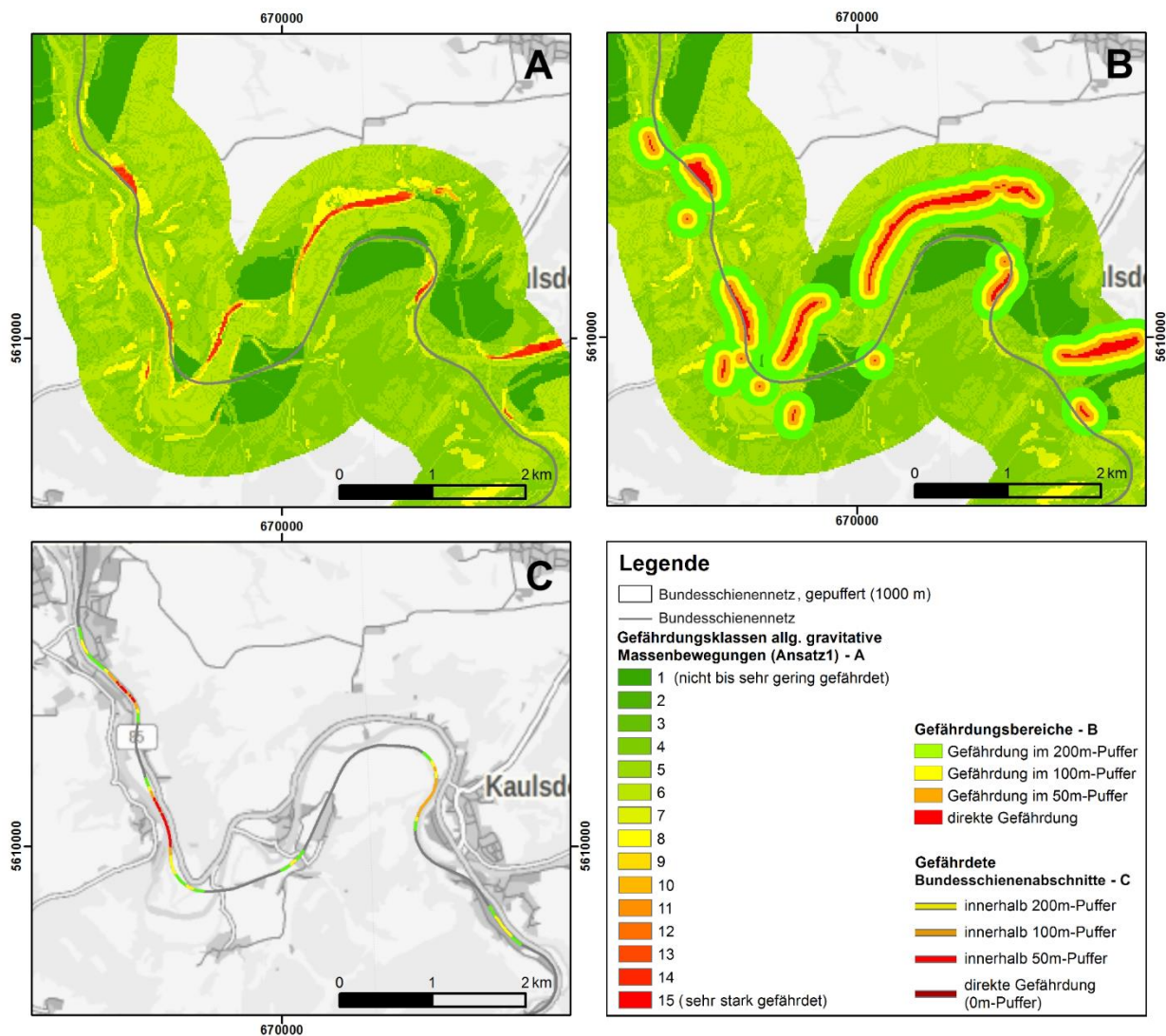


Abbildung 4-7: Potenzielle Gefährdung für allgemeine gravitative Massenbewegungen (A), gepufferte Gefährdungsbereiche der Klassen ≥ 10 (B) sowie die daraus resultierenden betroffenen Streckenabschnitte (C), expertenwissenbasierter Ansatz, Ausschnitt des Bundesschiennetzes (Quelle: EBA, 2018).

Die gesamte Hinweiskarte des Eisenbahn-Bundesamtes zu allgemeinen gravitativen Massenbewegungen ist in Abbildung 4-12 (s. Abschnitt 4.3) dargestellt.

Integration von Klimaparametern: Für den Modellansatz zu allgemeinen gravitativen Massenbewegungen wurde eine erste Methode zur Integration des Klimaeinflusses entwickelt.

In Anlehnung an das Projekt „Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen“ (Krauter et al. 2012) wurden zur Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf gravitative Massenbewegungen die Klimaparameter mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer Sommerniederschlag, mittlerer Winterniederschlag, Anzahl der Tage mit Starkniederschlagsereignissen und Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel aus Klimaprojektionsdaten abgeleitet.

Für die *nabe* und *ferne Zukunft* wurden die Klimaprojektionsdaten des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* und hier speziell die obere Bandbreite dieses Klimaszenarios verwendet, da die potenziell größtmöglichen Auswirkungen des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen betrachtet werden sollten. Hierbei ist zu beachten, dass für bestimmte Kombinationen von Klimaparametern das gemeinsame Auftreten der oberen (85. Perzentil) bzw. unteren (15. Perzentil) Bandbreite sehr unwahrscheinlich bis gänzlich unmöglich ist. So wurde die obere Bandbreite bei den Niederschlagsparametern (d. h. viel Niederschlag) und die untere Bandbreite bei den Frost-Tau-Wechsel Tagen (d. h. starke Temperaturzunahme) verwendet, da sich dies als realistisches Szenario durch Vergleiche der Änderungssignale von Temperatur und Niederschlag im Klimaprojektionszeitraum herausstellte.

Um hieraus Klimamodifikatoren zu entwickeln, wurden in einer ersten statistischen Auswertung zunächst potenzielle Schwellenwerte definiert. Die Ableitung dieser Schwellenwerte wurde unter Nutzung des Ereigniskatasters, das auch für den datenbasierten Ansatz (Ansatz 2) zur Modellierung verwendet wurde (Kapitel 4.2.2), durchgeführt. Hierbei wurden insgesamt 1.560 Trainingspunkte berücksichtigt, wovon 1.480 Rutschungsereignissen, 78 Fließprozessen und 2 Sturzprozessen zugeordnet werden konnten. Alle Ereignisse lagen gemäß dem expertenwissensbasierten Modellansatz für allgemeine gravitative Massenbewegungen in einer Gefährdungsklasse ≥ 7 bzw. wurden vom Auftragnehmer im Rahmen der Feldvalidierung erhoben. Es ist darauf hinzuweisen, dass den in der Datenbank vorliegenden Ereignissen aufgrund fehlender Informationen sowie standortspezifischer Untersuchungen zunächst keine direkten realen Witterungsereignisse als auslösende Ursache der gravitativen Massenbewegungen zugeordnet werden konnten. Der in Schipek und Kallmeier (2019) verwendete Ansatz versucht vielmehr, den bereits in Kapitel 4.1.2 beschriebenen allgemeinen Zusammenhang zwischen klimatischen/meteorologischen Bedingungen und dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen über vieljährige klimatologische Mittelwerte generalisiert darzustellen.

Zunächst wurden für die Bestimmung von klimatisch relevanten Schwellenwerten nur noch die Gebiete ab einer Gefährdungsklasse von ≥ 7 berücksichtigt. Somit können klimatologische Mittelwerte des durchschnittlichen Niederschlags, Starkniederschlags oder Frost-Tau-Wechsels, die nur in den übrigen Gebieten mit einer Gefährdungsklasse < 7 vorkommen, als Schwellenwerte ausgeschlossen werden. Als nächster Schritt wurde in den Gebieten ab einer Gefährdungsklasse von ≥ 7 über eine Häufigkeitsverteilung (ausführlicher in Schipek und Kallmeier (2019) erläutert) für die in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Klimaparameter eine weitere Eingrenzung der möglichen Schwellenwerte vorgenommen. Die Häufigkeitsverteilung wurde hierbei mit den Daten der historischen Klimamodellsimulationen für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 erstellt. Der Schwellenwert für den jeweiligen Klimaparameter wurde so festgesetzt, dass er einen höheren Wert als circa 75% der aufgetretenen Ereignisse aufwies. Die entsprechend definierten Schwellenwerte sind in Tabelle 4-2 aufgelistet.

Die Schwellenwerte dienen dazu, den Klimamodifikator zu bestimmen (Abbildung 4-8). Im ersten Schritt wurden die Datenebenen der Klimaparameter „Jahresniederschlag“ sowie „mittlerer Winterniederschlag“ zu einem Modifikator verrechnet. Wurden ein oder beide Schwellenwerte der genannten Datenebenen überschritten, kann dies u.U. negativen Einfluss auf die Hangstabilität haben (Modifikator +1). Dieser temporäre Modifikator (Kombination 1) wurde in einem weiteren Schritt mit dem „mittleren Sommerniederschlag“

verschnitten. Mit der Berücksichtigung des „mittleren Sommerniederschlags“ zu einem späteren Zeitpunkt im Berechnungsschema erfolgte eine verstärkte Wichtung gegenüber den Klimaparametern „Jahresniederschlag“ und „mittlerer Winterniederschlag“. Auch hier erfolgte die Festlegung des Modifikators auf +1 sobald die Kombination 1 oder der Schwellenwert des „mittleren Sommerniederschlags“ überschritten wurde und diese Datenebene den Wert +1 annahm. Ergebnis war wiederum ein temporärer Modifikator (Kombination 2). Dieser wurde in einem letzten Schritt mit den Datenebenen „Anzahl an Tagen mit Starkniederschlagsereignissen“ und „Anzahl an Tage mit Frost-Tau-Wechsel“ verschnitten. Für diese beiden Datenebenen wurde ein besonders großer Einfluss auf gravitative Massenbewegungsereignisse angenommen. Aus diesem Grund erfolgte eine verstärkte Wichtung im Berechnungsschema durch die Berücksichtigung im letzten Berechnungsschritt. Zulässig waren als Ergebnis nachfolgende Möglichkeiten:

- Ergebnis Gesamtmodifikator = 0, \sum der Kombination 2, sowie der Modifikatoren aus der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ≥ 20 mm und der Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel = 0
- Ergebnis Gesamtmodifikator = +1, \sum der Kombination 2, sowie der Modifikatoren aus der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ≥ 20 mm und der Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel = +1
- Ergebnis Gesamtmodifikator = +2, \sum der Kombination 2, sowie der Modifikatoren aus der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ≥ 20 mm und der Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel = +2 bzw. +3

Tabelle 4-2: Verwendete Schwellenwerte zur Berechnung der Klimamodifikatoren (Quelle: Schipek und Kallmeier (2019)).

Klimaparameter (absolut)	Einheit	Schwellenwert
mittlerer Jahresniederschlag	[mm]	1.000
mittlerer Winterniederschlag	[mm]	250
mittlerer Sommerniederschlag	[mm]	400
Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm	[Tage]	10
Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel	[Tage]	85

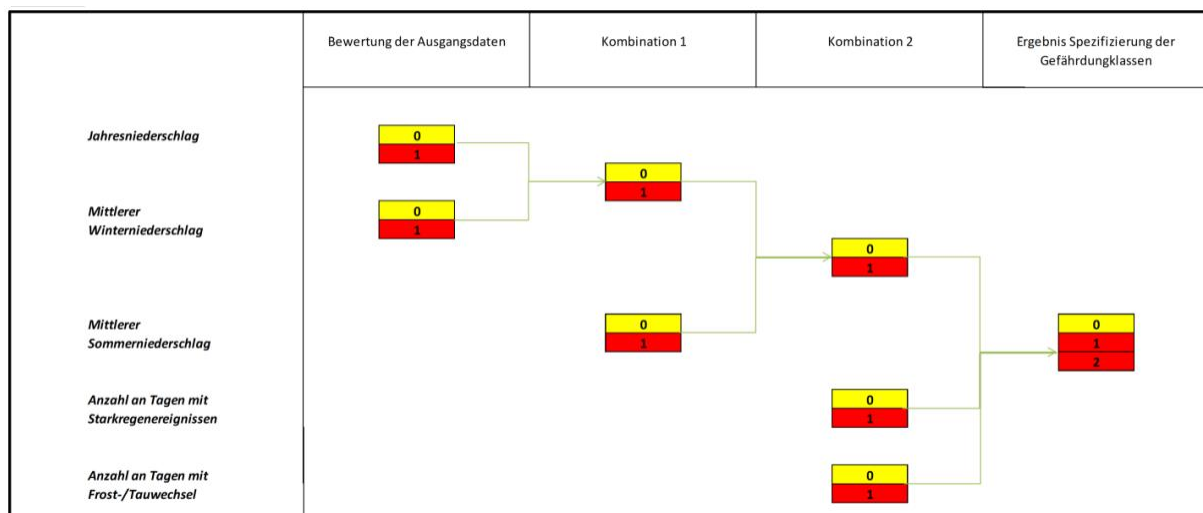


Abbildung 4-8: Schema zur Berechnung des Modifikators auf Grundlage der Klimaparameter (Quelle: Schipek & Kallmeier 2019).

Aus Abbildung 4-8 wird ersichtlich, dass der Ergebnis-Klimamodifikator maximal eine Erhöhung der Gefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen um +2 zulässt. Dies sorgt dafür, dass dem

Faktor Klima, der hier wie bereits beschrieben sehr generalisiert betrachtet wurde, nicht ein zu hohes Gewicht beigemessen wird. Die ingenieurgeologische Prädisposition zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials von gravitativen Massenbewegungen sollte ausschlaggebender Faktor bleiben.

Der Einfluss des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der *nahen* und *fernen Zukunft* wird durch die berechneten der Klimamodifikatoren in Abbildung 4-9 gezeigt. Ergänzend ist der Klimamodifikator für den *Bezugszeitraum* dargestellt um den Ist-Zustand zu repräsentieren. Gebiete wo der klimatische Einfluss zu einer potentiellen Zunahme von gravitativen Massenbewegungen führt, nehmen zukünftig (*nabe* und *ferne Zukunft*) zu.

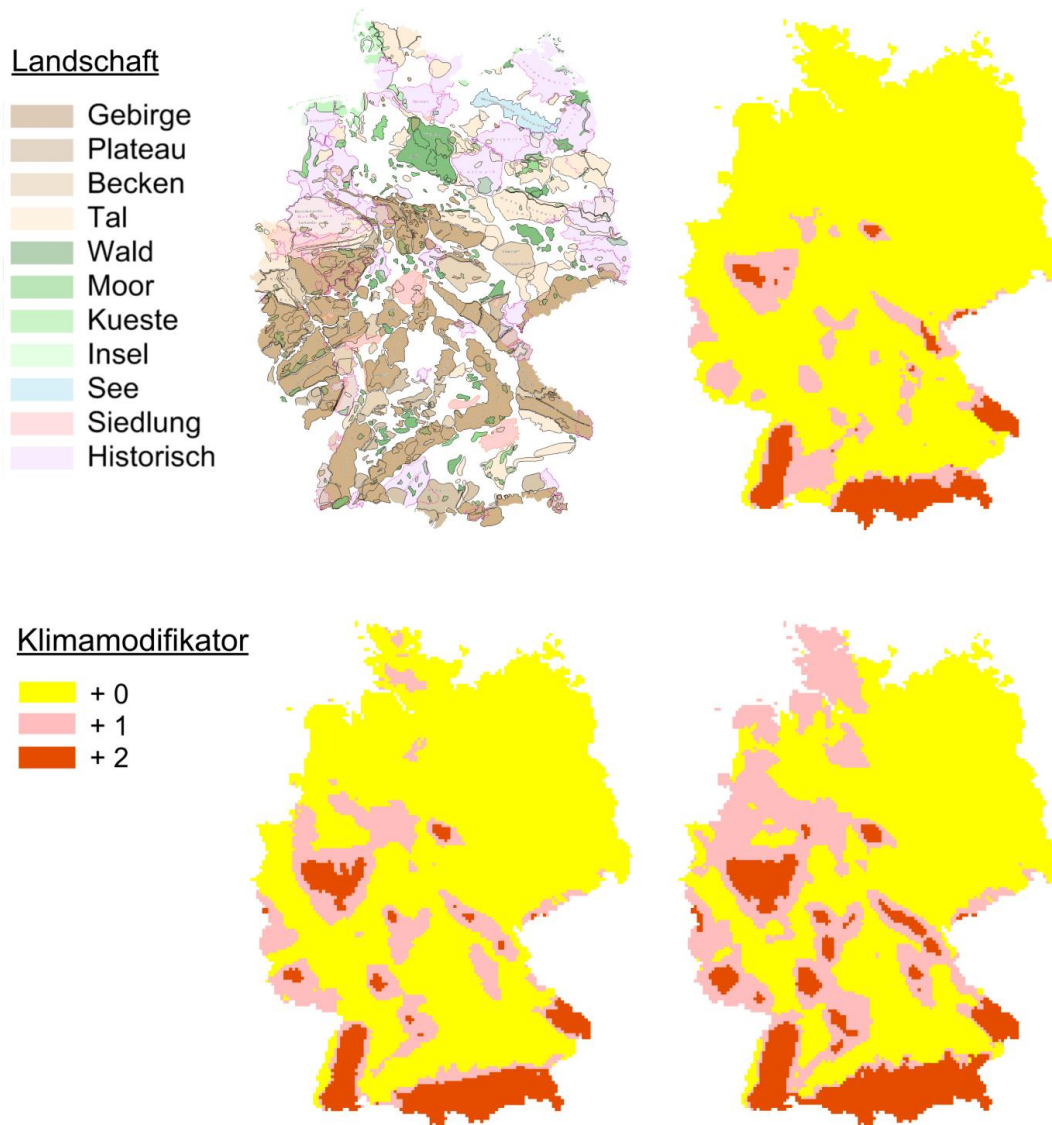


Abbildung 4-9: Ermittelte Klimamodifikatoren nach dem expertenwissensbasierten Ansatz. Links oben: Naturräumliche Großregionen Deutschland (Quelle: wms-Dienst „Landschaften Deutschland“ BKG (2018)). Rechts oben: *Bezugszeitraum* (1971–2000). Links unten: *Weiter-wie-bisher-Szenario nahe Zukunft* (2031–2060). Rechts unten: *Weiter-wie-bisher-Szenario ferne Zukunft* (2071–2100). (Quelle: verändert nach Schipek und Kallmeier (2019)).

Regionen, die einen Modifikator von +2 aufweisen, sind vor allem in den naturräumlichen Großregionen Alpenvorland, Schwarzwald, Bayerischer Wald sowie Rheinisches Schiefergebirge zu finden. Auch der Harz, der Odenwald oder auch Teile des Spessarts sind als großräumliche Naturregionen zu nennen, welche möglicherweise durch potenzielle Klimaänderungen des gewählten Klimaszenarios, stärker durch gravitative Massenbewegungen betroffen sein könnten. Orange gekennzeichnet, d. h. mit einem Modifikator von +1

versehen, sind diejenigen Bereiche, welche sich in relativer Nähe zu den schon genannten Zentren der genannten Großraumeinheiten befinden. Außerdem treten Bereiche des Erzgebirges, des Lausitzer Berglandes, aber auch die Münsterländer Tieflandsbucht und das Weserbergland deutlich hervor. Wird außerdem das *Weiter-wie-bisher-Szenario* in der *fernen Zukunft* (2071–2100) betrachtet, sind vor allem im Norden und Nordwesten Deutschlands Bereiche erkennbar, welche von den gewählten Klimamodifikatoren zusätzlich beeinflusst werden. Allerdings ist in den nördlichen Gebieten Deutschlands die Ausgangssituation aufgrund einer eher geringen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen eine völlig andere (Schipek und Kallmeier 2019).

Sturzprozesse

Da die Prozessabläufe gravitativer Massenbewegungen ebenso wie deren Voraussetzungen und den daraus resultierenden Gefährdungen differenziert zu bewerten sind, wurden erste Modelle zur prozessspezifischen Bewertung potenzieller Betroffenheiten entwickelt. Dabei wurde in Sturz- und Fließprozesse untergliedert.

Da sich Sturzprozesse vornehmlich auf Festgestein beziehen, wurde die Berechnung der Hauptgefährdungsklassen in Anlehnung an den Ansatz für allgemeine gravitative Massenbewegungen angepasst. Die Klassen wurden hier auf zwei Hauptgefährdungsklassen (1 = nicht bis sehr gering gefährdet und 3 = gefährdet) reduziert. Außerdem wurde der vertikale Abstand vom Hang zur Straße als zusätzlicher Eingangsparameter berücksichtigt (Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials für Sturzprozesse (Quelle: Schipek und Kallmeier (2019)).

Hauptgefährdungsklasse	Gefährdungsklasse	GÜK200 Gesteinsklassifikation		Vertikaler Abstand Hang zur Straße	Modifikator
		Lockergestein	Festgestein		
		<i>GK = 0; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8</i>	<i>GK = 1</i>		
3	4	-	$\geq 30^\circ$	>10 m	1
	3				0
	2				-1
1	1	alle	$< 30^\circ$	≤ 10 m	-

Zur Spezifizierung der Hauptgefährdungsklassen wurden diese in vier Gefährdungsklassen untergliedert. Zu den Festgesteins-Parametern „Klüftung (KL)“, „Trennflächen (TF)“ und der vorhandenen Landnutzung „Wald/Gehölz“ wurden entsprechende Modifikatoren entwickelt (Abbildung 4-10). Durch die Anwendung des Ergebnismodifikators ist eine Änderung der Gefährdungsklassen von -1 (positiver Einfluss) bis +1 (negativer Einfluss) möglich.

Ebenso wie im Ansatz für allgemeine gravitative Massenbewegungen wurde im letzten Analyseschritt der Lagebezug zum Bundesfernstraßennetz hergestellt. Für die Sturzprozesse wurden hierfür die Gefährdungsklassen ≥ 2 gewählt, die mit den Pufferzonen 0 m (direkte Gefährdung), 50 m, und 100 m versehen wurden. Im Anschluss daran wurden diese Zonen mit dem Bundesfernstraßennetz verschnitten.

Fließprozesse

Analog zum Vorgehen bei den allgemeinen gravitativen Massenbewegungen wurden für Fließprozesse zunächst fünf Hauptgefährdungsklassen aus dem Verschnitt der GÜK200 und der Hangneigungsklasse generiert (Tabelle 4-1). Für diese fünf Hauptgefährdungsklassen erfolgte eine Untergliederung, sodass letztlich 15 Gefährdungsklassen zur Weiterverarbeitung generiert wurden. Zur Spezifizierung der Hauptgefährdungsklassen wurden die Parameter „Landnutzung“, „Verformungsempfindlichkeit (VE)“ und „Fließakku-

mulation“ verwendet (Abbildung 4-11). Um in einer Kartendarstellung Erosionsrinnen besonders hervorzuheben, wurde der Parameter „Fließakkumulation“ doppelt gewichtet. Durch die Anwendung des Ergebnismodifikators wurden Klassenänderungen von -1 (positiver Einfluss) bis maximal +2 (doppelt negativer Einfluss) erzeugt.

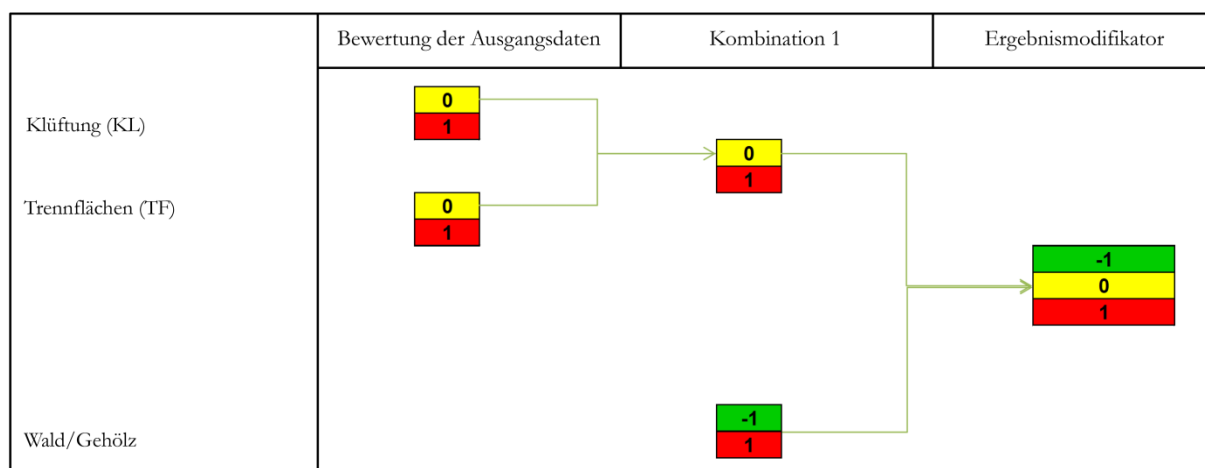


Abbildung 4-10: Fließschema zur Spezifizierung der Sturzprozesse (Quelle: Schipek & Kallmeier 2019).

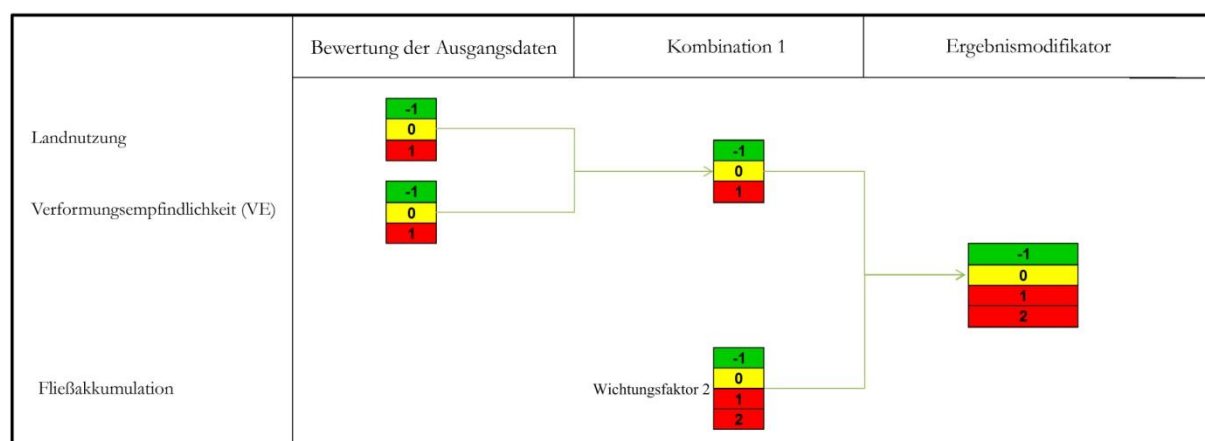


Abbildung 4-11: Fließschema zur Spezifizierung der Fließprozesse (Quelle: Schipek & Kallmeier 2019).

Ebenso wie im Ansatz für allgemeine gravitative Massenbewegungen wurde für die Fließprozesse im letzten Analyseschritt für die potenziellen Gefährdungsbereiche ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßennetz hergestellt. Zur Auswertung wurden die Gefährdungsklassen ≥ 10 (starke bis sehr starke Gefährdung) betrachtet. Um einen Überblick über die Streckenabschnitte zu erhalten, die direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m oder 200 m um Bereiche mit einer Gefährdungsklasse ≥ 10 liegen zu erhalten, wurden entsprechende Pufferzonen gebildet. Zuletzt wurde das Straßennetz mit diesen Zonen verschnitten.

4.2.2 Datenbasierter Modellansatz (Ansatz 2)

Wie bereits in Abschnitt 0 angesprochen, wurden zwei Ansätze zur Ermittlung von potenzieller Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen entwickelt. Ansatz 2 basiert auf der Verwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN). Anders als bei dem expertenwissensbasierten Ansatz 1, der auf Grundlage von wissenschaftlicher Expertise und Erfahrungen im Zusammenhang mit gravitativen Massenbewegungen entwickelt wurde, ist Ansatz 2 rein datengestützt. Expertenwissen bzw. eine geologische/ingenieurgeologische Expertise findet innerhalb dieses Ansatzes durch die Auswahl und Aufbereitung geeigneter geowissenschaftlicher Daten als Modelleingangsdaten Anwendung. Zur Anwendung kam die Software „advange®“ der Firma

Beak Consultants GmbH. Diese verknüpft die Lage dokumentierter Ereignisse mit geotechnischen/geologischen Eigenschaften, die Auslöser für gravitative Massenbewegungen sein können. Die Ereignisdaten stellen dabei für das Programm die eigentlichen Lernobjekte dar. Für die jeweils erfasste Lokalität werden prozesskontrollierende Parameter wie die Hangneigung, die Gesteinsart, die Klüftungs- und Verformungsempfindlichkeit registriert, um gravitative Massenbewegungen identifizieren und prognostizieren zu können.

Das in Abschnitt 4.1.1 genannte Ereignisdatenkataster mit insgesamt 11.658 Ereignissen wurde zunächst in die Prozesstypen „Rutschprozesse“, „Fließprozesse“, „Sturzprozesse“ und „Subrosion“ untergliedert. Der Prozesstyp der „Subrosion“ fand keine Anwendung. Des Weiteren erfolgte eine umfassende Plausibilitätsprüfung der Daten, was die Anzahl verwendbarer Ereignisse als Trainingsdaten weiterhin verringerte. Weitere Datengrundlagen sind auch bei diesem Ansatz das DGM20, die GÜK200 und das ATKIS Basis-DLM. Aus dem Landbedeckungsmodell wurden der Versiegelungsgrad und Bewuchs abgeleitet. In der Auswertung befanden sich 73 % der Ereignisse in Waldgebieten. Damit liegt ein Großteil der Ereignis- und demzufolge Lerndaten für den Ansatz 2 in Gebieten, in denen der vorhandenen Landnutzung eine stabilisierende Wirkung zugeschrieben wird. Geschuldet ist dies zum einen der Lage der Ereignispunkte, welche nicht zu 100 % korrekt erscheint sowie der Genauigkeit des DLM im Vergleich zur verwendeten Modelldiskretisierung. Aus diesem Grund wurde der Parameter „Landnutzung“ bei der Erstellung des finalen Modells ausgeschlossen, um möglicherweise falsche Lerneffekte der KNN zu reduzieren (Schipek und Kallmeier 2019).

Zur optimalen Nutzung der Eingangsdaten, wurden die Ereignisse mehrfach gefiltert. Final wurden zur Modellverbesserung nur die Ereignisdaten genutzt, die in den Gefährdungsklassen ≥ 7 aus Ansatz 1 lagen. Somit ergaben sich prozessbezogen nach Hinzufügen von zusätzlichen innerhalb des Projektes erhobenen Feldvalidierungspunkten insgesamt 1.529 Trainingspunkte für Rutschprozesse und 96 für Fließprozesse. Von der Verwendung der als Sturzprozesse deklarierten Schadensdaten wurde aufgrund ihrer meist nicht plausiblen bzw. eindeutigen Lage abgesehen, sodass letztendlich jeweils eine Karte für das Gefährdungspotenzial von Rutsch- und Fließprozessen generiert wurde.

Grundsätzlich sind die Ergebniskarten des datenbasierten Ansatzes mit dem des expertenwissensbasierten Ansatzes für die Straße vergleichbar. Anders als in der Darstellungsweise der Karten von Ansatz 1 wird das Gefährdungspotenzial sehr viel kontrastreicher ausgewiesen. Bei der Kartendarstellung wurde beim datenbasierten Ansatz eine fließende Farbskala, ebenfalls mit einer Reichweite von „nicht bis sehr gering gefährdet“ bis „stark gefährdet“ generiert. Der höhere Kontrast der Karte ruht daher, dass größtenteils Bereiche mit sehr hoher oder sehr geringer Gefährdung ausgewiesen werden und nur sehr wenige im mittleren Gefährdungsbereich liegen. Der Grund hierfür liegt in der KNN Methodik selbst, wobei zunächst in einem iterativen Prozess Trainingsraster erzeugt werden. Hierbei werden Trainingspixel mit den Werten 1 (Ereignis/zutreffend) oder 0 (kein Ereignis/nicht zutreffend) erzeugt. Weitere Ausführungen sind dem Projektabschlussbericht des EBA (2018) zu entnehmen.

Die Ergebnisse des datenbasierten Ansatzes weichen bei der Schiene z. T. erheblich von denen des expertenwissensbasierten Ansatzes ab. Zum Zeitpunkt des vorangegangenen Projektes des EBA lagen nicht genügend Trainingsdaten (Ereignisdaten) vor, um das Modell ausreichend zu trainieren. Aufgrund der geringen Datengrundlage (Ereignisse) und deren Verteilung hauptsächlich in Sachsen konnte lediglich eine Karte für Sachsen (mit Ansatz 2) erstellt werden. Diese Karte wurde mit der auf Expertenwissen basierenden Karte von Ansatz 1 für Sachsen verglichen. Der Einsatz neuronaler Netze hängt stark von der Quantität und der Qualität der Eingangsdaten ab, speziell der erfassten Massenbewegungsereignisse. Daten zu Massenbewegungsereignissen sind nur eingeschränkt vorhandenen bzw. kostenpflichtig, aus diesem Grund ist die Anwendbarkeit dieses Ansatzes grundsätzlich für eine deutschlandweite Netzbetrachtung als kritisch zu beurteilen. Zum Zeitpunkt des BAST-Projektes lagen zwar grundsätzlich ausreichend viele Ereignispunkte vor, dessen Lagegenauigkeit jedoch oftmals unzureichend war. Aus diesem Grund wurde auch hier Ansatz 1 weiterverfolgt und auf dessen Grundlage weitere Auswertungen vorgenommen.

4.3 Ergebnisse (Ansatz 1)

Nach dem Verschnitt des Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes mit den in Abschnitt 0 beschriebenen Gefährdungsbereichen (Pufferzonen) ergeben sich in Folge des Klimawandels die nachstehend beschriebenen Änderungen der potenziell betroffenen Streckenlängen.

Das Gesamtergebnis zeigt, dass unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* von einer Zunahme der potenziell durch gravitative Massenbewegungen gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte auszugehen ist. Laut des entwickelten Modells liegen bereits heute, unter Berücksichtigung der Klimaparameter, etwa 5 % des Bundesfernstraßen- und rund 6 % des Bundesschienennetzes potenziell in Bereichen mit einer Gefährdungsklasse ≥ 10 . In der *nahen Zukunft* (2031–2060) werden es rund 6 % des Bundesfernstraßen- und 7 % Bundesschienennetzes sein. In der *fernen Zukunft* (2071–2100) können sich die potenziell gefährdeten Straßenstrecken auf 7 % und die Schienenstrecken auf 8 % im Vergleich zur heutigen Betroffenheit erhöhen. Für eine vereinfachte Lesbarkeit der Ergebnisse wurden die in Kapitel 0 beschriebenen Pufferzonen (0 m, 50 m, 100 m und 200 m) zusammengefasst und allgemein als gefährdete Streckenabschnitte in Tabelle 4-4 aufgeführt. In Tabelle 4-5 sind die Änderungen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Streckenabschnitte bezogen auf die *nabe* und *ferne Zukunft* nach genannten Pufferzonen differenziert aufgeführt.

Es ist zu beachten, dass der Modellansatz so gewählt wurde, dass hauptsächlich die Grunddisposition über ein mögliches Gefährdungspotenzial bestimmt. Der Einfluss des Klimawandels wird lediglich als zusätzlicher Einflussparameter betrachtet. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass das Auswertungsergebnis einen ersten Ansatz zur Integration des Klimas darstellt. Die angegebenen Prozentwerte sind als tendenzielle Richtwerte zu betrachten, um einen Überblick über die potenzielle Betroffenheit durch gravitative Massenbewegungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel und Extremwetterereignissen zu erhalten. Sie beinhalten zum aktuellen Forschungsstand noch Unsicherheiten, die durch weitere Validierungen (Kapitel 4.4) in der zweiten Förderphase des BMVI-Expertenetzwerks zur Modellverbesserung beitragen sollen.

Tabelle 4-4: Gerundete Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und -schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im *Bezugszeitraum* (1971–2000) und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (*Weiter-wie-bisher-Szenario*) in der *nahen* und *fernen Zukunft*.

Verkehrsträger	Straße				Schiene			
Gefährdung durch allgemeine Massenbewegungen – <i>Bezugszeitraum</i>								
Gesamtlänge	51.150 km				34.140 km			
Gefährdete Streckenabschnitte (ohne Klimamodifikator)	1.640 km		3 %		1.340 km		4 %	
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikator)	2.590 km		5%		1.900 km		6 %	
Gefährdung durch allgemeine Massenbewegungen – <i>nabe</i> und <i>ferne Zukunft</i>								
Zeitraum	2031–2060		2071–2100		2031–2060		2071–2100	
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikator verändert nach dem <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>)	[km]	[%]	[km]	[%]	[km]	[%]	[km]	[%]
	2.980	6	3.650	7	2.270	7	2.800	8

Tabelle 4-5: Änderung der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten (Gefährdungsklasse ≥ 10) Bundesfernstraßen- und Bundesschienenabschnitte unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (*Weiter-wie-bisher-Szenario*) in der *nahen* und *fernen Zukunft*.

Änderung der Betroffenheit von Streckenabschnitten durch allgemeine Massenbewegungen				
Verkehrsträger	Straße		Schiene	
Gesamtlänge	51.150 km		34.140 km	
<i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	Zunahme <i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	Zunahme <i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	Zunahme <i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	Zunahme <i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Einheit	[km]	[km]	[km]	[km]
Zunahme Gefährdung im 100-200m-Puffer	155	387	145	307
Zunahme Gefährdung im 50-100m-Puffer	90	239	83	205
Zunahme Gefährdung im 0-50m-Puffer	127	363	117	294
Zunahme direkte Gefährdung (0m-Puffer)	22	75	20	66
Summe Zunahme an Gefährdung	394	1064	365	894

4.4 Validierung der Hinweiskarten

Im Rahmen des Projektes „Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz“ (Schipek und Kallmeier 2019) haben bereits erste Feldvalidierungen stattgefunden. Ausgehend von der Ergebniskarte des expertenwissensbasierten Modellansatzes für allgemeine gravitative Massenbewegungen erfolgte eine exemplarische Überprüfung gefährdeter und nicht gefährdeter Gebiete. Vorab wurden 12 Untersuchungsgebiete in 5 Bundesländern definiert: Thüringen, Sachsen, Rheinland-Pfalz, Bayern und Baden-Württemberg. Die Validierung fand in zwei Geländephasen im Juli und August 2018 statt. Es wurden insgesamt 172 Geländepunkte aufgenommen, wobei 156 Geländepunkte innerhalb des 1 km-Pufferbereiches um das Bundesfernstraßennetz lagen. Alle Punkte liegen ausnahmslos im Bereich der Bundesstraßen. Autobahnen wurden im Rahmen der Validierung nicht betrachtet, da deren Begehrbarkeit bzw. die Begehrbarkeit des umgebenden Geländes für den Auftragnehmer nicht gewährleistet war.

Circa 78 % der aufgenommenen Validierungspunkte lagen in der Hinweiskarte nach dem expertenwissensbasierten Ansatz in einer Gefährdungsklasse von ≥ 8 . Die Mehrzahl der gefährdeten Gebiete konnte damit im Gelände validiert werden. Nicht gefährdete bzw. gering gefährdete Gebiete wurden in den gewählten Großräumen der Feldvalidierung visuell im Gelände bestätigt, jedoch nicht quantitativ erfasst (Schipek und Kallmeier 2019).

In der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks ist über die erste Feldvalidierung hinaus vorgesehen, die entwickelten Hinweiskarten mit weiteren Verfahren zu validieren. Prioritär sollen die Berechnungen mittels höher aufgelösten Eingangsdaten in **Fokusegebieten** durchgeführt werden. Neben der höheren Datenauflösung kann die Methode durch weitere Einflussparameter wie zum Beispiel Bodentypen, Mikrorelief und geotechnische Parameter ergänzt werden. Durch die Berücksichtigung der Höhenlage von Straße und Schiene soll untersucht werden, ob sich z. B. der potenziell gefährdete Hang oberhalb oder unterhalb der Streckenabschnitte befindet. Außerdem kann die Integration von gefährdungsmindernden Objekten, wie z. B. die natürliche Barriere durch Fließgewässer oder von Hangsicherungen zu einer Verbesserung der Modellergebnisse beitragen. Da die Eingangsparameter für solche Detailanalysen auch in absehbarer Zeit mit kostenpflichtigen Geodaten verbunden sein werden, ist es vorgesehen, zunächst Beispielregionen zu

bearbeiten. Ein anschließender Abgleich der Ergebnisse mit dem deutschlandweiten Modellansatz soll Aufschluss darüber geben, ob eine Modellverbesserung durch höher aufgelöste Datengrundlagen zu erzielen ist. Ebenso ist eine Validierung der prozessspezifischen Hinweiskarten vorzunehmen. **Detailanalysen** mit höherer Datenauflösung können auch hier zur Überprüfung der Modellparameter dienen.

Bezüglich der Integration von Klimadaten in das Grundmodell der Hinweiskarte ist eine **Schwellenwertanalyse** durchzuführen. Im ersten Ansatz wurde eine Häufigkeitsverteilung mit den Daten der historischen Klimamodellsimulationen für den *Bezugszeitraum* 1971–2000 erstellt (Abschnitt 4.1.2). Da es sich hierbei nur um eine grobe Auswertung handelt, gilt es valide Schwellenwerte für Klimaparameter zu erarbeiten, die potenzielle Auslöser für gravitative Massenbewegungen darstellen können. Im Anschluss sollen diese erneut auf das Modell angewendet werden.

In einem geplanten Zusatzprojekt wird die Validierung mittels **Stand sicherheitsberechnungen** angestrebt. Ziel des Projektes ist es, die in der Hinweiskarte als potenziell instabil identifizierten Hänge und Böschungen entlang ausgewählter Streckenabschnitte des Bundesfernstraßennetzes zu bewerten. Es sollen exemplarische Untersuchungen zur Standsicherheit ausgewählter Hänge und Böschungen im Kontext des Klimawandels durchgeführt werden. Hierzu ist es beispielsweise vorgesehen zu untersuchen, wie sich der Einfluss unterschiedlicher Niederschlagszenarien auf die Standsicherheit auswirken kann.

Eine weitere Überlegung ist es, ein **Monitoring** von potenziell gefährdeten Hängen und Böschungen durchzuführen. Als Grundlage zur Wahl der exemplarischen Standorte sind neben der bereits entwickelten Hinweiskarte ebenso betroffene Straßenbauverwaltungen bzw. Straßenmeistereien einzubeziehen. Es ist angedacht, neben Kameraaufnahmen simultan Wetterdaten vor Ort aufzuzeichnen, um einen Zusammenhang zwischen Schadensfall und auslösenden Faktoren herzustellen. Die Ergebnisse können dazu beitragen, klimatische Schwellenwerte als Auslöser zu identifizieren.

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, werden für die Klimawirkungsanalyse drei Teilanalysen vorgesehen. Die Expositionsanalyse (Analyseschritt 1) wird weitestgehend über die Hinweiskarten bzw. dem zugrundeliegenden Modellansatz abgedeckt. Der Analyseschritt 2 beinhaltet die Sensitivitätsanalyse. Entscheidend ist hierbei, die bereits vorhandenen Sicherungsbauwerke in den Modellansatz einfließen zu lassen. Wie in Kapitel 3.3.2 erläutert, konnten die Standorte von Sicherungsbauwerken aufgrund fehlender Georeferenzierung bisher nicht in den Modellansatz integriert werden. Für die kommende Forschungsphase ist es besonders wichtig hierfür eine Lösung zu finden, um bereits gesicherte Streckenabschnitte nicht als gefährdet auszuweisen. Darüber hinaus ist jedoch auch abzuwägen, in welchem baulichen Zustand sich die Sicherungsbauwerke befinden und ob deren Funktionstüchtigkeit noch gegeben ist (Abbildung 4-13).



Abbildung 4-13: Sicherungsmaßnahmen der B49 an der Mosel bei Cochem; Teilweise nicht mehr funktionstüchtige Sicherungsmaßnahmen durch herausgelösten Anker des Fangzauns und mit Schutt gefüllte Fangnetze; Hinweis auf stetig stattfindende Massenbewegungen (Bilder: Lohrengel/Kirschen BASSt 2018).

5 Digitale Erfassung und Inventarisierung von gravitativen Massenbewegungen

In dem Forschungsprojekt „Digitale Erfassung und Inventarisierung von gravitativen Massenbewegungen entlang von Bundesfernstraßen“ (Steffen und Schipek (2019), FE 89.0337/2017/) wurde erprobt, ob neue Technologien unter der Nutzung von künstlicher Intelligenz auch auf diesem Gebiet potenziell zur Anwendung kommen können.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand darin, ein Verfahren zu entwickeln, welches zurückliegende gravitative Massenbewegungen mittels digitaler Verfahren erfassen und klassifizieren kann. Die Identifizierung und Analyse der kartierten Ereignisse sollen zukünftig als Basis für weitere Ansätze zum Monitoring potenziell gefährdeter Hänge und Böschungen sowie für die Früherkennung potenzieller Schadensfälle dienen. Zur Anwendung kamen die Verfahren der Künstlichen Neuronalen Netze sowie der Zufallswälder. Die Durchführung erfolgte auf Grundlage der frei verfügbaren, hochauflösten Geodaten für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Sachsen.

Im Anschluss an die Identifizierung der gravitativen Massenbewegungen, erfolgte eine Attributierung der Flächen bezüglich Größe, Position, Hangneigung, Geologie und Landnutzungsart. Im letzten Analyseschritt wurde ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßennetz hergestellt, um eine potenzielle Betroffenheit festzustellen.

5.1 Datengrundlagen

Folgende Geodaten wurden für das Projekt verwendet:

- Das Bundesfernstraßennetz aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra; BASt (2017)).
- Das digitale **Geländemodell** DGM1/DGM5 (von NRW und Sachsen), für die Ableitung von 25 Reliefparametern zur Charakterisierung der Erdoberfläche.
 - Für dieses Forschungsprojekt ist die hohe Auflösung der Daten essentiell. Anhand des Höhenmodells lernt der Algorithmus, typische Oberflächenstrukturen, die im Zusammenhang mit gravitativen Massenbewegungen stehen, zu erkennen.
- Die **Geologische Übersichtskarte** (GÜK200), zur späteren Attributierung der Ergebnisse.
- Das **digitale Landschaftsmodell** (ATKIS Basis-DLM), dient analog der Geologischen Übersichtskarte zur Attributierung und Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse.
- Das **Ereignisdatenkataster** bezüglich gravitativer Massenbewegungen mit insgesamt 11658 Ereignissen wurde auf Grundlage von Zuarbeiten und Datenlieferungen der geologischen Dienste der Bundesländer zusammengestellt.
 - Die Ereignisdaten stellen ebenso wichtige Lernobjekte dar, wie die Flächen des digitalen Höhenmodells. Hierbei ist die Lagegenauigkeit der erfassten Ereignisdaten von besonderer Relevanz, um dem Algorithmus keine Fehlinformationen vorzugeben. Da die übergebenen Ereignisdaten eine deutliche Variabilität hinsichtlich ihrer verwendeten Attributierungen aufwiesen, wurden diese entsprechend der Zielstellung des Projektes zunächst allgemeinen Prozesstypen zugeordnet.

5.2 Methodik

Die Entwicklung der Methodik zur Erkennung verschiedener Massenbewegungsprozesse erfolgte hauptsächlich unter Verwendung der Machine-Learning-Algorithmen mittels „Künstlicher Neuronaler Netze“ und „Zufallswäldern“. Die Methodik wurde dabei so entwickelt und aufbereitet, dass die Arbeiten bei zusätzlicher Datenverfügbarkeit fortführbar und bereits vorhandene Bereiche aktualisierbar sind. Die hierfür

erstellten Werkzeuge sind in einer ArcGIS Desktop-Umgebung lauffähig. Bezüglich der technischen Umsetzung sind aufgrund der erheblich schnelleren Rechenzeiten sowie der Möglichkeit, auch die landesweite Anwendung mit zwei Metern Zellgröße in einem überschaubaren zeitlichen Rahmen durchzuführen, die Zufallswälder dem Künstlichen Neuronalen Netz gegenüber etwas im Vorteil.

Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass sowohl die Modelle der Künstlichen Neuronalen Netze als auch der Zufallswälder grundsätzlich die gleichen Regionen mit zurückliegenden Ereignissen ausweisen, auch wenn Ausdehnung, Lage und Anzahl der Flächen im Detail nicht direkt vergleichbar sind.

Bei der Verwendung von digitalen Geländemodellen wurde eine Auflösung von zwei Metern der Auflösung von einem Meter vorgezogen, da die Qualität der Ergebnisse vergleichbar war, jedoch der Rechenaufwand erheblich gesenkt werden konnte. Bei einer Nutzung der höchsten verfügbaren Auflösung von einem Meter Zellgröße leidet das Aufwand-Nutzen-Verhältnis unverhältnismäßig stark.

Das prinzipielle Vorgehen beim maschinellen Lernen ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Dabei werden verschiedene morphologische Parameter miteinander kombiniert sowie der Zusammenhang zwischen ihnen und den Pixeln der kartierten Rutschungsflächen hergestellt. Das Gelernte kann anschließend auf weitere Bereiche angewendet werden und somit zur Identifizierung bisher nicht kartierter Ereignisse beitragen.

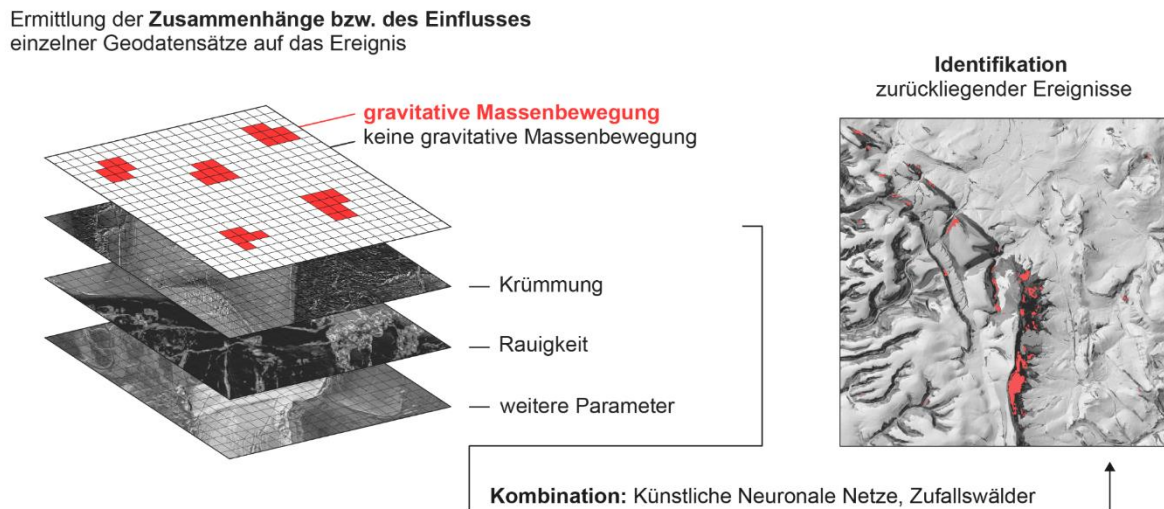


Abbildung 5-1: Generalisierte Darstellung des Konzepts zur Identifikation zurückliegender Ereignisse unter Verwendung von maschinellem Lernen (Quelle: Steffen und Schipek (2019)).

Der Ansatz zur Verwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen für die Modellierung raumbezogener Daten zielt im Wesentlichen darauf ab, komplexe lineare als auch nichtlineare Zusammenhänge darzustellen, wobei diese durch das Lernen bzw. Training in einem iterativen Prozess selbstständig rechnerisch ermittelt werden. Die Anwendung der Methode erfolgte mit der Software advangeo® der Firma Beak Consultants GmbH. Hierbei ist das Ergebnis stets eine Zahl im Wertebereich zwischen 0 und 1. Die finale Klassifikation, d. h. handelt es sich bei dem Pixel um einen Pixel innerhalb einer Rutschungsfläche (binär: 1) oder nicht (binär: 0), wird erst mit der Festlegung eines Grenzwertes durch den Anwender realisiert (sog. Cut-Off-Wert).

Das Verfahren der sog. Zufallswälder (Random Trees bzw. Random Forests) beruht auf dem Prinzip der Entscheidungsbäume. Dabei wird für jeden Pfad (Baum) zunächst zufällig ein Parameter aus den vorhandenen Parameterdatensätzen gewählt und versucht, ein Kriterium zu finden, welches die vorhandene Ereignismenge am saubersten teilt (z. B. Krümmung > 0). Aufbauend auf dem Ergebnis am Wurzelknoten wird im Anschluss erneut ein Parameter zufällig ausgewählt und anhand eines Grenzwertes (Hangneigung > 21,5 °) oder einer Klassifikation (Landnutzung: Wald) versucht, die verbliebenen Ereignisse entlang des

Pfades möglichst sauber zu trennen (non-terminal Nodes). Die Ermittlung des Grenzwertes bzw. die Wahl der Klasse wird dabei eigenständig durch den Algorithmus durchgeführt. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die Entscheidung nicht mehr verbessert werden kann. Das Ende dieser Kette stellen dabei die „terminal Nodes“ oder auch als „Leaf“ bezeichneten Knoten dar, deren Elemente die finale Aussage des Entscheidungsbaumes bestimmen. Die Zufallswälder erweitern nun dieses Prinzip, indem sie eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen berechnen und anschließend deren Ergebnisse bzw. Aussagen kombinieren.

Im Anschluss an die Erfassung der gravitativen Massenbewegungen wurde ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßennetz hergestellt. Dies erfolgte im ersten Schritt über eine quantitative Auswertung der Ergebnisflächen mit zurückliegenden Ereignissen innerhalb eines 500 m Bereiches um das Straßennetz. Im Ergebnis ist zu erkennen, dass nur 10 % bis 20 % der ermittelten Flächen in diesem Betrachtungsraum liegen. Im Weiteren wurde die potenzielle Betroffenheit von Streckenabschnitten untersucht. Dies erfolgte zum einen über die Anzahl der klassifizierten Ereignisse im Pufferbereich (500 m) und zum anderen über die Erstellung einer sog. Heat-Map (ArcGIS, Erweiterung *Spatial Analyst*), welche die potenzielle Ereignisdichte darstellen. Die Heat-Maps können dabei grundsätzlich auf Basis verschiedener Attribute wie z. B. der Lage oder Flächengröße berechnet werden.

5.3 Ergebnisse

Im Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass sich die entwickelte Methodik grundsätzlich zur Erfassung und Inventarisierung von einzelnen Ereignissen aus digitalen Geländemodellen eignet. Jedoch konnte eine möglichst großräumige Erfassung entlang des Bundesfernstraßennetzes, wie es ursprünglich vorgesehen war, nicht mit der vorhandenen Datengrundlage realisiert werden. Die Methodik ist darüber hinaus insbesondere für kleinere Ereignisse mit einem Umfang unter einem halben Hektar nicht gut geeignet.

Wie bereits erörtert, ist sowohl die hohe Auflösung des Geländemodells als auch die Lagegenauigkeit der erfassten Ereignisdaten von besonderer Relevanz. Hochaufgelöste Geländemodelle sind lediglich für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Thüringen und Hamburg frei verfügbar. Sachsen konnte auf Anfrage ein Modell mit der Auflösung 2 x 2 m zur Verfügung stellen. Von den insgesamt 11.658 übergebenen Ereignisdaten lagen allein 10.139 im Bundesland Bayern. Da hier jedoch kein hochaufgelöstes Geländemodell kostenfrei verfügbar war, konnten die Ereignisse in Bayern nicht für dieses Projekt verwendet werden. Im Umkehrschluss hierzu stand zwar für Thüringen das Geländemodell zur Verfügung, jedoch kein Ereigniskataster. Lediglich für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Sachsen standen sowohl Geländemodell, als auch Ereignisdaten zur Verfügung.

Um ein umfangreiches Inventar mit dem verwendeten Verfahren aufbauen zu können, müssen bedeutend mehr Ereignisse in Verbindung mit hochaufgelösten Geländemodellen vorliegen. Für den selbstlernenden Algorithmus stellen ganze Bundesländer sehr große und mit Blick auf die Oberflächenbeschaffenheit auch heterogene Regionen dar. Die Beschränkung auf einzelne Regionen, könnte das Ergebnis noch weiter verbessern.

Verglichen wurden außerdem Künstliche Neuronale Netze mit der Methodik der Zufallswälder. Die Erkennungsrate des Algorithmus auf Grundlage von Zufallswäldern war höher, jedoch kann dies aufgrund der geringen Anzahl an Trainingsflächen auch als Zeichen für eine Überanpassung des Modells gedeutet werden. Durch Künstliche Neuronale Netze wurden zwischen 60 % und 70 % der Trainingsflächen richtig klassifiziert (Abbildung 5-2). Eine Verbesserung der Ergebnisse kann mit zusätzlichen Trainingsdaten erzielt werden. Hinsichtlich der technischen Umsetzung ist die Methode der Zufallswälder zu bevorzugen.

Durch die entwickelte Methodik ist es zuletzt gelungen, aus den digitalen Geländemodellen der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Sachsen Regionen entlang von Bundesfernstraßen zu identifizieren, in denen vermehrt gravitative Massenbewegungen vorgekommen sind. Zur Darstellung und Nutzung der generierten Daten hat sich insbesondere die Erstellung sogenannter Heat-Maps als geeignet herausgestellt. Die Heat-Maps können dabei grundsätzlich auf Basis verschiedener Attribute wie z. B. der Häufigkeit von Ereignissen

oder der Flächengröße berechnet werden. Für Nordrhein-Westfalen wird dabei deutlich, dass besonders die klassifizierten Ereignisse im Sauerland zum einen Bereiche mit hohem Aufkommen bilden, zum anderen jedoch die Flächen an sich verhältnismäßig klein sein müssen. Das einzige größere Cluster in Sachsen im Elbstandteingebirge hingegen zeigt das Gegenteil. Hier werden viele Ereignisse vom Algorithmus ausgewiesen und zusätzlich müssen jedoch einige dieser Klassifikationen eine relative große Fläche besitzen (Steffen und Schipek 2019).

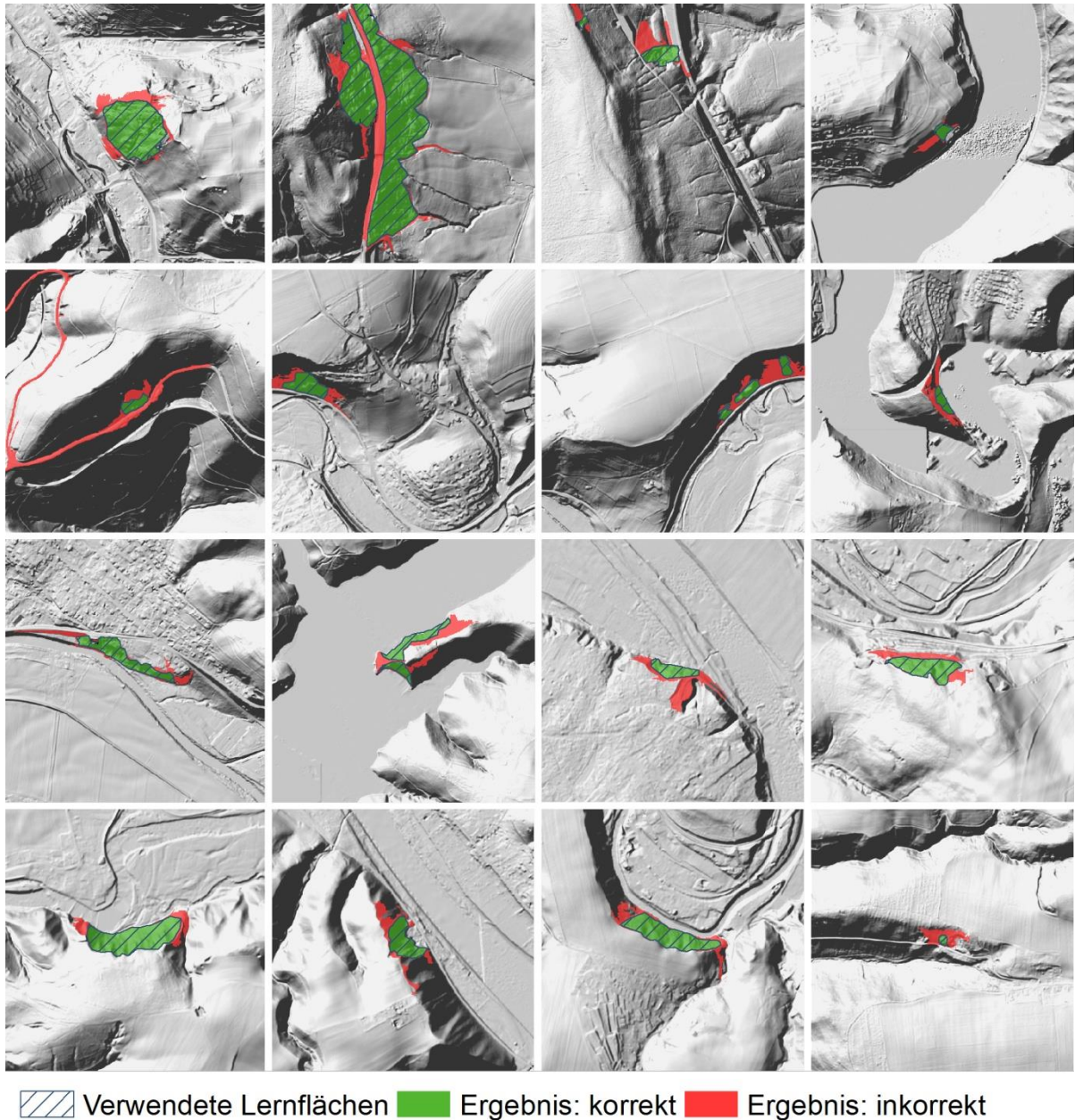


Abbildung 5-2: Trainingsergebnisse der Berechnungen mittels Zufallswäldern (Quelle: Steffen und Schipek (2019)).

6 Fazit & Ausblick

In der 2. Förderphase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) gilt es die bisherigen Erkenntnisse weiterzuentwickeln und darüber hinaus die noch offenen Fragestellungen zu bearbeiten.

In Bezug auf den Schwerpunkt *Hangrutschungen* steht die Validierung der entwickelten Modelle zur Identifizierung der Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur durch gravitative Massenbewegungen im Fokus. Das Vorgehen hierzu wurde bereits in Kapitel 4.4 erläutert. Die hierzu geplanten Themen umfassen:

- „Standsicherheitsberechnungen“,
- „Schwellenwertanalysen“,
- „Kameraüberwachung/Monitoring“,
- „Detailanalysen in Fokusgebieten“ und
- „Untersuchungen zu gravitativen Massenbewegungen anhand von Erosionsrinnen“.

Bezüglich der Integration von Klimadaten in das Grundmodell der Hinweiskarte ist im weiteren Verlauf des BMVI-Expertennetzwerks eine Schwellenwertanalyse durchzuführen. Im ersten Ansatz wurde eine statistische Annäherung der auslösenden Klimaparameter durchgeführt. Da es sich hierbei nur um einen sehr generalisierten Ansatz handelt, gilt es die Bestimmung von relevanten Schwellenwerten ausführlicher zu bearbeiten. Weiteres Potential bietet hier z. B. die Berücksichtigung von vorliegenden Boden- und Gesteinseigenschaften, die besonders sensitiv auf bestimmte Witterungsereignisse reagieren können. Auch wäre die Untersuchung kombinierter Klimaparameter und deren Entwicklung in der Zukunft denkbar. Eine weitere Möglichkeit zur Analyse relevanter Klimaparameter bestünde zudem in der Differenzierung nach Prozess-typen (Sturz-, Rutsch- und Fließprozesse).

Für das Projekt zur digitalen Erfassung und Inventarisierung von einzelnen gravitativen Massenbewegungen entlang von Bundesfernstraßen lagen der BASt und dem Auftragnehmer bisher zu wenige Trainingsflächen in ausreichend guter Qualität vor. Zwar konnten Regionen mit gravitativen Massenbewegungen in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Sachsen identifiziert werden, jedoch nicht einzelne Ereignisse mit einer Ausdehnung kleiner als 0,5 Hektar. Die Methodik bietet jedoch das Potenzial, die gestellte Aufgabe eines bundesweiten Ansatzes zu erfüllen, falls in Zukunft flächendeckend standortgenaue Ereignisdaten sowie frei verfügbare hochaufgelöste Geländemodelle zur Verfügung stehen. Derzeit ist die zukünftige Handhabung bezüglich der Haltung und Weitergabe von hochaufgelösten Geodaten seitens der datenhaltenden Ämter und Behörden noch nicht abschätzbar. In naher Zukunft werden die zur Ausweitung des Modellansatzes benötigten hochaufgelösten Geländemodelle (DGM1/DGM2) vermutlich auch weiterhin seitens der Landesvermessungsämter und des BKG nur kostenpflichtig erwerbbar sein. Gegebenenfalls kann dies auch künftig dazu führen, dass die Möglichkeiten bei Projektvorhaben limitiert bleiben oder nur mit viel höherem finanziellem Aufwand realisierbar sind.

Das Themenfeld 1 sieht insgesamt eine Umstrukturierung der zuvor in den Schwerpunktthemen bearbeiteten Inhalte vor (Abbildung 6-1). Für jede Naturgefahr finden Arbeitsschritte in jedem der vier Schwerpunktthemen statt. Die Schwerpunktthemen SPT-101 bis 104 umfassen die Analysebausteine der in Phase 1 entwickelten Klimawirkungsanalyse und -bewertung (Exposition, Sensitivität, Kritikalität und Integration). Die bisherigen Arbeiten zu gravitativen Massenbewegungen decken maßgeblich den Arbeitsschritt der Expositionsanalyse (SPT-101) ab. In Phase 2.0 gilt es diese weiterzuentwickeln und darüber hinaus zusätzlich Erkenntnisse zur Sensitivität (SPT-102) und Kritikalität (SPT-103) zu erarbeiten.

Das Schwerpunktthema SPT-104 „Integrierte Klimawirkungsbewertung & Nutzerdialog“ sieht eine Verknüpfung der SPT-101 bis 103 vor, um eine verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsbewertung durchzuführen. Der Nutzen von verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsbewertungen liegt darin, eine

deutschlandweite Hervorhebung von potenziell durch gravitative Massenbewegungen betroffene Streckenabschnitte im Zusammenhang mit dem Klimawandel und Extremwetterereignissen vornehmen zu können. Hierdurch wird es ermöglicht, einen Anpassungsbedarf beispielsweise durch Hangsicherungsmaßnahmen zu lokalisieren und die benötigten Ressourcen hierfür einzuplanen. Als Produkte werden neben Kartendarstellungen auch erweiterbare GIS-gestützte Modelle erarbeitet, die der Praxis zur Anwendungsunterstützung dienen sollen. Darüber hinaus soll der fachliche Dialog mit den Betreibern der Verkehrsinfrastruktur gefördert werden.

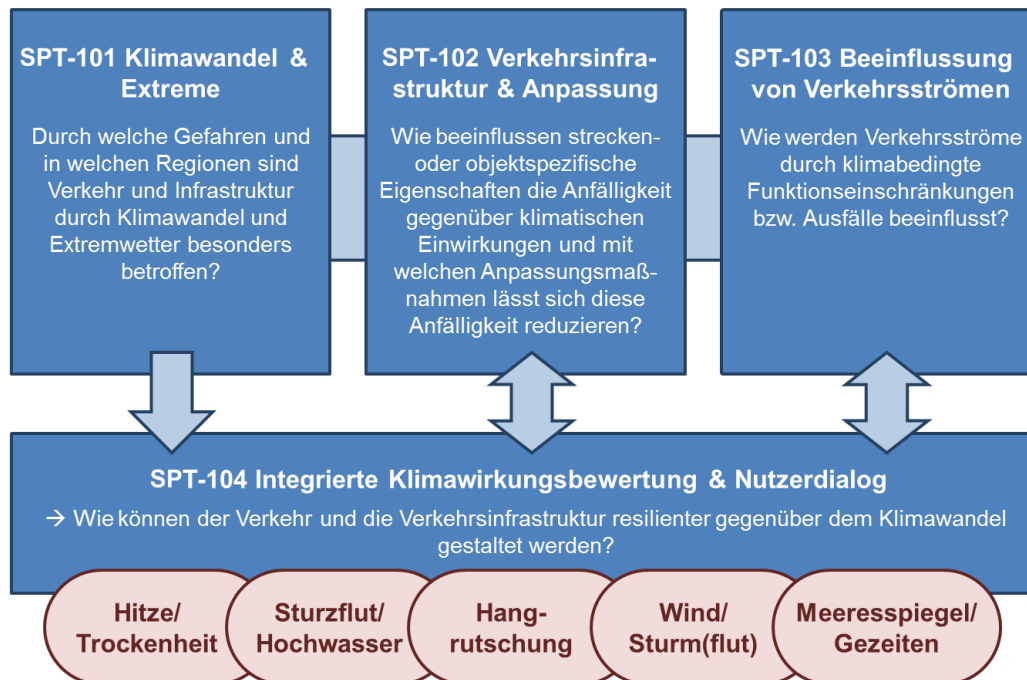


Abbildung 6-1: Organisationsstruktur, Schwerpunktthemen (SPT) und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase 2020–2025 des BMVI-Expertennetzwerks (Quelle: verändert nach Hänsel et al. 2020b).

Abgesehen von den neuen oder zu vertiefenden Forschungsinhalten sind für die 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks allgemeine Begrifflichkeiten und auch fachspezifische Definitionen zu diskutieren. Hierzu zählt beispielsweise der Begriff „Gefahrenhinweiskarte“. Dieser wurde in der 1. Phase durch den abgeschwächten Begriff „Hinweiskarte“ ersetzt, der jedoch als relativ unspezifisch zu bewerten ist. Laut Empfehlungen der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD 2008) sind „Gefahrenhinweiskarten nach objektiven wissenschaftlichen Kriterien erstellte Übersichtskarten mit Hinweisen auf geogene Naturgefahren, die erkannt und lokalisiert, jedoch nicht im Detail analysiert und bewertet sind“. Dabei spiegelt sich die geologische, morphologische und klimatische Varianz in Deutschland in den jeweiligen Gefahrenhinweiskarten zu den unterschiedlichen Prozessstypen (Rutsch-, Fließ- und Sturzprozesse) wider. Laut SGD (2008) enthalten Gefahrenhinweiskarten im Gegensatz zu Gefahrenkarten noch keine Angaben zu Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität einer Naturgefahr.

Die Staatlichen Geologischen Dienste empfehlen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten einen Projektmaßstab von 1:50.000. Es ist zu beachten, dass im Rahmen der Forschungsprojekte lediglich auf bundesweit frei verfügbare Daten als Datenbasis zurückgegriffen werden konnte. Diese sind inhomogen und liegen in unterschiedlichsten Maßstäben vor. Die Daten wurden daher zur weiteren Bearbeitung homogenisiert, in ein 20 m-Raster überführt und nachfolgend miteinander verschnitten. Das daraus resultierte Modell bildet die Basis für weitere detailliertere Untersuchungen, die dann in einem höheren Maßstabsbereich erfolgen können. Der entwickelte ingenieurgeologische Modellansatz wurde in einem Geoinformationssystem so

umgesetzt, dass eine Aktualisierung mit höher aufgelösten Daten, wenn diese bundesweit flächendeckend und einheitlich vorliegen, grundsätzlich möglich ist. Nach Bedarf kann dies auch für einzelne Bundesländer erfolgen.

Nach dem neusten Entwurf zur DIN EN ISO 14090:2018-07 „Anpassung an den Klimawandel – Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien“ ist der Begriff „Gefährdung“ als „Quelle oder Situation mit Schadenspotenzial“ definiert. Darüber hinaus gilt, dass das Schadenspotenzial in Bezug auf Verletzungen oder Gesundheitsschäden (sowohl kurz- als auch langfristig) bei Menschen, Sachschäden, Umweltschäden oder einer Kombination davon bestehen kann. Der Begriff verweist auf mit dem Klima im Zusammenhang stehende physikalische Ereignisse oder Trends oder ihre physikalischen Einflüsse. Die Verwendung des Begriffes ist somit im Zusammenhang mit den bisherigen Arbeiten zutreffend. Es ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die Begriffe „Gefahr“ und „Gefährdung“ im Deutschen oft als synonym verwendet werden.

Für die kommende Projektphase (2020–2025) schlagen wir die Verwendung des Begriffes

- a) „Gefährdungskarte zu gravitativen Massenbewegungen“ oder alternativ
- b) „Suszeptibilitätskarte zu gravitativen Massenbewegungen“ vor.

Der Vorschlag a) wird bevorzugt, da er auf der Definition des Begriffes „Gefährdung“ in der genannten Norm basiert. Nach telefonischer Rücksprache mit der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) existiert keine allgemein gültige Definition für „Suszeptibilitätskarten“ in Bezug auf gravitative Massenbewegungen. In Projekten der BGR werden Gefahrenhinweiskarten oft mit dem Begriff der „Suszeptibilität“ assoziiert und beschreiben die Empfindlichkeit in einem zu betrachtenden Raum (z. B. einer administrativen Einheit) gegenüber Massenbewegungen in Abhängigkeit von spezifischen Einflussfaktoren⁶. Diese beiden Begrifflichkeiten werden häufig synonym verwendet und sind bisher schwer voneinander abgrenzbar.

In dem derzeit laufenden Projekt (bis 31.12.20) „Massenbewegungen in Deutschland (MBiD) – ein Kooperationsprojekt zwischen Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Länder und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR“ werden methodische Empfehlungen zur regionalen Abschätzung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit (Suszeptibilität) von Massenbewegungen in Deutschland erarbeitet⁷. Die Projektergebnisse sollen im BMVI-Expertenetzwerk berücksichtigt werden.

⁶ https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefachrdungsanalysen/Ingenieurgeologische_Gefachrdungsanalysen/Gefachrdungspotenziale/analyse_suszeptibilitaet.html

⁷ https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefachrdungsanalysen/Projekte/Ingenieurgeologische_Gefachrdungsanalysen/laufend/deutschland_mbid.html

7 Literatur

- BAFU (2016) Schutz vor Massenbewegungsgefahren - Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/schutz-vor-massenbewegungsgefahren.html>
- BASSt (2017) Bundesinformationssystem Straße (BISStra), Datensatz des Bundesfernstraßennetzes. In: (BASSt) BfS (Ed.), Bergisch Gladbach.
https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/Daten/Daten-BISStra.html;sessionid=63AF0A95D08F4BC9175BF321C4FA0E05.live21301?nn=1817946
- BKG (2018) wms-Dienst „Landschaften Deutschland“. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
<http://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/wms-landschaften-deutschlands-wms-landschaften.html>
- BLfU (2017) Steinschlag, Felssturz, Rutschung, Erdfall - Geogefahren erkennen, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Augsburg.
- 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. Hänsel S, Herrmann C, Jochumsen K, Klose M, Nilson E, Norpöth M, Patzwahl R und Seiffert R (eds).
- 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
- Brien S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Krähenmann S, Möller J, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Buth M, Kahlenborn W, Greiving S, Fleischhauer M, Zebisch M, Schneiderbauer S und Schauer I (2017) Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen - Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>
- DB Netz AG (2017) Geo-Streckennetz, Geoinformationen zu Strecken des Schienenverkehrsnetzes. In: AG DB (Ed.). <http://download-data.deutschebahn.com/static/datasets/geo-strecke/geo-strecke.zip>
- DIN EN ISO 14090 (2019) Anpassung an die Folgen des Klimawandels - Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14090:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14090:2019 (Englischer Titel: Adaptation to climate change - Principles, requirements and guidelines).
- EBA (2018) Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn. (EBA) E-B (ed),
https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-13.html
- Glade T und Dikau R (2001) Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. Petermanns Geographische Mitteilungen 145(6), 42-53.
<https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade&Dikau2001.pdf>
- Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, Stanley S, Wachler B, Deutschländer T, Tinz B, Walter A, Winkel N, Krahe P und Höpp S (2020a) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.01
- Hänsel S, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020b) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.03

- Hübener H, Bülow K, Fooker C, Früh B, Hoffmann P, Höpp S, Keuler K, Menz C, Mohr V, Radtke K, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Toussaint F, Warrach-Sagi K und Woldt M (2017) ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Ergebnisbericht.
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Deque M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kroner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Redid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Sousana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2), 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2
- Krauter E, Kumerics C, Feuerbach J und Lauterbach M (2012) Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft S 75, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/531/file/S75b.pdf>
- Kumerics C, Krauter E, Feuerbach J und Lauterbach M (2015) Weiterentwicklung eines Modells zur Abschätzung rutschungsgefährdeter Gebiete entlang des Bundesfernstrassennetzes und Erstellung einer bundesweiten Gefahrenhinweiskarte. Abschlussbericht (unveröffentlicht), Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Haurert G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norporth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deuschländer 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
- Schipek M und Kallmeier E (2019) Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 89.0338/2017/, Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).
- SGD (2008) Geogene Naturgefahren in Deutschland. Empfehlungen der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Erarbeitet durch die Mitglieder des Personenkreises „Geogefahren“, Staatliche Geologische Dienste Deutschlands, Freiburg. https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/Geogene_Naturgefahren_2008.html
- SSP Consult (2019) Lagegenaue Angleichung der Geometrie des Netzmodells der Bundesfernstraßen (NEMOBFStr) an die Netzgeometrie des Bundesinformationssystems Straße (BISStra), Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Steffen M und Schipek M (2019) Digitale Erfassung und Inventarisierung gravitativer Massenbewegungen entlang von Bundesfernstraßen. Abschlussbericht (unveröffentlicht), Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Taylor KE, Stouffer RJ und Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4), 485. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- UBA (2016) 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. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z

8 Abkürzungsverzeichnis

AdSVIS	A daptation der S traßenverkehrs i nfrast r uktur an den Klimawandel
BAFU	Schweizer B undes a mt für U mwelt
Basis-DLM	D igitales B asis- L andschafts m odell
BASt	B undes a nstalt für S traßen w esen
Beak	B eak Consultants GmbH
BMVI	B undes m inisterium für V erkehr und digitale I nfrast r uktur
DAS	D eutsche A npassungs s trategie
DB	D eutsche B ahn
DGM	D igitales G eländeb m odell
DLM	D igitales L andschafts m odell
DTVw	d urchschnittlicher w erk t äglicher V erkehr
DWD	D eutscher W etter d ienst
EBA	E isenbahn- B undes a mt
GIS	G eographisches I nformationssystem
GK	G esteins k lasse – geologischer Parameter
GÜK	G eologische Ü bersichtsb k arte
IMA-A	I nterministerielle A rbeits g ruppe – A npassung an den Klimawandel
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
KNN	K ünstliche N euronale N etze
KT	K ern t hemen im BMVI-Expertennetzwerk
RCM	R egional C limate M odel – regionales Klimamodell
RCP	R epresentative C oncentration P athway – Emissionsszenarien (Repräsentative Konzentrationspfade) des 5. IPCC Sachstandsberichts
SGD	Staatliche G eologische D ienste
SP	S chwer p unkt
TF	T hemen f eld
TF	T renn f lächen – geologischer Parameter
UBA	U mwelt b undes a mt
VE	V erformungs e mpfindlichkeit – geologischer Parameter

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

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