Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Risikoabschätzung für den Schienengüterverkehr am Beispiel Flusshochwasser

Autoren

Stefan Schönfelder
Thomas Pütz
Peter Jakubowski

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Bearbeitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat I 5 – Digitale Stadt, Risikovorsorge
und Verkehr

Stefan Schönfelder
stefan.schoenfelder@bbr.bund.de

Thomas Pütz
thomas.puetz@bbr.bund.de

Peter Jakubowski
peter.jakubowski@bbr.bund.de

Redaktion

Friederike Vogel

Stand

April 2018

Gestaltung

Marion Kickartz

Druck

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn

Bestellungen

gabriele.bohm@bbr.bund.de
Stichwort: Schienengüterverkehr, Flusshochwasser

Bildnachweis

Titelseite, Quelle: pixaby/CCO

Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet.
Bitte senden Sie uns zwei Belegexemplare zu.

Die vom Auftragnehmer vertretene Auffassung ist nicht unbedingt mit der
des Herausgebers identisch.

ISBN 978-3-87994-173-5 Bonn 2018

Lieber Leserinnen und Leser,

erst vor wenigen Monaten – im Oktober 2017 – tobte Herbststurm „Herwart" über Norddeutschland hinweg. Umgefallene Bäume blockierten wichtige Fernverkehrstrecken. Es dauerte Tage, bis die Züge wieder normal fuhren. Für Reisende sind die Folgen von Extremwetter ein Ärgernis, für viele Unternehmen können gesperrte Strecken richtig teuer werden. Wenn Waren nicht pünktlich geliefert werden, drohen Produktionsausfälle und Umsatzeinbußen. Auch die volkswirtschaftlichen Folgen können beträchtlich sein. Neben Stürmen machte in der Vergangenheit auch Hochwasser immer wieder der Bahn zu schaffen – etwa an der Elbe im Sommer 2013. Wochenlang war die Strecke zwischen Berlin und Hamburg unpassierbar.

Extreme Wetterereignisse wie Stürme und Hochwasser werden wir in Zukunft häufiger erleben, sagen Klimaforscher. Damit gewinnen auch Analysen an Bedeutung, die mögliche wunde Punkte der Infrastruktur unter die Lupe nehmen und räumlich differenziert betrachten. Solche Risikoabschätzungen sind Grundlage, um planerische, technische und bauliche Vorsorgemaßnahmen zu treffen.

Die vorliegende Analyse konzentriert sich auf Risiken von Flusshochwässern für den Güterverkehr auf der Schiene. Anhand verschiedener Maßzahlen beschreibt sie die verkehrliche Bedeutung der Regionen in Deutschland und stellt sie Daten zur kleinräumigen Gefährdung durch Hochwasser gegenüber. Daraus ergeben sich Anhaltspunkte dafür, welche Einschränkungen des Transports bei anhaltenden Unterbrechungen von Strecken zu erwarten sind.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Dr. Robert Kaltenbrunner
Stellvertetender Leiter des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Inhalt

1 Einführung 5

Gefahren des Klimawandels und ihre Relevanz für den Verkehr 5
Flusshochwasser und Schadenspotenziale für den Schienengüterverkehr 6
Exkurs: Kritikalität der Verkehrsinfrastruktur 8

2 Gang der Analyse und Datengrundlagen 9

Methodisches Vorgehen 9
Datengrundlagen und Indikatorenbildung 10

3 Ergebnisse der empirischen Analysen 12

Gefährdung durch Flusshochwasser auf Kreisebene 12
Die regionale Ausstattung mit Schienenverkehrsinfrastruktur 13
Das regional differenzierte Aufkommen im Schienengüterverkehr 14
Die regional differenzierte Verkehrsleistung im Schienengüterverkehr 17

4 Methodenvergleich – Vergleich der Rangreihungen und Klassen 19

5 Indikatorengestützte Risikoabschätzung 22

Deutschlandweite Übersicht 22
Transportstrom-Analyse für zwei ausgewählte Kreise 24

6 Fazit und Schlussfolgerungen 27

7 Anmerkungen 29

1 Einführung

Gefahren des Klimawandels und ihre Relevanz für den Verkehr

Der Klimawandel und der Umgang mit seinen potenziellen Gefahren gehören zu den dringendsten globalen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte. Negative Folgen des Klimawandels, etwa Schäden durch zunehmende Extremwetterereignisse, können auch in Deutschland beträchtlich sein. Berechnungen der Versicherungswirtschaft gehen davon aus, dass schon heute rund zwei Drittel der weltweiten Schäden durch wetter- und klimabedingte Katastrophen verursacht werden.[1] Mit der fortschreitenden Erhöhung der Durchschnittstemperatur von Atmosphäre und Weltmeeren aufgrund des anhaltend intensiven Ausstoßes von Treibhausgasen wie CO_2 wird das Gefahrenpotenzial künftig weiter wachsen.

Klimawandel äußert sich in einer Reihe von (Wetter-)Phänomenen: Grundsätzlich wird erwartet, dass langfristig Änderungen der Lufttemperatur und der Niederschlagsintensität einsetzen und meteorologische Extreme[2] sowie „Klimawirkungen erster Ordnung" wie Flusshochwasser oder Sturmfluten häufiger auftreten. Mit solchen Extremereignissen sind regelmäßig Gefahren für natürliche, technische wie auch gesellschaftliche Systeme oder Sektoren verbunden. Ist die Vulnerabilität (Verletzbarkeit) der Systeme groß und die Fähigkeit zur Adaption (Anpassung) an Klimagefahren[3] nicht oder nur unzureichend vorhanden, werden substanzielle (materielle) Schäden wahrscheinlicher.

Während Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und damit in weiterer Folge zur Verringerung von Klimarisiken (Mitigation) schon einige Zeit hohe politische Priorität genießen, besteht für die notwendige Anpassung der sozio-technischen Systeme an den Klimawandel eine geringere öffentliche Aufmerksamkeit. Um die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen zu verdeutlichen, ist eine bessere Abschätzung des möglichen Ausmaßes und der Folgen von Klimagefahren in ihrer sachlichen und räumlichen Ausprägung geboten. Sind die möglichen Effekte bekannt und prognostizierbar, lassen sich geeignete Vorsorge- und Notfallmaßnahmen treffen und die Widerstandsfähigkeit „kritischer" Sektoren[4] wie die Energie- oder Gesundheitsversorgung gegenüber den potenziellen Gefahren des Klimawandels erhöhen. Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den kritischen Sektoren (etwa Stromversorgung und IKT), die Domino- und Kaskadeneffekte auslösen können[5], ist Risikovorsorge in diesen Bereichen von immenser Bedeutung.

Zu den anzupassenden Systemen zählt in besonderem Maße das Verkehrssystem. Im aktuellen „Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel" wird beim Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur darauf hingewiesen, dass insbesondere die Verkehrsinfrastruktur etwa durch den Anstieg der heißen Tage sowie Überschwemmungen, Unterspülungen von Straßen und Schienenwegen oder Flusshochwasser schon bald häufiger negativ betroffen sein wird.[6] Die Unterbrechung von Verkehrswegen, besonders der kritischen Verkehrsinfrastruktur, die in unterschiedlicher Weise abgegrenzt werden kann, kann zu schwerwiegenden Einschränkungen der Mobilität in betroffenen Räumen führen. Damit können die potenziellen Gesamt-Schadenskosten von Klimafolgen, inklusive der indirekten Kosten etwa für Umwegfahrten, deutlich höher sein als die direkten Kosten im Verkehrsbereich selber (zum Beispiel für den Verlust und die spätere Ertüchtigung beschädigter Verkehrsinfrastruktur durch Unwetterereignisse). Trotz eines großen Schadenspotenzials geht der Fortschrittsbericht allerdings davon aus, dass die Anpassungskapazität im Bereich des Verkehrs hoch und die Vulnerabilität des Systems langfristig eher gering ist.

In diesem Beitrag wird das Risiko für den Schienengüterverkehr in Deutschland gegenüber Flusshochwassergefahren abgeschätzt. Dazu werden Verkehrsnachfragedaten sowie das Transportstrom-Visualisierungs-Modell (TraViMo) des BBSR[7] und Geographische Informationssysteme genutzt. Damit werden vorliegende Analysen ergänzt, die Klimawirkungen oder -gefahren oft nur auf die Verkehrsinfrastruktur, nicht aber auf deren tatsächliche Nutzung beziehen.[8]

Flusshochwasser und Schadenspotenziale für den Schienengüterverkehr

Flusshochwasser war in den letzten Jahren in Deutschland für Schäden in Milliardenhöhe verantwortlich. So wurden verschiedene Regionen Süd- und Ostdeutschlands im Frühjahr 2013 von folgenschweren Überflutungen getroffen, deren Gesamtschaden von der MunichRE auf rund 12 Mrd. Euro beziffert wurde. Nur 2,4 Mrd. Euro davon waren versichert.[9] Das Hochwasser hatte zum Teil schwerwiegende verkehrliche Auswirkungen mit Unterbrechungen von Verkehrsverbindungen des Personen- und Güterverkehrs. Besonders betroffen war die Schienenverbindung zwischen Nord- bzw. Westdeutschland und Berlin, die wesentlich über die Schnellfahrstrecke Hannover–Berlin geführt wird. In Folge des Elbehochwassers musste im Juni 2013 die strategisch bedeutende Brücke bei Hämerten (Sachsen-Anhalt) gesperrt werden. Obwohl die Brücke durch das Hochwasser selber nicht beschädigt wurde, konnte der reguläre Bahnbetrieb aufgrund der Überflutung des umgebenden Streckenabschnitts erst rund fünf Monate später wieder aufgenommen werden. Verkehre mussten umgeleitet werden, es kam zu Zugausfällen und für die Deutsche Bahn zur Notwendigkeit, einen Ersatzfahrplan einzurichten.

Für die Entstehung von Hochwässern ist eine Reihe von meteorologischen Faktoren verantwortlich. Dazu gehören Entstehung und Verlauf von Wetterlagen, Regenintensität, räumliche und zeitliche Regenverteilung sowie die Zugbahnen der Regenereignisse.[10] Das Ausmaß der Schäden durch Flusshochwässer ist jedoch nicht nur von der Intensität und Verteilung von extremen Regenfällen oder einer Durchfeuchtung der Einzugsgebiete durch Vorregen abhängig, sondern wird auch durch anthropogene Faktoren mitbestimmt. Indirekten Einfluss haben insbesondere Faktoren wie die Versiegelung der umgebenden Landschaft und die Ausweitung von Siedlungsflächen in die Überschwemmungsgebiete. Zusätzlich spielen Bodenstruktur, -bearbeitung und -bewuchs eine wesentliche Rolle. Eine degradierte Vegetationsdecke, gesättigtes Bodengefüge oder Undurchlässigkeit und damit eingeschränkte Aufnahme- und Haltefähigkeit der Böden können zu einem schnellen und unkontrollierten Oberflächenabfluss beitragen. Wenn sich Flusstäler zusätzlich noch durch steile Hänge auszeichnen, ist die Gefahr durch Sturzfluten[11] besonders hoch. Sturzfluten werden allerdings in dieser Publikation nicht behandelt. In der Folge von lokalen Hochwässern können zudem Hangrutschungen und Muren einsetzen, mit denen das Schadenspotenzial für die Verkehrsinfrastruktur und andere Bauwerke weiter ansteigt.

Bei Flusshochwässern, Murenabgängen oder Hangrutschungen treten i.d.R. lokale Phänomene, d. h. relevante Gefahren oder Gefahrenprozesse für betroffene Bauwerke (z. B. Brücken) auf, die deren Nutzung beeinträchtigen.[12] Dazu gehören beispielsweise Verklausungen (Druckaufbau und Belastung des Bauwerks durch Ansammlung großer Mengen losen Materials), Anprallungen (Zusammenstoß von losem Material mit Brückenpfeilern oder Aufbauten) oder das Aufweichen, d. h. der „Steifigkeitsverlust" von umgebenden Böden infolge einer über längeren Zeiträumen hinweg wirkenden starken Wasserbelastung.

Da Flusshochwässer mit großer Wahrscheinlichkeit direkt durch die zu erwartenden Klimaänderungen wie insbesondere das häufigere Auftreten von regenreichen Tiefdruckgebieten über Mitteleuropa im Winter beeinflusst werden, wird in einschlägigen Studien davon ausgegangen, dass bis Ende des 21. Jahrhunderts eine Verdoppelung bis Verdreifachung der Flussüberschwemmungen gegenüber dem heutigen Auftreten solcher Ereignisse möglich ist.[13] Tritt dies ein, werden auch die negativen Folgen für den Verkehrssektor und andere soziotechnische Sektoren zunehmen.

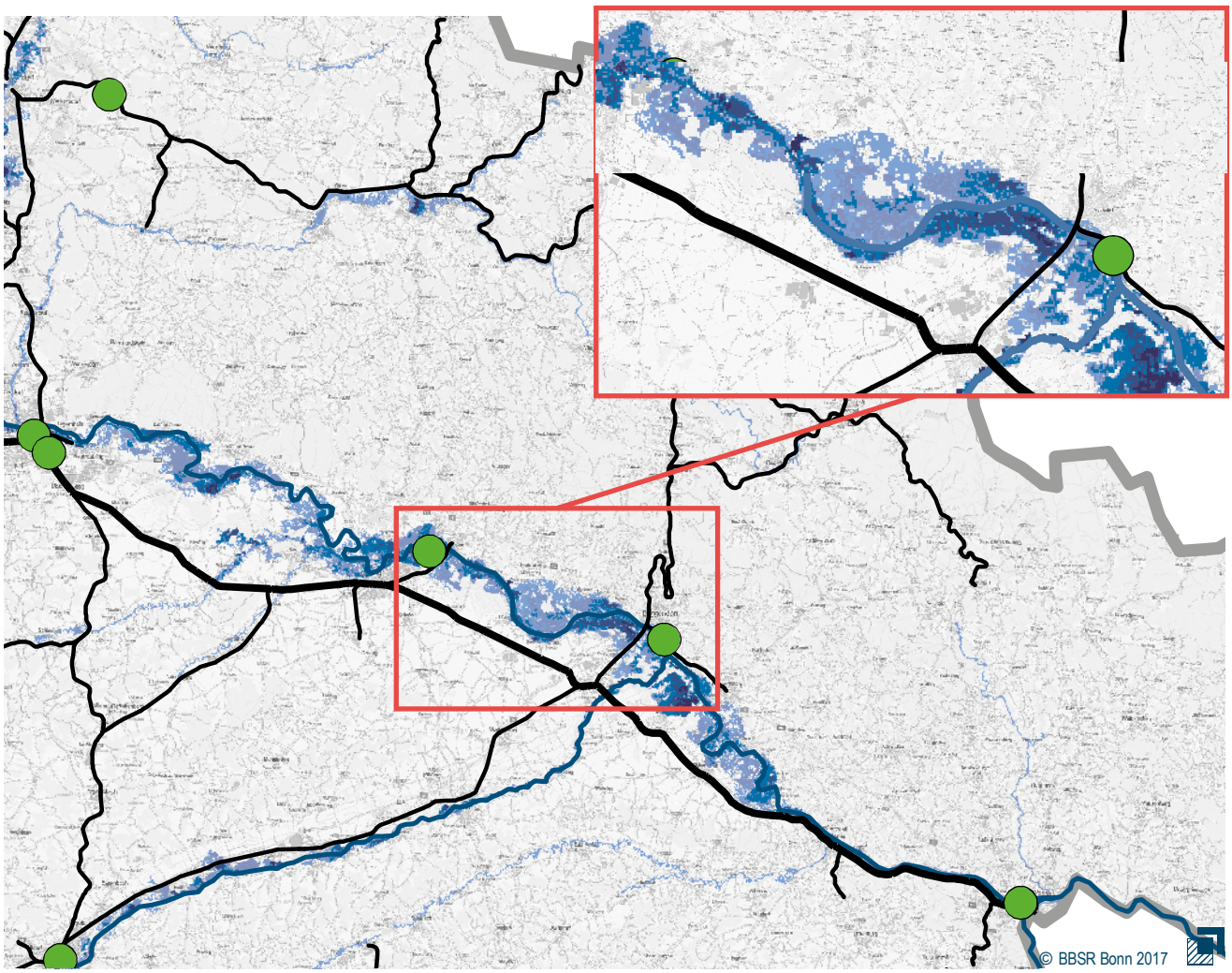
Mit dem Schienengüterverkehr wird in dieser Risikoabschätzung ein Teilbereich des Verkehrssystems herausgegriffen, dessen spezifische Vulnerabilität gegenüber den Gefahren des Klimawandels höher eingeschätzt werden muss als etwa beim Straßenverkehr. Obwohl die Reaktionsfähigkeit des (deutschen) Schienenverkehrssektors auf wetterbedingte Schäden allgemein als hoch eingeschätzt wird,[14] erschwert das vergleichbar grobmaschige Netz beispielsweise eine kurzfristig notwendige Umleitung der Güterverkehrsnachfrage. Bei Streckenunterbrechungen ist das Ausweichen auf andere Routen zwar nicht unmöglich, das Beispiel der Sperrung der Rheintalstrecke bei Rastatt im Sommer 2017 hat jedoch gezeigt, dass die Nutzung parallel verlaufender Infrastruktur wie die Strecke durch das Elsass oder die Gäubahn zwischen Stuttgart und Singen durch abweichende (internationale) Zulassungsstandards, Kapazitätsbeschränkungen oder laufende Sanierungsmaßnahmen auf den redundanten Strecken eingeschränkt ist.

Schienenverkehrskorridore mit teils hoher Nutzungsintensität durch den Personen- und Güterverkehr verlaufen aufgrund wirtschaftlicher und technischer Notwendigkeiten sowie der historisch gewachsenen Infrastruktur oft in den Tallagen von großen Flüssen. Damit befindet sich die Verkehrsinfrastruktur – wie in Karte 1 am Beispiel der Donau im Bereich Straubing/Deggendorf/Passau gezeigt – oft in unmittelbarer Nähe von oder sogar mitten in potenziellen Überschwemmungsgebieten von Flüssen. Deutschlandweit ist dies in den Tallagen vieler großer und kleinerer Flussläufe der Fall, etwa entlang des Rheins und der Flüsse Donau, Elbe und Weser.

Bei extremen Hochwasserereignissen können die folgenden Infrastrukturelemente der Eisenbahn betroffen sein[15]:

- Fahrweg (Untergrund und Unterbau, Oberbau sowie Oberleitungen)
- Brücken und Tunnel
- Stellwerke
- (Bahnhofs-)Gebäude
- Umschlagseinrichtungen wie Umschlagsbahnhöfe oder Terminals des kombinierten Ladungsverkehrs (KLV)
- Umspannwerke

Karte 1
Beispiel für den räumlichen Zusammenhang von Überschwemmungsgebieten und Schieneninfrastruktur



KLV-Terminal
Schienenstrecke
Schienenfernverkehrsstrecke

Potenzielle Überschwemmungsfläche

Datenbasis: BVU, BMVI-Verflechtungsprognose 2030, LISFLOOD-Modell des Joint Research Centre
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2014 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: T. Pütz

Diese Anlagen haben i.d.R. einen hohen finanziellen Wert und sind für den reibungslosen Betrieb des Schienenverkehrs von essenzieller Bedeutung. Der Bahnbetrieb ist jedoch nicht nur auf die Funktionsfähigkeit der Schieneninfrastruktur selber angewiesen, sondern auf das Zusammenspiel einer Reihe von am Transport direkt beteiligten öffentlichen und privaten Akteuren wie Eisenbahnverkehrsunternehmen oder der Zugsicherung. Darüber hinaus besteht eine starke Abhängigkeit von der Funktionalität weiterer Infrastruktur- und Dienstleistungsbereiche wie der externen Stromversorgung oder der Telekommunikation, was die Koordination möglicher Notfall- sowie Vorsorge- und Adaptionsmaßnahmen gegenüber Risiken insgesamt erschwert und zu einer höheren systembedingten Anfälligkeit des Verkehrsträgers Schiene beiträgt. Schließlich werden (bauliche) Maßnahmen zur Reduktion der Vulnerabilität bzw. zur Anpassung des Systems an den Klimawandel aus betriebswirtschaftlichen Gründen oft auf strategisch-bedeutende Netz-Abschnitte und Neubaumaßnahmen fokussiert. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die Funktionalität des Gesamtsystems Schiene in Katastrophenfällen von der Vulnerabilität nachrangiger Infrastrukturelemente bzw. von Abschnitten des Bestandsnetzes abhängt, die bei entsprechenden Maßnahmen des Infrastrukturbetreibers nicht bedacht worden sind oder die eine abweichende Herangehensweise erfordern.[16]

Kritikalität der Verkehrsinfrastruktur

Im Rahmen des öffentlichen Risikomanagements werden oft die Begriffe „Kritikalität“ und „kritische Infrastrukturen“ verwendet, um die hohe Bedeutung bestimmter sozio-technischer Systeme zu charakterisieren. Kritikalität ist grundsätzlich Ausdruck dafür, welche Bedeutung dem Fehlverhalten eines Elements für die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems beigemessen wird. Die Kritikalität eines Elements ist hoch, wenn der Funktionsverlust eine existenzielle Gefährdung etwa für die Versorgungssicherheit von Gesellschaft und Wirtschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen darstellt.[17] Da dies für Transport und Verkehr im Allgemeinen, aber für die Verkehrsinfrastruktur im Speziellen zutrifft, wird die Verkehrsinfrastruktur zu den kritischen Infrastrukturen gezählt. Ein Ausfall von Teilen der Verkehrsinfrastruktur etwa wegen Nicht-Benutzbarkeit von strategischen Brücken oder Verbindungen in peripheren Regionen kann sich schwerwiegend für das (regionale) Verkehrssystem auswirken und auch übergeordnete Systeme wie zum Beispiel Zulieferverkehre für die Produktion oder die Versorgung der Bevölkerung beeinträchtigen.

In der Literatur werden unterschiedliche Konzepte oder Kriterien diskutiert, um die Kritikalität baulicher Anlagen der Verkehrsinfrastruktur näher zu definieren. Die Kritikalität der Abschnitte eines Netzes kann unter anderem anhand folgender Parameter bestimmt werden[18]:

- strategische Bedeutung (innerhalb eines Bezugsgebiets) und Leistungsfähigkeit,
- Erschließungsfunktion (bezüglich Bevölkerung oder wichtigen Einrichtungen des Güterverkehrs),
- Quantität und Qualität alternativer Strecken, ihrer Nutzungsintensität,
- der Dauer zur Wiederherstellung eines beschädigten Bauwerks,
- des Schwer- bzw. generell des Güterverkehrsanteils oder
- der Nutzungserlaubnis für Spezialtransporte (zum Beispiel bestimmte Gefahrgüter, hohe Fahrzeuge)

In der „Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen“[19] wird die Kritikalität der Verkehrsinfrastruktur stärker aus Richtung des Bevölkerungsschutzes betrachtet. Dort stehen insbesondere die Beförderung sowie Versorgung der Bevölkerung im Fokus. Dazu werden für vorab festgelegte Anlagenkategorien der Verkehrsinfrastruktur – im Bereich der Schiene etwa Bahnhöfe, das Schienennetz, Stellwerke oder Verkehrssteuerungs- und Leitzentralen – Schwellenwerte festgelegt, die die (Unter-)Grenze der Kritikalität darstellen. Diese Schwellenwerte beziehen sich auf einen Mindestwert jährlicher Transport- oder Abfertigungsfälle bzw. -mengen je Anlage, etwa für Leitzentralen der Eisenbahn die „disponierte Transportleistung im Güterschienenverkehr zur Versorgung einer Person pro Jahr“. Für Güterbahnhöfe liegt der Schwellenwert nach der KRITIS-Verordnung zum Beispiel bei 23.000 ausgehenden Zügen pro Jahr.[20]

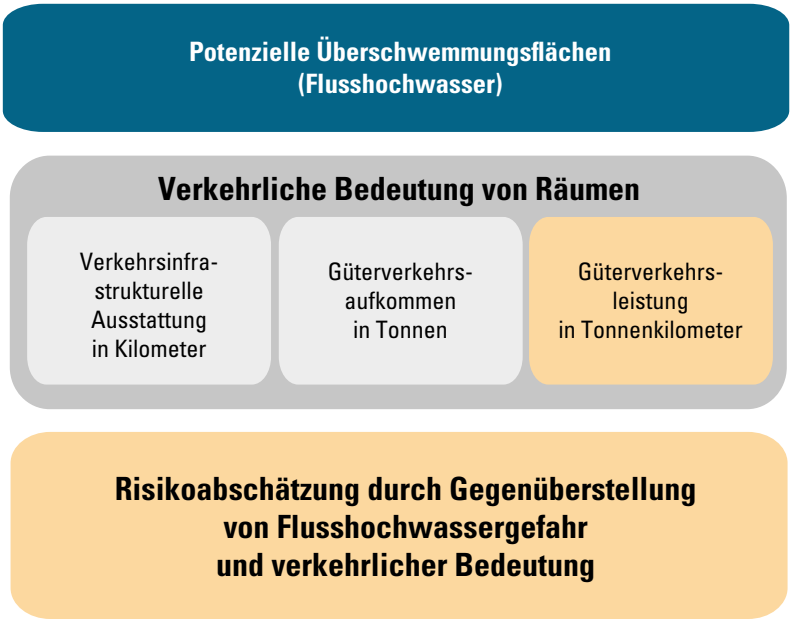
2 Gang der Analyse und Datengrundlagen

Methodisches Vorgehen

In der vorliegenden Analyse wird von einer komplexen, mehrdimensionalen Zuordnung der Kritikalität zu spezifischen Netzelementen oder Anlagen der Schieneninfrastruktur abgesehen. Vielmehr wird die Sensitivität (Empfindlichkeit) der regionalen Verkehrssysteme gegenüber den Gefahren durch Flusshochwässer anhand aggregierter Maßzahlen untersucht. Als Kriterium der Sensitivität des Verkehrssystems wird in dieser Analyse die verkehrliche Bedeutung von Räumen, d. h. Kreisen und kreisfreien Städten für den Schienengüterverkehr herangezogen. Diese kann mit Hilfe von Daten zur Schieneninfrastruktur und zu den Transportströmen im Güterverkehr auf der Schiene unterschiedlich operationalisiert werden. Das (relative) Ausmaß der regionalen Hochwasser-Gefahr, die auf den potenziellen Überschwemmungsflächen basiert, wird dann mit der verkehrlichen Bedeutung in Beziehung gesetzt, um das Klimarisiko in den Teilräumen Deutschlands abzuschätzen. Diese Abschätzung bezieht sich auf das Jahr 2030, für das sowohl für die Klimagefährdungen als auch für die Transportströme einschlägige Prognosedaten vorliegen.

Abbildung 1 stellt den methodischen Ansatz zur Risikoabschätzung dar. Kern ist die Operationalisierung der verkehrlichen Bedeutung im Schienengüterverkehr, die auf drei unterschiedliche Indikatorenkonzepte aufbaut.

Abbildung 1
Schematische Darstellung zum methodischen Ansatz der Analyse



Quelle: eigene Darstellung

1. Zunächst ist das Niveau der verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung in den Kreisen und Städten relevant.[21] Die verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung in den Regionen wird anhand der Länge des Schienenwegs (in Kilometer) in dem jeweils betrachteten Kreis ermittelt, die ihrerseits auf die Kreisfläche bezogen wird.

2. Für die verkehrliche Bedeutung eines Raumes ist zusätzlich das Güterverkehrsaufkommen gemessen in Tonnen relevant. Zur Bestimmung des Aufkommens werden Quellverkehre – also die Menge an Gütern, die aus einer betrachteten Region in andere Regionen transportiert wird – und Zielverkehre herangezogen und addiert. Letztere umfassen die Güter, die aus anderen Regionen in die betrachtete Region transportiert werden.

3. Aus der Länge der Schienenstrecken in einem Raum und den auf diesen Strecken transportierten Gütermengen gelangt man zur Verkehrsleistung gemessen in Tonnenkilometer. Die in einem Raum pro Jahr erbrachte Verkehrsleistung ist ein umfassendes und aussagekräftiges Maß zur Abschätzung der verkehrlichen Bedeutung des betrachteten Raums und damit seiner Sensitivität gegenüber Klimagefahren.

Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung, Aufkommen und Verkehrsleistung stehen grundsätzlich in Zusammenhang. Die Stärke des Zusammenhangs wird in Kapitel 4 näher dargestellt.

Datengrundlagen und Indikatorenbildung

Exposition gegenüber Flusshochwässern: Die in dieser Analyse genutzten Daten zur Flusshochwassergefährdung entstammen der Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2015 zur Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel.[22] Die Studie stellt eine sektorenübergreifende Vulnerabilitätsanalyse dar, die für alle in der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel"[23] berücksichtigten Handlungsfelder eine Methodik entwickelt, die vergleichbare Aussagen zu den Klimawirkungen erlaubt. Eines der vornehmlichen Ziele der Studie war die räumlich differenzierte Ermittlung von Klimarisiken und -wirkungen auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte.

Basis der regionalisierten Indikatoren der Gefährdung durch Flusshochwässer bildet die (Kreis-) Summe der potenziellen Überschwemmungsflächen, die ohne Schutzeinrichtungen oder Deiche durch Flusshochwasser bei einem Hochwasserereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit, dem sogenannten HQ100[24], auftreten (Karte 2, links).[25] Zur Berechnung des Indikators (Karte 2, rechts) wurde die absolute wie auch die anteilige Überschwemmungsfläche in den Kreisen herangezogen, normiert und additiv verknüpft. Von den in der UBA-Studie genutzten Klima- bzw. Hochwasser-Szenarien wird für diese Analyse beispielhaft dasjenige Szenario berücksichtigt, bei dem in naher Zukunft ein „schwacher Wandel"[26] (bezogen auf die Gegenwart) unterstellt wird.[27] Es unterscheidet sich von der gegenwärtigen Gefährdungssituation kaum, könnte – bei unveränderter Sensitivität – für die Stadt Bremen und in den Regionen entlang von Elbe und Havel sogar zu einer Entspannung des Hochwasserrisikos gegenüber heute führen.

Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung: Die Länge der Schienenstrecke in den Kreisen wurde auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (DLM) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) berechnet.[28] Das DLM beinhaltet die topographischen Objekte der Landschaft, zu denen auch Bahnstrecken mit weiteren Charakteristika (z. B. Elektrifizierung, Spurweite, Zustand) gehören. Der Informationsumfang des Modells entspricht im Wesentlichen der Topographischen Karte 1:25.000. Stand der Daten ist das Jahr 2014.

Bei der Bildung des Indikators „Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung" wurde auf eine Kategorisierung der Bahnstrecken, etwa nach Elektrifizierung und Zulassung der Streckenabschnitte für den Güterverkehr, verzichtet – allein die (Gesamt-) Streckenlänge je Kreis wurde berücksichtigt[29].

Im Detail wird zur Bildung dieses Indikators zur verkehrlichen Bedeutung der Kreise für jeden Kreis – gemäß der auf der nächsten Seite dargestellten Methodik – zunächst die Gesamt-Streckenlänge ermittelt (km) und dann auf die Kreisfläche bezogen (km je km²). Letzteres verhindert, dass die Heterogenität der Kreisgrößen (Flächen) in Deutschland den Indikator zur verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung dominiert. Beide Werte werden schließlich normiert[30] und gehen dann zu gleichen Teilen in den (Gesamt-)Indikator ein.

Güterverkehrsaufkommen und Verkehrsleistung: Um die Indikatoren zum Güterverkehrsaufkommen (Gütermenge) sowie zur Verkehrsleistung (Produkt aus beförderter Gütermenge und zurückgelegtem Transportweg) zu bilden, wurden die Daten der bundesweiten „Verkehrsverflechtungsprognose 2030" (im Weiteren VVP[31]) genutzt. Sie stellt eine langfristige (modellgestützte) Prognose des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland dar und diente als breit abgestimmte Grundlage der Erstellung des „Bundesverkehrswegeplans 2030"[32] (BVWP). Die VVP ist somit ein Orientierungsrahmen für die langfristige Verkehrspolitik des Bundes.

Die Jahresdaten des Güterverkehrsaufkommens liegen in einer Matrix vor, die die Verkehrsströme zwischen allen im zugrundeliegenden Verkehrsmodell berücksichtigten Quellen und Zielen erfasst. Quellen und Ziele werden modelltechnisch als „Verkehrszellen" bezeichnet, die im Inland mit den Kreisen und kreisfreien Städten sowie darüber hinaus wichtiger Flug- und Seehäfen korrespondieren.[33] Auch die Verkehrs- und Transportstrom-Beziehungen Deutschlands mit den weiteren Ländern Europas werden in der VVP berücksichtigt. Die Transportströme des Güterverkehrs sind noch weiter in Verkehrsträger (Lkw, Zug und Binnenschiff), Güterart (gemäß NST2007-Klassifikation) und Ladungskategorie (flüssiges

sowie trockenes Massengut und Stückgut) differenziert, so dass ein detailliertes Bild des interregionalen Warenaustauschs zur Verfügung steht.

Der Indikator des Güterverkehrsaufkommens setzt sich aus den Gütermengen im Versand und Empfang zusammen. Die jeweiligen Werte für die Kreise (Tonnage) werden dazu normiert und gehen zu jeweils 50 Prozent in den Indikator ein.

Um den Indikator zur Verkehrsleistung zu berechnen, wurden zusätzlich „Umlegungsdaten" der Verflechtungsmatrix für den Schienengüterverkehr herangezogen. Als Umlegung wird in der Verkehrsplanung der modellgestützte Arbeitsschritt bezeichnet, in dem die genaue Route der Verkehre zwischen Quelle und Ziel bestimmt wird.[34] Das Routing orientiert sich dabei an der vorhandenen bzw. für die jeweiligen Verkehre zugelassenen Verkehrsinfrastruktur, die in diesem Fall auch die bis zum Jahr 2030 voraussichtlich fertig gestellten Schieneninfrastrukturmaßnahmen gemäß BVWP beinhaltet. Man erhält mit einer Umlegung Informationen über die „Belastung" der einzelnen Strecken des Netzes (siehe Visualisierungsbeispiel in Karte 5).

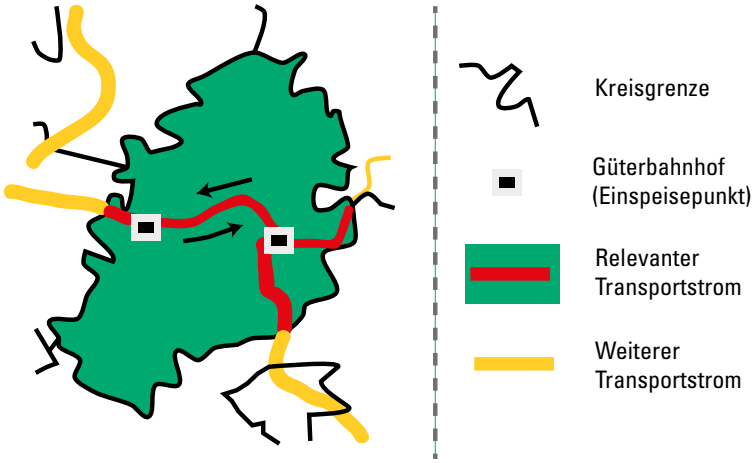
Wie bei der verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung wird der Indikator zur Verkehrsleistung aus einem absoluten und einem auf die Flächen bezogenen Wert gebildet, d. h. innerhalb der Kreisgrenzen insgesamt abgewickelte Verkehrsleistung in Tonnenkilometer sowie Tonnenkilometer je Quadratkilometer. Die jeweiligen Werte werden dann ebenfalls normiert und additiv verknüpft.

Zuordnung von Streckenabschnitten zu (Kreis-)Polygonen

Da die UBA-Daten zur Exposition gegenüber Flusshochwässern als Indikatoren auf Basis der Kreise und kreisfreien Städte vorliegen, war es notwendig, die linienhaft vorhandenen Daten zur Verkehrsinfrastrukturausstattung und zu den Transportströmen (Umlegungsdaten) in Indikatoren auf Kreisebene zu überführen. Der Ansatz besteht darin, sowohl die Streckenlängen des Schienennetzes als auch die aus der Umlegung vorliegenden Belastungen der Streckenabschnitte auf die entsprechenden Kreise zu beziehen und jeweils aufzusummieren. Bei den (modellierten) Belastungen, die je nach Streckenabschnitt stark variieren können, werden dabei sowohl die Hin- als auch die Rückrichtung betrachtet. Die Umlegungsdaten enthalten grundsätzlich Durchgangsverkehre, aber auch Quell- und Zielverkehre der betrachteten Region (siehe Abbildung).

Die Zuordnung der Schienenverkehrsinfrastruktur und der Transportströme zu den jeweiligen Kreisen und kreisfreien Städten erfolgt durch Überlagerung in einem geographischen Informationssystem.

Schematischer Ansatz zur Zuordnung von Streckenabschnitten zu (Kreis-)Polygonen[35]: Beispiel Umlegungsdaten



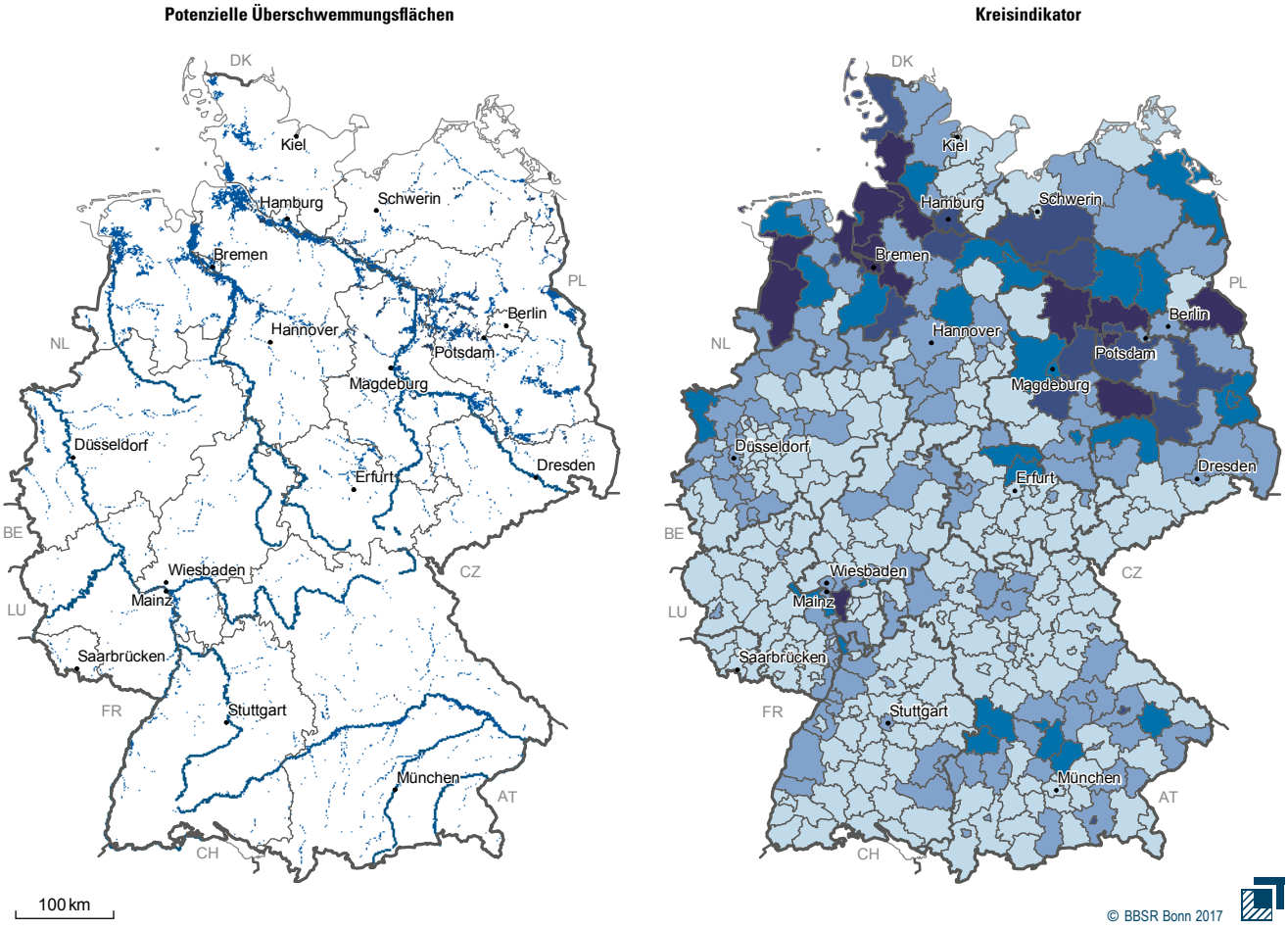
Quelle: Eigene Darstellung

3 Ergebnisse der empirischen Analysen

Gefährdung durch Flusshochwasser auf Kreisebene

Die relative Gefahr durch Flusshochwässer wird in näherer Zukunft gemäß den Prognosen der UBA-Studie wie schon heute entlang der Flussläufe von Elbe, Oder, Donau, Rhein, Ems oder Weser hoch sein. Dies ist weniger Ausdruck des Klimawandels als vielmehr Folge des in den letzten Jahrzehnten verstärkten Ausbaus und der Begradigung der Flüsse sowie des Verlustes an

Karte 2
Gefährdung durch Flusshochwasser: Potenzielle Überschwemmungsflächen und Kreis-Indikator des Umweltbundesamtes für die nahe Zukunft (2021–2050)



Potenzielle Überschwemmungsflächen

Kreisindikator Flusshochwasser (Maximum = 0,82)

- 0,00 bis unter 0,05
- 0,05 bis unter 0,15
- 0,15 bs unter 0,25
- 0,25 bis unter 0,35
- 0,35 und mehr

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, BKG Basis-DLM 2014, Umweltbundesamt, LISFLOOD-Modell des Joint Research Centre
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2015 © GeoBasis-DE/BKG

natürlichen Überschwemmungsflächen durch Siedlungsentwicklung.[36] Grundsätzlich sind Nord- und Ostdeutschland mit ihren breiten Flussauen und den geringen Reliefunterschieden besonders betroffen. Höhere Überschwemmungsgefahr besteht für eine Reihe von dichtbesiedelten Großstadtregionen wie Hamburg und Bremen, aber auch Leipzig und das Rhein-Main-Gebiet (Karte 2, links).

Dieses Verteilungsmuster ist auch an den in der UBA-Studie gebildeten Kreis-Indikatoren für das Jahr 2030 abzulesen (Karte 2, rechts), die im Weiteren für die Gegenüberstellung mit den Indikatoren zur verkehrlichen Bedeutung herangezogen werden (Kapitel 5). Hier wird deutlich, dass das Hinterland der Nordseeküste und die Nordseeküste selber besonders betroffen sein werden. Die fünf am meisten gefährdeten Kreise im Jahr 2030 sind Leer, Cuxhaven, Stade, Emden und Verden. Bremen und Hamburg als wichtige Seehafenstädte nehmen die Ränge 6 und 17 der am meisten gefährdeten Regionen Deutschlands ein.

Die regionale Ausstattung mit Schienenverkehrsinfrastruktur

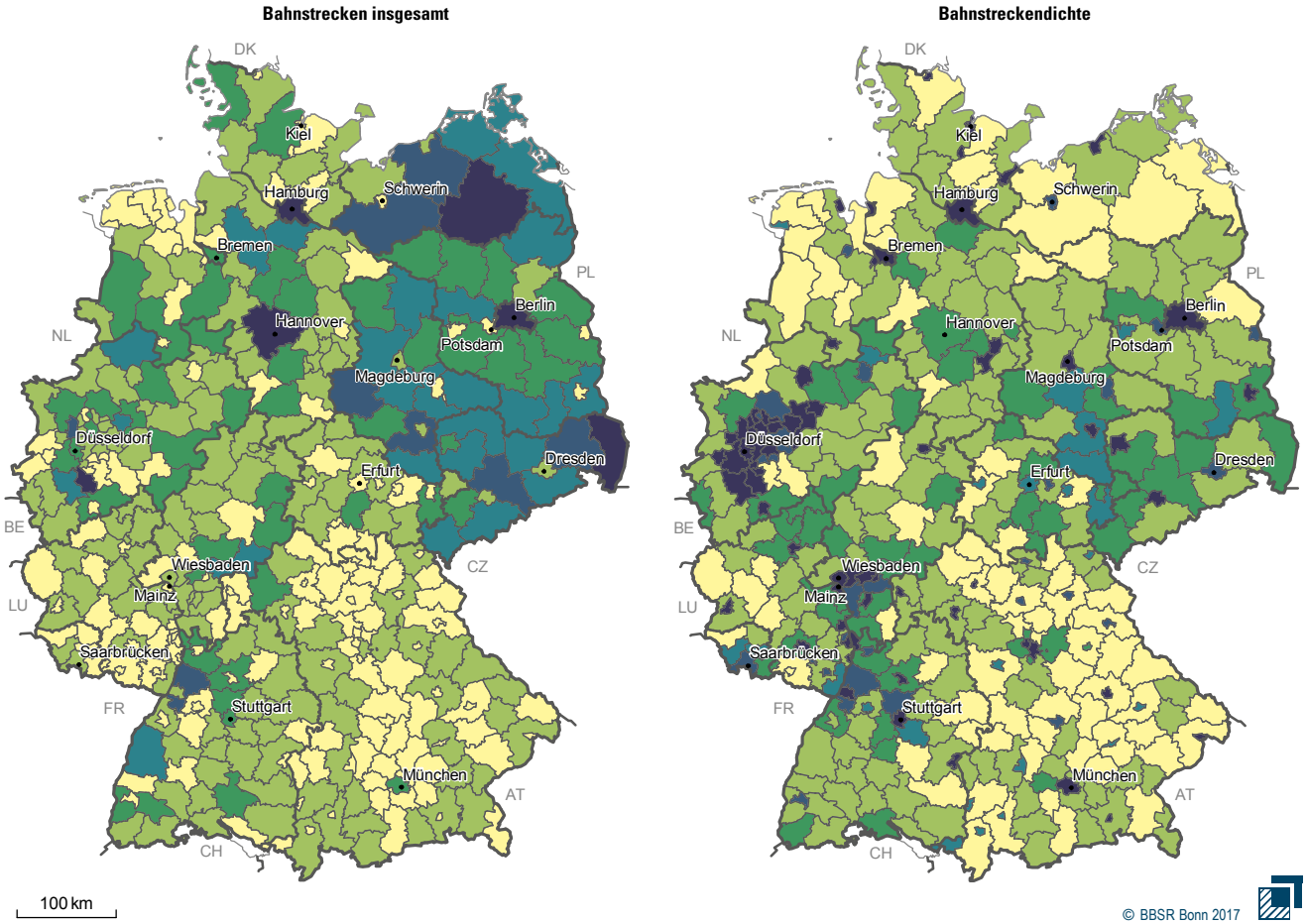
Die Ausstattung der Regionen mit Schienenverkehrsinfrastruktur ist in Karte 3 dargestellt. Gemäß der berücksichtigten Datenbasis zum Stichjahr 2014 verlaufen durch alle 402 Kreise und kreisfreien Städte in Deutschland Schienenstrecken. Es bestehen beim gebildeten Indikator zur verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung jedoch große regionale Unterschiede. Ein deutlicher Unterschied ist der zwischen Großstädten und Landkreisen. In ausgewählten Großstädten ist vor allem der Teilindikator „Streckendichte", d. h. die Streckenlänge je Fläche, sehr hoch. Sie sind in der Regel Netzknoten, darüber hinaus befinden sich hier ausgedehnte Rangierbahnhöfe und Güterumschlagseinrichtungen. Die Streckendichte erreicht etwa in Herne, Duisburg oder Oberhausen Werte bis über 130 km je 100 Quadratkilometer, im Mittel aller 402 Kreise sind es dagegen nur 25 km/100 km². Die schon genannten Städte gehören auch zu den zehn mit den höchsten Werten des (Gesamt-)Indikators, dessen Rangfolge von Duisburg angeführt wird (Tabelle 1). Am unteren Ende der Skala finden sich ländliche Kreise wie Rhön-Grabfeld oder Wittmund sowie die kreisfreie Stadt Pirmasens, wo die Streckenlänge insgesamt weniger als 30 km beträgt. Innerhalb der Landkreise weisen überwiegend flächenmäßig große Kreise wie Mecklenburgische Seenplatte, Görlitz, Ludwigslust-Parchim oder Harz die höchsten Indikatorwerte auf. Darüber hinaus nehmen solche Kreise obere Ränge ein, die an Großstädte angrenzen oder Teil von Stadtregionen sind, zum Beispiel Rhein-Erft-Kreis oder Unna.

Tabelle 1
Rangfolge nach verkehrsinfrastruktureller Ausstattung (Auswahl)

Rang	Kreis/ kreisfreie Stadt	Indikator	Schienen-strecke (km)	Schienen-strecke je Fläche (km/100 km²)
… Kreisfreie Städte				
1	Duisburg, Stadt	0,81	347	149
2	Köln, Stadt	0,71	389	96
3	Hamburg	0,62	413	55
4	Berlin	0,62	427	48
5	Herne	0,60	91	178
… Landkreise				
10	Mecklenburgische Seenplatte	0,52	437	8
13	Görlitz	0,48	379	18
17	Ludwigslust-Parchim	0,42	354	7
19	Harz	0,41	327	16
20	Saalekreis	0,40	308	21

Quelle: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, BKG Basis-DLM, eigene Berechnungen

Karte 3
Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung der Kreise und kreisfreien Städte im Jahr 2014



Kilometer Bahnstrecke insgesamt 2014

	bis unter	75
75	bis unter	150
150	bis unter	225
225	bis unter	300
300	bis unter	375
375	und mehr	

Kilometer Bahnstrecke je 100 km² Fläche 2014

	bis unter	8
8	bis unter	14
14	bis unter	20
20	bis unter	26
26	bis unter	32
32	und mehr	

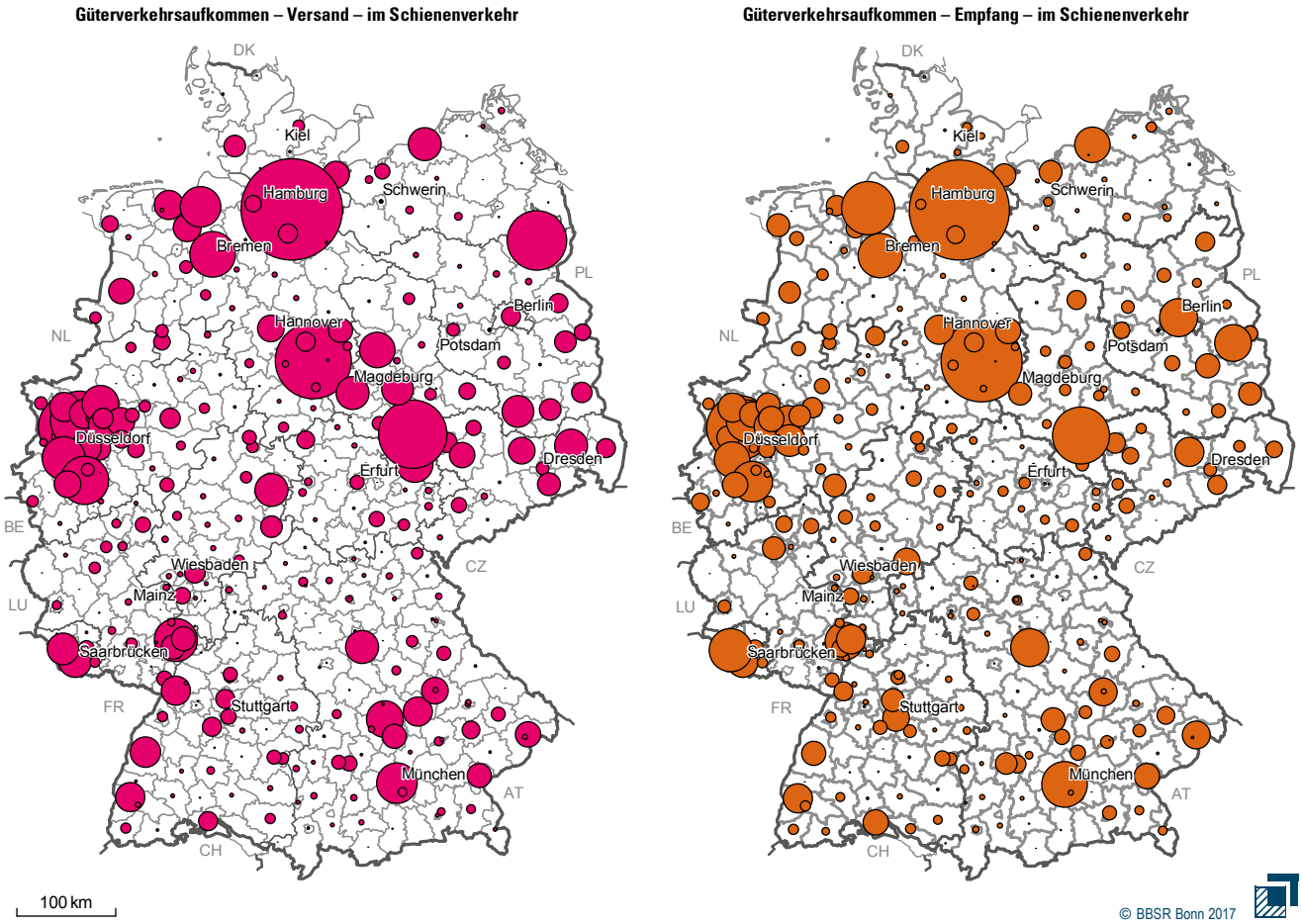
Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR,
BKG Basis-DLM 2014
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2014 © GeoBasis-DE/BKG

Bearbeitung: T. Pütz

Das regional differenzierte Aufkommen im Schienengüterverkehr

Die beiden folgenden Karten und die Tabelle 2 zeigen das Schienengüterverkehrsaufkommen, d. h. die Beförderungsmenge im Quell- und Zielverkehr, in den Kreisen und kreisfreien Städten Deutschlands. Gemäß Verflechtungsprognose sind die meisten Regionen sowohl Versender als auch Empfänger von Gütern auf der Schiene. Das Aufkommen bei Versand und Empfang nimmt in vielen Fällen die gleiche Größenordnung ein[37]. Zu den zehn Städten und Kreisen mit dem höchsten Transportaufkommen im Schienengüterverkehr des Jahres 2030 gehören (wie auch überwiegend schon heute) die Seehafenstädte Hamburg, Bremerhaven und Bremen, industriell geprägte Städte und Kreise wie Salzgitter (Stahl) und Oberhausen (Metallverarbeitung) sowie der

Karte 4
Güterverkehrsaufkommen der Schiene im Jahr 2030



Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR,
Verkehrsprognose 2030
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2010 © GeoBasis-DE/BKG

Bearbeitung: T. Pütz

Saalekreis (Chemie). Weiterhin ist das Güteraufkommen in bedeutenden multimodalen Logistikstandorten wie Duisburg (Stahl, Binnenhafen) und Köln (Chemie, Containerumschlagbahnhof) hoch, aber auch in der eher ländlich geprägten Uckermark, wo eine Großraffinerie ihren Standort hat (Schwedt). Die zehn aufgelisteten Städte und Kreise umfassen mehr als ein Drittel des Gesamtaufkommens in Deutschland. Grundsätzlich werden Chemie- und Mineralölerzeugnisse sowie Metallerzeugnisse und Fahrzeuge oft per Zug transportiert, womit Produktions- sowie Umschlagsstandorte solcher Güter zu den wesentlichen Quellen und Zielen des Schienengüterverkehrs gehören. Auch Massengüter wie Kohle, Erze, Steine und Erden werden oft auf der Bahn transportiert – sie

Tabelle 2
Rangfolge nach Schienengüterverkehrsaufkommen im Jahr 2030

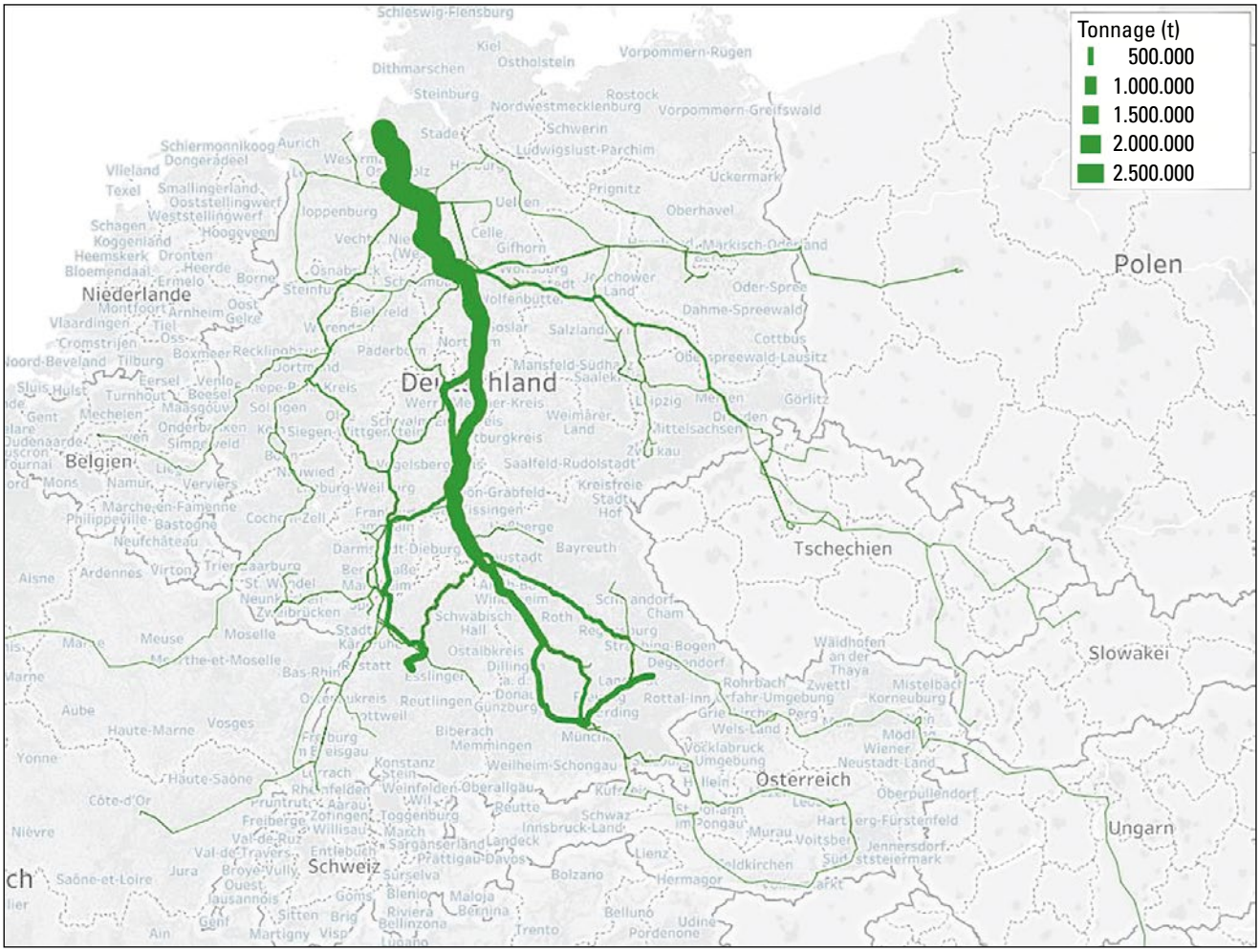
Rang	Kreis/ kreisfreie Stadt	Indikator	Güter-versand (Mio. t p.a.)	Güter-empfang (Mio. t p.a.)	Güterver-kehrsauf-kommen (Mio. t p.a.)
1	Hamburg	1,00	33	35	68
2	Salzgitter	0,60	18	23	41
3	Duisburg	0,42	14	15	29
4	Saalekreis	0,39	15	12	27
5	Oberhausen	0,26	11	6	17
6	Bremerhaven	0,23	5	10	15
7	Köln	0,20	8	6	14
8	Bremen	0,20	7	7	14
9	Braunschweig	0,20	7	6	13
10	Uckermark	0,20	12	1	13

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis VVP (Konventionelle und Kombinierte Verkehre, inkl. Vorlauf, auch Ziele/Quellen im Ausland)

bietet die dafür notwendigen Kapazitäten. Allerdings ist deutschlandweit die mit Abstand größte Güterart im Schienenverkehr die NST-2007-Kategorie „Gutart unbekannt", hinter der sich vor allem Container und Wechselbehälter mit jeglichen Inhalten verbergen.

Neben dem Schienengüterverkehrsaufkommen sind die Transportrelationen von Interesse. Karte 5 veranschaulicht die Struktur der Transportströme anhand des Beispiels des Transports von Fahrzeugen nach Bremerhaven im Jahr 2030. Der Seehafen der Stadt ist der wichtigste deutsche Hafen für die Verschiffung von Pkw, wobei die Anlieferung überwiegend (zu mehr als 80 %) auf der Schiene abgewickelt wird. Die Karte stellt die auf den einzelnen Streckenabschnitten der verfüg-

Karte 5
Visualisierungsbeispiel von Umlegungsdaten: Fahrzeuglieferungen nach Bremerhaven im Jahr 2030



Quelle: VVP, eigene Darstellung

baren Schieneninfrastruktur transportierte Gütermenge in Tonnen dar. Der Hauptteil der Fahrzeugtransporte erfolgt gemäß Umlegung auf der wichtigen Süd-Nord-Relation Würzburg–Kassel–Hannover und von dort weiter über Bremen nach Bremerhaven. Der Transportstrom nach Bremerhaven wird dabei vorwiegend mit Fahrzeuglieferungen aus den Automobilherstellerregionen Baden-Württemberg (Stuttgart), Bayern (München, Ingolstadt, Niederbayern) und Niedersachsen (Hannover, Braunschweig, Wolfsburg) gespeist. In Bremerhaven werden jedoch auch Fahrzeuge von der Schiene auf das Schiff umgeschlagen, die etwa in Tschechien bzw. der Slowakei (Skoda), in der Steiermark (Magna) oder in der Region Posen (Volkswagen) hergestellt werden.

Die regional differenzierte Verkehrsleistung im Schienengüterverkehr

Der dritte Indikator zur Verkehrsbedeutung der Kreise, die Verkehrsleistung (VL), setzt sich – wie beschrieben – aus zwei Teilindikatoren zusammen (VL absolut und VL bezogen auf die Kreisfläche), die in Karte 6 dargestellt werden.

Bei der Summe der Verkehrsleistung (links) werden die „Hot-Spots" des Schienentransports in Deutschland deutlich sichtbar: Dazu gehören insbesondere die Regionen, in denen Verkehre wichtiger deutscher bzw. europäischer Relationen aufeinandertreffen. Dies sind beispielsweise die Region Hannover/Hildesheim (mit den Relationen Hamburg-Süddeutschland sowie Berlin-Ruhrgebiet bzw. -Seehäfen in Belgien und den Niederlanden), aber auch das Hinterland des Hamburger Hafens (d. h. Landkreise Harburg und Uelzen mit den Relationen Hamburg–Berlin sowie Hamburg–Südwesten) sowie Mittel- und Südhessen (Relationen Norddeutschland-Süd/West) oder Karlsruhe (Rheinstrecke-Süddeutschland).

Wird die innerhalb der Kreise erbrachte Verkehrsleistung auf die Fläche bezogen (Karte 6, rechts), ergibt sich ein ähnliches Bild der räumlichen Verteilung, sie erscheint jedoch noch akzentuierter. Hier kristallisieren sich Großstädte und Kreise entlang der wichtigen Transportkorridore als die Regionen mit der höchsten Nutzungsintensität der Schieneninfrastruktur heraus. Zu den Spitzenreitern zählen die Großstädte Oberhausen, Mannheim, Würzburg, Koblenz, Fürth, Leverkusen, Herne, Rosenheim, Regensburg und Bonn. Auch einige Landkreise entlang der bedeutenden Transportkorridore wie Groß-Gerau, Neuwied und Hersfeld-Rotenburg weisen eine hohe Verkehrsleistung je Fläche auf.

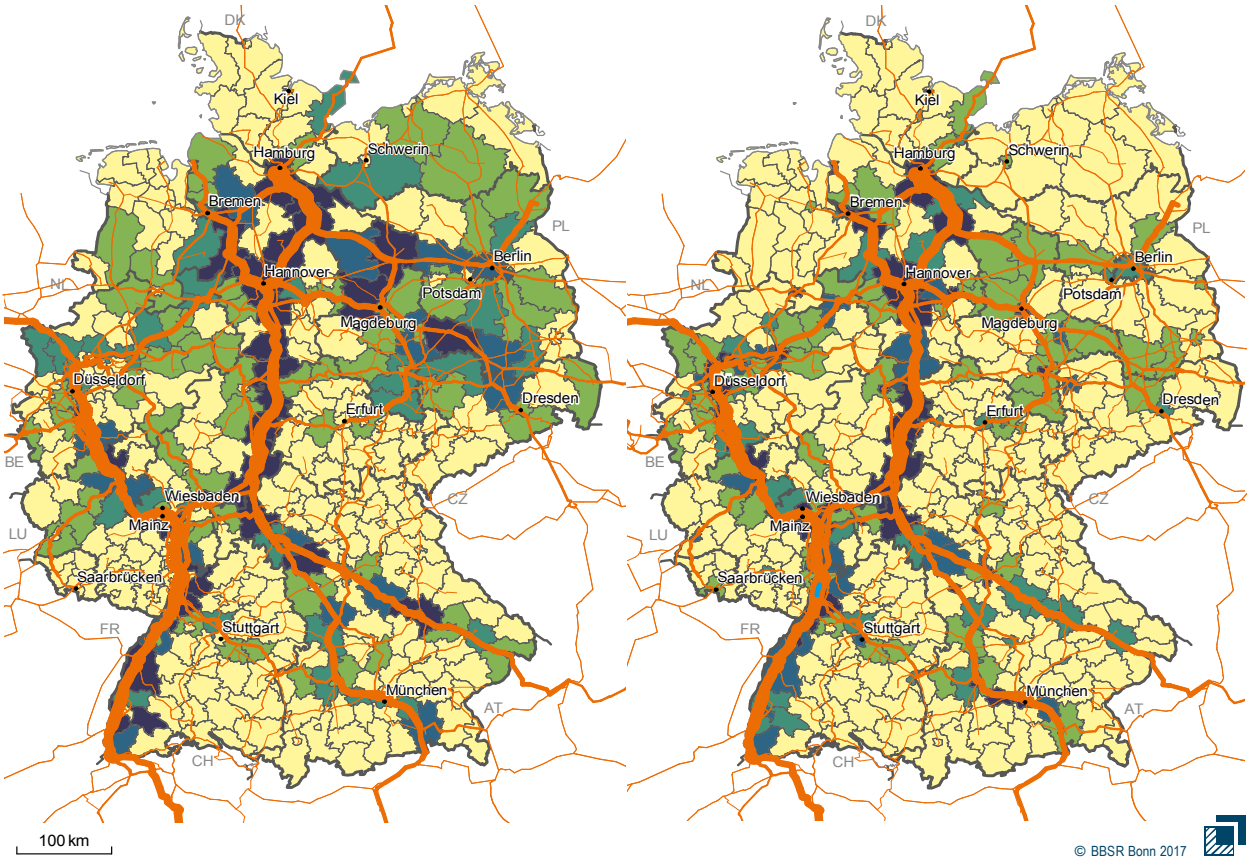
Bei dem durch Addition gebildeten Gesamtindikator zur Verkehrsleistung stehen insbesondere Regionen an der Spitze der Rangfolge, die entlang und an den Schnittstellen wichtiger deutscher und europäischer Transportkorridore liegen (Tabelle 3). Eine Reihe von ihnen können als (reine) Durchgangs- oder Transitregionen des Schienengüterverkehrs bezeichnet werden. Andere nehmen diese Funktion wahr, haben aber auch selbst ein hohes Quell- bzw. Zielaufkommen, das sich entsprechend auf dem Schienennetz verteilt. Zu den Kreisen mit hohen Indikatorwerten gehören beispielsweise die Region Hannover, die Städte Mannheim, Oberhausen, Würzburg und Köln sowie die Kreise Groß-Gerau, Main-Kinzig-Kreis, Hildesheim, Uelzen und Fulda. Am unteren Ende der Rangfolge finden sich eher ländliche Kreise wie Starnberg, Oberbergischer Kreis, Odenwaldkreis, Freyung-Grafenau oder Wittmund.

Tabelle 3
Rangfolge nach Verkehrsleistung im Schienengüterverkehr

Rang	Kreis/ kreisfreie Stadt	Indikator	Verkehrs-leistung (Mio. tkm)	Verkehrsleistung je Fläche (tkm je 100 km²)
1	Region Hannover	0,61	4.443	19.394
2	Mannheim	0,58	1.155	79.699
3	Oberhausen	0,58	677	87.872
4	Würzburg	0,48	626	71.383
5	Groß-Gerau	0,46	1.943	42.877
6	Main-Kinzig-Kreis	0,45	2.940	21.038
7	Hildesheim	0,45	2.813	23.326
8	Uelzen	0,43	2.836	19.501
9	Köln	0,43	1.698	41.921
10	Fulda	0,41	2.647	19.174

Quelle: VVP, Laufende Raumbeobachtung des BBSR, eigene Berechnungen

Karte 6
Verkehrsbedeutung nach Verkehrsleistung im Schienengüterverkehr im Jahr 2030; absolut und flächenbezogen



Güterverkehrsleistung 2030 im Schienenverkehr in Mio. Tonnenkilometer absolut innerhalb eines Kreises

	bis unter 300
300	bis unter 600
600	bis unter 900
900	bis unter 1 200
1 200	und mehr

Im Schienenverkehr transportierte Güter 2030 in Mio. Tonnen

1
10
30

Güterverkehrsleistung 2030 im Schienenverkehr in Tonnenkilometer je 100 km² Fläche innerhalb eines Kreises

	bis unter 4 000
4 000	bis unter 8 000
8 000	bis unter 12 000
12 000	bis unter 16 000
16 000	und mehr

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR,
BKG Basis-DLM 2014, BMVI-Verflechtungsprognose 2030
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2014 © GeoBasis-DE/BKG

Bearbeitung: T. Pütz

4 Methodenvergleich – Vergleich der Rangreihungen und Klassen

Nachfolgend werden die Indikatoren zur Abbildung der verkehrlichen Bedeutung von Räumen gegenübergestellt und ihre jeweiligen Eigenschaften bzw. Vorteile für die hier durchgeführte Risikoabschätzung herausgearbeitet: Zunächst wird auf statistische Zusammenhänge eingegangen, die durch entsprechende Korrelationen dargestellt werden (Tabelle 4). Die Korrelationen zwischen den Indikatoren zur Streckenlänge, zum Transportaufkommen und zur Verkehrsleistung sind positiv, aber insgesamt gering (<0,5). Die nur losen statistischen Zusammenhänge können dahingehend interpretiert werden, dass die gebildeten Kennzahlen weitgehend voneinander unabhängige Sachverhalte aus dem Bereich des Schienenverkehrs darstellen. Die einzelnen Indikatoren betonen im Wesentlichen unterschiedliche räumlich-verkehrliche Funktionen: Bei der verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung und beim Transportaufkommen steht die Standortfunktion des Kreises im Mittelpunkt, die sich aus aktuellen und zum Teil historischen Implikationen von Logistik, Produktion und Siedlungsdichte ergibt. Beim Indikator zur Verkehrsleistung dagegen wird eher die Durchgangs- oder Verbindungsfunktion der Kreise betont. Sie ist dann besonders ausgeprägt, wenn bedeutende Transportkorridore durch die Kreise verlaufen. Dass es bei den Funktionen und damit bei den gebildeten Indikatoren der Verkehrsbedeutung zu großen Differenzen kommen kann, wird bei den Seehafenstädten Hamburg, Bremen und Bremerhaven sehr deutlich: Sie rangieren beim Transportaufkommen in den Top 10, beim Indikator zur Verkehrsleistung gehören sie aufgrund ihrer geographischen Randlage in Deutschland jedoch nicht mehr zu den 20 Kreisen mit den höchsten Werten. Entgegengesetzt ist die Situation bei den Landkreisen Uelzen oder Main-Kinzig-Kreis, wo das Verkehrsaufkommen niedrig, die Verkehrsleistung innerhalb der Kreise aber sehr hoch ist.

Tabelle 4
Korrelationen zwischen den gebildeten Indikatoren der verkehrlichen Bedeutung (N = 402)

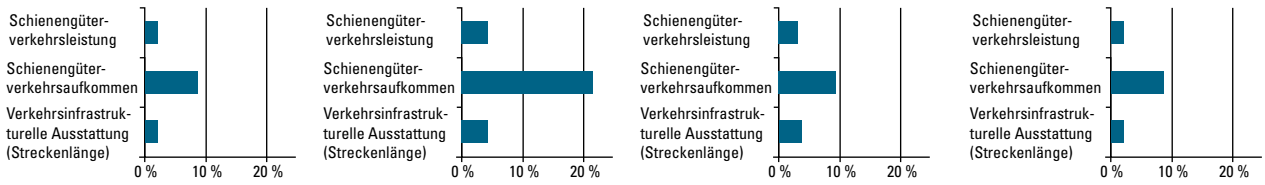
	Verkehrs-infrastrukturelle Ausstattung	Aufkommen	Verkehrs-leistung
Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung	1	0,47**	0,46**
Aufkommen	0,47**	1	0,27**
Verkehrsleistung	0,46**	0,27**	1

** Korrelationskoeffizienten statistisch signifikant auf dem Niveau von 0.05

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis BKG Basis-DLM, Laufende Raumbeobachtung des BBSR und VVP

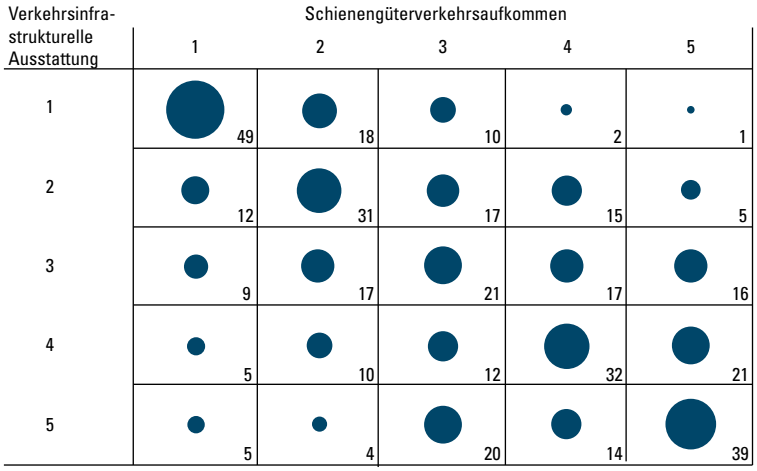
Tabelle 5
Schnittmengen bei den gebildeten Indikatoren im oberen Rangbereich (1–20) und deutschlandweite Abdeckung bezüglich Strecke, Aufkommen und Verkehrsleistung

Strecke – Aufkommen – Verkehrsleistung (3)	**Strecke – Aufkommen (5)**	**Strecke – Verkehrsleistung (6)**	**Aufkommen – Verkehrsleistung (3)**
Duisburg	Hamburg	Duisburg	Duisburg
Oberhausen	Duisburg	Oberhausen	Oberhausen
Köln	Oberhausen	Köln	Köln
	Köln	Mannheim	
	Saalekreis	Region Hannover	
		Karlsruhe	



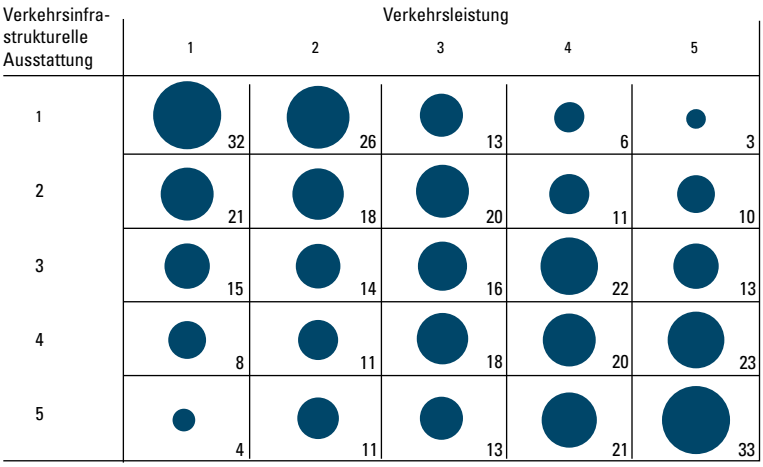
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis BKG Basis-DLM, Laufende Raumbeobachtung des BBSR und VVP

Abbildung 2
Übereinstimmungen und Abweichungen der Klassenzugehörigkeit der Kreise bei den Indikatoren Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung und Schienengüterverkehrsaufkommen



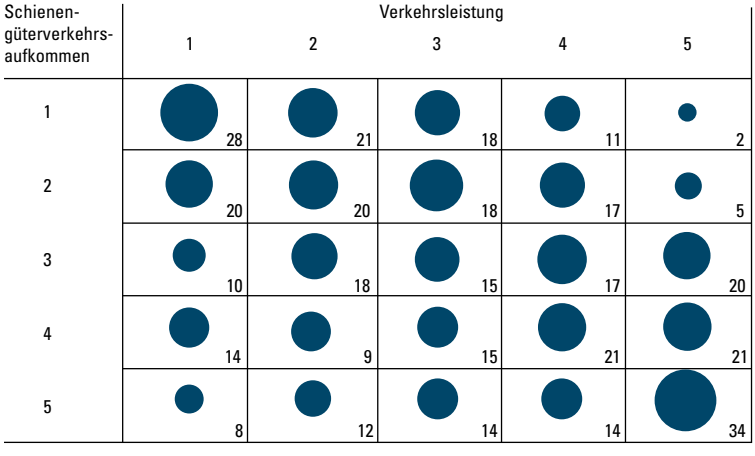
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 3
Übereinstimmungen und Abweichungen der Klassenzugehörigkeit der Kreise bei den Indikatoren Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung und Verkehrsleistung



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 4
Übereinstimmungen und Abweichungen der Klassenzugehörigkeit der Kreise bei den Indikatoren Schienengüterverkehrsaufkommen und Verkehrsleistung



Quelle: eigene Darstellung

Die Zusammenhänge der Indikatoren können auch anhand der Gegenüberstellung der Rangpositionen der Kreise bei Verwendung der unterschiedlichen Indikatoren gezeigt werden: Hier zeigt sich, dass nur drei Städte, nämlich Duisburg, Oberhausen und Köln, bei allen drei Indikatoren der verkehrlichen Bedeutung eine Position in den Rängen 1 bis 20 aufweisen. Diese drei Städte decken insgesamt zwei Prozent der Gesamtschienenstrecke und der Verkehrsleistung ab und vereinigen neun Prozent des Güteraufkommens in Deutschland auf sich. Tabelle 5 zeigt die Schnittmengen der Indikatoren für alle drei (erste Spalte) und jeweils zwei Indikatoren sowie die dazugehörigen, kumulierten Anteile an der gesamtdeutschen Schienenstreckenlänge, dem Güteraufkommen und der Verkehrsleistung auf der Schiene.

Neben den Schnittmengen bei den Rangpositionen der Kreise sind auch die Abweichungen bei der regionalen Ausprägung der drei Indikatoren von Interesse. Welche Städte und Kreise besitzen also hohe Werte bei dem Indikator zur verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung, zeigen bei den Indikatoren zum Aufkommen und/oder zur Verkehrsleistung jedoch eine geringe(re) Ausprägung oder andersherum? Um diese Frage zu beantworten, wurden die Kreise für jeden der drei Indikatoren in fünf Klassen eingeteilt und jeweils Paarvergleiche der Klassenzugehörigkeit durchgeführt. Die Klasseneinteilung erfolgt auf Basis der Quintile der Indikatorwerte.

In den Abbildungen 2, 3 und 4 werden die jeweiligen Übereinstimmungen sowie Abweichungen bei den Klassenzuordnungen der Kreise in einem XY-Diagramm dargestellt. Die jeweilige Diagonale des Koordinatensystems zeigt eine Übereinstimmung der Indikatoren-Klassen. Die Zahl der Übereinstimmungen liegt jeweils für die Indikatoren-Paare

- Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung und Schienengüterverkehrsaufkommen bei 172 (43 %)
- Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung und Verkehrsleistung bei 119 (30 %)
- Schienengüterverkehrsaufkommen und Verkehrsleistung bei 118 (29 %).

Damit wird der schon einleitend durch die Korrelationen aufgezeigte schwächere Zusammenhang zwischen den Indikatoren Verkehrsleistung und Aufkommen deutlich. Größere Abweichungen, d. h. „Klassensprünge“ über zwei oder mehr Klassen sind bei allen drei Paarvergleichen deutlich seltener.

In einem nächsten Schritt werden die Abweichungen und Übereinstimmungen bei der Klassenzugehörigkeit nach allen drei Indikatoren betrachtet. Es werden für jeden Kreis also gleichzeitig zwei Paarvergleiche durchgeführt und die „Summe der absoluten Differenzen" gebildet. Bei einer Summe von null gäbe es gänzliche Übereinstimmung der Klassenzugehörigkeit, die maximale Summe beträgt bei fünf Klassen ein Wert von acht. Tabelle 6 zeigt beispielhaft die Zugehörigkeit zu den Klassen und die Gesamtdifferenz für die Städte Köln, Leipzig, Kiel und Wolfsburg.

Tabelle 6
Klassifizierung gemäß Indikatoren-Ausprägung bei den Städten Köln, Leipzig und Kiel

	Zugehörigkeit zur Klasse beim…			Summe der absoluten Differenzen zwischen den Klassen (I–II, I–III, II–III)
	Indikator Verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung (I)	Indikator Güterverkehrsaufkommen (II)	Indikator Verkehrsleistung (III)	
Köln	1	1	1	0
Leipzig	1	1	2	2
Kiel	2	2	4	4
Wolfsburg	5	1	3	8

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis BKG Basis-DLM, Laufende Raumbeobachtung des BBSR und VVP

Insgesamt 65 der 402 Kreise weisen keine Abweichungen bei den Klassen auf, das heißt, sie haben eine identische (relative) Ausprägung bei allen drei Indikatoren. Eine maximale Heterogenität bei der Klassenzugehörigkeit, also eine Summe der absoluten Differenzen von 8, liegt bei 19 Kreisen vor. Darunter findet sich z. B. die Stadt Mühlheim an der Ruhr, die in die höchste Klasse bei der verkehrsinfrastrukturellen Ausstattung und beim Aufkommen fällt, bei der Verkehrsleistung aber nur einen geringen Indikatorwert aufweist und damit hier zur niedrigsten Klasse gehört. Die Stadt Baden-Baden hingegen rangiert in der höchsten Klasse bei der Verkehrsleistung, weil sie am wichtigen Transportkorridor Mannheim–Basel liegt und viele Durchgangsverkehre aufnimmt. Ihr eigenes Quell- und Zielaufkommen und die verkehrsinfrastrukturelle Ausstattung sind jedoch vergleichsweise gering (jeweils Klasse 5).

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass insgesamt nur moderate statistische Zusammenhänge zwischen den gebildeten Indikatoren der Verkehrsbedeutung bestehen, was sich auch anhand der geringen Übereinstimmung bei der Gegenüberstellung der Rangpositionen und Klassenzugehörigkeit zeigt. Übereinstimmungen ergeben sich dann, wenn die Kreise und kreisfreien Städte bei ihrer „Durchgangs- oder Verbindungsfunktion" sowie der „Standortfunktion" eine ähnlich starke Ausprägung aufweisen. Die Zahl der Städte, die bei allen drei Indikatoren der verkehrlichen Bedeutung im oberen Rangbereich (1–20) einzuordnen sind, ist mit drei aus über 400 Städten und Landkreisen außerordentlich gering. Gering ist auch die Zahl der Städte und Landkreise, bei denen eindeutige Abweichungen bei den Indikatoren vorliegen und die somit eine hohe Heterogenität bei den Indiktoren der verkehrlichen Bedeutung aufweisen.

5 Indikatorengestützte Risikoabschätzung

Die potenziellen Auswirkungen von Flusshochwässern auf den Schienengüterverkehr werden nun abgeschätzt, indem die Flusshochwassergefahr, denen die Kreise und kreisfreien Städte rund um das Jahr 2030 ausgesetzt sind, der prognostizierten verkehrlichen Bedeutung dieser Räume im gleichen Zeitraum gegenüber gestellt wird. Für die verkehrliche Bedeutung nutzen wir den Indikator „Verkehrsleistung". Er adressiert gleichzeitig verkehrsinfrastrukturelle und logistische, d. h. die Transportströme betreffende Aspekte, und bildet eine gedankliche Klammer zwischen der Ausstattung mit Schieneninfrastruktur in den Kreisen und ihrer tatsächlichen Nutzung. Zudem stellt die Verkehrsleistung einer Region stärker als die beiden anderen Indikatoren ihre großräumige Verbindungsfunktion heraus.

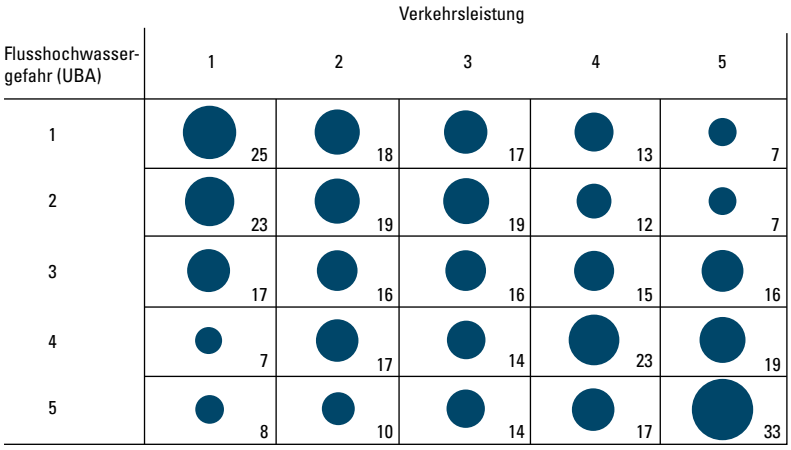
Deutschlandweite Übersicht

Die Risikoabschätzung soll ein räumlich differenziertes Bild von potenziellen Gefährdungen des Schienengüterverkehrs durch Flusshochwässer ermöglichen. Dazu bietet es sich an, Hochwassergefahren und verkehrliche Bedeutung ähnlich wie im letzten Abschnitt zu klassifizieren und dann Übereinstimmungen der Kreise zu identifizieren. Abbildung 5 zeigt, dass insgesamt 25 Kreise eine Überschneidung in der jeweils ersten Kategorie, d. h. höchsten Gefahrenklasse für Flusshochwasser und zugleich die höchste verkehrliche Bedeutung, aufweisen. In einem „erweiterten Kreis" der Relevanz (d. h. Teil der jeweils ersten beiden Klassen) wurden insgesamt 85 Kreise und kreisfreie Städte identifiziert. Rund ein Fünftel der Kreise (92) ist weder einer hohen Flusshochwassergefahr ausgesetzt, noch ist ihre verkehrliche Bedeutung innerhalb Deutschlands hoch (Klassen 4 und 5).

Nachfolgend werden die 25 Kreise der ersten Kategorie weitergehend analysiert. In Tabelle 7 sind sie in der Reihenfolge ihrer reletiven Hochwassergefahr aufgelistet. Die Tabelle enthält darüber hinaus Informationen zum Anteil der auf dem Kreisgebiet verlaufenden Schienenstrecken im HQ100-Überschwemmungsgebiet und der Verkehrsleistung des Kreises an der Gesamtverkehrsleistung in Deutschland. Schließlich wird die Klassifizierung bei den beiden weiteren Indikatoren zur Verkehrsbedeutung dargestellt. Eine gleich hohe oder niedrigere Bedeutung bei den weiteren Indikatoren bezieht sich immer auf die höchste Kategorie der Verkehrsleistung.

Aus der Tabelle geht hervor, dass im Jahr 2030 eine Reihe von Großstädten und Verdichtungsräumen mit hoher verkehrlicher Bedeutung von einer erhöhten Überschwemmungsgefährdung durch Flusshochwasser betroffen sind. Zu nennen sind vor allem die Großräume Bremen (Bremen, Verden und Nienburg), Hamburg (Hamburg, Harburg, Lüneburg) und Hannover (Hannover und Celle), aber auch die Region Mittlerer Oberrhein (Karlsruhe, Rastatt, Ortenaukreis), das Rhein-Main- oder Rhein-Neckar-Gebiet, Halle sowie Duisburg. Weiterhin sind verkehrlich bedeutende Kreise und Städte entlang von Elbe und Havel mit erhöhter Flusshochwassergefahr konfrontiert. Dazu gehören die Landkreise Stendal, Wittenberg, Havelland und Börde sowie die Stadt Magdeburg, die im wichtigen West-/Nord-Ost-Schienenverkehr von überregionaler Bedeutung sind. Eine hohe Ex-

Abbildung 5
Übereinstimmungen und Abweichungen der Klassenzugehörigkeit der Kreise in Bezug auf Flusshochwassergefahr und Verkehrsbedeutung



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis UBA (2015), BKG Basis-DLM, Laufende Raumbeobachtung des BBSR und VVP

Tabelle 7
Kreise und kreisfreie Städte mit hoher Flusshochwassergefährdung und hoher Verkehrsbedeutung

Kreis/Stadt	Hochwasser-gefahr (UBA-Indikator)	Anteil der Schienenstrecke in HQ100-Gebiet (%)	Anteil der Verkehrsleistung an der gesamten Verkehrsleistung in Deutschland (%)	Verkehrsinfra-strukturelle Bedeutung	Schienen-güterverkehrs-aufkommen
Verden	0,54	13,2	0,91	↓	↓
Bremen	0,53	20,0	0,51	↔	↔
Stendal	0,49	15,3	1,12	↔	↓
Groß-Gerau	0,46	28,5	1,24	↓	↓
Wittenberg	0,44	10,2	0,79	↔	↓
Havelland	0,41	17,3	0,76	↔	↓
Hamburg	0,34	16,9	1,04	↔	↔
Nienburg (Weser)	0,33	19,3	0,86	↓	↓
Rosenheim (Stadt)	0,31	44,7	0,11	↓	↓
Straubing (Stadt)	0,30	2,7	0,13	↓	↓
Harburg	0,30	9,6	1,53	↔	↔
Lüneburg	0,23	7,1	0,87	↓	↓
Celle	0,20	9,4	0,91	↓	↓
Magdeburg	0,19	0,7	0,35	↓	↓
Mainz-Bingen	0,17	15,6	0,77	↓	↓
Halle (Saale)	0,16	9,5	0,23	↔	↓
Börde	0,16	5,2	0,84	↔	↔
Mannheim	0,16	5,1	0,74	↔	↔
Rastatt	0,14	7,6	0,66	↓	↓
Region Hannover	0,14	2,4	2,83	↔	↔
Regensburg	0,13	1,5	0,87	↓	↓
Frankfurt am Main	0,13	11,6	0,45	↔	↔
Karlsruhe	0,12	22,0	0,38	↔	↔
Ortenaukreis	0,12	4,1	1,58	↔	↔
Duisburg	0,12	3,3	0,55	↔	↔

↔ Der Indikator führte zur Einstufung einer ebenso hohen Bedeutung

↓ Der Indikator führte zur Einstufung einer deutlich niedrigeren Bedeutung

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis UBA (2015), BKG-Basis DLM und VVP

position gegenüber Flusshochwässern bei gleichzeitig hoher Verkehrsbedeutung wegen der innerhalb der Grenzen erbrachten Verkehrsleistung ist schließlich in Süddeutschland u. a. für die Städte Rosenheim (Inn) und Straubing (Donau) gegeben. Sie sind ebenfalls wichtige Durchgangspunkte des Schienengüterverkehrs. Anzumerken bleibt schon an dieser Stelle, dass der z. T. geringe Anteil der Schienenstrecken, der in einem HQ100-Gebiet liegt, nahelegt, dass in einer detaillierten Risikoanalyse die lokale Situation und die exakte Lage der Infrastruktur stärkere Berücksichtigung finden muss. Auf diese und weitere Implikationen aus dem vorliegenden (kreis-)indikatorengestütz-

ten Ansatz zur bundesweiten Risikoabschätzung wird in den Schlussfolgerungen eingegangen.

Das maximale Schadenspotenzial der 25 Kreise der Kategorie 1 ist nicht unerheblich: Sie decken in ihren Grenzen insgesamt 21 % der gesamtdeutschen jährlichen Verkehrsleistung im Jahr 2030 ab. Dazu umfassen sie 11 % des deutschlandweiten Schienenstreckennetzes und 21 % des jährlichen bundesweiten Transportaufkommens. Mittelbare Wirkungen bei Unterbrechungen von Güterströmen für andere Regionen aufgrund der Durchgangs- oder Verbindungsfunktion der gefährdeten Gebiete können zwar nicht quantifiziert werden, sind jedoch wahrscheinlich.

Transportstrom-Analyse für zwei ausgewählte Kreise

Um sich dem potenziellen Schadensausmaß durch Unterbrechungen der Schieneninfrastruktur weiter zu nähern, werden nachfolgend beispielhaft Transportströme in den durch Hochwasser gefährdeten Kreisen Verden (Weser/Aller) und Groß-Gerau (Rhein/Main) detaillierter betrachtet. Dabei steht die Analyse der auf einzelnen Streckenabschnitten transportierten Güterstruktur im Fokus.

Die lokale Situation der beispielhaft gewählten Strecken und der Überschwemmungsflächen gemäß LISFLOOD-Modellierung wird in Karte 7 gezeigt. Neben der Karte wird in einem Diagramm die auf der Strecke transportierte Güterstruktur[38] bezogen auf das Gewicht aufgeschlüsselt und dem Durchschnitt aller Strecken in Deutschland[39] gegenübergestellt. Die Schienenstrecken, bei denen eine Unterbrechung unterstellt wird (jeweils rot gekennzeichnet), liegen in unmittelbarer Nähe zu oder sogar direkt in potenziellen Überschwemmungsgebieten von Weser und Rhein und deren Zuflüssen. Diese Strecken können als besonders gefährdet eingeschätzt werden.

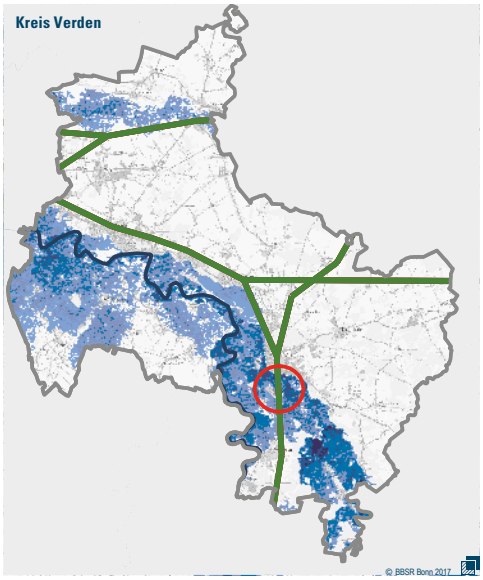
Gemäß den genutzten Umlegungsdaten liegt das Transportaufkommen bei den Streckenbeispielen in Summe bei etwa 78 Mio. t (Verden) bzw. 39 Mio. t (Groß-Gerau) pro Jahr[40]. Die Güterstruktur unterscheidet sich bei der ausgewählten Strecke im Landkreis Verden aufgrund der Dominanz der Hinterland-Verkehre der nahen Seehäfen Bremen und Bremerhaven deutlich vom Durchschnitt aller deutschen Strecken: Hier sind die Anteile der „Gutart unbekannt" (vor allem Container) und Fahrzeuge mit 57 % bzw. 8 % deutlich höher als im Rest des Landes mit 36 % bzw. 4 %. Dafür werden auf der Strecke im Landkreis Verden anteilig weniger Metalle und Metallerzeugnisse (9 %; Deutschland: 14 %) sowie chemische Erzeugnisse (5 %; Deutschland: 9 %) transportiert.

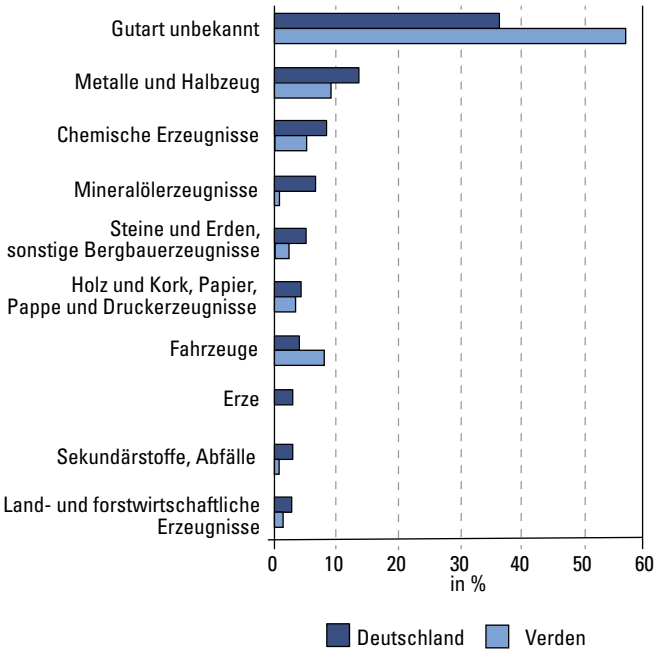
Auch die Strecke im Kreis Groß-Gerau weist bei der Güterstruktur Abweichungen vom Durchschnitt aller Strecken in Deutschland auf: Wiederum liegt der Anteil der Container-Transporte mit 60 % deutlich über dem Deutschlandwert von 38 %. Eine geringere Rolle spielen auch hier Metalle und Metallerzeugnisse (7 % zu 14 % in Deutschland). Der Transport chemischer Erzeugnisse macht auf dieser Strecke 8 % des Gesamtaufkommens aus und liegt damit einen Prozentpunkt unter dem Durchschnitt.

In Karte 8 werden die Transportrelationen dargestellt, die die beiden gewählten Streckenabschnitte tangieren. Die Wegebäume verdeutlichen wie oben schon dargestellt die Quell-Ziel-Beziehungen, aber vor allem die Routen der Transporte. Zu den wichtigen Quellen der innerdeutschen Transporte nach Bremerhaven, die über die Strecke nahe Verden verlaufen, zählen beispielsweise München und Dingolfing (BMW) oder Böblingen (Mercedes).

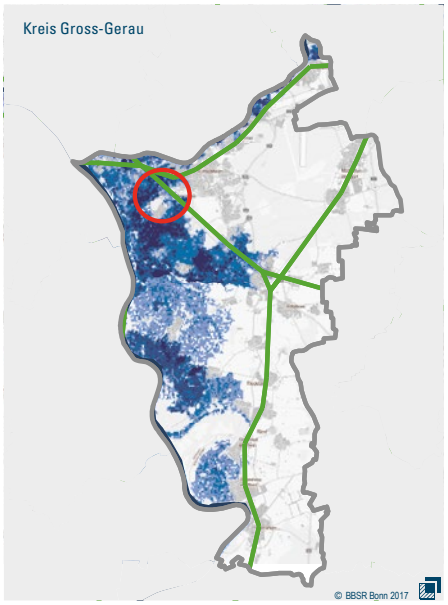
Bei dem Streckenabschnitt im Kreis Groß-Gerau entfällt ein Großteil der Transporte auf den Versand von Gütern in das bzw. aus dem Ausland sowie Transitverkehre. Dies ist der zentralen Lage der Strecke in Deutschland bzw. Europa geschuldet. Zu den wichtigen Quell-Ziel-Beziehungen über die Strecke im Bereich der Stadt Bischofsheim gehört beispielsweise die Relation Rheinland-Oberitalien.

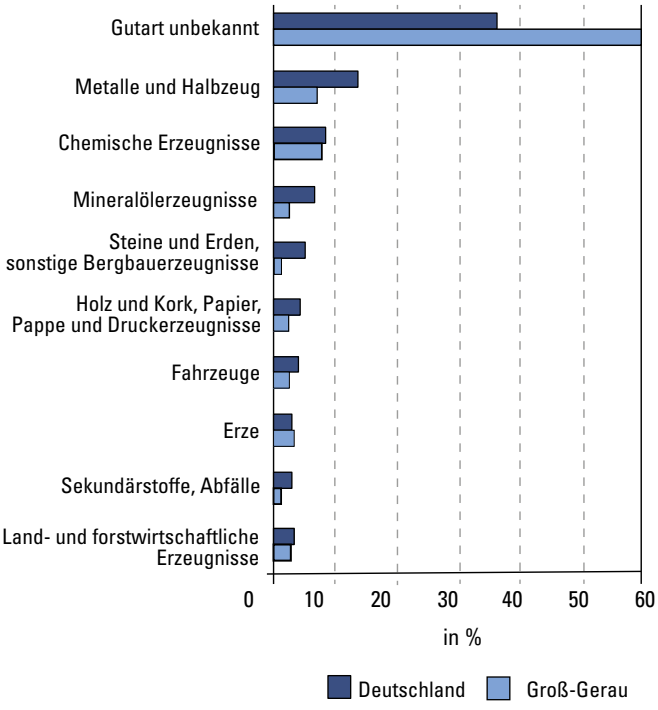
Karte 7
Beispiele betroffener Streckenabschnitte im Schienengüterverkehr





Schienengüter-verkehrsstrecke
Potenzielle Überschwemmungsfläche
ausgewählter Streckenabschnitt



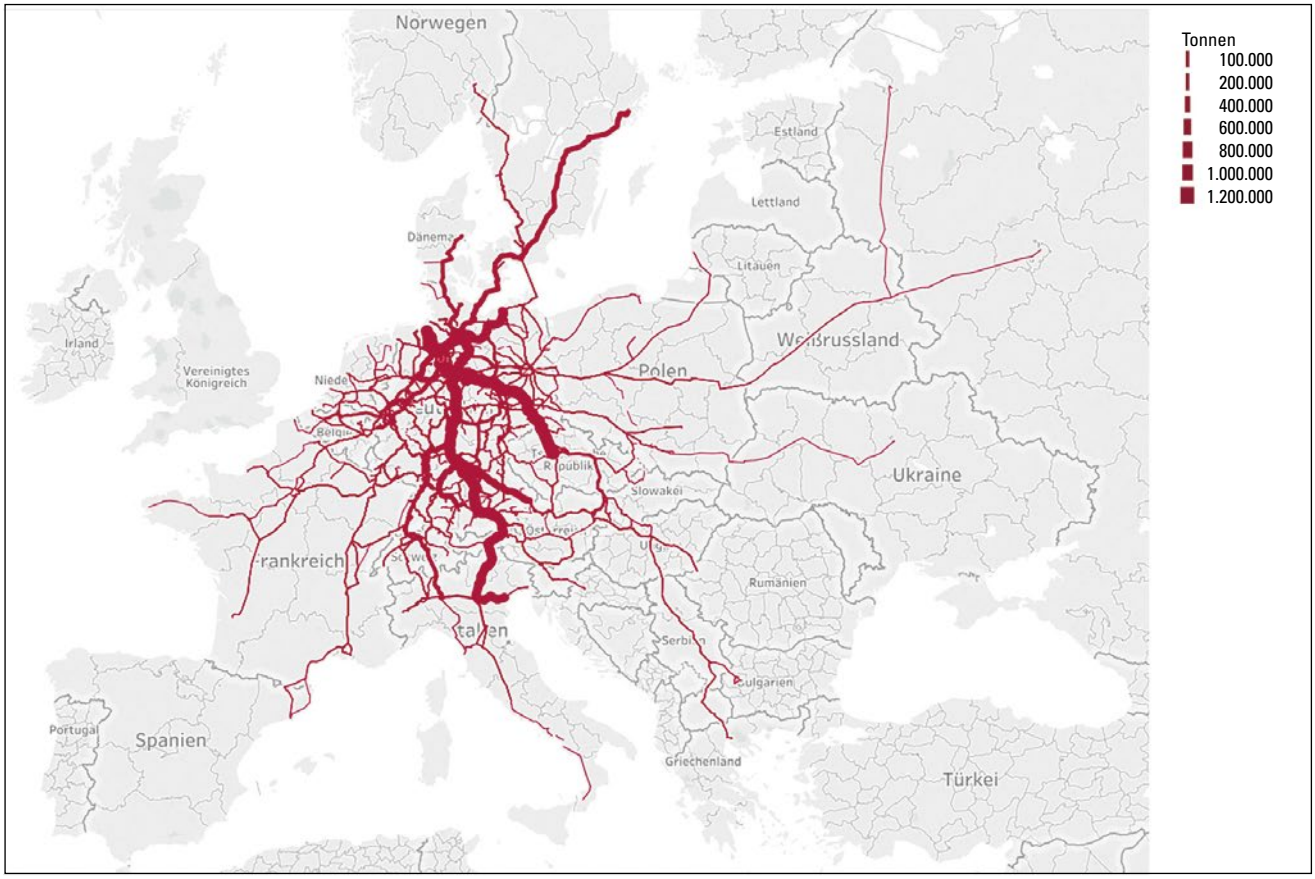


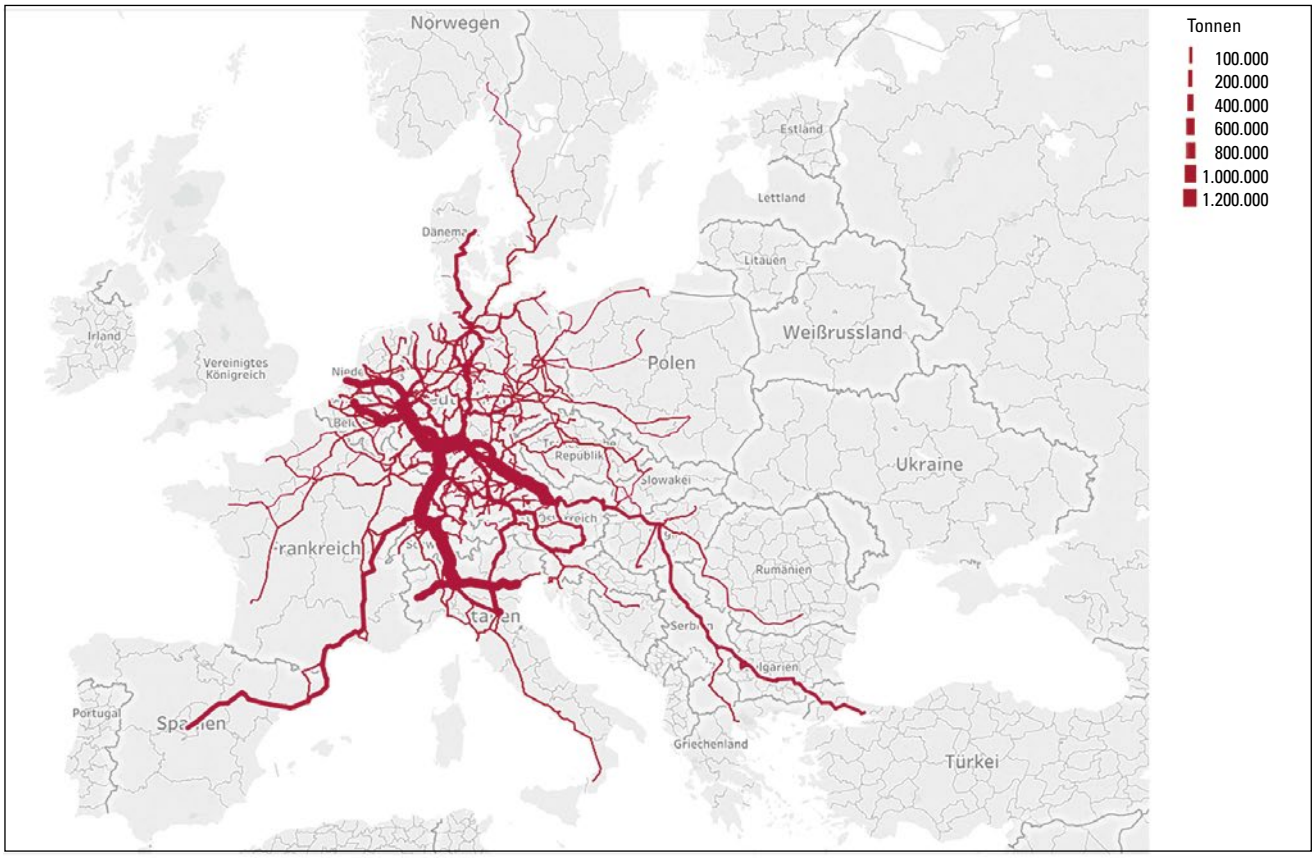
Schienengüter-verkehrsstrecke
Potenzielle Überschwemmungsfläche
ausgewählter Streckenabschnitt

Datenbasis: BVU, BMVI-Verflechtungsprognose 2030, LISFLOOD-Modell des Joint Research Centre
Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2014 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: T. Pütz

Güterstruktur gemäß NST 2007

Karte 8
Transportrelationen, die die ausgewählten Streckenabschnitte in den Landkreisen Verden und Groß-Gerau tangieren





Anmerkung: Es erfolgt keine Aufsummierung der Belastungen einzelner Streckenabschnitte.

6 Fazit und Schlussfolgerungen

Der Schienengüterverkehr wird regional unterschiedlich von den Gefahren durch Flusshochwässer betroffen sein. Eine deutschlandweite Risikoabschätzung erfordert eine möglichst genaue Beschreibung der regionalen Empfindlichkeit, die sich über unterschiedliche Indikatoren der Verkehrsbedeutung von Regionen darstellen lässt. In dieser Untersuchung wird die auf Kreisebene berechnete Verkehrsleistung als tragfähiger Indikator für die Abbildung der verkehrlichen Bedeutung von Räumen herausgearbeitet und für eine Gegenüberstellung mit der Gefährdung durch Flusshochwässer verwendet. In beiden Fällen stellen die Indikatoren relative Größen dar.

Die Berücksichtigung der Verkehrsbedeutung auf Basis der in den Kreisen abgewickelten Verkehrsleistung geht über vergleichbare Studien hinaus, in denen Analysen zu den Wirkungen des Klimawandels auf das Verkehrssystem angestellt werden. Dort wurde zum Teil nur die regionale Ausstattung mit Verkehrsinfrastruktur als Indikator für die Sensitivität gegenüber Klimagefahren verwendet.

Die Analyse zeigt, dass nicht alle Kreise und Städte mit hoher Flusshochwassergefährdung auch Räume mit einer im bundesdeutschen Maßstab großen Verkehrsbedeutung sind. Sie zeigt aber auch, dass Flusshochwässer in einigen verkehrlich sehr bedeutenden Teilräumen Deutschlands zu großen Beeinträchtigungen des Schienengüterverkehrs führen können, deren Auswirkungen deutlich über die direkt betroffenen Räume hinausgehen würden. Hier sind vor allem die Großräume Hamburg und Bremen zu nennen, deren wichtige Schnittstellen zum Seeverkehr eine große wirtschaftliche Bedeutung für viele Regionen in Deutschland haben. Diese und weitere durch Flusshochwässer bedrohte Regionen entlang der großen Flusssysteme Elbe, Weser, Rhein und Donau werden auch in der näheren Zukunft wichtige Logistik- sowie Verbindungs- und Transitfunktionen im Bereich des Schienenverkehrs wahrnehmen. Die Effekte temporärer Unterbrechungen der Schienenverbindungen in diesen Regionen werden sich wegen der vielseitigen Verkehrsverflechtungen auch in anderen Regionen Deutschlands bemerkbar machen.

Für eine genauere Abschätzung möglicher Schadensausmaße von extremen Wetterereignissen sind u. a. folgende Aspekte von Belang:

- exaktere Kenntnisse und detailliertere Annahmen zum Ausmaß und zur Dauer von möglichen Unterbrechungen der Infrastruktur oder der Nicht-Verfügbarkeit von z. B. Eisenbahnbrücken oder Häfen
- konsistente Kostenschätzungen zum Gesamt-Schadensausmaß, die weiterhin Nutzungsalternativen zu den üblichen Transportrouten und -strömen berücksichtigen, die sich aus Kapazitätsreserven ergeben und sich kostenmindernd auswirken können und
- die flächendeckende Berücksichtigung bereits ergriffener Hochwasserschutzmaßnahmen an den betrachteten Infrastrukturen für eine handlungsorientiertere Risikobeurteilung und -vorsorge.[41]

Es bestehen also noch Einschränkungen, die letztlich auf einen indikatorengestützten Ansatz zurückzuführen sind, der nur Hinweise für im Prinzip risikobehaftete Räume geben kann. Je besser es gelingt, die Infrastruktur und die Transportströme in digitalen Systemen inklusive der bereits ergriffen Schutzmaßnahmen vollständig abzubilden, desto besser können Empfehlungen für die operative Risikovorsorge abgeleitet werden.

Trotz dieser Einschränkungen sind die hier genutzten Daten zur Verkehrsleistung und zu Transportströmen ein Anhaltspunkt dafür, welche maximalen Handels-, Versorgungs- und Mobilitäts-Einschränkungen bei anhaltenden Unterbrechungen von Schieneninfrastrukturen zu befürchten wären. Eine weitergehende Monetarisierung und Abschätzung der volkswirtschaftlichen Wirkungen solcher Unterbrechungen sind grundsätzlich ebenfalls möglich.[42] Festzuhalten bleibt, dass eine potenziell starke Klimawirkung, d. h. die Kombination aus hoher räumlicher Exposition sowie Sensitivität, darauf verweist, dass in den betroffenen Regionen überprüft werden sollte, ob bereits ausreichende Maßnahmen zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur an mögliche Hochwasserereignisse realisiert wurden oder geplant sind.

Die Notwendigkeit, Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu ergreifen, ist seit Jahren bekannt und wird in strategischen Dokumenten wie dem europäischen „Grünbuch zur Anpassung an den Klimawandel" erörtert.[43] Grundsätzlich sollten die frühzeitige Entwicklung von Maßnahmen, die Erweiterung der Wissensgrundlage durch integrierte Klimaforschung sowie die Einbindung der relevanten Akteure bei der Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen Priorität haben. Experten schätzen die Anpassungskapazität im Schienenverkehr in Deutschland so ein[44], dass die aktuellen und künftigen aus dem Klimawandels resultierenden Anpassungserfordernisse schon in aktuellen Fach- und Begleitplanungen (Umweltrecht) thematisiert werden. Trotzdem sind auch im Eisenbahnbereich noch nicht alle Herausforderungen der Anpassung an den Klimawandel gelöst: Neben einer Aufstockung der finanziellen und personellen Ressourcen für dieses Handlungsfeld sollten für bestimmte Klimagefahren, wie etwa Hangrutschungen oder Überflutungen, weiterführende konkrete Vulnerabilitätsuntersuchungen durchgeführt und spezifische Anpassungs- und Notfallmaßnahmen entwickelt werden.[45]

Die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Hochwasserschutzes ist nicht zuletzt Aufgabe der Raumordnung, die länder- und regionsübergreifend koordinierend tätig werden kann. Das BBSR eruiert derzeit mit Zustimmung des zuständigen Ministeriums, wie ein Bundesraumordnungsplan für den Hochwasserschutz inhaltlich und organisatorisch ausgestaltet werden könnte.[46] Raumordnerische Instrumente und Vorgaben wären flächenorientiert und komplementär zu den Maßnahmen der Wasserwirtschaft zu sehen.[47] Sie würden darauf abzielen, das Hochwasserrisiko zu minimieren und Schadenspotenziale auch für kritische Infrastrukturen wie das Schienennetz zu begrenzen. Die hier vorgelegte Analyse kann dazu beitragen, der Raumordnung wichtige Informationen über das räumlich differenzierte Schutzerfordernis kritischer Infrastrukturen bereit zu stellen.

7 Anmerkungen

(1)
Vgl. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE (2015) Loss events world wide 2015, Percentage distribution, URL: https://www.munichre.com/site/corporateget/documents_E-397017904/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/Natural%20Hazards/NatCatService/Annual%20Statistics/2015/2015_Torten_Ereignis_e.pdf (11.08.2016), MunichRe, München.

(2)
Beispielsweise heiße Tage, Tropennächte, Frosttage, Starkniederschläge und kumulative Ereignisse, Trockenheit/niederschlagfreie Tage, Starkwind, Schneetage mit mindestens 30 Zentimetern Schneehöhe, Badetage oder Heiztage.

(3)
Zur genauen Definition der Begriffe „Klimarisiko", „Vulnerabilität" u. a. siehe Lavell, A. et al. (2012) Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B. et al. (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, Seiten 25–64 sowie Cardona, O.D. et al. (2012) Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B. et al. (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 65–108.

(4)
Zum Begriff der kritischen Infrastruktur siehe auch Kapitel 2.

(5)
Pescaroli, G., Alexander, D.E. (2016) Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters, Natural Hazards 82 (1), 175–192.

(6)
Vgl. Bundesregierung (2015) Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Stand 16.11.2015, Berlin, 53/54.

(7)
Anwendungsfälle in:
BBSR (Hrsg.) (2015) Verkehrliche Auswirkungen einer Sturmflut, BBSR-Analysen KOMPAKT, 06/2015, Bonn.
BBSR (Hrsg.) (2013) Robustheit des Verkehrssystems, BBSR-Analysen KOMPAKT, 11/2013, Bonn.

(8)
Vgl. z. B. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, Reihe, Climate Change 25/2015, Dessau.

(9)
https://www.munichre.com/de/media-relations/publications/press-releases/2014/2014-04-01-press-release/index.html.

(10)
The RAINEX-Konsortium (Hrsg.) (2014) RAINEX Handbuch, Risikobasierter Ansatz zum Schutz der Landverkehrsinfrastruktur vor den Auswirkungen extremer Regenfälle, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach.

(11)
Sturzfluten werden als solche Überflutungen definiert, die sich in weniger als 6 Stunden aufbauen.

(12)
The RAINEX-Konsortium (2014), s.o.

(13)
Vgl. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Freie Universität Berlin (FUB), Universität zu Köln (UK), Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG) (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadensituation in der deutschen Versicherungswirtschaft, Kurzfassung Hochwasser, Studie im Auftrag des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Berlin.

(14)
Vgl. UBA (2015) 409, s.o.

(15)
Vgl. auch Moran, A.P. et al. (2010) Documentation of Flood Damage on Railway Infrastructure, in J. Düh, H. Hufnagl, E. Juritsch, R. Pfliegl, H.-K. Schimany und H. Schönegger (Hrsg.) Data and Mobility, Transforming Information into Intelligent Traffic and Transportation Services Proceedings of the Lakeside Conference 2010, S. 61–70, Springer, Berlin/Heidelberg.

(16)
Lindgren, J., Jonsson, D.K., Carlsson-Kanyama, A. (2009) Climate Adaption of railways: lessons from Sweden, EJTIR, 9(2) 164–181.

(17)
Vgl. auch Bundesministerium des Inneren (Hrsg.) (2009) Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Berlin. Der Schutz kritischer Infrastrukturen wurde schon Ende 2008 als neuer Grundsatzinhalt in den Katalog der Grundsätze der Raumordnung aufgenommen (vgl. Raumordnungsbericht 2011, BBSR, Bonn, 2011, 53 ff.). Vgl. auch ROG § 2 Abs. 3.

(18)
Vgl. PTV AG et al. (2011) Security of Road Transport Networks: SERON, Deliverable D200, Identification and Risk Classification of Critical Infrastructures (concise version), Stuttgart als Beispiel eines umfassenden Ansatzes zur Bestimmung der Kritikalität von Straßentunneln.

(19)
BSI-Kritisverordnung vom 22. April 2016 (BGBl. I S. 958), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 21. Juni 2017, (BGBl. I S. 1903) geändert worden ist.

(20)
Der für Güterbahnhöfe und Zugbildungsbahnhöfe in der KRITIS-Verordnung genannte Schwellenwert (Anzahl ausgehender Züge/Jahr) ist unter Annahme einer durchschnittlichen disponierten Transportleistung im Güterschienenverkehr von 1.460 Tonnenkilometern zur Versorgung einer Person, eines Regelschwellenwerts von 500.000 versorgten Personen sowie einer durchschnittlichen Transportleistung von 32.000 Tonnenkilometern pro Güterzug pro Jahr berechnet. Der Schwellenwert liegt demnach bei 23.000 ausgehenden Zügen pro Jahr: 23.000 Züge/Jahr≈(1.460 tkm/Jahr x500.000)/(32.000 tkm/Zug). Vgl. BSI-Kritisverordnung 2016, Anhang 7, Teil 2.

(21)
Ähnlich wird die Sensitivität auch in der UBA-Studie zur Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bestimmt.

(22)
Siehe Fußnote 8. An einer Aktualisierung wird derzeit gearbeitet: https://www.umweltbundesamt.de/vulnerabilitaetsanalyse-2021.

(23)
Die Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen, Berlin.

(24)
HQ100 ist die Kurzbezeichnung für ein Jahrhundert-Hochwasser bzw. eine Jahrhundertflut. Damit ist eine Pegelhöhe gemeint, die statistisch im Mittel nur einmal alle 100 Jahre erreicht oder überschritten wird. Zu beachten ist, dass die Nicht-Berücksichtigung von Deichen in LISFLOOD dazu führt, dass die in den Karten dargestellten betroffenen Flächen größer sind als auf den Hochwassergefahren bzw. -risikokarten der Bundesländer.

(25)
Die ursprünglichen Informationen zu den potenziellen Überschwemmungsflächen entstammen dem sog. „LISFLOOD-Modell“, das seit 1997 vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission entwickelt wird (vgl. Joint Research Centre, European Commission (Hrsg.) [2011] LISFLOOD, Distributed Water Balance and Flood Simulation Model, Revised User Manual, Dictus Publishing, Riga). Es stellt im Kern eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung dar, die zur Abschätzung des Durchflusses von (extremen) Niederschlagsereignissen durch ein Fließgewässer eingesetzt wird. Der Einsatzbereich des Modells liegt darin, Hochwässer aufgrund von Flussbegradigungen, Landnutzungsveränderungen, des Klimawandels oder anderer Faktoren zu simulieren. Das Modell ist in der Lage, räumlich und zeitlich differenzierte Ergebnisse zu produzieren. Auf der räumlichen Ebene sind aufgrund des Rasterzellenansatzes grundsätzlich Auflösungen zwischen 100 und 5.000 m möglich.

(26)
In der UBA-Studie wurden für „Klimasignale“ (z. B. Starkregen oder Sturm) und Sensitivitäten (nicht-klimatische Systeme wie Siedlungsfläche) jeweils zwei Szenarien des Wandels gebildet, nämlich eines des schwachen und ein weiteres des starken Wandels. Dafür wurden für die meisten klima-bezogenen Werte jeweils das 15. sowie 85. Perzentil aus einem Ensemble von zwölf Klima-Modellrechnungen des Deutschen Wetterdienstes berücksichtigt (UBA, 2015, 43 ff.). In den Wirkungsrechnungen des UBA wurden die Szenarien kombiniert, so dass danach vier Kombinationsmöglichkeiten zur Verfügung standen, aus denen normativ zwei für die Vulnerabilitätsanalyse ausgewählt wurden. Davon beschreibt das erste einen starken Klimawandel und eine dynamische sozio-ökonomische Entwicklung (etwa mit einem höherem Anstieg des Flächenverbrauchs), das zweite die Kombination, die einen eher schwachen klimatischen Wandel beschreibt und bei der, die sozio-ökonomische Entwicklung mit geringerem Anstieg des Flächenverbrauchs moderat ausfällt. Gemäß UBA sind beide Szenarien gleich wahrscheinlich. Welches eintrifft, hängt von den Erfolgen des Klimaschutzes sowie dem gesellschaftlichen und technologischen Wandel ab.

Flusshochwasser wird grundsätzlich nicht als (reines) Klimasignal sondern als „Klimawirkung erster Ordnung“ definiert, weil es auch nicht-klimatische Parameter wie die Topographie berücksichtigt. Um die beiden Szenarien für Flusshochwasser zu bilden, wurden abweichend zum dargestellten Vorgehen das 15. und 85. Perzentil des LISFLOOD-Modells verwendet, das auf einem Ensemble von zwölf verschiedenen Modellrechnungen beruht und eine belastbare Grundlage bildet (ebd., 44).

(27)
Das Prognosejahr der VVP, das Jahr 2030, liegt im Prognosehorizont des in der UBA-Studie als „nahe Zukunft“ definierten Zeitraums von 2021 bis 2050 und konnte daher verwendet werden.

(28)
BKG (2017) Digitales Landschaftsmodell 1:250 000, BKG, Leipzig.

(29)
Eine weitere Differenzierung der Strecken ist für weitere Analysen geplant.

(30)
Zur Normierung wurden die Werte auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 skaliert.

(31)
Siehe Intraplan et. al. (2014) Verkehrsverflechtungsprognose 2030, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Intraplan, BVU, IVV, PLANCO, München.

(32)
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, Entwurf März 2016, BMVI, Bonn.

(33)
Für das Ausland ist die Zonierung der Verkehrszellen der VVP gröber und variiert je nach Entfernung zum deutschen Staatsgebiet zwischen NUTS-2- und NUTS-1-Zonen (ganzes Staatsgebiet).
Für den Indikator wurden die Transporte in die und zu den deutschen Seehäfen den jeweiligen Kreisen zugeordnet.

(34)
Die Umlegung wurde seitens des BBSR bei externen Gutachtern in Auftrag gegeben; die Belastungsdaten werden mit dem Tool „TraViMo“ visualisiert und analysiert (siehe dazu Buthe, B. [2017] Transportstrom-Visualisierungs-Modell-TraViMo 2.0 – Integration raumordnerischer Belange in die Verkehrsplanung, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 169–196).

(35)
Im GIS (z. B. durch das ARCGIS-Werkzeug Identity) werden den linienhaften Daten Informationen zum Kreis zugespielt. Auf dieser Grundlage können durch Zusammenfassung aller Abschnitte innerhalb eines Kreises die Indikatoren auf Kreisebene gebildet werden.

(36)
Vgl. UBA (2015) 330, s. o.

(37)
Die Paarigkeit bezieht sich i.d.R. jedoch nicht auf eine identische Güterstruktur oder Struktur der Verkehrsbeziehungen.

(38)
Vgl. Statistisches Bundesamt (2008) Verkehr, NST-2007, Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik – 2007, Wiesbaden.

(39)
Bei der Berechnung der durchschnittlichen Güterstruktur aller Streckenabschnitte in Deutschland wurde auf Längengewichtung verzichtet. Das genutzte Umlegungsnetz enthält für Deutschland etwa 22.000 Streckenabschnitte.

(40)
Umfasst Hin- und Rückrichtung

(41)
Im Rahmen der MORO-Studie „Regionalentwicklung und Hochwasserschutz in Flussgebieten“ wurde dahingehend eine annähernd flächendeckende Auswertung der Landes- und Regionalpläne im Bereich des Hochwasserschutzes vorgenommen.

(42)
Vgl. Buthe (2017), s. o.

(43)
Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU {SEK(2007) 849}

(44)
Vgl. UBA (2015) 408 ff., s. o.

(45)
Im Expertennetzwerk des BMVI werden solche Fragen aktuell erforscht und bearbeitet (vgl. http://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Home/home_node.html). Vgl. auch Die Bundesregierung (2015) Fortschrittbericht der Bundesregierung zur Anpassung an den Klimawandel, Stand 16.11.2015, Berlin.

(46)
Vgl. ROG § 17

(47)
Im MORO-Forschungsfeldes „Vorsorgendes Risikomanagement in der Regionalplanung“ werden die Möglichkeiten zur Integration eines vorsorgenden Risikomanagements in die räumliche Planung untersucht.

www.bbsr.bund.de