
Gefährdungsanalyse von Verkehrsinfrastrukturen gegenüber Klimaauswirkungen

Teil 1: Gefährdungsanalyse (2021)

Gutachten zur Erstellung einer Grundlage für die regionalisierte Abschätzung von Gefährdungen von Straßenverkehrsinfrastrukturen durch die Folgen des Klimawandels in Hessen

Ein Gutachten im Auftrag von

HESSEN



Hessen Mobil
Straßen- und Verkehrsmanagement



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachgebiet Raum- &
Infrastrukturplanung

raum
infrastruktur | planung

Prof. Hans-Joachim Linke

Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 21964
Mobil +49 178 235 7099
linke@geod.tu-darmstadt.de

Gefährdungsanalyse von Verkehrs- infrastrukturen gegenüber Klimaauswirkungen

Gutachten zur Erstellung einer Grundlage für
die regionalisierte Abschätzung von Gefährdungen
von Straßenverkehrsinfrastrukturen durch die
Folgen des Klimawandels in Hessen

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Das Gutachten ist Eigentum von Hessen Mobil und darf nur mit schriftlicher Genehmigung vervielfältigt
oder an Dritte weitergegeben werden.

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke,
Luisa Ritter, Audrey Bourgoin, Benjamin Dominic Kraff, Fabian Salemons

TU Darmstadt, Darmstadt/Wiesbaden, 2022

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Fachgebiet Raum- und Infrastrukturplanung
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Auftraggeber:

Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement
Abteilung Planung und Bau
Wilhelmstraße 10, 65185 Wiesbaden

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	5
1. Einleitung	6
2. Klimawandel in Hessen	8
2.1. Überblick über die Methodik der Klimaprojektionen	8
2.2. Temperatur.....	10
2.3. Niederschlag.....	13
2.4. Wind	16
2.5. Klimaregionen in Hessen.....	16
3. Räumliche Gegebenheiten	21
3.1. Topografische Struktur.....	22
3.2. Bodentypen und Bodenarten	26
3.3. Landwirtschaftliche Nutzflächen und forstwirtschaftliche Flächen in Hessen	34
4. Gefährdungen durch den Klimawandel	39
4.1. Hochwasser	39
4.1.1. Entstehung von Hochwasser	39
4.1.2. Klimatische Einflüsse	40
4.1.3. Räumliche Gegebenheiten.....	41
4.1.4. Zusammenfassung.....	42
4.2. Massenbewegung.....	43
4.2.1. Entstehung.....	43
4.2.2. Klimatische Einflüsse	44
4.2.3. Räumliche Gegebenheiten.....	45
4.2.4. Zusammenfassung.....	47
4.3. Sturm	47
4.3.1. Entstehung von Wind	47
4.3.2. Klimatische Einflüsse	48
4.3.3. Räumliche Gegebenheiten.....	49
4.3.4. Zusammenfassung.....	51
4.4. Dürre und Niedrigwasser.....	51
4.4.1. Entstehung und klimatische Einflüsse	51
4.4.2. Räumliche Gegebenheiten.....	52
4.4.3. Zusammenfassung.....	53
4.5. Hitze.....	53
4.5.1. Klimatische Einflüsse zur Entstehung von Hitze	53
4.5.2. Räumliche Gegebenheiten.....	54
4.5.3. Zusammenfassung.....	55
4.6. Kälte.....	56
4.6.1. Klimatische Einflüsse zur Entstehung von Kälteschäden	56

4.6.2. Räumliche Gegebenheiten.....	57
4.6.3. Zusammenfassung.....	57
4.7. Zwischenfazit.....	58
5. Bauwerke	61
5.1. Ingenieurbauwerke	61
5.2. Fahrbahnen und Seitenräume.....	63
6. Auswirkungen der klimatischen Einflüsse auf das Straßenverkehrssystem.....	64
6.1. Niederschlag – Starkniederschläge & lang andauernde Niederschlagsperioden, Veränderungen der saisonalen Niederschlagsmuster sowie Trockenperioden	65
6.2. Starke Winde und Stürme	68
6.3. Temperatur – erhöhte mittlere Lufttemperatur & Hitzewellen sowie vermehrte Frost-Tau- Wechsel	70
7. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	73
Literaturverzeichnis.....	75
Glossar.....	84
Anhang: Datenblätter zu den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf das Straßenverkehrssystem	93

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Bodenabtragsgleichung
Basis-DLM	Digitales Basis-Landschaftsmodell
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HMUKLV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (dt. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
NN	Normalnull
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (dt. repräsentativer Konzentrationspfad)
TUDa	Technische Universität Darmstadt
UBA	Umweltbundesamt
UHI	Urban Heat Island

1. Einleitung

Das wirtschaftliche und gesellschaftliche Leben fußt auf einem leistungsfähigen Verkehrssektor (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 79). Nahezu alle privaten und ökonomischen Aktivitäten sind auf die Nutzung der Straßenverkehrsleistungen angewiesen. Im Personenverkehr greifen über 83% der Beförderungsleistungen und im Güterverkehr über 77% der Transportleistungen auf die Straße als Infrastruktur zurück. Der hohe Grad der Vernetzung zum einen, aber auch die mit alternativen Infrastrukturen verbundenen hohen Kosten zum anderen, ermöglichen eine nur begrenzte Substituierbarkeit des Straßenverkehrs. (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2015, S. 51)

Die Verkehrssicherheit und -leistungsfähigkeit können jedoch durch Störungen eingeschränkt werden, so dass die gesamte Funktionsfähigkeit sowie andere vom Straßennetz abhängige Infrastrukturen nach dem Prinzip der Kaskadeneffekte beeinträchtigt werden. Neben einer reduzierten Alltagsmobilität können Produktivitätseinbrüche mit volkswirtschaftlichen Folgen ebenso wie Auswirkungen für die Versorgungssicherheit und damit öffentliche Sicherheit entstehen. Zudem spielen der Zustand der Verkehrsinfrastruktur sowie das Verkehrs- und Transportaufkommen eine entscheidende Rolle für die Systemanfälligkeit. Der fortschreitende Klimawandel und seine Auswirkungen führen zu sich verändernden Anforderungen an die Funktionsfähigkeit von Verkehrsinfrastrukturen. Für Schäden, die beispielsweise durch Extremwetterereignisse verursacht werden, ist der Verkehrssektor aufgrund des weitläufigen Netzes mit sehr unterschiedlichen strukturellen Umgebungen besonders vulnerabel. Auf der einen Seite entstehen durch den Temperaturanstieg und die Zunahme an heißen Tagen zusätzliche Schäden am Oberbau der Straßeninfrastruktur. Auf der anderen Seite reduzieren sich Schäden, die durch Frost, Schnee- und Eislasten beim Gefrieren sowie Räumen der Straßen entstehen, und Systemstörungen, die sich bei starkem Schneefall und damit verbundenen Straßensperrungen ergeben. Neben extremer Hitze zählen extreme Hochwasser, Sturzfluten, Stürme und gravitative Massenbewegungen zu den kritischen Ereignissen, die bisher jedoch nur mit hohen Unsicherheiten modelliert werden können. Die Sensitivität von Straßen gegenüber Überflutungen kann beispielsweise maßgeblich von der Höhenlage bzw. Lage zum Gewässer bestimmt werden, während die Sensitivität gegenüber Windbrüchen in direktem Zusammenhang mit der an die Infrastruktur angrenzenden Vegetation und ihren Baumbeständen steht. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 81)

In diesem Gutachten wird der Fokus auf die etwa 7.200 km Landesstraßen von Hessen, für die die obere Landesbehörde Hessen Mobil zuständig ist, gelegt. Hessen Mobil ist dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen unterstellt und umfasst neben der Zentrale 13 regionale Standorte sowie 46 Straßenmeistereien (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021). Alle den Landesstraßen zuzuordnenden Bauwerke werden entsprechend der DIN 1076 regelmäßig überwacht. Bestimmte Bauwerke sowie solche, die von besonderen Witterungsereignissen betroffen sind, erhalten zudem Sonderprüfungen, um die Sicherheit und Funktionsfähigkeit der Infrastruktur zu gewährleisten. Von dem Hessen Mobil zur Verfügung stehenden Budget fließt der größte Teil in Erhaltungsmaßnahmen. (dpa 2021)

Das Klima sowie ökonomische, umweltbezogene und technische Rahmenbedingungen befinden sich demnach im stetigen Wandel und müssen beim Neu-, Aus- und Umbau von Straßeninfrastrukturen berücksichtigt werden (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 79). Mit diesem Gutachten werden die durch die Klimaveränderungen zu erwartenden Auswirkungen für die Landesstraßen von Hessen Mobil systematisch aufbereitet. Das Gutachten zielt darauf ab, die Folgen für die Funktionsfähigkeit der Landstraßen zu erfassen und die wissenschaftlichen Grundlagen verschiedener Einflussfaktoren zusammenzustellen. Es wird eine Basis für die Erstellung von Handlungsempfehlungen und Leitfäden sowie ggf. für die Anpassung von Richtlinien geschaffen. Die Ergebnisse können zudem in Planungen und Programme von Hessen Mobil Eingang finden.

Für die weitere wissenschaftliche Aufbereitung werden zunächst im Kapitel 2 *Klimawandel in Hessen* die aktuell verwendeten Klimamodelle vorgestellt. Zugleich werden die Klimaregionen in Hessen mit ihren einzelnen Strukturen hinsichtlich sich verändernder klimatischer Bedingungen analysiert. In Kapitel 3 *Räumliche Gegebenheiten* folgt ergänzend eine Erläuterung der Topografie, der Gewässereinzugsgebiete, der vorherrschenden Böden und der Landnutzung, die allesamt für Hessen durch den Klimawandel beeinflusst werden. Die Darstellung der *Gefährdungen durch den Klimawandel* im Kapitel 4 zeigt auf, welche grundsätzlichen Gefährdungen bestehen und in welchen Regionen Hessens diese vorherrschend anzutreffen sind. Im Kapitel 5 werden die verschiedenen *Bauwerke* beschrieben, die bei der Abschätzung klimabedingter Gefährdungen zu berücksichtigen sind. Die möglichen *Auswirkungen der klimatischen Einflüsse auf das Straßenverkehrssystem* werden dann im Kapitel 6 dargelegt. Im abschließend Kapitel 7 *Schlussfolgerungen und Ausblick* werden die wesentlichen Erkenntnisse des Gutachtens zusammengefasst und ein Vorschlag zur weiteren Verwendung dieser Erkenntnisse unterbreitet. Im beigefügten Glossar können alle im Gutachten verwendeten wichtigen Begriffe nachgeschlagen werden.

2. Klimawandel in Hessen

Auf die regionalen und lokalen Strukturen im Land Hessen wirken verschiedene Klimagrößen. Für ein grundlegendes Verständnis der Klimaveränderungen bedarf es der Interpretation verschiedener Szenarien, die abhängig vom heutigen Handeln die zukünftige Entwicklung des Klimapfads beeinflussen.

2.1. Überblick über die Methodik der Klimaprojektionen

Mit der globalen Erderwärmung werden die Folgen des Klimawandels auch in Hessen immer deutlicher nachweisbar. Werden die Änderung der jährlichen Durchschnittstemperaturen bis 2020 betrachtet, so liegt Hessen mit einer Temperaturzunahme von 1,6 °C seit 1881¹ im deutschlandweiten Mittel (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021c). Ob und in welcher Ausprägung dieser Trend in Zukunft fortgesetzt wird, kann durch Klimaszenarien beschrieben werden. Im Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), auch: Weltklimarat) aus dem Jahr 2013/2014 veröffentlichte die Organisation vier mögliche Verläufe des weltweiten Treibhausgasausstoßes (angegeben in CO₂-Äquivalenten²) bzw. der erwarteten Änderung des Strahlungsantriebes. Diese vier „repräsentativen Konzentrationspfade“ („representative concentration pathways“, RCP) stehen stellvertretend für im wissenschaftlichen Diskurs anerkannte Szenarien und fassen diese zusammen. Das IPCC unterscheidet dabei RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2015). Die Werte geben dabei jeweils den erwarteten Strahlungsantrieb (Watt pro m²) im Jahr 2100 an. Diese Einstufungen spiegeln mögliche Emissionsverläufe wider (vgl. Abb. 1). Das Szenario RCP 2.6 etwa nimmt einen Peak der weltweiten Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 an, woraufhin ein beständiger Rückgang des Ausstoßes folgt. Dies ist nur mithilfe starker Bemühungen im Klimaschutz und negativer Emissionen (Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre) zu erreichen. RCP 4.5 und RCP 6 gehen von einem weiteren Anstieg der Emissionen bis zum Jahr 2050 (RCP 4.5) bzw. 2080 (RCP 6) aus und repräsentieren mittlere Konzentrationsverläufe. Der RCP 8.5 beschreibt einen Verlauf mit sehr hohen Treibhausgasemissionen.

¹ Beginn der Wetteraufzeichnungen

² Mithilfe von CO₂-Äquivalenten werden verschiedene Treibhausgase auf das Erwärmungspotential (Global Warming Potential, GWP) von CO₂ bezogen, um die unterschiedlich stark wirkenden Klimagase vergleichbar zu machen

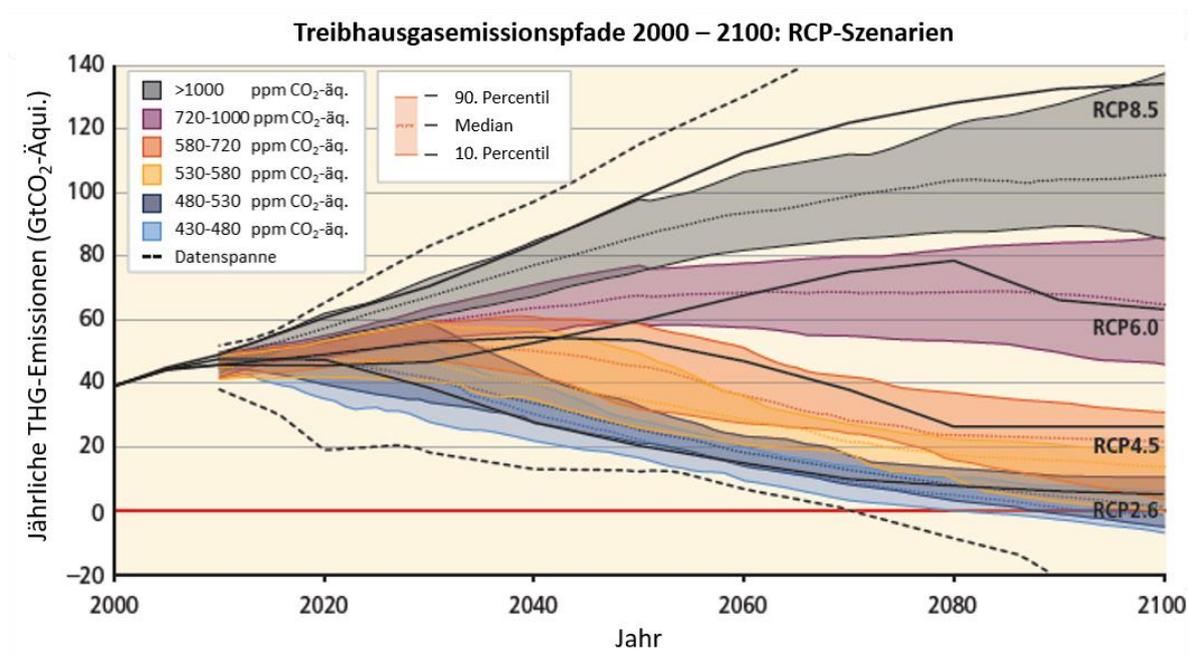


Abbildung 1: Treibhausgasemissionspfade der RCP-Szenarien im Zeitraum 2000 – 2100. Übersetzt aus Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014.

Wird der Ausstoß von Treibhausgasen der letzten 15 Jahre betrachtet, so repräsentiert dieses Szenario RCP 8.5 den aktuellen Zustand der weltweiten Emissionen am besten (Schwalm et al. 2020), und wird daher auch als „Weiter-wie-bisher“- oder „business as usual“-Szenario bezeichnet. Welche Auswirkungen entlang der verschiedenen Pfade zu erwarten sind, wird durch Klimaprojektionen im Rahmen von Projekten wie CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, in Europa: EURO-CORDEX) oder ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) abgeschätzt, welche global oder regional erstellt werden. Diese basieren auf globalen Klimamodellen (General Circulation Model, GCM), welche dynamisch auf regionale Modelle (Regional Circulation Model, RCM) skaliert werden, um geringere räumliche Ausdehnungen zu beobachten. Basierend auf den Berichten des IPCC und den Empfehlungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) werden in der Regel 30-jährige Zeiträume verwendet, um Klimaveränderungen zu beschreiben, insbesondere der Zeitraum „Mitte des Jahrhunderts“ von 2031 – 2060 sowie „Ende des Jahrhunderts“ von 2071 – 2100, welche vom DWD für die Aufbereitung der RCP-Szenarien verwendet werden (Deutscher Wetterdienst (DWD)). Bei der Beschreibung von Veränderungen durch den DWD sowie Autoren, welche sich auf die vom DWD veröffentlichten Projektionen beziehen, wird die Periode 1971 – 2000 als Referenz aufgegriffen. Das gleiche gilt für nachfolgende Beschreibungen.

Bei der Betrachtung möglicher Auswirkungen steigender Treibhausgasemissionen sollte stets berücksichtigt werden, dass diese mit vielen Unsicherheiten verbunden sind, einerseits auf der Seite der Emissionspfade, andererseits bezogen auf die Auswirkungen von Treibhausgasen auf das System Erde.

Im Folgenden wird der Fokus auf die Klimaprojektionen des Szenarios RCP 8.5 gelegt. Dieses ist zum einen, wie oben bereits aufgeführt, das Szenario, welches den Trend der letzten 15 Jahre am besten wiedergibt (Schwalm et al. 2020), zum anderen kann hierdurch „... [die] ausreichende Dimensionierung

möglicher Anpassungsmaßnahmen [sichergestellt werden].“ (Umweltbundesamt (UBA) 2021a). Um das Spektrum möglicher Klimafolgen bestmöglich abzudecken, werden jeweils das 15. und 85. Perzentil des Szenarios betrachtet. Hierdurch wird ein eher optimistischer (d.h. durch Anstrengungen im Klimaschutz liegen die Treibhausgasemissionen im unteren Bereich) sowie ein pessimistischer Fall abgebildet. Für die nahe Zukunft ergibt sich hierdurch zudem, dass die Szenarien RCP 2.6 sowie RCP 4.5 ebenfalls miteinbezogen werden, da die Unterschiede zwischen den Szenarien bei Betrachtung der gewählten Perzentilspanne hinsichtlich der Klimaauswirkungen bis zum Jahr 2061 geringfügig sind.

Für die Klimaänderungen in den Bereichen Temperatur, Niederschlag und Wind wird zunächst die aktuelle Situation erläutert, welche sich aus dem langjährigen Mittel (1971 – 2000) ergibt, beobachtbare Trends bis zum heutigen Zeitpunkt und Projektionen in die Zukunft, mit besonderem Fokus auf der Periode bis 2060. Zudem werden die mit diesen Bereichen in Verbindung stehenden Extremwetterereignisse und die damit verbundenen Prognosen erläutert.

Die analysierten Daten stammen dabei aus dem Bereich „Zeitreihen und Trends“ des DWD sowie aus den Ergebnissen des deutschen Klimaatlas, welche durch den DWD erhoben und für diesen Bericht auf das Land Hessen zugeschnitten wurden (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021a, 2021c).

2.2. Temperatur

Situation

In Hessen beträgt die Durchschnittstemperatur im Referenzzeitraum 8,5 °C (Deutschland: 8,6 °C). Über das Jahr hinweg beträgt die durchschnittliche Temperatur im Frühling 8,2 °C, im Sommer 16,5 °C, im Herbst 8,5 °C und in den Wintermonaten 0,9 °C (vgl. Abb. 2). Die wärmste Region in Hessen ist hierbei das Rhein-Main-Gebiet mit 10,7 °C Jahresdurchschnittstemperatur, wohingegen im Großteil der hessischen Mittelgebirgslagen die Temperaturen etwas unter dem Durchschnitt mit 6 bis 8 °C liegen. In sehr vereinzelt auftretenden Fällen in einzelnen Mittelgebirgsregionen (Hoher Meißner, Rothaargebirge, Rhön, Taunus) liegt die Durchschnittstemperatur knapp unter 6 °C.

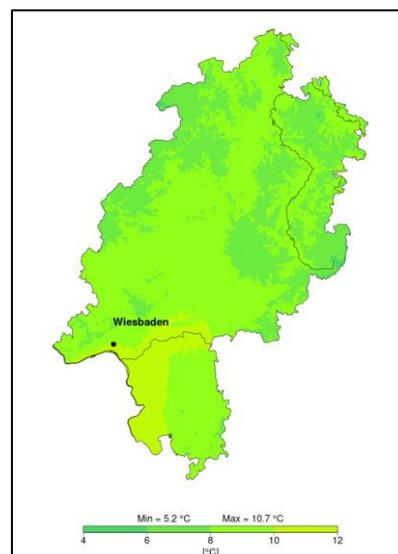


Abbildung 2: Mittlere Temperaturen in Hessen im Bezugszeitraum 1971 – 2000. Deutscher Klimaatlas (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021a).

Trend

Wird die Durchschnittstemperaturen der vergangenen zwanzig Jahre betrachtet, so sind vermehrt überdurchschnittlich warme Jahre in diesem Zeitraum aufgetreten. Acht der zehn wärmsten Jahre im Zeitraum 1951 – 2015 wurden nach dem Jahr 2000 gemessen (Brienen et al. 2020). Auch im Referenzzeitraum ist bereits der Einfluss des Klimawandels festzustellen (ebd.).

Projektion

Im Szenario RCP 8.5 ist in allen Perzentilen von einem deutlichen Temperaturanstieg auszugehen, wie in Abb. 3 dargestellt. Diese reichen von einem Anstieg der Jahresdurchschnittstemperaturen von 1,4 bis 1,6 °C (15. Perzentil) über 1,8 bis 2 °C (50. Perzentil) bis hin zu 2 bis 2,3 °C (85. Perzentil), hessenweit gibt es dabei fast keine regionalen Unterschiede.

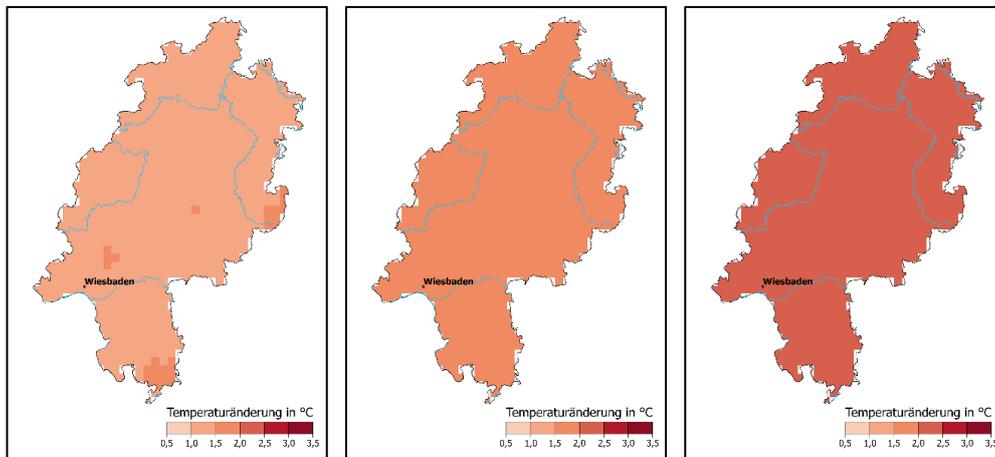


Abbildung 3: Projektionen der Jahresdurchschnittstemperatur. Links: 15. Perzentil RCP 8.5, Mitte: 50. Perzentil RCP 8.5, Rechts: 85. Perzentil RCP 8.5, Quelle Rasterdaten: DWD, 2021.

Im Frühling wird mindestens ein Anstieg der Temperaturen von 1 bis 1,5 °C erwartet. Für das 85. Perzentil wurden Anstiege zwischen 1,5 und 2 °C berechnet. Auch in den Sommermonaten ist über alle Perzentile hinweg von einem Temperaturanstieg auszugehen, welcher stärker ausfällt als im Frühjahr. In Südhessen werden hier auch für das 15. Perzentil bereits Anstiege von 1,5 bis 2 °C erwartet. Für das 85. Perzentil wird für ganz Hessen eine um 2 bis 3 °C erhöhte Temperatur projiziert. Auch für die Herbstmonate liegt der Temperaturanstieg über der Projektion für den Frühling. Hier ist von einem Anstieg zwischen 2 und 3 °C auszugehen (50. und 85. Perzentil; 15. Perzentil: 1 bis 1,5 °C), gleiches gilt für die Änderung der Temperatur im Winter. Die regionalen Unterschiede sind hierbei bis auf die erwähnte Ausnahme (Südhessen) geringfügig.

Bis zum Ende des Jahrhunderts werden mögliche Temperaturanstiege von 4–6 °C (Jahresdurchschnitt) projiziert. Im Frühjahr liegt dabei der Anstieg mit max. 3 bis 4 °C (85. Perzentil) am geringsten. In Sommer, Herbst und Winter werden 4 bis 6 °C für das 85. Perzentil berechnet, für das 15. Perzentil wird eine Steigerung der Durchschnittstemperaturen jeweils um 3 bis 4 °C projiziert.

Heiße Tage

Die Anzahl heißer Tage³ ist in Hessen recht unterschiedlich verteilt. In den höheren Lagen gab es im Referenzzeitraum 0 bis 2 heiße Tage jährlich. Im Rhein-Main-Gebiet dagegen liegt die Zahl der heißen Tage bei über 10 Tage pro Jahr (max. 15 Tage). Der Mittelwert über ganz Hessen liegt hierbei bei 5,9 Tagen im Jahr. Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist für ganz Hessen von einem Anstieg heißer Tage auszugehen. In Südhessen werden min. 6 bis 10 heiße Tage mehr pro Jahr erwartet, in Nordhessen wird ein geringerer Anstieg von 2 bis 6 Tagen jährlich berechnet (15. Perzentil). Wird das 85. Perzentil betrachtet, werden in Nordhessen 6 bis 10 heiße Tage mehr erwartet, in Mittelhessen + 10 bis 14 Tage und in Südhessen + 14 bis 18 Tage (mit Ausnahme des Odenwaldes, hier liegt die Zahl ebenfalls bei + 6 bis 10 heißen Tagen pro Jahr).

Hitzeperioden

Aktuell verzeichnet Hessen durchschnittlich eine Wärmeperiode⁴ pro Jahr. Dies wird sich bis zum Ende des Jahrhunderts jedoch deutlich verändern: Hier werden bis zu 6,4 zusätzliche Wärmeperioden prognostiziert (50. Perzentil RCP 8.5; Hübener et al. 2017).

Kalte Tage (Frosttage⁵)

Wird die Anzahl kalter Tage in Hessen betrachtet, so ist die Verteilung recht unterschiedlich. In der Region Rhein-Main gibt es jährlich durchschnittlich 52 Frosttage (max. 70 Tage), in den hessischen Mittelgebirgen teilweise über 120 Tage im Jahr. Hessenweit liegt die Anzahl an kalten Tagen bei 84,9. Klimawandelbedingt wird dies um bis zu 50 Tage abnehmen (15. Perzentil RCP 8.5). Ebenso wird die Anzahl der Eistage hessenweit abnehmen.

Vegetationsbeginn

Der Vegetationsbeginn in Hessen liegt, abhängig von der räumlichen Lage, zwischen dem 82. und dem 106. Jahrestag bzw. Ende März bis Mitte April. Im Süden Hessens liegt der Termin früher im Jahr, in den Mittelgebirgen später. Im Norden Hessens ist der Vegetationsbeginn um den 92. Jahrestag, also Anfang April. Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird sich dieser Zeitraum weiter nach vorne verschieben, im Süden etwas weniger stark um 6 bis 8 Tage, im Norden um etwa 8 bis 10 Tage. In den Mittelgebirgen und den Regionen, wo der Vegetationsbeginn bisher eher später im Jahr stattfindet, wird er in Zukunft um bis zu zwei Wochen früher stattfinden. Der Vegetationsbeginn ist direkt abhängig von der Lufttemperatur. Ein früherer Vegetationsbeginn ist ein Hinweis auf eine Verschiebung wärmerer Jahreszeiten hin zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr.

³ Heißer Tag: > 30 °C Tageshöchsttemperatur; Sommertage: Tageshöchsttemperatur > 25 °C

⁴ Wärmeperiode: min. sechs zusammenhängende Tage, an denen die maximale Tagestemperatur höher ist als die 10 % wärmsten Tage in der Referenzperiode (Hübener et al. 2017).

⁵ Frosttag: Tiefsttemperatur des Tages unter null Grad Celsius. Falls auch die Höchsttemperatur unter null Grad Celsius liegt, spricht man von einem Eistag.

Frost- und Tauwetter

Gleichzeitig hierzu ist aktuell bereits eine Verkürzung des Winters um etwa drei Wochen zu beobachten, eine leichte Abnahme der Dauer von Frühling und Herbst, sowie eine starke Verlängerung des Sommers. Damit einher geht das Einsetzen von Frost- und Tauwetter: Ersteres wird etwas später im Jahr stattfinden (ca. 6 Tage später im Dezember bis 2050 gegenüber 1952), das frühjährliche Tauwetter hingegen bereits wesentlich früher im Jahr (bis zu 14 Tage im Februar im Jahr 2050 gegenüber 1952). (Wang et al. 2021)

Mit den steigenden Temperaturen kommt es zu einer Abnahme von Frosttagen und die winterlichen Durchschnittstemperaturen erhöhen sich. Der Anstieg im Winter von bisher durchschnittlich 0,9 °C um 2,0 °C könnte vielmehr noch dazu führen, dass es zwischen Frost und Tau häufigere Wechsel gibt und die Temperaturen somit auch häufiger um den Bereich auftretender Winterglätte schwanken (4 °C). Der Frost-Tau-Wechsel hat somit einen direkten Effekt auf die Verkehrssicherheit, da Autofahrende häufiger mit sich verändernden Bedingungen rechnen müssen und von Glätte überrascht werden könnten. Da jedoch keine Daten zu Temperaturveränderungen innerhalb einzelner Tage erhoben werden können, kann hierzu keine gesicherte Aussage getroffen werden.

2.3. Niederschlag

Situation

Im langjährigen Mittel (1971 - 2000) beträgt die Niederschlagssumme in Hessen über das gesamte Jahr hinweg 776,7 mm. Während davon 180,3 mm auf das Frühjahr entfallen, ist die Niederschlagsmenge im Sommer mit 207,5 mm, im Herbst mit 196,1 mm und Winter mit 192,8 mm jeweils etwas höher. Insgesamt entspricht die Niederschlagsmenge im Mittel etwa der mittleren Niederschlagsmenge in Deutschland (787,7 mm/Jahr im Bezugszeitraum). Die größten Niederschlagsmengen entfallen in Hessen auf die Mittelgebirge, insbesondere den Vogelsberg bzw. die Rhön, den Odenwald sowie das Rothaargebirge bzw. den Westerwald (vgl. Abb. 4). Hier sind mittlere Jahresniederschläge bis zu 1.356 mm zu beobachten, während im Rhein-Main-Gebiet sowie in Nordhessen stellenweise minimale Niederschlagsmengen von 505 mm im langjährigen Mittel gemessen wurden.

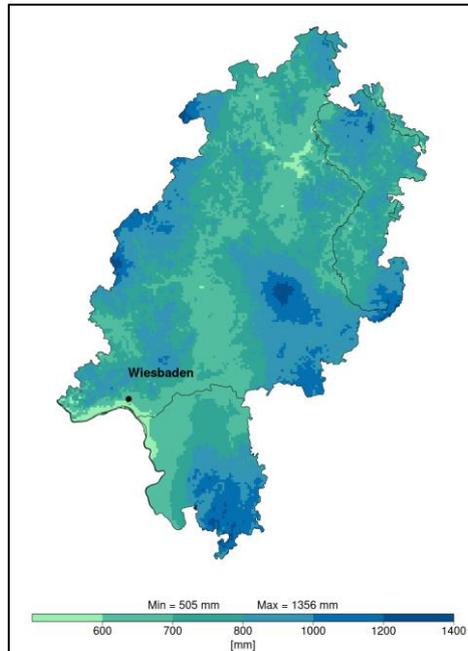


Abbildung 4: Mittlere Niederschlagsmengen in Hessen im Bezugszeitraum 1971 – 2000. Deutscher Klimaatlas (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021a).

Trend

In den letzten Jahren seit 2010 sind vermehrt negative Anomalien aufgetreten und die Niederschlagssummen lagen unter dem vieljährigen Mittelwert. Diese sind jedoch nicht als statistisch signifikante Trends anzusehen. Niederschläge sind stark variabel hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Ausprägungen. Jahre mit stark erhöhten oder verminderten Niederschlägen sind keine Ausnahmen (Martel et al. 2018).

Projektion

Für die Mitte des Jahrhunderts wird von einer leichten Zunahme der Jahresniederschlagssummen ausgegangen. Die Veränderungen belaufen sich dabei von leicht sinkenden Niederschlägen bzw. keiner Änderung für die Projektion des 15. Perzentils (- 6 bis + 3 %) über max. 8 % erhöhte Niederschläge für das 50. Perzentil und 14 % erhöhte Niederschlagssummen für das 85. Perzentil (vgl. Abb. 5).

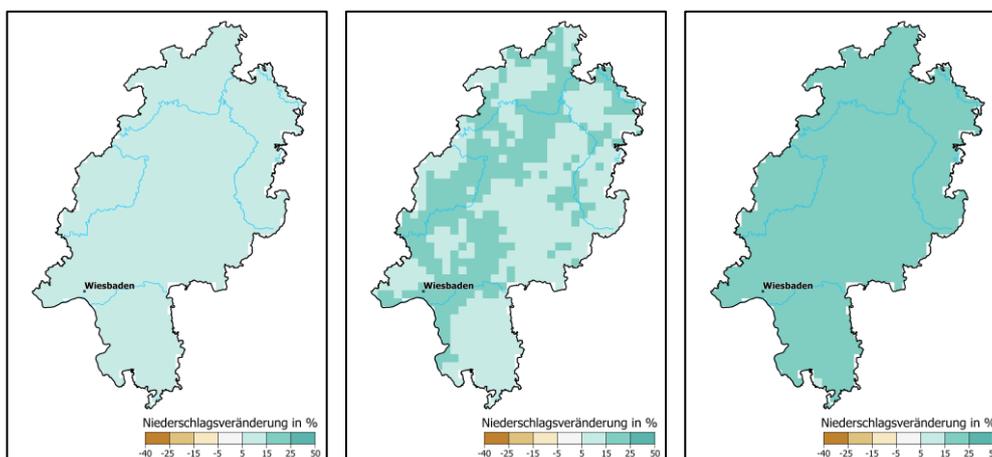


Abbildung 5: Projektionen des durchschnittlichen Jahresniederschlags. Links: 15. Perzentil RCP 8.5, Mitte: 50. Perzentil RCP 8.5, Rechts: 85. Perzentil RCP 8.5, Quelle Rasterdaten: DWD, 2021.

Über den jahreszeitlichen Verlauf werden größere Änderungen projiziert. Im Frühling könnten Niederschlagszunahmen bis zu 25 % auftreten (85. Perzentil). Im Sommer hingegen zeigt sich kein klares Bild: Für das 15. Perzentil werden verringerte Niederschläge um stellenweise bis zu – 25 % projiziert, für das 85. Perzentil dagegen Zunahmen bis + 15 %. Ein ähnliches Ergebnis liefert die Betrachtung der Niederschlagsveränderungen im Herbst. Für den Winter kann von einer deutlichen Zunahme der Niederschläge ausgegangen werden: Für die Projektionen des 85. Perzentils zeigen sich gebietsweise Zunahmen bis zu +70 % (z.B. Nordhessen und Taunus), im Mittel liegt die Zunahme bei + 20 % (Hübener et al. 2017). Wegen der gleichzeitigen Zunahme der Temperaturen werden die Winterniederschläge in den meisten Fällen als Regen niedergehen und Schnee-Ereignisse seltener werden, wodurch die Hochwassergefahr im Winter steigt (ebd.). Damit einhergehen könnte auch eine Zunahme von Glatteisregen, denn obwohl die Wahrscheinlichkeit für Frost durch den Klimawandel geringer wird, können steigende Temperaturen und erhöhte Niederschläge im Winter zu einer erhöhten Anzahl von Tagen führen, an denen warme und kalte Luftmassen aufeinandertreffen, was zu Glatteisregen führen kann (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

Für das Ende des Jahrhunderts wird von einer weiteren Zunahme der Niederschläge im Winter und Frühling ausgegangen, für Sommer und Herbst zeigt sich kein eindeutiger Trend über den Wahrscheinlichkeitsraum. Die abzulesende Tendenz der Modelle zeigt für die Sommermonate jedoch abnehmende Niederschläge (Hübener et al. 2017). Die aufgeführten Änderungen können längere Trockenperioden im Sommer sowie längere Regenperioden im Winter auslösen (ebd.).

Starkregenereignisse⁶

Im Bereich Niederschläge ist die Anzahl der Starkregentage ein entscheidender Faktor, da hierdurch weitreichende Schäden entstehen und Starkregenereignisse nur schwer vorhergesagt werden können (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

Im Referenzzeitraum fanden solche Ereignisse an nur vier Tagen im Jahr statt. Im betrachteten Szenario RCP8.5 kann eine mögliche Zunahme um maximal fast + 40 % gezeigt werden, bzw. + 1,7 Tagen pro Jahr (85. Perzentil; 15. Perzentil: + 0,3 Tage; Umweltbundesamt (UBA) 2021b). Die verschiedenen Projektionen und Wahrscheinlichkeitsräume zeigen hier alle Unterschiede und die Tendenz kann nicht als eindeutig angesehen werden. (Hübener et al. 2017) Analysen deuten jedoch auf eine Zunahme der Intensität einzelner Ereignisse hin, so dass Hochwasserereignisse in Folge von Starkregen, bedingt durch den Klimawandel, vermutlich zunehmen werden (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

Hochwasserereignisse

Im Herbst, Winter und Frühling treten zunehmend länger andauernde Niederschlagsereignisse auf. Die gezielte Betrachtung von Zukunftsprojektionen in Hinblick auf Flusshochwasser zeigen eine Steigerung von Flusshochwasserereignissen um 20 – 100 % bis zur Mitte des Jahrhunderts und eine Zunahme um bis zu 200 % bis zum Ende des Jahrhunderts, wodurch die Befahrbarkeit von Flüssen negativ beeinflusst werden kann und Verlagerungen auf andere Verkehrsträger nötig sein können. Zudem verkürzen sich

⁶ Starkregentag: Tage mit Niederschlagssumme > 20mm/Tag

die Wiederkehrintervalle von extremen Flusshochwasserereignissen von 100 Jahren auf etwa 30 bis 50 Jahre. (Rauthe et al. 2020b)

Niedrigwasserereignisse

Durch die Verschiebung von Niederschlagsereignissen rechnen Experten insbesondere bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme von Dauer und Intensität von Niedrigwasserereignissen, was deutliche Auswirkungen auf die Transportkapazität der Wasserstraßen haben wird (bis zu – 10 % zur Mitte des Jahrhunderts und bis zu - 25 % bis zum Ende des Jahrhunderts; Nilson et al. (2020)).

2.4. Wind

Das Umweltbundesamt schreibt in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (Umweltbundesamt (UBA) 2021c): „Hinsichtlich der Windgeschwindigkeiten in Deutschland sind die zukünftigen Änderungen (gegenüber dem Bezugszeitraum) im Vergleich zu anderen Variablen (Temperatur, Niederschlag) gering.“ Aussagen zur Veränderung von Windgeschwindigkeiten sind generell mit größeren Unsicherheiten verbunden und Projektionen zu Starkwindereignissen können aufgrund der Auflösung der verwendeten Modelle nur begrenzt simuliert werden (Umweltbundesamt (UBA) 2021b). Sowohl für mittlere Windgeschwindigkeiten sowie für Starkwinde können in den vorhandenen Simulationen nur geringfügige Änderungen von $\pm 5\%$ festgestellt werden (Bott et al. 2020). Dies bezieht sich in Hinblick auf die Windgeschwindigkeiten sowohl auf die Mitte als auch auf das Ende des Jahrhunderts. Zwischen den beiden Szenario-Zeiträumen lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen.

2.5. Klimaregionen in Hessen

Das Umweltbundesamt hat in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (Umweltbundesamt (UBA) 2021c) sogenannte Klimaraumtypen für Deutschland auf Basis des Bezugszeitraumes 1971 – 2000 bestimmt, welche „[...] hinsichtlich ihres Klimas relativ homogene, voneinander abgrenzbare Räume [sind], die mittels einer Clusteranalyse identifiziert wurden.“ (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 102)

Die Unterscheidung der Raumtypen basiert auf einer Auswahl von Indikatoren, die das Klima im jeweiligen Gebiet beschreiben:

- Mittlere Niederschlag Winter (Millimeter)
- Mittlere Niederschlag Sommer (Millimeter)
- Mittlere Temperatur Winter (Grad Celsius)
- Mittlere Temperatur Sommer (Grad Celsius)
- Trockentage im Winter (Anzahl Tage)
- Trockentage im Sommer (Anzahl Tage)
- Starkregentage (Anzahl Tage)
- Extremer Wind (Meter pro Sekunde)
- Heiße Tage (Anzahl Tage)

- Tropische Nächte (Anzahl Tage)
- Frosttage (Anzahl Tage)
- Kontinentalität (Grad Celsius)
- Tägliche Temperaturspanne Winter (Grad Celsius)
- Tägliche Temperaturspanne Sommer (Grad Celsius) (UBA 2021a, S. 104–105).

Die Bestimmung erfolgt mittels einer Clusteranalyse: Für alle Indikatoren wurde der Mittelwert aller Rasterzellen innerhalb eines Clusters bestimmt. Entsprechend dieser Mittelwerte, der geographischen Lage sowie der Topografie sind sieben Cluster zu unterscheiden. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c)

In Hessen tritt eine große Variation an Clustern auf. Bis auf die Cluster „Küste“ und „Gebirge“ sind alle Klimaraumtypen vertreten (vgl. Abb. 6).

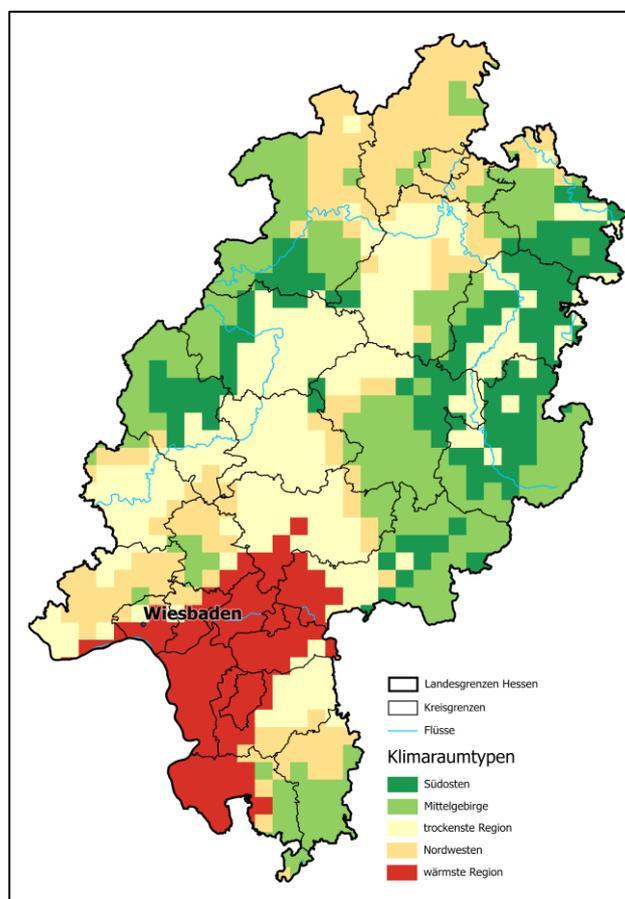
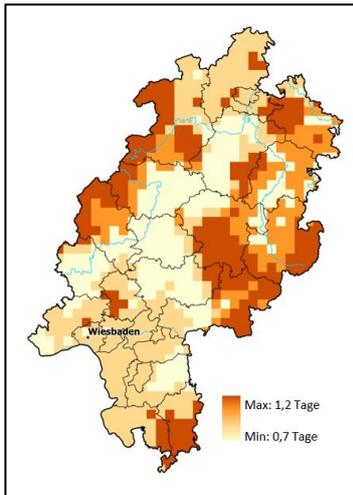


Abbildung 6: Klimaraumtypen in Hessen. Nach KWRA 2021 (Umweltbundesamt (UBA) 2021c).

Das Umweltbundesamt beschreibt die Klimaregionen sowie ihre künftigen Entwicklungen in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (Umweltbundesamt (UBA) 2021b, 2021c) für Deutschland. Für die unterschiedlichen Klimaraumtypen wurden die Veränderungen für die Mitte des Jahrhunderts sowie für das Ende des Jahrhunderts untersucht und dabei das 50. Perzentil des Szenarios RCP 8.5 betrachtet. Die nachfolgenden für ganz Hessen beschriebenen Projektionen wurden hierfür von Eurac Research im Auftrag des Umweltbundesamtes in höherer räumlicher Auflösung berechnet und beschrieben. Die

nachfolgende Darstellung zeigt die Änderungssignale einzelner Indikatoren, wie sie in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse beschrieben werden.

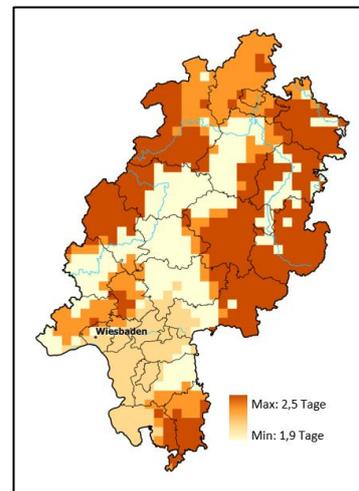


Die Zunahme von **Starkniederschlagstagen** (vgl. Datenblatt N1) ist in Abbildung 7 für die abgeleiteten Regionen dargestellt. In den Klimaraumtypen *Südosten* sowie *Mittelgebirge* sind die Veränderungen überdurchschnittlich ansteigend, in allen Regionen ist jedoch eine Zunahme von Starkregentagen um durchschnittlich 0,9 Tage pro Jahr zu erwarten (+ 23 %).

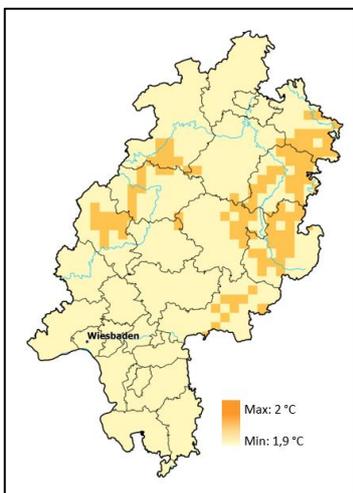
Abbildung 7: Zunahme von Starkniederschlagsereignissen in den Klimaregionen Hessens. Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

Trockenperioden, ausgelöst durch erhöhte Temperaturen, welche die Evaporation erhöhen, und sinkende Sommerniederschläge werden in zukünftigen Sommern häufiger erwartet. In ganz Hessen steigt die Anzahl der Trockentag um 2 Tage pro Jahr bis zur Mitte des Jahrhunderts an, dabei überdurchschnittlich in den Klimaraumtypen *Mittelgebirge* (+ 2,4 Tage) und *Südosten* (+ 2,5 Tage), in welchen gleichzeitig auch die Gefahr von Starkregenereignissen steigt (vgl. Abbildung 8 und Datenblatt N3).

Abbildung 8: Zunahme von Trockentagen im Sommer in den Klimaregionen Hessens. Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).



Hessenweit steigen die Temperaturen im Winter um 0,9 °C. In der Region *Südosten* ist dieser Anstieg mit 2,0 °C etwas höher als in den anderen Regionen, wie in Abbildung 9 dargestellt. Damit könnten sich **saisonale Niederschlagsmuster** verändern: Hessenweit wird vermehrt mit Regen anstelle von



Schnee zu rechnen sein (vgl. Datenblatt N2), und damit, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, im Winter das Risiko für Überschwemmungen, Erd- und Hangrutschungen steigen. Die steigenden Temperaturen im Winter sorgen außerdem für eine Verschiebung des Frost- und Tauzeitraumes (vgl. Datenblatt T2), und könnten zu vermehrten Frost-Tau-Wechseln innerhalb eines Tagesanges führen (vgl. Datenblatt T3).

Abbildung 9: Zunahme der durchschnittlichen Wintertemperatur in den Klimaregionen Hessens. Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

Durchschnittlich sinkt die Anzahl der **Frosttage** in Hessen um 29 Tage pro Jahr. In den *Mittelgebirgen* ist die Abnahme mit -32 Tagen am höchsten, in der *wärmsten Region*, wo jetzt bereits die Anzahl der Frosttage gering ist, am niedrigsten. Abbildung 10 zeigt die Veränderung im hessenweiten Vergleich. Die Auswirkungen einer sinkenden Anzahl von Frosttagen sind in den Datenblättern T2 und T3 beschrieben.

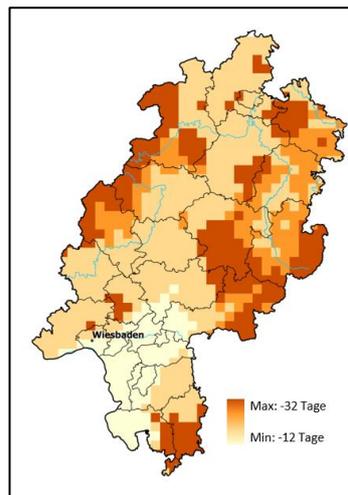


Abbildung 10: Veränderung der Frosttage in den Klimaregionen Hessens. Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

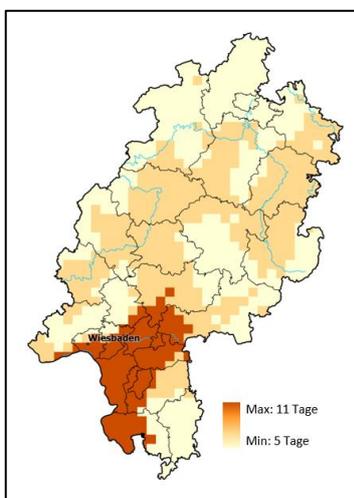


Abbildung 11 zeigt die Veränderung der Anzahl heißer Tage in Hessen. Im Cluster *wärmste Region* wird die Anzahl heißer Tage und damit auch die Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen (vgl. Datenblatt T1) regional überdurchschnittlich stark ansteigen (+ 11 Tage). Im Klimaraumtyp *trockenste Region* ist die Veränderung ebenfalls überdurchschnittlich (+ 8 Tage). Der Mittelwert für ganz Hessen liegt hierbei bei + 7,4 Tagen.

Abbildung 11: Veränderung der Anzahl von heißen Tagen in den Klimaregionen Hessens. Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

Für die Veränderung im Bereich Windgeschwindigkeiten und Starkwind (vgl. Datenblatt S1) von - 5 % bis + 5 % kann keine genaue Aussage zu einzelnen Regionen in Hessen getroffen werden.

Regionsspezifische Zusammenfassung

Das Rhein-Main-Gebiet einschließlich der Bergstraße (Abb. 6) kann überwiegend dem Cluster „*Wärmste Region*“ zugeordnet werden, welches hohe Temperaturen, viele heiße Tage sowie tropische Nächte aufweist. Für die beiden letztgenannten ist eine Zunahme dieser Ereignisse zu erwarten (+ 5 tropische Nächte und + 11 heiße Tage). Die Zahl der Trockentage nimmt um 2 Tage pro Jahr zu. Zudem muss mit einer Zunahme des mittleren Niederschlags in den Wintermonaten gerechnet werden (+ 11 %). Die Starkregentage nehmen um durchschnittlich 0,9 Tage pro Jahr zu. Die Wintertemperaturen steigen um 0,9°C. Die Anzahl der Frosttage sinkt um ca. 24 Tage.

Zum Cluster „*Mittelgebirge*“ gehören die südlichen Teile des Odenwalds sowie große Teile des Spessarts und der Südrhön, Teile des osthessischen Berglands/Vogelsberg/Röhn (Vogelsbergkreis, Landkreis Fulda, Schwalm-Eder-Kreis, Werra-Meißner-Kreis) sowie des Westerwaldes und des Bergischen Lands/Sauerlands (Lahn-Dill-Kreis, Landkreis Marburg-Biedenkopf, Landkreis Waldeck-Frankenberg). Dessen Klima ist kühl-gemäßigt und zeichnet sich durch hohe Niederschlagssummen in

den Wintermonaten sowie, im Vergleich mit den anderen Clustern, häufige Starkregenereignisse aus. In diesen Regionen ist mit einer Zunahme der Niederschläge in den Wintermonaten zu rechnen (+ 4 %), zugleich mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer (- 3 %). Die Zahl der Starkregentage wird ganzjährig überdurchschnittlich zunehmen (+ 17 % bzw. 1,2 Tage), wie die Anzahl von trockenen Tagen im Sommer (+ 2,5 Tage). Die Wintertemperaturen steigen um 0,9 °C. Die Frosttage nehmen um bis zu 32 Tage im Jahr ab.

Dem Cluster „*Nordwesten*“, welches Regionen vor allem im Bereich des Oberen Weser-Leineberglands, und im nördlichen Teil des Westhessischen Berg- und Beckenlands aber auch im Taunus und dem nördlichen Odenwald umfasst, herrscht ein gemäßigtes Klima mit geringen Temperaturschwankungen sowohl bei der Betrachtung des Tages- als auch des Jahresganges. In dieser Region kommt es zu einem etwas geringeren Temperaturanstieg als in den anderen Regionen (+ 1,9 °C im Winter und + 1,8 °C im Sommer verglichen mit mittleren Anstiegen von 2,0 °C bzw. 1,9 °C) und weniger Frosttagen (- 37 %, entspricht ca. 25 Tagen). Die Anzahl der Starkregentage wird um 0,8 Tage (ca. 25 %) steigen, ebenso die Zahl der Temperaturextreme (+ 8 heiße Tage).

Im Lahn- und dem Fuldatale sowie in den Regionen in Schwalm-Eder und Wetterau sowie Teilen Darmstadt-Dieburgs überwiegt das Cluster „*trockenste Region*“. Diese Klimaregion weist die höchsten Sommertemperaturen, die meisten Trockentage sowie die geringsten Niederschläge auf. Auch in Zukunft repräsentiert dieses Cluster deutschlandweit die trockensten Gebiete. In diesen steigt die Anzahl der Starkregentage um 0,7 Tage (+ 30 %), der heißen Tage (+ 8 Tage) und der tropischen Nächte überdurchschnittlich an, die Anzahl der Frosttage sinkt mit 28 Tagen überdurchschnittlich ab (- 35 %).

Zum Cluster „*Südosten*“ gehören in Hessen vor allem die an das Fulda-, das Werra- und das Kinzigtal angrenzenden Regionen sowie die Übergänge vom Westerwald bzw. des Bergischen Lands/Sauerlands zum Westhessischen Berg- und Beckenland. Der Indikator „Kontinentalität“ ist hier im Vergleich zu den anderen Regionen am größten und damit die Spannweite zwischen Sommer- und Wintertemperaturen. Hier ist eine überdurchschnittliche Erwärmung zu erwarten (+ 2,1 °C im Winter, + 2,0 °C im Sommer), die mit „deutlich mehr heißen Tage[n]“ einhergeht. Die Sommer werden sich durch zurückgehende Niederschläge und häufigere Trockenperioden (Zunahme der Trockentage um 2,5 Tage pro Jahr) auszeichnen. Allerdings wird die Anzahl der Starkregentage in diesen Regionen stark ansteigen (+ 20 %, bzw. 1 Tag). Die Anzahl der Frosttage sinkt um 30 Tage.

3. Räumliche Gegebenheiten

Die im Kapitel 2 beschriebenen Auswirkungen der Klimaveränderung, vor allem Starkniederschlagsereignisse, Hitze- und Trockenphasen und häufigerer Frost-Tau-Wechsel, führen zu einem zu veränderten direkten Belastungen von Straßeninfrastrukturen. Zum anderen entstehen auch indirekten Belastungen, die sich durch die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die unmittelbare Umgebung wie auch die Region ergeben. Diese zukünftigen lokalen und regionalen Auswirkungen erlangen vor allem dann eine besondere Bedeutung, wenn bei Bau und Unterhaltung von Straßeninfrastrukturen Annahmen über lokale und regionale Auswirkungen getroffen werden, die nicht den zukünftigen Entwicklungen entsprechen. Damit steigen das Risiko von Systemstörungen im Verkehr und das Risiko von Beeinträchtigungen der Funktionsfähigkeit der Straßeninfrastruktur. Insbesondere durch Extremwetterereignisse, die aufgrund der Klimaveränderungen in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen, entstehen solche zusätzlichen Gefährdungspotenziale (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 79).

Dabei spielt der lokal vorhandene Boden in Kombination mit dem Relief und der Landnutzung eine entscheidende Rolle für die Abschätzung eines klimabedingt steigenden Gefährdungspotenzials. Entscheidend ist hierbei, wie anfällig die Gegebenheit gegenüber Niederschlägen ist, die räumlich und zeitlich stark variieren und dadurch in der Folge einerseits unterschiedliche Mengen an Boden abtragen (Glaser et al. 2010) bzw. inwieweit Niederschläge im Boden gespeichert werden bzw. versickern können.

Bodenerosion

Bei Bodenverlagerungen ist zwischen der Massenbewegung, die durch Schwerkraft in Gang gesetzt wird, und dem Massentransport, der zusätzlich auch eine treibende Kraft wie beispielsweise Wasser, Eis oder Wind umfasst, zu unterscheiden (Brunotte et al. 2002b). Simulationen und Modelle zu dadurch bedingten Bodenverlagerungen für größere Räume sind aufgrund der räumlich und zeitlich komplexen Prozesse bis heute mit keiner ausreichenden Aussagekraft möglich (Eitel und Bork 2008).

Bodenerosion ist die Abtragung von Bodenmaterial und entsteht durch abfließendes Wasser, Wind, Schneeschmelze und gravitative Bodenverlagerung (Duttmann et al. 2011). Sie ist auf Klimaveränderungen und klimatische Extremwetterereignisse sowie menschliches Zutun zurückzuführen, das sich durch Vegetationszerstörung und nachfolgende Landnutzung äußert (Eitel und Bork 2008) und den größten Teil der Bodendegradation verursacht. Unter Bodendegradation ist die dauerhafte und nicht mehr rückgängig machbare Veränderungen sowohl der Strukturen als auch der Funktionen von Böden zu verstehen (Brunotte et al. 2002a). Aufgrund des veränderten Stoff-, Wasser und Energiehaushalts kommt es mit physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen zur Überlastung des Systems, was sich u.a. in der Entstehung von zusätzlichen Erosionen ausdrückt (ebd.; (Glaser et al. 2010).

Somit können Naturereignisse wie auch menschliche Tätigkeiten, die Änderungen der Pflanzendecke und der obersten Bodenschichten durch beispielsweise landwirtschaftliche Nutzung bewirken, das Gleichgewicht von Bodenabtragung und Bodenreuebildung stören und einen Zustand der beschleunigten Erosion herbeiführen. Sturzregen bewirken bei Hangflächen nicht nur starke

Massentransporte, vielmehr werden durch die Bodenverlagerungen auch Poren zugedeckt, die der Filtration dienen. Aufgrund der damit verbundenen verminderten Aufnahmefähigkeit wird der Oberflächenabfluss und damit auch die zusätzliche Abtragung erhöht. Die verminderte Infiltrationswirkung ist insbesondere bei tonhaltigen Böden vorzufinden. Fehlende Pflanzendecken verringern zudem den bei Erosionen auftretenden Widerstand, so dass durch die hohe Erosionskraft ein schneller Oberflächenabfluss herbeigeführt wird (Strahler und Strahler 2009).

Daraus lässt sich folgern, dass der Sedimentaustrag (abgeführte Sedimentmenge) und der Oberflächenabfluss ausschlaggebend von Art und Dichte der zu schützenden Vegetationsdecke abhängen. Der Sedimentaustrag von Ackerland kann im Vergleich zu Weideland das Zehnfache, im Vergleich zu einer bewaldeten Kieferpflanzung das Tausendfache annehmen. Um der beschleunigten Bodenerosion entgegenzuwirken, kann eine Terrassierung von Steilhängen und eine Dauerbepflanzung mit dichter Vegetationsdecke Abhilfe schaffen. Die Erodierbarkeit von Böden wird in der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) durch den K-Faktor beschrieben (→Glossar: Bodenabtragungsgleichung).

Wasserspeicherkapazität und Wasserdurchlässigkeit eines Bodens

Der Umfang einer Bodenerosion hängt auch von der Wasserspeicherkapazität bzw. der Wasserdurchlässigkeit eines Bodens ab. Die Wasserspeicherkapazität eines Bodens bezeichnet die Fähigkeit, Wasser aufzunehmen und gegen die Schwerkraft zu halten. Die Wasserdurchlässigkeit des Bodens entspricht der schwerkraftbedingten Abflussgeschwindigkeit, mit der das Wasser im Boden versickert. (Stahr 2014a)

Bei einer hohen Wasserspeicherkapazität oder einer hohen Wasserdurchlässigkeit eines Bodens (s. Kap. 3.2) kann zumindest ein Teil des Niederschlags durch den Boden aufgenommen werden und reduziert die Bodenerosion, die durch einen oberflächigen Abfluss des Niederschlagswassers entstehen würde. Dabei beeinflussen die Topografie und die Landbewirtschaftung die Speicherung und Versickerung von Wasser (s. Kap. 3.1 und 3.3.).

3.1. Topografische Struktur

Die topografische Struktur einer Region, hier beschränkt auf das Relief und das Gewässereinzugsgebiet, bestimmen maßgeblich den Oberflächenabfluss sowie die Erosions- und Massentransportprozesse (Brunotte et al. 2002c).

Relief

Die Bildung von Reliefs basiert auf Verwitterungs- und Abtragungsprozessen, die abhängig vom Klima unterschiedlich ausgeprägt sind. Daher sind im Zusammenspiel mit dem Klima die geologischen Gegebenheiten mit unterschiedlich erosionsbeständigen Gesteinen sowie die geomorphologische Dynamik, die sich aus der Reliefzusammensetzung verschiedener Gesteinsschichten ergibt, für die Oberflächenformen wesentlich (Glaser et al. 2010). Sie werden in die drei Grundtypen Hohlformen, Vollformen und flächenartige Formen gegliedert (Brunotte et al. 2002c).

Bei Hohlformen fallen die Hänge von mehreren Seiten zu einer Fläche, einem Punkt oder einer Linie hin ab (Brunotte et al. 2002b). Dabei können sie unterschiedliche Ausprägungen erfahren, die durch

ihre jeweiligen Hangneigungen charakterisiert werden (→Glossar: Relief; Hohlformen). Kommt es zu Niederschlägen, so treten bei Hohlformen konzentrierte Oberflächenabflüsse im tiefsten Bereich auf. In Abhängigkeit von der Erodierbarkeit des vorhandenen Bodens können solche Oberflächenabflüsse zudem die Bodenerosion befördern, so dass sich neben Wasser auch der Bodenabtrag im tiefsten Bereich der Form sammelt. In der Bodenabtragungsgleichung sind hierfür der Hanglängenfaktor und Hangneigungsfaktor maßgebend (→Glossar: Bodenabtragungsgleichung). Zur Abschätzung lokaler Gefährdungspotenziale bei Hohlformen des Reliefs sind daher die potenziell auftretenden Wassermengen, der Bodenabtrag sowie der weitere Abfluss zu analysieren.

Bei Vollformen hingegen fallen die Hänge ausgehend von einer Fläche, einem Punkt oder einer Linie ab (Brunotte et al. 2002c). Da bei Vollformen als Relief auftretendes Niederschlagswasser als Oberflächenabfluss in verschiedene Richtungen abgeleitet wird, besteht hier vor allem das Risiko einer Bodenerosion aufgrund von Oberflächenabflüssen. Gleichwohl sollte betrachtet werden, ob es doch an bestimmten Stellen außerhalb der Vollform zu Konzentrationen von Oberflächenabflüssen und Bodenabtrag kommen könnte.

Flächenartige Formen weisen nur geringe Neigungen auf und können als Strukturflächen, wenn die Abtragungsfäche sich an die Untergrundstruktur anlehnt, oder als Skulpturflächen (Schichtstufen), beim Schnitt des geologischen Baus, klassifiziert werden (Brunotte et al. 2002a). Aufgrund der geringen Neigung solcher Formen besteht nur ein reduzierter Oberflächenabfluss und Bodenabtrag, der in der Regel kein besonderes Gefährdungspotenzial bedeutet.

Relieftypen in Hessen

Mit einer Gesamtfläche von etwa 21.115 km² erstreckt sich Hessen über Teile der deutschen Mittelgebirgsschwelle, im Süden und Südosten über die Südwestdeutsche Schichtstufenlandschaft und im Südwesten über das Oberrheinische Tiefland (Michael 2020) (vgl. Abbildung 12).

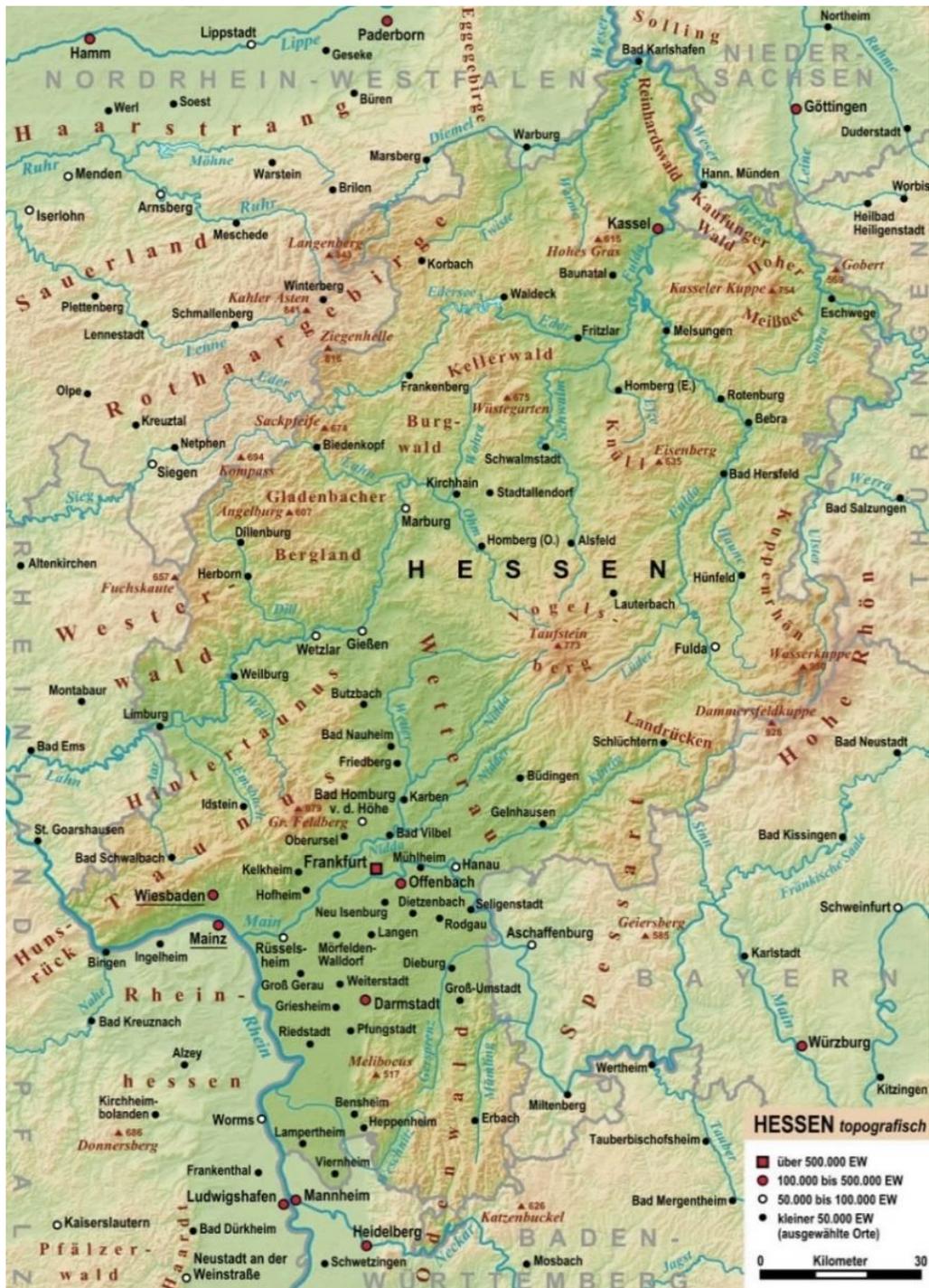


Abbildung 12: Topografische Karte Hessen, (Michael 2020)

Mittelgebirge

Mittelgebirge sind meist alte Rumpfgebirge oder Tafelbergländer mit im Vergleich zu Hochgebirgen geringeren Zerschneidungen. Die Landschaft ist oft weitgespannt und flachwellig. Mit absoluten Höhen von 500 bis 1.500 Meter und Höhenunterschieden von 300 bis 1.000 Metern gibt es ggf. nur wenige Höhenstufen.

Die größte Fläche Hessens besteht aus der deutschen Mittelgebirgsschwelle mit zahlreichen Mittelgebirgen: Rhön, Taunus, Rothaargebirge, Vogelsberg, Hoher Meißner, Kellerwald, Westerwald,

Söhre, Kaufunger Wald, Knüllgebirge, Habichtswald, Gladenbacher Bergland, Odenwald, Stölzinger Gebirge, Spessart, Schlierbachswald, Seulingswald, Richelsdorfer Gebirge und Reinhardswald.

Mittelgebirge weisen typischerweise höhere Niederschlagsmengen auf. Mit steigender Höhe nimmt die mittlere Niederschlagshöhe zu. Die Verteilung der Niederschläge in den Mittelgebirgen hängt von deren Ausrichtung ab (Brunotte et al. 2002b). So weist eine dem Atlantik zugekehrte Westseite eines Mittelgebirges höhere Niederschläge auf als seine Ostseite.

Schichtstufen

Schichtstufenlandschaften sind durch ihren geologischen Untergrund geprägt und somit in allen Klimazonen der Erde vorzufinden (Brunotte 2007). Sie entstehen, wenn der geologische Untergrund aus unterschiedlichen abtragungsresistenten Schichten mit schwacher Neigung besteht. Daher kennzeichnet sich ihr Querprofil durch einen steil ansteigenden Stufenhang und einer nahezu ebenen Stufenfläche. Unterschieden werden die Walm-Schichtstufe, die Trauf-Schichtstufe mit Walm und die Trauf-Schichtstufe ohne Walm (→Glossar: Relief; Schichtstufen). An der Stufenstirn können Quellerosionen und lokale Rutschungen sowie Bergstürze auftreten (Brunotte et al. 2002c).

Die Südwestdeutsche Stufenlandschaft umfasst in Hessen den Odenwald und den Spessart, die ansonsten gleichartige Klimabedingungen wie die nördlich liegenden Mittelgebirge aufweisen.

Tiefland

Die Tiefebene bzw. das Tiefland (< 200 Meter über NN) ist zusammen mit der Mittelgebirgsebene (200 bis 1.500 Meter über NN) und dem Hochland bzw. Plateau (> 1.500 Meter über NN) dem Flachland zuzuordnen. Ein Flachland ist ein Gebiet, das ausgedehnt, flach und von nur geringen Höhenunterschieden sowie geringen Hangneigungswinkeln geprägt ist. Dennoch können auch hier durch bspw. Endmoränenzüge, kleine Täler und Dünen lokal beträchtliche Höhenunterschiede auftreten (Brunotte et al. 2002a).

Die Beckenlandschaft des Oberrheingrabens bildet die Oberrheinische Tiefebene. Weitere flächenmäßig kleinere Becken sind in Richtung Nordosten das Gießener Becken, das Amöneburger Becken und die Westhessische Senke. Sofern nicht lokale Besonderheiten auftreten, tritt verstärkter Oberflächenabfluss sowie Bodenerosionen in diesen Regionen nicht auf.

Gewässereinzugsgebiet

Für den Abfluss anfallender Niederschläge ist die Betrachtung der Gewässereinzugsgebiete, die sich aus den geologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen ergeben, essenziell. Ein Einzugsgebiet wird durch einen Fluss und seine Nebenflüsse entwässert und von benachbarten Einzugsgebieten durch Wasserscheiden getrennt. Zu unterscheiden sind oberirdische und unterirdische Einzugsbereiche, die in ihrer räumlichen Ausdehnung voneinander abweichen (Brunotte et al. 2002a). Oberirdische Einzugsbereiche werden mit Reliefformen wie beispielsweise Bergen, Kämmen und Rücken begrenzt. Wasserstauende und -leitende Gesteinsschichten bilden hingegen den unterirdischen Einzugsbereich (Brunotte et al. 2002d).

Mit 215 km Länge bildet die Fulda den längsten Flussabschnitt in Hessen, gefolgt von der Lahn (166 km) und der Eder (129 km). Hierdurch ergeben sich die Einzugsgebiete Fulda mit den Flüssen Eder und

Fulda sowie Lahn. Mit dem Rhein im Südwesten, der auf einer Länge von 107 km die Grenze zu Rheinland-Pfalz bildet, und dem Main in Süd- und Mittelhessen werden weitere große Einzugsgebiete gebildet. Andere wichtige Flüsse und Einzugsgebiete sind Weser und Werra. Zudem ergibt sich durch den Neckar im Süden ein weiteres Einzugsgebiet. (Michael 2020) (vgl. Abb. 13)

Von der Größe des Einzugsbereichs sowie den geologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen im Einzugsgebiet hängt das Risiko von Hochwasserereignissen nach Starkregenfällen ab.

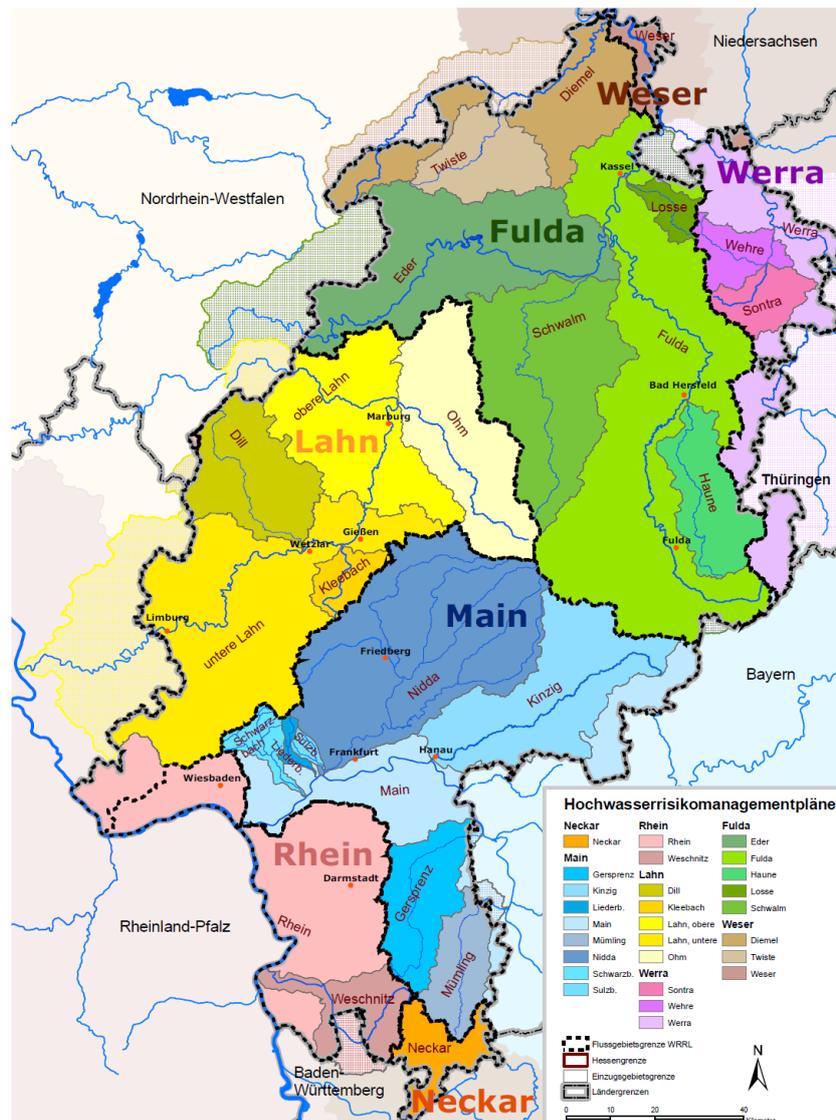


Abbildung 13: Flusseinzugsgebiete, (Regierungspräsidium Darmstadt 2015)

3.2. Bodentypen und Bodenarten

Neben der Topografie sind die Böden selbst entscheidend, um Aussagen zu Risiken möglicher Bodenerosionen treffen zu können (Strahler und Strahler 2009).

Der Term Boden beschreibt die oberste Schicht der Erdoberfläche. Böden bestehen aus Gesteinsstücken (Mineralien) und zersetzten sowie nichtzersetzten organischen Stoffen (Humus). Des Weiteren sind Bodenwasser, Bodenluft und Bodenorganismen wichtige Bestandteile von Böden. Aufgrund ihres Nährstoffreichtums sind Böden Lebensraum vieler Arten und tragen einen wichtigen

Teil zu der Funktion von Ökosystemen bei. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021c)

In der Literatur finden sich verschiedene Klassifizierungen von Böden.

Bodentypen

Bei der Klassifizierung in Bodentypen werden Böden anhand gemeinsamer Merkmale wie der historischen Entstehungsgeschichte und dem Aufbau der horizontalen Profile (Horizonte) gegliedert. Diese Systematik reicht von einer groben bis hin zu einer sehr feinen Differenzierung in Subtypen. Die grobe Einteilung fußt auf dem zentralen Einfluss des Wassers auf die Entwicklung des Bodens. (Umweltbundesamt 2010)

Da sich Böden ständig im Wandel befinden, beschreibt die Horizontabfolge eines Bodens seinen aktuellen Entwicklungsstand, jedoch nicht seinen endgültigen Zustand. Böden entstehen grundsätzlich durch die Verwitterung von anstehendem Gestein. Verwitterung bedeutet hier alle physikalischen und chemischen Prozesse, die zur Lockerung und Zerstörung von Gesteinen führen. (GeoHilfe 2020).

Der oberste Horizont eines Bodens wird durch den Buchstaben A gekennzeichnet. Er enthält als humoser Oberboden für das Pflanzenwachstum lebensnotwendige Mineral- und Nährstoffe und erhöht die Wasserhaltekapazität des Bodens. Darunter folgt in manchen Fällen ein Unterboden (B), der aus verwittertem Ausgangsgestein besteht. Dieser liegt auf einem mit dem Buchstaben C gekennzeichneten Untergrund auf, dem unverwitterten Ausgangsgestein (Umweltbundesamt 2010). Während die Mächtigkeit von Böden im Bergland oft nur wenige Zentimeter beträgt, können Böden im Tiefland und insbesondere an den Mittel- und Unterläufen von Flüssen eine Dicke von mehreren Metern erreichen (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021c)

Bodenarten

Böden werden aber auch anhand der prozentualen Anteile der Korngrößenfraktionen in vier Hauptbodenarten Sand, Schluff, Ton und Lehm unterschieden. (bodenwelten 2021). Durch die Korngrößenverteilung und die Porengrößenverteilung wird die Wasserspeicherfähigkeit, die Wasserdurchlässigkeit und die Erodierbarkeit eines Bodens bestimmt.

Die **Wasserspeicherfähigkeit** eines Bodens hängt von der Aufteilung des Porenvolumens eines Bodens, die Porengrößenverteilung, ab, die wiederum mit der Korngrößenverteilung korreliert. Je feiner die Poren sind, z.B. bei Ton, desto stärker wirken Kapillarkräfte und Adsorptionskräfte, die das Wasser gegen die Schwerkraft halten. Während die Entwässerung eines Bodens von den groben zu den feinen Poren abläuft, werden bei einer langsamen Bewässerung aufgrund der Kapillaren zuerst die feineren Poren gefüllt. Bei einer hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers hängt die Befüllung der Poren von der Luftverdrängung und Kompression ab.

Die **Wasserdurchlässigkeit** des Bodens entspricht der schwerkraftbedingten Abflussgeschwindigkeit, mit der das Wasser im Boden versickert. Je grobkörniger ein Boden ist, desto höher ist auch die Wasserdurchlässigkeit, da hier Kapillarkräfte nur eingeschränkt wirken. Demnach fließt das Wasser in tonhaltigen Böden mit einem sehr feinkörnigen Gefüge weitaus langsamer ab als in schluff- oder sandhaltigen Böden, welche über größere Korngrößen verfügen.

Die **Erodierbarkeit der Böden** wird in der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) durch den K-Faktor (→Glossar: Bodenabtragungsgleichung) beschrieben. Abb. 14 zeigt beispielhaft die kleinräumige Strukturierung des K-Faktors. Dieser gibt an, wie leicht Bodenmaterial aus dem Aggregatgefüge gelöst und abgetragen wird. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind Bodenart, Humusgehalt, Aggregatgefüge, Wasserleitfähigkeit und der Anteil des Grobbodens > 2 mm (Schwertmann et al., 1987: 19, DIN 19708).

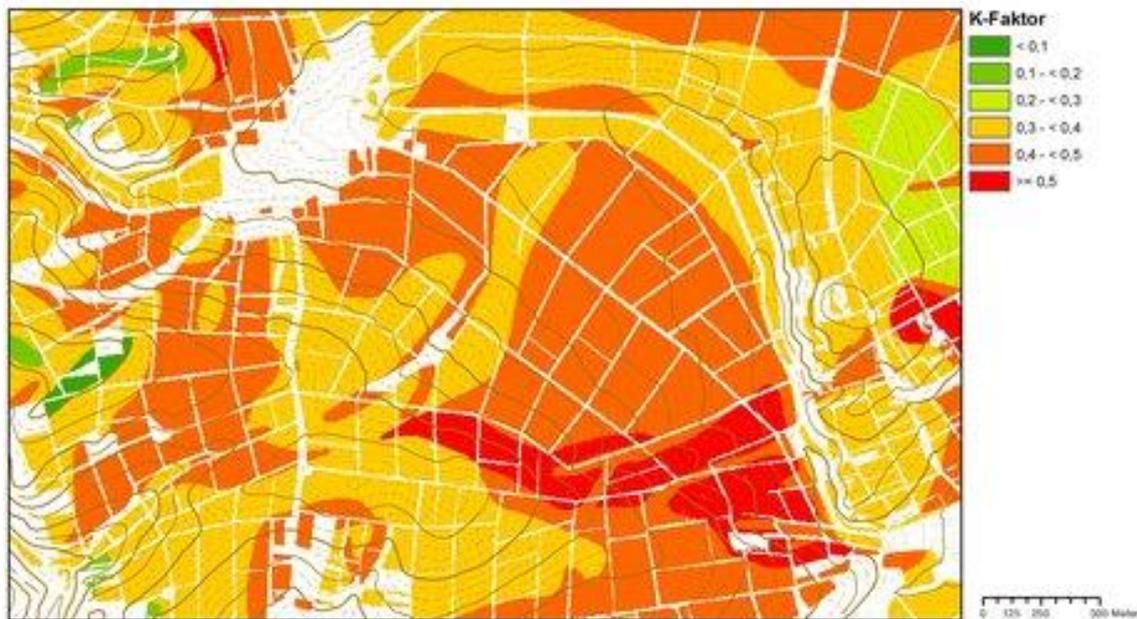


Abbildung 14: K-Faktor einer ausgewählten Fläche, (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021e)

Schluffige und feinsandreiche Böden sind im Gegensatz zu Ton- und Sandböden besonders erosionsanfällig (s. Abb. 22). Das Vorhandensein von Humus und Grobboden senkt die Erosionsanfälligkeit genauso wie ein feinkrümeliges Gefüge oder eine hohe Wasserdurchlässigkeit. Ist der Humusanteil hingegen gering, kann es bei Starkregen zu Bodenabtrag kommen. Der resultierende Massentransport führt zur Überspülung niedrigerliegender Gebiete. (BGR o. J.b; HLNUG o. D.; Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Die Bodenart, der Humus- und Grobbodengehalt (Grundlage für K_b , K_h und K_s) sind weitgehend statische Größen, während Aggregatgröße und die Wasserdurchlässigkeit des Oberbodens im Jahresverlauf sehr stark variieren. Für letztere liegen zeitlich und räumlich nur punktuelle Untersuchungen vor, so dass auf diese Parameter z. B. für eine landesweite Betrachtung verzichtet werden muss.

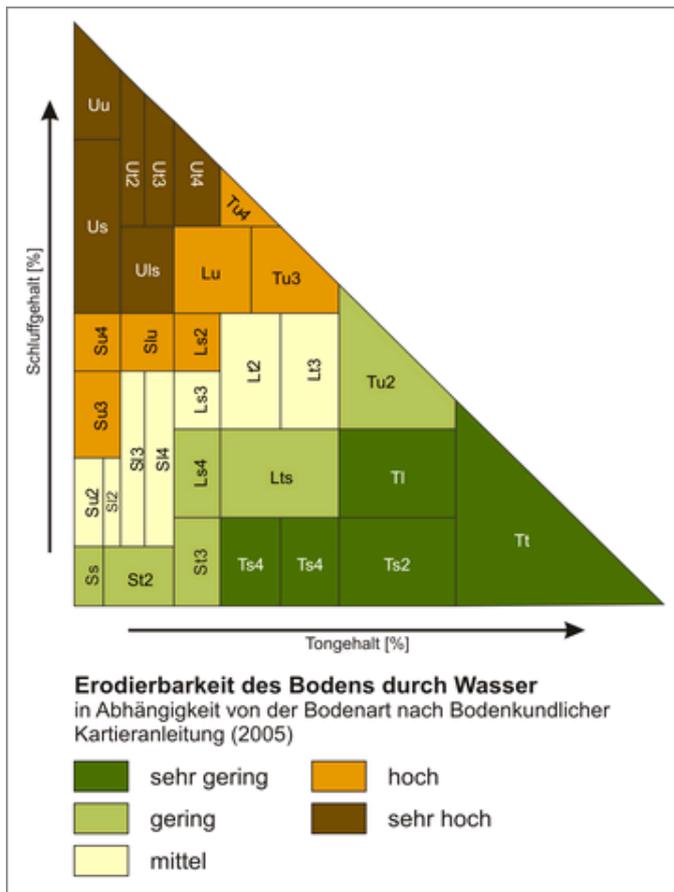


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Bodenart und Erodierbarkeit von Böden durch Wasser, (BGR o. J.b)

Bodentypen in Hessen

Im nachfolgenden Teil werden die in Hessen anzutreffenden Bodentypen (Abb. 16) hinsichtlich ihrer Beeinflussung durch den Klimawandel analysiert.

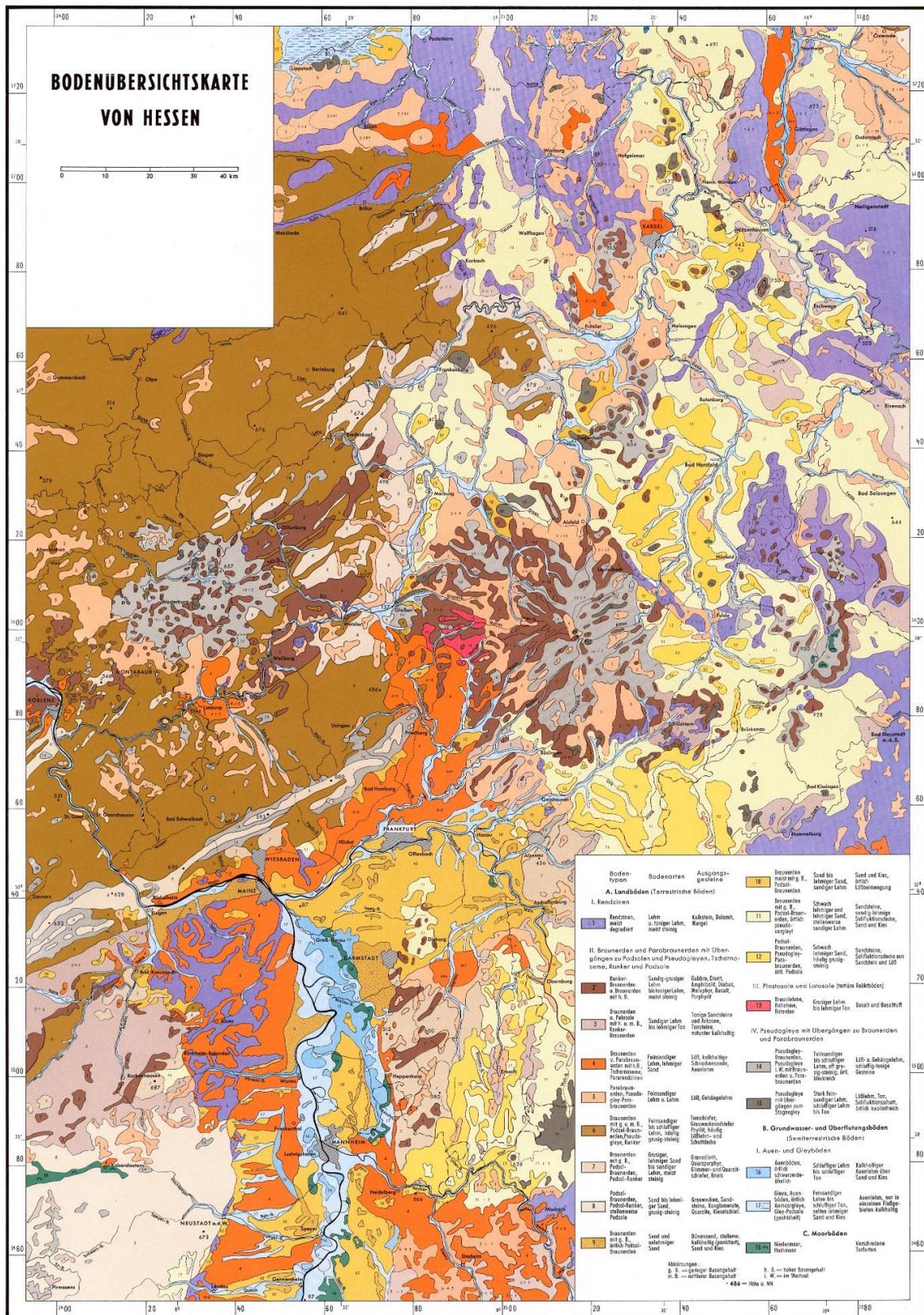


Abbildung 16: Bodenübersichtskarte von Hessen, (Hessisches Landesamt für geschichtliche Landeskunde (HLGL) 2021)

Braunerde und Parabraunerde

Der bei weitem größte Anteil der Bodengeologie Hessens ist durch ein Vorkommen der Bodentypen Braunerde und Parabraunerde gekennzeichnet. Von den typischen Braunerden gibt es eine Vielzahl an Varietäten, die in Ausprägung, Entwicklung und Eigenschaften geringfügig abweichen. Diese Bodentypen sind generell weit verbreitet in Mitteleuropa. Braunerden und ihre Sub- und Mischtypen sind in nahezu allen Regionen Hessens anzutreffen (Koppe 2019).

Abhängig vom Grad der Verwitterung kann die Körnung der Braunerde von steinig über sandig bis lehmig variieren. Dementsprechend sind auch die Wasserdurchlässigkeit und die Wasserspeicherfähigkeit sowie das Risiko der Bodenerosion von den lokalen Gegebenheiten abhängig.

Die Parabraunerden sind vermehrt im Tiefland zu finden. Aufgrund ihres Ausgangsgesteins, Löss und Gehängelehm, bestehen sie aus feinsandigem Lehm oder Lehm. Somit können sie Wasser gut speichern und weisen eher eine Resistenz gegenüber Bodenerosion auf.

Rendzinen

Insbesondere im Norden und Osten von Hessen haben sich aufgrund kalkhaltigen Untergrunds der Bodentyp Rendzina ausgebildet. Diese Böden bestehen aus Lehm oder tonigem Lehm mit zumeist hohem Steinanteil. Insofern besteht bei diesen Böden auch eine gute Wasserspeicherfähigkeit bei geringer Erodierbarkeit.

Auen- und Gleyböden

Die Böden in der Umgebung der Wasserläufe Hessens, neben Rhein und Main gibt es in Hessen viele weitere große und kleine Flüsse und Bäche, lassen sich in die Bodentypen Auenböden und Gley einteilen. Auenböden befinden sich zumeist im regelmäßig überfluteten Auenbereich von Flüssen. Dabei weisen die Unterläufe der Flüsse im Tiefland im größeren Umfang Auenböden auf, während schmalere und steilere Oberläufe im Bergland nur selten größere Auen umfassen.

Gleye werden maßgeblich vom Grundwasser und dessen Schwankungen beeinflusst. Sie sind vermehrt an Standorten vorzufinden, an denen sich das Sickerwasser der Umgebung sammelt.

Beiden Böden bestehen aus feinsandigem Lehm bis schluffigem Ton. Sie weisen gleichzeitig hohe Grundwasserstände auf und sind wenig wasserdurchlässig. Da sie vor allem in ebenen Lagen zu finden sind, erfolgt dort regelmäßig keine Bodenerosion. Eine Ausnahme hierbei bilden Hochwasserereignisse.

Auswirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche Bodentypen

Der Klimawandel wirkt sich auch auf Böden aus. So steigen analog zu den Lufttemperaturen auch die Bodentemperaturen. Wichtiger ist aber die Veränderung der Niederschlagsmuster. Während im Winter mehr Niederschlag fällt, und dieser vermehrt in Form von Regen auftritt, treffen im Sommer mehr Starkregenereignisse und längere Trockenphasen zusammen (s. Kap. 2.3). Die veränderten Niederschlagsmuster führen zu einem Anstieg der Bodenerosion.

Abhängig von den unterschiedlichen Bodentypen sind auch die mit dem Klimawandel verbundenen lokalen Auswirkungen. Sandige Böden sind aufgrund der hohen Wasserdurchlässigkeit weniger stark

erosionsgefährdet. Zudem bedarf es einer hohen Energie durch den Abfluss, um die schwereren Sandpartikel zu mobilisieren. Schluff- und tonhaltige Böden sind aufgrund des hohen Zusammenhalts (Kohäsion) der Bodenteilchen ebenfalls wenig anfällig gegenüber dem Splash-Effekt und auch besser vor Abschwemmung durch Oberflächenabfluss geschützt (→Glossar: Splash-Effekt). Am stärksten gefährdet sind schluff- und feinstsandreiche Böden. Die Partikel weisen einen geringen Zusammenhalt auf und sind vergleichsweise leicht. (BGR o. J.b)

Das Vorhandensein von Humus und Grobboden senkt die Erosionsanfälligkeit genauso wie ein feinkrümeliges Gefüge oder eine hohe Wasserdurchlässigkeit. Ist der Humusanteil hingegen gering, kann es bei Starkregen zu Bodenabtrag kommen. Der resultierende Massentransport führt zur Überspülung niedrigerliegender Gebiete. (BGR o. J.b; HLNUG o. D.; Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)(Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Flachgründige und sandige Böden sind zudem stärker von längeren Trockenperioden betroffen, da sie geringe Wasserspeicherkapazitäten aufweisen als z.B. mittel- bis tiefgründige Lehmböden. Ausgetrocknete Böden, vor allem schluff- und tonhaltige Böden, neigen bei kurzen und sehr intensiven Regenereignissen zur Oberflächenverschlammung. Im Gegensatz zu durchfeuchteten Böden kann hier nur wenig Wasser während des Starkregens aufgenommen werden. Dadurch steigt die Gefahr von Oberflächenabfluss und Bodenerosion deutlich an (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021d).

Die Bodenerosion wirkt sich nachteilig auf die unmittelbar betroffene Fläche selbst aus, ist aber auch eine Gefahr für umliegende Gebiete. Neben einer Schädigung der Bodenfruchtbarkeit (sog. „On-site Schäden“) kann die Bodenerosion sich unter Umständen in flächenhaften oder linienhaften Formen auf angrenzenden Flächen fortsetzen, indem sie geschützte Biotop schädigt, Boden, Nährstoffe und Schadstoffe in Gewässer schwemmt sowie Verkehrswege oder bebauten Gelände gefährdet (sog. „Off-site-Schäden“) (Friedrich et al. 2006).

Auch der Effekt von Winderosion auf Straßen sollte nicht unterschätzt werden. Abtrag der lockeren Oberschicht nach intensiver Bearbeitung kann Straßen und Brücken schädigen und den Straßenverkehr maßgeblich beeinträchtigen. Erosionen durch Wind treten in Hessen nur lokal und zeitlich sehr begrenzt auf, so sie hier eine untergeordnete Rolle einnehmen (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021f)

Schlussfolgerungen

In Abhängigkeit vom Bodentyp und der Bodenart (ohne Berücksichtigung von Relief und Landnutzung) eines Standorts ist dieser unterschiedlich stark anfällig für Bodenerosion:

- Die in vielen Regionen Hessens vorzufindenden Braunerden haben eine stark eingeschränkte Wasseraufnahmekapazität. Dies führt insbesondere in Hanglagen zu Oberflächenabfluss.
- Die Erosionsgefährdung durch Wasser ist auf vielen kleinen Flächen in Ost-, Mittel- und Nordhessens mittel bis hoch. Während der potenzielle Bodenabtrag durch Wasser im hessischen

Ried und in der Bergstraße als sehr gering eingestuft wird, wird die Erodierbarkeit der Ackerböden dort als sehr hoch eingestuft. Dies liegt am Vorkommen von Lössböden.

- In Hessen sind es vor allem die durch Böden aus Löss und Buntsandstein geprägten Landschaften, in denen unter Ackernutzung die Gefahr von Bodenerosion durch Wasser besteht. Dies betrifft beispielsweise Lössböden im Rheingau, in der Wetterau und in der niederhessischen Senke. Auch das Limburger Becken zwischen Limburg und Sankt Goar mit seinen in den Unterlauf der Lahn mündenden Zubringerbächen (Aar, Aubach, Dörsbach, Emsbach, Mühlbach) ist aufgrund seines hohen Lössanteils gefährdet. Ebenso sind feinkörnig verwitterte Böden in den osthessischen Buntsandsteingebiete betroffen.
- Parabraunerden auf Lössunterböden, wie sie im Limburger Becken, im Vogelsberg und im Schwalm-Eder-Kreis vorkommen, sind bei Nichtbedeckung durch eine schützende Grünschlicht stark erosionsgefährdet.
- Die in Hessen zu findenden Rendzinen bestehen zumeist aus den Bodenarten Lehm und tonhaltigem Lehm auf einem steinigem Kalkboden (Lagis Karte). Diese Kombination trägt nicht zu einer erhöhten Erosionsgefahr bei. Das gleiche gilt für Pararendzinen, die aufgrund ihrer hohen Skelettgehalte nicht von Abschwemmungen betroffen sind. Da allerdings der obere der zwei Horizonte meist flachgründig ist, kommt es bei übermäßiger Beweidung zur Freilegung des unteren Gesteinshorizonts. Eine landwirtschaftliche Nutzung von Rendzinen sollte also vermieden werden (Stahr 2014c).
- Auenböden und Gleye sind von Schwankungen des Grundwassers abhängig und daher ebenfalls Klimagefahren ausgesetzt. Pseudogleye in Hessen sind meist feinsandig bis stark feinsandig oder schluffiger Lehm. Da diese Bodenart leichter weggespült wird, sind Pseudogleye bei starker Austrocknung durch Hitzewellen erosionsgefährdet. Sie sind insbesondere im Vogelsberg und vereinzelt in Nordhessen zu finden.

Lokal bestehende Erosionsgefährdung (Abb. 17) werden in Hessen im Erosionsatlas 2018 dokumentiert, der Teil des Bodenviewers des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie ist.

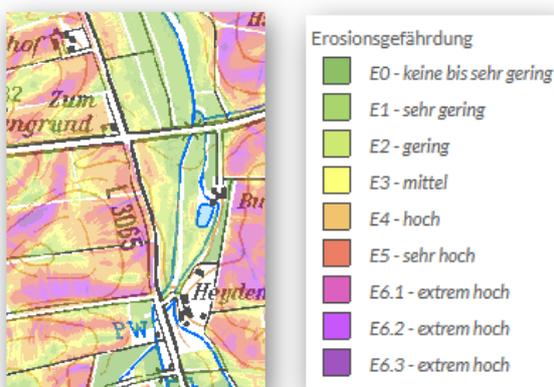


Abbildung 17: Auszug aus dem Erosionsatlas 2018 des Landes Hessen (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2018)

3.3. Landwirtschaftliche Nutzflächen und forstwirtschaftliche Flächen in Hessen

Neben Relief und Böden ist der Einfluss der Landnutzung für das Ausmaß der Bodenerosion entscheidend (Eitel und Bork 2008).

Landwirtschaftliche Nutzflächen

Im Jahr 2020 betrug die landwirtschaftlich genutzte Fläche Hessens 765.000 Hektar (ha). Davon fielen mit 295.000 ha ca. 37 % auf Grünland und mit 465.000 ha ca. 62 % auf Ackerland (Statistik.Hessen 2021). Als Ackerland werden Felder bezeichnet, die regelmäßig bearbeitet werden und einer Fruchtfolge unterliegen. Unter Fruchtfolgen sind die zeitliche Abfolge des Anbaus unterschiedlicher Kulturpflanzen zu verstehen. Auf einem gegebenen Feld werden einjährige Kulturen in einer geplanten Struktur oder Abfolge im Wechsel angebaut, so dass auf demselben Feld niemals ohne Unterbrechung Kulturpflanzen derselben Art angebaut werden. Normalerweise wechseln die Kulturen jährlich, aber auch eine mehrjährige Fruchtfolge ist möglich (Europa Zollportal 2021). Wichtigste Kulturart in Hessen ist der Winterweizen. Weitere Beispiele für weitverbreitete Kulturpflanzen sind Mais, Winterraps und Zuckerrüben. Gemüse, Feldfrüchte und Kartoffeln nehmen hingegen nur eine untergeordnete Rolle ein (Statistik.Hessen 2021).

Da die Erodierbarkeit von Bodenflächen mit ihrer jeweiligen Nutzung zusammenhängt, sind Flächen, welche landwirtschaftlich intensiv genutzt werden, besonders anfällig für Erosionen. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Bei Böden mit höherem Steinanteil wird für eine erleichterte Bewirtschaftung der Steinanteil reduziert. Allerdings wirken diese Steine als Hindernisse erosionshemmend. Eine Bereinigung von Hindernissen erhöht die Wahrscheinlichkeit des Oberflächenabtrags (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK-NRW) 2007). Diese steigt insbesondere bei einer Nutzung von Ackerland in Hanglagen.
- Die Nutzung moderner Landwirtschaftsmaschinen wirkt sich ebenfalls auf die Erodierbarkeit der Flächen aus. Zum einen führt die intensive Bodenbearbeitung zu einer Zerstörung der Aggregate, was eine Verschlammung des Bodens zur Folge hat. Zum anderen kommt es durch die Benutzung schwerer Maschinen zu einer Verdichtung des Bodens. Regenwasser versickert schlechter, was zu einem erhöhten Oberflächenabfluss führt. (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK-NRW) 2007)
- Eine intensive landwirtschaftliche Nutzung führt zu einer Abnutzung der obersten schützenden Schicht aus Pflanzen oder Mulch und zur Freilegung der unteren Schichten (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK-NRW) 2007).
- Wenn eine ackerbauliche Nutzung bei hängigem Gelände erfolgt, sollte parallel zur Höhenlinie gewirtschaftet werden, um einen Abfluss der Niederschläge in Richtung der Hangneigung zumindest zu verzögern und eine Ausbildung von Abflussrinnen zu minimieren.

Letztendlich hat die gewählte Anbaukultur einen großen Einfluss auf die Erodierbarkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen. Unter anderem trägt ein weiter Reihenabstand der Feldfrüchte maßgeblich zur Erodierbarkeit bei (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK-NRW) 2007). Die Auswirkungen unterschiedlicher Anbaukulturen auf Böden werden im nachfolgenden Abschnitt

näher betrachtet. Mit dem C-Faktor in der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung, auch bekannt als Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor, wird der langfristig zu erwartende, mittlere Bodenabtrag durch die landwirtschaftliche Nutzung einer Fläche angegeben. Dieser beschreibt den potenziellen Bodenabtrag unter Berücksichtigung bestimmter Fruchtfolgen (→Glossar: Bodenabtragungsgleichung). Dementsprechend wird jeder Anbaukultur ein eigener C-Faktor zugewiesen. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Tabelle 1 liefert einen Überblick über die C-Faktoren verschiedener Anbaukulturen, welche typisch für die hessische Landwirtschaft sind. Die ideale agrarische Nutzung einer Fläche stellt hierbei das Dauergrünland dar. Der C-Faktor von 0,004 resultiert hierbei aus der geringen Bearbeitung der Fläche und der oberen Grasschicht, welche als Schutzschicht auf dem humosen A-Horizont aufliegt. Mit einem C-Faktor von 0,66 stellt der Spargelanbau den Extremfall bei den für Hessen typischen Anbaukulturen dar. Grund dafür ist die extreme Auflockerung des A-Horizonts. Mit dem absolut höchsten Wert dient die Schwarzbrache als Referenzpunkt in der Landwirtschaft. Ihr wird ein C-Faktor von 1,0 zugewiesen. Schwarzbrachen sind vegetationslose, stark aufgelockerten Böden. Aufgrund dieser Eigenschaften bieten Schwarzbrachen Angriffsmöglichkeiten für Wind und Wasser und sollten keinesfalls auf anderswertig erosionsgefährdeten Flächen umgesetzt werden. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021a, 2021b)

Tabelle 1: C-Faktoren verschiedener Anbaukulturen, welche in Hessen anzutreffen sind, (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021a)

Angebaute Kultur	Verbreitung in Hessen	C-Faktor	Angebaute Kultur	Verbreitung in Hessen	C-Faktor
Mais	50.000 ha	0,35	Kartoffeln		0,29
Raps	45.000 ha	0,1	Zuckerrüben	17.100 ha	0,32
Sonnenblumen		0,32	Rebland		0,31
Winterweizen	272.000 ha	0,1	Gemüse		0,24
Dauergrünland		0,004	Spargel		0,66

Um einen visuellen Eindruck über die Sensitivität des C-Faktors und die Unterschiede beim Anbau verschiedener Anbaukulturen zu erlangen, wurde die Bodenabtragsgefährdung nach ABAG in zwei Szenarien berechnet. Szenario 1 beschreibt den Anbau von Mais, welcher mit 0,35 einen hohen C-Faktor aufweist. Dies bedeutet, dass Maisanbau Bodenerosion stark begünstigt. Nichtsdestotrotz hat der Maisanbau in Hessen in den letzten Jahren stetig zugenommen. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Abb. 18 zeigt exemplarisch, wie sich der Anbau von Mais in verschiedenen topographischen Ebenen auf die Erosionsgefährdung auswirkt. Es ist erkennbar, dass in vielen Teilen eine hohe bis sehr hohe Erosionsgefährdung besteht.

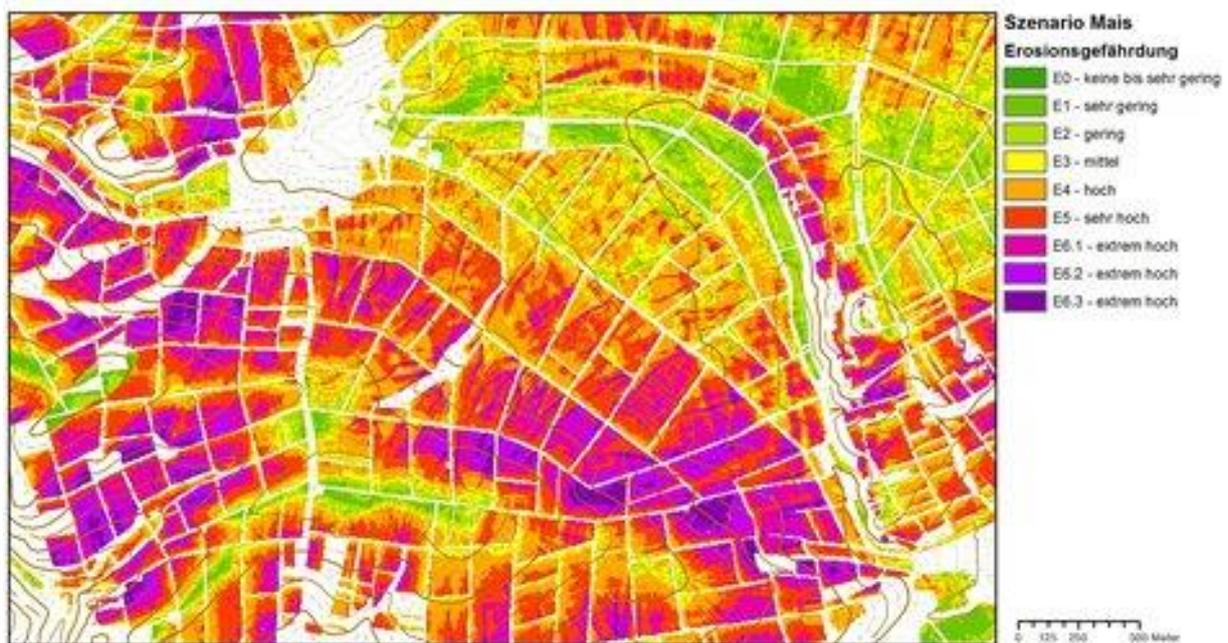


Abbildung 18: C-Faktor von Maiskulturen, (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Winterweizen stellt mit 34 % der hessischen Ackerfläche eine der am weitest verbreiteten Anbaukulturen dar. Mit einem C-Faktor von 0,12 ist der Winterweizenanbau jedoch weitaus weniger erosionsgefährdend als der Maisanbau. Diese grundsätzlich geringere Erosionsgefährdung spiegelt sich auch in Abb. 19 wider. Die meisten Flächen sind demnach nur mittel oder gering erosionsgefährdet. Dies bedeutet, dass Weizenanbau bei den meisten topographischen Bedingungen wenig zu der Erosionsgefährdung des Bodens beiträgt. Im frühen Stadium der Bestellung mit Winterweizen sind die Ackerflächen über eine relativ lange Zeit jedoch nur gering bedeckt, so dass eine Anfälligkeit für Oberflächenerosionen gegeben ist (Kremer 2017). Einzelne Flächen können aber auch beim Anbau von Winterweizen eine sehr hohe bzw. extrem hohe Bodenerosionsgefährdung aufweisen, wenn sie beispielsweise eine große Hanglänge aufweisen und die Bewirtschaftung mit dem Gefälle erfolgt (Hiller 2007).



Abbildung 19: C-Faktor von Winterweizenkulturen, (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Um Bodenerosionen entgegenzuwirken sind daher folgende Maßnahmen zielführend:

- Schützende Pflanzendecke, um Oberboden zu beschützen.
- Bepflanzung oder Begrünung von Flächen in der Nähe von Siedlungen und Infrastrukturen, um Schäden durch Erosion zu vermeiden.
- Anbaukulturen mit einem hohen C-Faktor nicht in Hanglage oder auf generell erosionsgefährdeten Flächen anbauen.
- Ausrichtung der Bewirtschaftung vertikal zum Hangverlauf.

Forstwirtschaftliche Flächen

Die Waldfläche in Hessen erstreckt sich über 894.180 ha. Dies sind 42 % der gesamten hessischen Landesfläche, womit Hessen unter den deutschen Bundesländern eine Spitzenposition beim relativen Anteil der Waldfläche einnimmt. Hohe Waldanteile mit über 50 % finden sich im Odenwald, Spessart, Taunus, dem nördlichen hessischen Schiefergebirge und im Weserbergland. Die Wälder Hessens sind demnach vermehrt im Süden und Norden des Bundeslandes zu finden. Ihre Lage deckt sich mit derer der Mittelgebirge. Viele Wälder Hessens sind in Hanglage gelegen. In der Wetterau und dem Gießener Becken mit ihrer eher ebenen Topografie beträgt der Waldanteil daher nur 15 %. Hier dominieren fruchtbare Böden mit einem hohen Lössanteil, die schon seit frühester Zeit landwirtschaftlich genutzt werden. Auch in der Rhein-Main-Ebene ist der relativ geringe Waldanteil von 26 % zum einen auf die der Landwirtschaft zugutekommenden nährstoffreichen Böden zurückzuführen. Zum anderen weist diese Region einen hohen Urbanisierungsgrad auf, was mit einem hohen Flächenbedarf für den Bau von Siedlungen und Verkehrsinfrastruktur einhergeht. (umwelt.hessen.de 2021)

Wälder bilden einen natürlichen Schutz vor Klimaauswirkungen für den Menschen und Infrastrukturen. Dies liegt unter anderem daran, dass Waldgebiete durch ihren dauerhaften Bewuchs

erosionshemmend wirken. Somit bieten Wälder eine Schutzfunktion gegen Hochwasser und Erdrutsche infolge von Erosion (Paar et al. 2016).

Allerdings beeinträchtigen der Klimawandel und seine Auswirkungen diese Schutzfunktion der Wälder:

- Starke Winde können einen Windwurf von Bäumen auslösen.
- Langanhaltende Staunässe führt zu Sauerstoffmangel und kann daher ein Absterben von Baumwurzeln auslösen und so die Standsicherheit betroffener Bäume gefährden.
- Lange Trockenperioden mit absinkendem Grundwasserspiegel führen zu einer unzureichenden Wasserversorgung von Bäumen. Dies kann zum Absterben einzelner Äste oder ganzer Bäume führen und damit eine Gefährdung durch Astbruch bzw. der Standsicherheit ganzer Bäume führen.
- Langandauernde Hitzewellen steigern das Risiko von Waldbränden. Ausgedehnte Brände wie in Südeuropa stellen aktuell keine Gefahr für hessische Wälder dar, jedoch waren im Jahr 2020 auch in Hessen rund 26 Hektar Wald von Bränden betroffen (HessenForst 2021).
- Die Ausbreitung von Schädlingen durch höhere Temperaturen und die Schwächung der Abwehrkräfte von Bäumen wirkt sich nachteilig auf den Baumbestand aus. Schädlinge wie der Borkenkäfer befallen vor allem Fichten, was das großflächige Absterben dieses für die Forstwirtschaft wichtigen Baumes zur Folge hat. Auch Pilzkulturen und durch längere Trockenheit ausgetrocknetes Holz können ein Umknicken der Bäume zur Folge haben. Obwohl Wälder die Hochwassergefahr drastisch reduzieren, kann Holz im Hochwasserfall aus Wäldern gespült werden und als Treibholz zum Aufstau von Wasser an Straßen und Brücken führen sowie diese beschädigen.

Demnach stellen der Windwurf von Bäumen oder das Abrutschen von Böden die größten Gefahren für den Menschen und Infrastrukturen dar, die von Waldgebieten ausgehen.

Trotz der genannten Auswirkung durch Klimaveränderungen haben Waldgebiete generell ein weitaus geringeres Potential zur Schädigung von Infrastrukturen als landwirtschaftliche Flächen. Insbesondere Erosion spielt aufgrund der natürlichen Beschaffenheit des Waldbodens eine weitaus kleinere Rolle als bei intensiv bearbeiteten Flächen.

4. Gefährdungen durch den Klimawandel

Im zweiten Kapitel wurden die mit dem Klimawandel einhergehenden klimatischen Änderungen im Allgemeinen und bezogen auf die Regionen des Landes Hessen beschrieben. Aufbauend darauf wurden im dritten Kapitel die Strukturen des Landes Hessen erläutert, auf die der Klimawandel einwirkt. Mit dem vierten Kapitel wird nun der Fokus auf die Gefährdungen, die Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur und im Besonderen auf die Landesstraßen gelegt. Dabei werden vor allem die Gefährdungen durch Hochwasser, Massenbewegungen, Sturm, Dürre, Hitze und Kälte vertieft behandelt.

4.1. Hochwasser

Die durch den Klimawandel veränderten Niederschlagsmuster zeigen, dass zeitliche und räumliche Ausprägungen von Niederschlagsereignissen stark variieren (Martel et al. 2018). Extremniederschläge sind daher häufiger zu erwarten und können Hochwasserereignisse zur Folge haben.

4.1.1. Entstehung von Hochwasser

Hochwasser entstehen unvermeidlich als Teil des natürlichen Wasserkreislaufs durch das Zusammenspiel von Niederschlag und äußeren Rahmenbedingungen. Ist die Niederschlagsrate höher als die Evaporation, beginnt die Versickerung des Regens zum Grundwasserleiter und, soweit die Niederschlagsmenge nicht versickern kann, entsteht ein Oberflächenabfluss (s. Kap. 3.2). Sind die Regenrückhaltungsmöglichkeiten von Pflanzen und die Wasserspeicherfähigkeit bzw. Wasserdurchlässigkeit des Bodens erschöpft, steigt der Oberflächenabfluss stark an. Liegt eine extreme Niederschlagsmenge (Starkregenereignisse) vor und trifft diese auf wassergesättigte Böden, so können extreme Hochwasser entstehen. (Patt und Jüpner 2020)

Die Folgen von Hochwasser unterscheiden sich nach der Art des Ereignisses: Sturzfluten, Überschwemmungen aus Starkregenereignissen, Flussüberschwemmungen und Sturmfluten. Letztere entstehen an den Küsten von Meeren und großen Seen und sind für Hessen nicht weiter von Relevanz.

- **Sturzfluten** entstehen durch extreme Starkregenereignisse, die im Einzugsgebiet eines kleinen Fließgewässers erfolgen. Bei einer gleichzeitig hohen Geländeneigung entfaltet das fließende Wasser eine hohe mechanische Wirkung und kann Bäume und andere Materialien mitreißen. Es kommt zu einer hohen Feststofffracht und Schäden durch Erosion.
- Trifft ein lokales Starkregenereignis auf eine ebene Fläche, so kommt es zu **Überschwemmungen** und einer Wasseransammlung in ggf. vorhandenen Senken (z.B. Unterführungen).
- Im Gegensatz zu den Auswirkungen durch Starkregenereignisse sind zu **Flussüberschwemmungen** meist gute Vorhersagen zu treffen. Sie entstehen nach lang andauernden Niederschlägen, insbesondere bei großen Flusseinzugsgebieten. Häufig ist die Versickerung durch wassergesättigte Böden oder gefrorene Böden eingeschränkt, so dass dem Fluss viel Wasser zugeführt wird. Die Gefährdung findet meist unmittelbar in Flussnähe statt. Je nach Aufbau des Flusstales kann es zu hohen Fließgeschwindigkeiten kommen und damit auch zu Auswirkungen durch mechanische Kräfte des Wassers.

Große Auswirkung auf die Dauer des Hochwassers und das Schadensausmaß haben das Geländegefälle, der Aufbau des Bodens sowie die Nutzungsart. (Patt und Jüpner 2020)

4.1.2. Klimatische Einflüsse

Ein Anstieg von Hochwasserereignissen aufgrund des Klimawandels, sowohl hinsichtlich der Häufigkeit wie auch der Stärke, ist in den Regionen Hessens zu erwarten, in denen ein vermehrtes Auftreten von Starkregenereignissen vorhergesagt wird. Damit steigen an diesen Orten (vgl. Abbildung 20 die Wahrscheinlichkeiten von Sturzfluten und Überflutungen).

In Regionen, in denen sich lang andauernde Niederschlagsereignisse häufen, steigt die Wahrscheinlichkeit für Flussüberschwemmungen. Ein Anstieg der jährlichen Niederschlagssummen in bestimmten Regionen von Hessen (vgl. Abbildung 21), lässt dort auch länger andauernde Niederschläge erwarten. Prognosen über die Länge von Niederschlagsereignissen liegen allerdings nicht vor. Gleichzeitig wird durch den zukünftigen Anstieg der winterlichen Temperaturen in Hessen (ohne signifikante regionale Unterschiede) vor allem in den Mittelgebirgen mehr Niederschlag in Form von Regen anstelle von Schnee fallen. Dadurch steigt das Risiko eines höheren Oberflächenabflusses.

Trifft ein Starkregenereignis auf durch langanhaltende Niederschlagsereignisse gesättigte Böden, steigt die Wahrscheinlichkeit für extreme Hochwasser. Hiervon sind besonders die Mittelgebirgsregionen betroffen, in denen eine höhere Anzahl von Starkregentagen sowie hohe Jahresniederschlagssummen aufeinandertreffen. Das Ausmaß der Hochwasserereignisse ist abhängig von Dauer und Intensität des Starkregens bzw. des Niederschlagsereignisses.

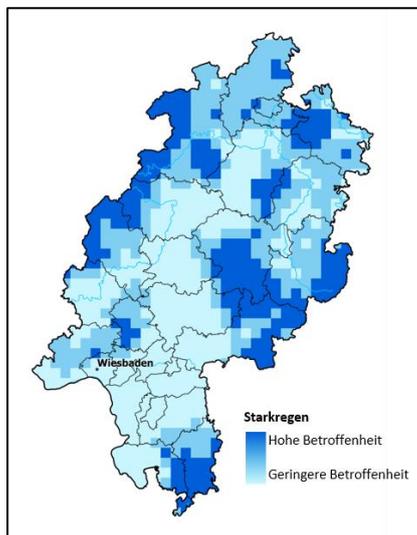


Abbildung 20: Anzahl der Starkregentage in den Klimaraumtypen (Mitte des Jahrhunderts, 50. Perzentil).
Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

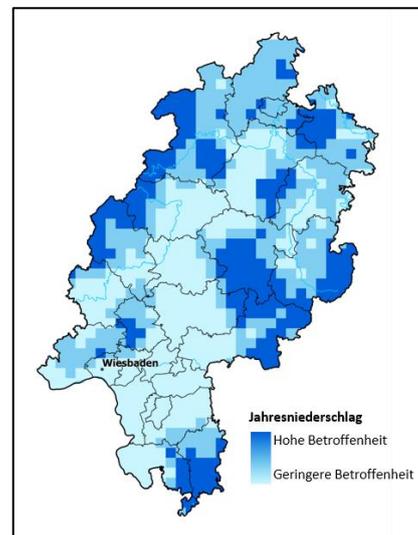


Abbildung 21: Jährliche Niederschlagssumme in den Klimaraumtypen (Mitte des Jahrhunderts, 50. Perzentil).
Quelle: Rasterdaten & Datengrundlage (DWD).

Ein weiterer Faktor, der die Gefahr von Hochwasser durch Starkregenereignissen erhöht, sind verringerte Niederschläge im Sommer. Hierdurch entstehen unter Umständen ausgetrocknete Böden, die große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit nicht aufnehmen können, so dass der Oberflächenabfluss steigt.

4.1.3. Räumliche Gegebenheiten

Verschiedene Faktoren der Oberfläche (Morphologie, Landnutzung und Bodenbedeckung) sowie des Untergrundes (Bodeneigenschaften und Hydrogeologie) haben neben den Klimagrößen Einfluss auf die räumliche sowie zeitliche Variabilität des Abflusses und somit auch auf die Entstehung von Hochwasser.

Der sich aus Niederschlagswasser bildende Abfluss fließt auf und unter der Oberfläche ab. Oberirdisch kommt es nach Starkregenereignissen zu stark flächenhaftem Abfluss sowie zu stark linienhaftem Abfluss in Gerinnen der Gewässernetze. Unterirdisch kommt es zu einem oberflächennahen Abfluss (Zwischenabfluss), der nur eine geringe zeitliche Verzögerung aufweist.

Oberflächenabfluss entsteht hierbei infolge von:

- Infiltrationsüberschuss (die Niederschlagsintensität ist größer als die Infiltrationsrate, d.h. die Wasseraufnahmegeschwindigkeit des Bodens),
- Sättigungsüberschuss (die Infiltrationskapazität ist infolge der vollen Wassersättigung der Böden gering) und
- Returnflow (hangaufwärts in den Boden infiltrierte Wasser, das oberflächennah abgeflossen ist, tritt hangabwärts wieder aus der Landoberfläche aus) (Lexikon der Geographie).

Auswirkungen der Topografie

Das oberflächlich abfließende Niederschlagswasser sucht den Weg des größten Gefälles. Je größer das Gefälle ist, desto höher ist auch die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Der Vorfluter (DIN 4049: natürliches oder künstliches Gewässer) wird unter diesen Gegebenheiten bei gleichbleibender Entfernung mit einer kürzeren Fließzeit erreicht (Abflussbildung). Der im gesamten Einzugsgebiet entstandene Oberflächenabfluss konzentriert sich somit ebenfalls im linienhaften Abfluss des Gewässernetzes und bildet eine Abflusswelle.

Innerhalb von Fließgewässern wird der Abfluss als Durchfluss Q erfasst, der das in einem Gewässerquerschnitt durchfließende Wasservolumen je Zeiteinheit misst (m^3/s oder l/s). Auf der Landfläche wird der Abfluss hingegen als Wasserhöhe pro Zeiteinheit angegeben (mm/a) und ist somit direkt mit dem Gebietsniederschlag vergleichbar.

Sind lange Hänge ohne Abflussbarrieren (Hanglängenfaktor) vorzufinden, so sammelt sich im Hangverlauf mehr oberflächlich abfließendes Wasser und die Abflussgeschwindigkeit steigt. Sind zudem steile Hänge (Hangneigungsfaktor) gegeben, so setzt der Oberflächenabfluss früher ein. Auch hier kommt es zu einer Erhöhung der Abflussgeschwindigkeit. Die Gefahr von Hochwasser entsteht insbesondere in der Talsohle. Je schmaler (trichter- oder wannenförmig, →Glossar: Hohlformen) diese ausgebildet ist, desto stärker kann der Wasseranstieg bei Starkregenereignissen ausfallen. Ist die Talsohle hingegen sehr breit (schalen- oder schüsselförmig, →Glossar: Hohlformen), so verteilt sich der Landoberflächenabfluss über eine deutlich größere Fläche. (Spektrum 2014b)

Je kleiner Einzugsgebiete sind, desto größer ist auch die zeitliche Variabilität des Abflusses. Kommt es zu Starkniederschlagsereignissen, so können hier kurzzeitig extrem hohe Abflüsse entstehen. Bei großen Einzugsgebieten ist die Durchflussganglinie hingegen in der Regel ausgeglichener. Allerdings

können auch hier langanhaltende, starke Niederschläge im gesamten Einzugsgebiet (siehe das Hochwasser an der Ahr im Jahr 2021) sowie Schnee- und Eisschmelzen extreme Hochwässer zur Folge haben.

Auswirkung der Bodenzusammensetzung

Böden verfügen im gleichen Maße über die Kapazität, Wasser aufzunehmen (siehe Kap. 3.2). Insbesondere bei Starkregenereignissen spielt die grundsätzliche und die im Ereigniszeitpunkt noch vorhandene Wasserspeicherkapazität bzw. Wasserdurchlässigkeit eines Bodens eine wichtige Rolle.

Das Hochwasserrisiko steigt, wenn durch anhaltenden Wassernachfluss (Regen, Flut) die Wasserspeicherkapazität bzw. Wasserdurchlässigkeit des Bodens erschöpft ist und das Wasser oberflächlich abfließt (s. Kap. 3.2).

Auswirkungen der Landnutzung

Die natürliche Wasserspeicherkapazität bzw. Wasserdurchlässigkeit eines Bodens wird durch Eingriffe des Menschen eingeschränkt. Versiegelungen, wie z.B. durch Straßen, führen zu einer Erhöhung des oberflächlich abfließenden Niederschlagswassers. Dieses kann bei Starkregen häufig nicht durch eine Kanalisation oder einen Vorfluter aufgenommen werden, so dass Versiegelungen örtliche Überschwemmungen verursachen (Umweltbundesamt 2020).

Auch bestimmte landwirtschaftliche Nutzungen tragen zu einer verminderten Wasserspeicherfähigkeit bzw. Wasserdurchlässigkeit bei (s. Kap. 3.3). Intensive Bearbeitung mit schweren Maschinen komprimiert die Partikel des Bodens und beeinträchtigt die Bodenfunktionen landwirtschaftlich genutzten Landes meist schleichend aber gravierend. Verminderte Wasserspeicherfähigkeit bzw. Wasserdurchlässigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden können bei ungünstigen Witterungsverhältnissen zu Staunässe, verstärktem Oberflächenabfluss und damit stärkerer Bodenerosion und lokalen Überschwemmungen führen. (Umweltbundesamt 2016)

Forstwirtschaftliche Nutzungen können die Wasserspeicherfähigkeit bzw. Wasserdurchlässigkeit von Böden auch beeinträchtigen, insbesondere bei weniger hängigen Flächen, die mit schweren Maschinen befahren werden können. Allerdings erfolgt hier eine Befahrung in deutlich längeren zeitlichen Abständen und damit nicht so intensiv wie bei landwirtschaftlich genutztem Land.

4.1.4. Zusammenfassung

Ein erheblicher Anstieg von Hochwasserereignissen in Form von Sturzfluten mit großem Schadenspotenzial ist in Hessen bei Starkregenereignissen zukünftig vor allem in Mittelgebirgslagen und dort in engen Tälern mit hohem Oberflächenabfluss zu erwarten. Überschwemmungen ebener Flächen können überall dort auftreten, wo vorhandene Kanalisationen und Vorfluter Starkregenereignisse nicht aufnehmen können. Da diese in der Regel auf Regenereignisse von 3- bis 5-jährlicher Eintrittswahrscheinlichkeit ausgelegt sind, nicht aber auf weit seltener auftretende extreme Niederschlagsereignisse, sind hier zukünftig häufiger Überschwemmungen zu erwarten. Hierdurch können ggf. Infrastrukturen zeitlich begrenzt nicht genutzt werden. Das Schadenspotenzial kann durch geeignete Maßnahmen, z.B. Zwischenspeicherung von Wasser, reduziert werden. Hochwasserereignisse bzw. deren Schadenspotenzial in den eher weiten Tälern größerer Flüsse, die

durch auftretende Starkregenereignisse bzw. entsprechende Wasserzuflüsse aus Nebenflüssen entstehen können, lassen sich durch natürliche oder künstliche Retentionsräume bzw. Hochwasserschutzmaßnahmen und ggf. die Verlagerung von Infrastrukturen aus den Überschwemmungsbereich der Flüsse minimieren.

4.2. Massenbewegung

Gravitative Massenbewegung und Massentransport sind Prozesse der Bewegung von Festkörpern an der Erdoberfläche. Während gravitative Massenbewegungen allein durch Schwerkraft in Gang gesetzt werden, wirkt bei Massentransport zusätzlich eine treibende Kraft wie beispielsweise Wasser, Eis oder Wind (Brunotte et al. 2002e).

Beide Prozesse können gravierende Auswirkungen auf das Straßennetz haben und seine Funktionsfähigkeit stören. Durch beispielsweise Erdbeben können Straßen blockiert und Straßenaufbauten beschädigt werden, so dass Verkehrswege nur noch eingeschränkt, zeitweise nicht mehr nutzbar oder dauerhaft zerstört werden können.

4.2.1. Entstehung

Gravitative Massenbewegungen können sich in unterschiedlichen Bewegungsformen äußern: von Sturzprozessen bzw. dem Fallen (Felssturz, Bergsturz, Steinschlag), Rutschungen und Gleitungen (Blockrutschung, Bergrutsch, Erdbeben) bis zu Fließ- und Kriechbewegungen (Mure, Erdfließen, Solifluktion). Voraussetzung für Massenbewegungen ist die Instabilität von Hängen oder Hangteilen.

- **Steinschlag** ist der Niedergang von kleinen Gesteinsfragment aus einem Hang oder einer Felswand, die sich durch Verwitterung aus ihrem Verbund gelöst haben und bergab fallen.
- Beim **Felssturz** löst sich eine größere Felsmasse in einem Stück aus einer Felswand. Während des Sturzes oder beim Aufprall wird sie in Blöcke und Steine zerteilt.
- Bei **Erdbeben** handelt es sich um in unterschiedlichem Umfang ausgedehnte (einige Quadratmetern bis zu einigen Quadratkilometern) und in unterschiedlicher Dicke ausgeprägte Pakete (einige Dezimetern bis zu einigen hunderte von Metern), die bergab rutschen.

Die Entstehung und der Ablauf von Massenbewegungen werden durch ein komplexes Gefüge verschiedener Faktoren beeinflusst. Geologische Strukturen (Verlauf von Schichtflächen, von Klüften usw.), Gesteinszusammensetzung und die Hangneigung sind wesentliche Faktoren, auf die im Folgenden näher eingegangen werden.

Maßgeblicher Auslöser der Destabilisierung ist das Wasser, auch wenn es per Definition nicht als Transportmittel beteiligt ist, sondern durch Änderungen des Porenwasser- und Aggregatzustandes (z.B. durch Niederschläge oder Frost-Tau-Wechsel). Vor allem bei Erdbeben und Schlammlawinen ist der Beitrag des Wassers sehr ausgeprägt, wenngleich bei Steinschlag kaum oder nur in geringem Maße. Menschliche Einflüsse (z.B. Baumaßnahmen, Verkehr...), die das Gleichgewicht von stabilisierenden zu destabilisierenden Kräften verändern, können auch Massenbewegungen auslösen (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021b; Spektrum Akademischer Verlag 2000).

Massentransport ist, im Unterschied zur Massenbewegung, die **Verlagerung von Lockermaterial durch verschiedene Agenzien** (Wasser, Eis, Wind). Massentransport kann also nur dort entstehen, wo das Oberflächenmaterial locker genug ist oder durch die Beteiligung eines Agens zur Materialverfrachtung und somit zur Auslösung eines Transportprozesses kommt, z.B. bei einer Bodenerosion durch Wasser oder Wind.

Darüber hinaus können Übergangsformen zwischen Massentransport und gravitativer Massenbewegung stattfinden, wenn ein Agens Teil der Massen abtransportiert und eine Destabilisierung herbeiführt, so dass es zur Massenbewegung unter Einfluss der Schwerkraft kommt.

4.2.2. Klimatische Einflüsse

Der wichtigste Einflussfaktor für gravitative Massenbewegungen und Massentransporte sind Niederschlagsereignisse. Niederschlagswasser kann die Eigenschaften des Bodens (zum Beispiel Porenwasser- und Aggregatzustände) ändern. Dadurch kann sich das Gleichgewicht und die Bindigkeit von Bodenmassen ändern, was zu Erdbeben und Schlammlawinen führen kann. Niederschläge tragen auch wesentlich zu Erosionsmechanismen wie Oberflächenerosionen und Unterspülungen bei (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021b).

Starkregen in Trockenperioden

Bei heftigem Regen sowie Starkregen in ansonsten trockenen Perioden steigt das Risiko von Erdbeben oder Murenabgängen, da dadurch bereits kleine Hänge destabilisiert werden können.

Die Klimaraumtypen „Südosten“ und „Mittelgebirge“, in denen ein stärkerer Anstieg der durchschnittlichen Starkregentage prognostiziert wird als in anderen Regionen, sind besonders anfällig für häufigere gravitative Massenbewegungen.

Veränderte Niederschlagsmuster

Böden in Regionen mit zukünftig verändertem Niederschlagsmuster im Winter sind auch empfindlich hinsichtlich gravitativer Massenbewegungen und Massentransporten. Fallen in einer Region zukünftig die Niederschläge verstärkt in Form von Regen anstelle von Schnee, versickert mehr Wasser in dem regelmäßig dann nicht gefrorenen Boden. Durch den höheren Wassergehalt des Bodens und häufigere Frost-Tau-Wechsel können solche Böden anfälliger für gravitative Massenbewegungen sein (Deutscher Wetterdienst (DWD); Hoffmann et al. 2009a, S. 5–6).

Der Klimaraumtyp „Südosten“ ist von dem veränderten Niederschlagsmuster etwas stärker betroffen als die anderen Regionen.

Frost und Frost-Tau-Wechsel

Auch Frost sowie Frost-Tau-Wechsel beeinflussen die wasserbezogene Eigenschaften des Bodens und können zur Destabilisierung von Bodenmassen führen (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021b). Aufgrund des derzeitigen Defizits an präzisen Daten zu diesem Thema können keine bestimmten Regionen oder Klimatypen als besonders empfindlich eingestuft werden. Es sollte davon ausgegangen werden, dass alle Regionen betroffen sein können. Allerdings können Regionen, z.B. bestimmte Mittelgebirgslagen, die bisher von längeren Dauerfrostphasen geprägt waren, durch den

Temperaturanstieg im Winter zukünftig häufigere Frost-Tau-Wechsel aufweisen (s. Kap. 2.5). Darüber hinaus vergünstigt Tauwetter – in den Regionen, in den Schnee fällt – nach Schneefall die Schneeschmelze, die in geringem Maße zur Oberflächenerosion beiträgt.

Wind

Letztlich kann auch Wind die Oberflächenerosion verstärken (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021b). Der durch Wind bedingte Massentransport, der auch als äolische Transport bezeichnet wird und Material wie Staub und Sand mit sich führt, kann Feinpartikel der Verwitterung verlagern (Deflation) sowie aktiv Partikel durch Abschleifprozesse abführen (Korrasion). Hier können aufgrund der aktuellen Datenlage keine bestimmten Regionen oder Klimatypen als besonders empfindlich eingestuft werden.

4.2.3. Räumliche Gegebenheiten

Das Risiko von Steinschlag und Erdbeben als gravitative Massenbewegung wie auch von Bodenerosion als Massentransport hängt von den Faktoren der Oberfläche (Morphologie, Landnutzung und Bodenbedeckung) sowie des Untergrunds (Bodeneigenschaften und Hydrogeologie) ab (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021b).

Niederschläge beeinflussen in Abhängigkeit von ihrer Art, Intensität und des Zeitpunkts das Risiko von Steinschlag und Erdbeben sowie von Bodenerosion.

Starkregenereignisse und andauernde Regenereignisse können Steinschläge auslösen sowie Bodenschichten auflösen und auseinanderschwemmen. Dadurch fehlt die nötige Haftreibung und die Schwerkraft lässt die Bodenschicht am Hang rutschen. Hierdurch können Erdbeben, Felsstürze oder Schlammlawinen entstehen.

Starkregenereignisse führen zu starken flächenhaften Oberflächenabflüssen sowie zu starken linienhaften Abflüssen in Gerinnen der Gewässernetze, die eine Verlagerung von Lockermaterial bewirken können (s. Kap. 3).

Der durch Wind bedingte Massentransport wird neben dem Windklima durch die Topografie sowie die Beschaffenheit des gegebenen Geländes bestimmt, was sich in auftretenden Windgeschwindigkeiten sowie einem äolischen Transport äußert.

Der durch Eis bedingte Massentransport wird nicht weiter betrachtet, da in den hessischen Breiten kein Hochgebirge vorliegt und es nur zu geringem Schneefall kommt. Der als glaziale Erosion bezeichnete Massentransport tritt in der Regel nur bei Gletschern auf (Spektrum 2014c)

Auswirkungen der Topografie

Steinschlag und Erdbeben

Steinschläge und Felsstürze treten überwiegend an steilen Felswänden auf. Der Frost-Tau-Wechsel ist für die Erosionsform der Frostsprengung verantwortlich. Diese stellt eine physische Verwitterungsform dar und geht häufig mit Steinschlägen einher. Das Risiko von Steinschlägen und Felsstürze besteht in den Mittelgebirgen Hessens.

Erdrutsche treten in hängigem bis stark hängigem Gelände auf und sind abhängig von geologischen, morphologischen und hydrologischen Faktoren. Sie treten häufig dann auf, wenn gut wasserwegsame Gesteinsschichten auf wasserstauenden Schichten lagern und die maßgebenden Trennflächen hangparallel oder flacher einfallen. Rutschungen sind in Hessen weit verbreitet und können auch an flacheren Hängen auftreten.

Für das Land Hessen liegt eine Datenbank zu Bereichen mit Steinschlag bzw. Felssturz-Risiko und mit rutschungsempfindlichen Schichten vor. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021g)

Bodenerosion

Der durch Wasser bedingte Massentransport ist für die Bodenerosion von besonderer Bedeutung. Oberflächenabfluss erfolgt über den Weg mit dem größten Gefälle und sammelt sich im linienhaften Abfluss des Gewässernetzes. Sind lange Hänge ohne Abflussbarrieren (Hanglängenfaktor) vorzufinden, so sammelt sich im Hangverlauf mehr oberflächlich abfließendes Wasser und die Abflussgeschwindigkeit sowie die auf die Böden wirkenden Kraft steigt, was Bodenerosionsprozesse mit Tiefenerosionen und Massentransporten zur Folge hat. (Brunotte et al. 2002a). Sind zudem steile Hänge (Hangneigungsfaktor) gegeben, so setzt früher der Landoberflächenabfluss ein. Auch hier kommt es zu einer Erhöhung der Abflussgeschwindigkeit und dadurch zu einem erhöhten Oberflächenabtrag und Massentransport (Strahler und Strahler 2009). Je kleiner Einzugsgebiete sind, desto größer ist auch die zeitliche Variabilität des Abflusses und die Gefahr größerer Massentransporte. Kommt es zu Starkregenereignissen, so können hier kurzzeitig stark erhöhte Abflüsse mit Materialtransporten entstehen. In Flüssen können aufgrund der dann vorherrschenden hohen Abflüsse hohe Strömungsenergien entstehen, durch die Seitenerosionen begünstigt werden (Brunotte et al. 2002c).

Die Bodenerosion durch Wind nimmt eine eher untergeordnete Rolle ein. Während im hessischen Tiefland die Windgeschwindigkeiten moderat bis gering ausfallen, so treten vor allem in den Berglagen der Mittelgebirgsregionen hohe Windgeschwindigkeiten auf. Zugleich schützt die Tallage von Mittelgebirgsregionen vor starken Winden, so dass dort je nach Standort die zu erwartenden Windgeschwindigkeiten vergleichsweise gering ausfallen (Energiewelt Hessen o. J.). Dennoch spielen für das Windklima verschiedene regionaler Faktoren eine wichtige Rolle, so dass Vorhersagen zu den Windgeschwindigkeiten nicht allein an der Topografie festgemacht werden können. Besondere Luftstrom-Zirkulationen, wie Land- und Seewind oder Berg- und Talwind, treten in Hessen nicht auf, da sich das Landesgebiet weder in Meeresnähe noch im Gebirge- oder Hügelland befindet. Daher sind hier keine zusätzlichen Risiken zu erwarten.

Auswirkungen der Bodenzusammensetzung

Die Schädigung benachbarter Areale durch Massenbewegungen ist in vielen Fällen eine Folge von Bodenerosion (Friedrich et al. 2006). Bodentyp und Bodenart bestimmen die Erodierbarkeit eines Bodens (s. Kap. 3.2).

Der Bodenabtrag infolge von Erosion wird in Hessen vor allem durch Niederschlagswasser ausgelöst. Der Abtrag steigt, wenn durch anhaltenden Wassernachfluss (Regen, Flut) die

Wasserspeicherkapazität bzw. Wasserdurchlässigkeit des Bodens erschöpft ist und das Wasser oberflächlich abfließt (s. Kap. 3.2).

Bei ausgetrockneten Böden ohne Vegetation und geringer Bindigkeit bzw. Masse der Bodenkomponenten werden auch durch Winderosion vor allem feine und leichte Bodenpartikel (Ton, Schluff, Humus) verweht.

Auswirkungen der Landnutzung

Steinschlag und Erdbeben

Landnutzung kann das Risiko von Steinschlag und Erdbeben steigern, wenn schützende Bodenbedeckungen oder Bodenschichten aufgebrochen werden.

Bodenerosion

Eine intensive landwirtschaftliche Nutzung begünstigt die Erodierbarkeit einer Fläche. Dafür können die in Kap. 3.3 genannten Gründe herangezogen werden. Eine ackerbauliche Nutzung in Hanglagen begünstigt hierbei in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung und Art der Bodenbearbeitung (siehe Kap. 3.3) die Erosion während Grünlandnutzungen eine solche zumindest vermindern kann.

Sind Hanglagen bewaldet, so können die bei gravitative Massenbewegungen und bei Massentransport losgelösten Feststoffe an den Wurzelläufen sammeln (Thorn, Jehl & Fischer 2013) und somit weitere Transportprozesse reduzieren.

4.2.4. Zusammenfassung

Der Klimawandel wird für Hessen vor allem in den Mittelgebirgen Auswirkungen im Bereich der gravitativen Massenbewegung haben. So greifen Temperatur-, Temperaturwechsel- und Niederschlagsänderungen in den Gleichgewichtszustand natürlicher Hänge und Böschungen ein, der auf rückhaltenden und angreifenden Kräften im Hang beruht. Wird das Verhältnis gestört kann es zu einer Massenbewegung kommen. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021g)

Gleiches gilt auch für den Massentransport durch Bodenerosion. Hier sind vor allem solche ackerbaulich genutzten Böden betroffen, die grundsätzlich wasser- oder winderosionsanfällig sind und die gleichzeitig nicht erosionsmindernd bewirtschaftet werden.

4.3. Sturm

Starke Winde und Stürme sowie plötzliche Windböen können aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten auftreten und stellen ein Risiko für die bauliche Verkehrsinfrastruktur sowie die laufende Verkehrssicherheit dar.

4.3.1. Entstehung von Wind

Wind entsteht durch die Strömung von Luftmassen von Hoch- zu Tiefdruckgebieten, welche sich durch die unterschiedlich starke globale Sonneneinstrahlung ausbilden. Treffen kalte und warme Luftmassen aufeinander, entsteht eine Luftfront und kalte Luftmassen, welche schwerer sind und sich unter die

leichtere Warmluft schieben. Durch die Corioliskraft kommt es zu einer Drehung und der Luftdruck sinkt ab, wodurch weitere kalte Luft angesaugt wird und gleichzeitig die Windgeschwindigkeiten steigen. Hierdurch können starke Winde entstehen, welche ab einer Windstärke von 9 auf der Beaufort-Skala (entspricht Windgeschwindigkeiten ab 75 km/h) als Sturm bezeichnet werden. Besonders starke Strömungen entstehen bei großen globalen Temperaturdifferenzen, wie dies etwa im Winter der Fall ist. Die Sonneneinstrahlung ist dabei auf der Nordhalbkugel stark reduziert, während am Äquator weiterhin hohe Temperaturen herrschen. Daher entstehen im Winter besonders starke Stürme (sogenannte Winterstürme), die große Schäden anrichten können.

Je nach Windgeschwindigkeit sind die Schäden von sehr unterschiedlicher Art. Bei einem stürmischen Wind (Windstärke 8) brechen Zweige und auch die Fortbewegung im Freien bereitet Mühe. Sobald die kritische Grenze zum Sturm erreicht ist, steigt die Gefahr von brechenden Ästen oder abgehobenen Dachziegeln. Schwere Stürme (Windstärke 10, ab 89 km/h) können Bäume abbrechen lassen und größere Schäden an Gebäuden anrichten. Noch größere Schäden an Gebäuden entstehen durch orkanartige Stürme (Windstärke 11, ab 103 km/h), durch welche auch Bäume entwurzelt werden können. Von einem Orkan wird ab Windstärke 12 und Windgeschwindigkeiten über 118 km/h gesprochen. Hierdurch können schwere Verwüstungen auftreten. (Deutscher Wetterdienst (DWD))

Neben den eher großräumig auftretenden Stürmen entstehen pro Jahr in Deutschland auch 40 bis 50 Tornados, vor allem im Westen und Süden Deutschlands. Tornados entstehen, wenn sich feuchtwarme Luft am Boden und trockene und kalte Luft in der Höhe übereinanderschichten. Dabei entsteht ein Aufwind bei dem immer mehr Luft mit immer größerer Geschwindigkeit ins Innere des Schlauchs strömt. Tornados lassen sich allerdings schwer vorhersagen, können aber bei starken Temperaturgegensätzen und Gewittern entstehen. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021e)

4.3.2. Klimatische Einflüsse

Sind die Temperaturen auf der Nordhalbkugel sehr niedrig, entsteht über dem Osten Europas ein Hochdruckgebiet, welches wie ein „Schutzwall“ zwischen Europa und dem Atlantik wirkt und Sturmtiefs, die aus westlicher Richtung heranziehen, blockiert. Ist der Winter in Europa jedoch mild, wird das Hochdruckgebiet nicht ausgebildet und Stürme aus Westen können ungehindert nach Europa gelangen. Diese Situation wird durch den Klimawandel wahrscheinlicher, da die steigenden Temperaturen häufiger für milde Winter sorgen. Gleichzeitig kann die wärmere Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen, wodurch über den Atlantik nicht nur Wind, sondern auch große Wassermassen nach Europa transportiert werden, welche für mehr Niederschlag sorgen. (Schwanke et al. 2009)

Dementsprechend wird ein Ansteigen der Anzahl und der Intensität von Stürmen mit dem Fortschreiten des Klimawandels in Deutschland erwartet (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021d). Mit einem Anstieg der Gewitterhäufigkeit vor allem im Westen und Süden Deutschlands steigt damit auch in Hessen das Risiko von Tornados (Schafbuch 2021).

Die Schäden durch Stürme und Tornados hängen jedoch von verschiedenen Gegebenheiten ab. So können beispielsweise Bäume leichter entwurzelt werden, wenn die Böden gesättigt und damit aufgeweicht sind. Dies geschieht durch langanhaltende Niederschläge im Vorfeld eines Sturmereignisses, wie es in zukünftigen Wintern der Fall sein kann. Verstärkt wird dies durch die

steigenden Temperaturen, wodurch statt Schnee vermehrt Regen fällt, welcher den Boden zusätzlich sättigt. Auch trockene Bedingungen beeinflussen die Gefährdung durch Stürme. In heißen, trockenen Sommern können Böden schneller austrocknen und es kann zum Windbruch kommen, wobei insbesondere Flachwurzler wegen ihrer in den oberen Bodenschichten ausgebildeten Wurzeln leichter abbrechen (Bolte et al. 2009; Mattheck 1992).

4.3.3. Räumliche Gegebenheiten

Der Sturmwurf ist maßgeblich auf die Windgeschwindigkeit zurückzuführen, die durch bestimmte Faktoren der Landoberfläche (Relief, Landnutzung) sowie des Untergrunds (Bodeneigenschaften und Hydrogeologie) beeinflusst wird.

Auswirkungen der Topografie

Winde der Orkanstärke treten vor allem auf Kuppen und den oberen, in Hauptwindrichtung geneigte Hanglagen auf. Starke Winde und somit ein mittleres Sturmrisiko besteht in schwach geneigten Lagen, während das Risiko in unteren Hanglagen und Mulden eher als gering einzustufen ist (Wegmann 2010). In Hessen ist Sturmwurf daher insbesondere in den Berglagen der Mittelgebirgsregionen zu erwarten, da hier im Vergleich zum hessischen Tiefland die höchsten Windpotenziale lokalisiert werden können. In den vielen Tallagen der Mittelgebirgsregionen sind so aber auch – abhängig vom Standort – die geringsten Windpotenziale auszumachen, so dass dort nur ein geringes Sturmwurf-Risiko besteht (Energiewelt Hessen o. J.). Neben der Topografie sind es weitere regionale Faktoren, die das Windklima beeinflussen und eine Vorhersage zu Windgeschwindigkeiten und möglichen Risiken für Sturmwurf nicht möglich machen.

Auswirkungen der Bodenzusammensetzung

Nicht nur die Stärke des Windes, sondern auch die Verankerung der Bäume im Boden spielt eine wichtige Rolle bei der Beurteilung von Sturmwürfen. Wichtige Umweltfaktoren, die direkten Einfluss auf das Schadensausmaß haben, sind die Gründigkeit, die Beschaffenheit und der Wassergehalt der Böden. (Wegmann 2010)

Im Idealfall verfügen Bäume über ein stabiles Wurzelsystem, durch welches sie fest im Boden verankert sind. Kommt es zum Abtrag des Bodens durch Erosion, so haben die Wurzeln weniger Halt. Ein schlecht ausgeprägtes Wurzelsystem begünstigt Erosion, da die Bodenpartikel durch keine Barriere zurückgehalten werden.

Auch aufgeweichte Böden ermöglichen den Wurzeln nur einen geringen Halt. Durch Niederschläge aufgeweichte Böden sind eine Folge von andauernden Niederschlägen oder Starkregen. Letzterer tritt zudem oft in Kombination mit orkanartigen Böen auf. Bereits im Entwicklungsstadium eines Baumes zeigt sich die Wichtigkeit der Kenntnis der Bodenart. So bildet die Fichte auf vernässenden oder tonigen Böden sowie bei zu engem Standraum in der Jugend nur sehr flache Wurzeln aus, so dass die Standsicherheit von Fichten an solchen Standorten nur eingeschränkt gegeben ist. (Kaulfuss, 2020)

Bäume an Straßen, d.h. Allees, Baumreihen oder auch Bäume im urbanen Raum wachsen häufig unter schlechteren Standortbedingungen als Bäume in der freien Natur – neben dem begrenzten Raum für Wurzelwachstum können die Verdichtung des Bodens, Schadstoffe oder Streusalz die Bäume

schädigen. Trockenheit verschlechtert diese Standortbedingungen zusätzlich. Sie verschärft das durch Versiegelung und Verdichtung ohnehin schon bestehende Problem der unzureichenden Wasserversorgung der Wurzeln und mindert das Baumwachstum, so dass junge Bäume absterben können, bevor sie richtig groß geworden sind. Diese Bäume sind besonders anfällig für Sturmwurf durch Entwurzelung oder Abknicken. (Umweltbundesamt, 2021)

Tabelle 2: Umweltfaktoren, (Wegmann 2010)

Sturmrisiko	Umweltfaktoren				
	Windstärke	Geländeform	Boden		
			Gründigkeit	Beschaffenheit	Wassergehalt
klein	schwach, unter 35 km/Std.	untere Hanglagen, Mulden	tiefgründig, tiefer als 60 cm	bindig	trocken bis frisch
mittel	stark, 40 bis 100 km/Std.	schwach geneigte Lagen	mittelgründig, 30 cm bis 60 cm	kiesig-lehmig	feucht
groß	orkanartig, über 110 km/Std.	Kuppen, obere Hanglagen	flachgründig, weniger als 30 cm	kiesig-sandig	nass, wassergesättigt

Auswirkungen der Landnutzung

Monokulturen engen den Raum für das Wurzelwachstum des einzelnen Baums ein. Eine dichtere Bepflanzung fördert daher eine schlechte Verankerung der Bäume im Boden (Danneberg, Jasser et al 2001). Bäume weisen unterschiedliche Widerstandskräfte gegenüber Windwurf auf. Dies hängt vor allem vom Grobwurzelsystem der Baumart und der Baumhöhe sowie der Stammform ab (Tabelle 3) (Wegmann 2010).

Tabelle 3: Baummerkmale, (Wegmann 2010)

Sturmrisiko	Baummerkmale			
	Baumart	Grobwurzelsystem	Baumhöhe	Stammform
klein	Wta, Fö, Sei, Tei (jung)	Pfahlwurzeln	gering	abholzig
mittel	Lä. Dgl, Bu, Habu, Ah, Es, Li, Bi, Sei und Tei (alt)	Herzwurzeln	mittel	vollholzig
erhöht	Fi	Flachwurzeln	groß	schlank

Ein Baumbestand wird mit steigendem Alter sturmanfälliger. Eine intensive Mischung unterschiedlicher Baumarten auf einer Fläche reduziert das Sturmrisiko ebenso wie ein Baumbestand mit geschlossener Krone. Lichte und lückige Bestände bedürfen einer stufigen Erziehung, um das Sturmrisiko klein zu halten. Massive Durchforstung von Beständen sollten vermieden werden, um das Sturmrisiko nicht zu erhöhen. (Wegmann 2010)

Tabelle 4: Bestandsverhältnisse, (Wegmann 2010)

Sturmrisiko	Bestandsverhältnisse					
	Entwicklungsstufe	Mischungsart	Kronenschluss	Bestandesstruktur	Durchforstungsstärke	Zeit seit der letzten Durchforstung
klein	Jungwald	Einzelmischung	normal	stufig	schwach	mehr als 8 Jahre
mittel	Baumholz	Trupp bis Gruppen bis 10 Aren	licht	ungleichförmig	mittel	6 bis 7 Jahre
erhöht	Altholz	Horst bis Bestand mehr als 10 Aren	lückig	gleichförmig	stark	bis 5 Jahre

4.3.4. Zusammenfassung

Um das Risiko von Sturmschäden für eine Region bzw. einen Standort abschätzen zu können, müssen insbesondere deren räumlichen Gegebenheiten analysiert werden. Neben dem im allgemeinen höheren Risiko von Sturmschäden in Mittelgebirgsregionen auf Kuppen und den oberen, in Hauptwindrichtung geneigte Hanglagen, ist in den westlichen und südlichen Regionen Hessens aufgrund des Klimawandels mit einem Anstieg von Stürmen und damit einem höheren Risiko von Sturmschäden zu rechnen.

4.4. Dürre und Niedrigwasser

Durch die Klimaveränderungen kann es zu Dürre- und Niedrigwasserphasen kommen, die sich auf die Bodenstrukturen auswirken, diese für andere Extremwetterereignisse vulnerabler machen und die Funktionalität von Verkehrsinfrastrukturen beeinträchtigen können.

4.4.1. Entstehung und klimatische Einflüsse

Dürren entstehen, wenn über einen längeren Zeitraum zu wenig Wasser vorhanden ist, um den Bedarf von Mensch und Umwelt zu decken. Diese können durch verringerte Niederschläge eintreten und durch Hitze oder Wind verstärkt werden. Aufgrund fehlender Niederschläge kann es in Binnengewässern außerdem zu Niedrigwasserständen kommen, die die Schifffahrt beeinträchtigen.

Verringerte Niederschläge treten meist im Sommer auf, können im Winter jedoch auch entstehen, wenn in höheren Lagen Regen als Schnee gebunden ist und somit weniger Wasser zur Verfügung steht. Für Hessen ist der letztgenannte Fall jedoch ohne Relevanz. Vielmehr ist in den früher schneereichen Regionen Hessens aufgrund des Klimawandels zukünftig mit einem erhöhten Anteil an Regen zu rechnen.

Sinkende Sommerniederschläge sind jedoch Teil der Klimaprojektionen und somit steigt auch die Wahrscheinlichkeit von Dürren, insbesondere, da zeitgleich in allen Regionen Hessens die sommerlichen Temperaturen ansteigen und vermehrt heiße Tage und Hitzewellen auftreten. Die

Anzahl der Trockentage, d.h. Tage, an denen kein Regen fällt (vgl. Abbildung 23), sowie die Verteilung der Niederschlagssummen im Sommer (vgl. Abbildung 22) ist in den verschiedenen Regionen unterschiedlich hoch und damit auch das Risiko für lokale Dürreereignisse.

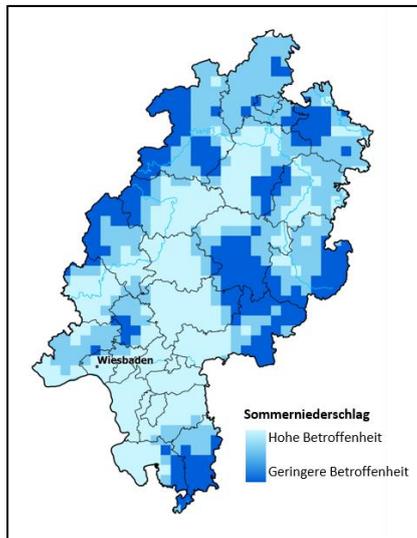


Abbildung 22: Abnahme der Niederschlagssumme (Sommer) in den Klimaraumtypen (Mitte des Jahrhunderts, 50. Perzentil). Quelle: Rasterdaten & Datengrundlage (DWD).

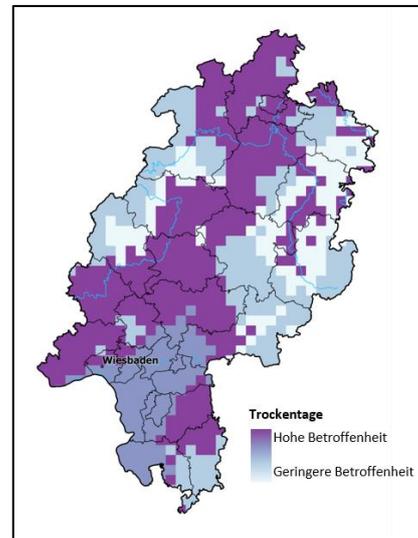


Abbildung 23: Anzahl Trockentage in den Klimaraumtypen (Mitte des Jahrhunderts, 50. Perzentil). Quellen: Rasterdaten (DWD), Datengrundlage (Umweltbundesamt (UBA) 2021b).

4.4.2. Räumliche Gegebenheiten

Ob Trockenphasen zu Dürren führen, hängt maßgeblich von der allgemeinen Wasserverfügbarkeit einer Region sowie der Speicherfähigkeit der dort gegebenen Böden ab.

Auswirkungen der Topografie

Lange Trockenphasen können auf den nicht dem Atlantik zugekehrten Ostseiten der hessischen Mittelgebirge zu Dürreereignissen führen (s. Kap. 3.1).

Ob Gewässern in Trockenphasen Niedrigwasser droht, hängt unmittelbar mit der meteorologischen sowie hydrologischen Ausgangslage in den Einzugsgebieten zusammen (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2021). Befinden sich vorgelagerte Gewässerabschnitte in niederschlagsreicheren Gebieten, so kann dies bei längeren Trockenperioden extreme Niedrigwassersituation am Ort entschärfen (Umweltbundesamt (UBA) 2019). Sind die Einzugsgebiete allerdings kleinräumig und von Trockenheit betroffen, so besteht aufgrund der fehlenden Grundwasserneubildung eine erhöhte Gefahr für Niedrigwasser und Dürren.

Auswirkungen der Bodenzusammensetzung

Die Art des Bodens spielt besonders bei einer Kombination aus Dürre und schlagartigen Regenfällen eine große Rolle. Flachgründige und sandige Böden sind stärker von längeren Trockenperioden betroffen, da sie geringe Wasserspeicherkapazitäten aufweisen als z.B. mittel- bis tiefgründige Lehmböden.

Ausgetrocknete Böden neigen bei kurzen und sehr intensiven Regenereignissen teilweise zur Oberflächenverschlammung. Im Gegensatz zu durchfeuchteten Böden kann hier nur wenig Wasser während des Starkregens aufgenommen werden, da sich die sogenannte hydraulische Leitfähigkeit verändert: Ist ein Boden trocken, dauert es länger bis das Wasser durchsickern kann als wenn der Boden feucht ist (s. Kap. 3.2). Dadurch steigt die Gefahr von Oberflächenabfluss und Bodenerosion deutlich an. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021d)

Auswirkungen der Landnutzung

Trocknet die oberste Schicht des Bodens aus und ist sie durch landwirtschaftliche Nutzung stark aufgelockert, so können Windböen zu Staubaufwirbelung und Winderosion führen. Besonders groß ist die Gefahr der Winderosion auf Ackerflächen ohne geschlossene Bodenbedeckung. Kommen dann noch starke Winde hinzu oder entsteht Erosion durch die Bewirtschaftung (Bodenbearbeitung bei extremer Trockenheit und Wind), kann humusreiches Feinmaterial durch Winderosion verdriftet, d.h. ausgeweht werden. Bodenpartikel werden hierbei von ihrer Ausgangsposition fortgetragen und auf umliegende Gebiete transportiert (s. Kap. 4.2.3). Dies kann eine Gefahr für umliegende Bauwerke und Straßeninfrastrukturen darstellen. (Umweltbundesamt, 2021)

4.4.3. Zusammenfassung

Dürren können in Hessen zukünftig vor allem in den Regionen entstehen, die dem Klimaraumtyp „trockene Region“ (Lahn- und Fulda, Schwalm-Eder, Wetterau, Teile Darmstadt-Dieburgs) zuzuordnen sind. Je geringer die Wasserspeicherfähigkeit der Böden ist, umso größer werden die negativen Auswirkungen der Trockenphase sein.

4.5. Hitze

Der klimabedingte Temperaturanstieg führt in den bereits jetzt wärmeren Regionen Hessens zu einem Anstieg der Sommertemperaturen, so dass dort die Anzahl der heißen Tage und tropischen Nächte ansteigen wird und sich häufiger und länger Hitzewellen ausbilden.

4.5.1. Klimatische Einflüsse zur Entstehung von Hitze

In Deutschland, wie in den meisten Gebieten Europas, werden sommerliche Hitzewellen meist durch andauernde, ausgeprägte und fast stationäre sommerliche Hochdrucklagen (Hochdruckgebiete) ausgelöst. Hochdrucklagen, auch Schönwetterlagen genannt, sind durch einen praktisch wolkenfreien, blauen Himmel gekennzeichnet. Vorhandene Wolken werden durch die Zufuhr von trockener Warmluft schnell wieder aufgelöst. Zu den typischen Merkmalen einer Hochdrucklage gehört auch fehlender oder nur leichter Wind. Aufgrund ihrer inhärenten Stabilität kann eine Hochdrucklage längere Zeit andauern, sodass die Erwärmung immer größer wird. Werden mehrere Tage mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung gemessen (üblicherweise wird die Schwelle von 30°C Lufttemperatur angewandt), wird von einer Hitzewelle gesprochen (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021a).

Häufig werden Hitzewellen in Deutschland durch ein feststehendes Hoch über Osteuropa oder Skandinavien ausgelöst, das sich zudem mit einem Azorenhoch verbindet. Durch diese Lage können

sich trockene, warme Luftmassen aus Nordafrika nach Mitteleuropa bewegen. Während des Transports kann die Luft sich durch intensive Sonneneinstrahlung und Föhnwirkung zusätzlich erwärmen.

Gelegentlich, wie es in 2018 der Fall war, kann eine sommerliche Hitzewelle hingegen das Resultat aus zwei über Skandinavien und Großbritannien liegenden stationären Hochdruckgebieten sein, die niederschlagsreiche Tiefdruckgebiete weggleiten und somit den Einfluss des Atlantiks unterbinden. Dadurch kommt die trockene Luft ausschließlich aus östlicher Richtung und das Zufließen der Westdrift wird verhindert. Es entsteht eine Rückkopplung, die diese Wetterlage sehr stabil macht.

Wenn die stark erwärmten bodennahen Luftschichten, die durch die starke Sonneneinstrahlung zusammen mit dem Festland erwärmt wurden, auf die Höhenkaltluft treffen, kann es zur Destabilisierung der Luft führen. Dann steigt die Luft auf und es entstehen lokale Hitzetiefs. Wird feuchte Luft miteinbezogen, können Gewittern entstehen (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT 2021a; Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021b).

In Zeiten von Wärmeperioden können versiegelte Flächen insbesondere in Städten und in der näheren Umgebung unter Wärmeinseleffekten leiden, so dass höhere Temperaturen als im Umland gemessen werden. Dieser Effekt erreicht sein Maximum bei wolkenfreien und windschwachen Wetterbedingungen während der Nacht. Die Differenz kann bis zu 10 Grad Celsius betragen (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

4.5.2. Räumliche Gegebenheiten

Neben der Großwetterlage als Ursache für heiße Tage trägt auch der Umfang der unmittelbaren Sonneneinstrahlung und der Durchlüftung eines Standorts zu den Auswirkungen heißer Tage bei. Diese werden wiederum maßgeblich durch die topografischen Gegebenheiten, die Bodenarten und die Landnutzung bestimmt.

Auswirkungen der Topografie

Täler, die in Hauptwindrichtung (in Hessen West-Ost-Richtung) verlaufen werden durch vom Atlantik kommende Winde stärker gekühlt als in Nord-Süd-Richtung verlaufende Täler. Durch Berg-Talwind-Zirkulation kann auch in Mittelgebirgen Wind entstehen, der tagsüber von sonnenbeschienenen Hängen erwärmte Luft als Hangaufwind aus dem Tal und nachts durch den Bergwind frische Luft in das Tal transportiert. In welchem Umfang sich Hänge durch Sonneneinstrahlung erwärmen hängt von der Hangausrichtung, der Oberflächenform des Hanges und dem Hangbewuchs ab. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2015)

Schmale und von Wasserläufen durchzogene Täler weisen im Vergleich zu weiten großräumigen Flächen ein kühleres Mikroklima auf.

In urban geprägten Tallagen kann es bei einer Kessellage mit fehlender Durchlüftung bzw. Frischluftzufuhr zu extremen Hitzebelastungen kommen. Die ist insbesondere in Tallagen von Mittelgebirgsregionen mit geringen Windpotenzialen und bei einer die Windzirkulation unterbindende Bebauung der Fall (EnergieLand Hessen o. J.)

Auswirkungen der Bodenzusammensetzung

Boden, der optimal mit Wasser versorgt ist, verdunstet gemeinsam mit der Vegetation erhebliche Mengen an Wasser. Durch die entstehende Verdunstungskälte kühlt sich die Lufttemperatur in der Umgebung ab (bodenwelten 2021). Böden, die nur im geringen Umfang Wasser speichern können bzw. deren Wasserspeicher geleert ist, trocknen dagegen bei anhaltenden Hitzewellen aus. Sie speichern die Wärme und geben sie während der Nacht wieder an die Umgebung ab. Dies vermindert den nächtlichen Abkühlungseffekt und führt zu einem Anstieg der Durchschnittstemperatur eines nächsten heißen Tages.

Auswirkungen der Landnutzung

Die Art der Landnutzung spielt eine große Rolle für die Entwicklung von Hitze.

Eine Bodenvegetation unterstützt durch Transpiration der Pflanzen die Verdunstung und kühlt durch die dabei entstehende Verdunstungskälte die Lufttemperatur in der Umgebung. Da die Pflanzen die Transpiration steuern können, kann bei fehlendem pflanzenverfügbarem Wasser im Boden die Pflanze durch Schließen der Spaltöffnungen die Verdunstungsmenge reduzieren. (bodenwelten 2021) Mit einer Verschattung des Bodens durch die Pflanze wird ein Aufwärmen des Bodens durch direkte Sonneneinstrahlung und eine weitere Verdunstung von Wasser direkt aus dem Boden vermindert. Daher sollte bei Böden in den Sommermonaten immer ein bodendeckender Pflanzenbewuchs gegeben sein.

Die maximale Temperatur in Wäldern liegt im Durchschnitt vier Grad tiefer als außerhalb. Das Blätterdach der Bäume mindert den Einfluss von Hitzewellen deutlich ab. Mit steigenden Temperaturen steigt auch die Pufferkapazität der globalen Wälder. Obwohl die Temperaturen außerhalb der Wälder ansteigen werden, folgen die Temperaturen innerhalb der Wälder diesem Trend nur teilweise. Dadurch klaffen die Temperaturen im Wald und im Umland dann weiter auseinander (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) 2019). Das Potenzial für Waldwind als Teil der Wald-Feld-Windzirkulation steigt deutlich an (Spektrum 2014d).

In Städten kommt es beispielsweise aufgrund des Wärmeinseleffekts (Urban Heat Island = UHI) vermehrt zu Hitzeschäden. Die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel beschreibt das Phänomen, dass sich innerhalb von Städten Wärme- und Hitzebelastungen stärker bemerkbar machen als im unbebauten Umland. Je mehr Fläche die Städte beanspruchen und je dichter sie bebaut sind, desto größer fällt der Wärmeinseleffekt typischerweise aus. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021h)

4.5.3. Zusammenfassung

Der klimabedingte Temperaturanstieg führt vor allem in den Regionen in Hessen im Sommer zu einer höheren Anzahl an heißen Tagen, die zum Klimaraumtyp „wärmste Region“ (Rhein-Main-Region einschließlich Bergstraße) und zum Klimaraumtyp „trockenste Region“ (Lahn- und Fulda, Schwalm-Eder, Wetterau, Teile Darmstadt-Dieburgs) gehören. Um Hitzeschäden zu vermeiden, sollten Maßnahmen ergriffen werden, die eine flächendeckende Vegetation von Böden in den Sommermonaten sicherstellt und Windzirkulationen ermöglicht.

4.6. Kälte

Auch wenn der Klimawandel im Durchschnitt zu einer Reduzierung der Frosttage führt, sind die Auswirkungen in den Regionen unterschiedlich. Während in Mittelgebirgen die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (s. Kap. 4.2.2) zukünftig steigen kann, fallen diese in den Tieflagen ggf. insgesamt weg.

4.6.1. Klimatische Einflüsse zur Entstehung von Kälteschäden

Kälte stellt an sich keine Gefahr für die Straßen dar, kann aber negative Auswirkungen mit sich ziehen, wenn die Temperaturen nahe am Null-Grad Punkt liegen. Es können Glätte, Reifbildung bei Frostwetter, Schneefall, Nebel, Tau sowie Frost-Tau-Wechsel entstehen, die die Verkehrssicherheit gefährden können.

Glätte entsteht durch Überfrieren oder Gefrieren von Wasser oder Schnee, z.B. auf Straßen. Dabei sind Temperaturen zwischen + 4 und -5°C für die Glättebildung besonders kritisch. Besonders gefährlich ist Glatteis (oder Blitzeis), das entsteht, wenn Regen oder Sprühregen auf einen gefrorenen Boden fällt (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

Reifbildung kann auch eine **Glättegefahr** darstellen, wenn es auf den Straßen durch Reifablagerungen streckenweise glatt wird. Reif entsteht aus Eisablagerungen des Wasserdampfes aus der umgebenden Luft in kristalliner Struktur bei **Frostwetter**, also wenn die Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt des Wassers (0°C) absinkt (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021b).

Schneefall entsteht, wenn die Temperaturen in den Wolken zwischen minus vier und minus 20 Grad Celsius liegen, damit Schneeflocken sich durch Zusammenballungen und Verkettungen von Schneesternchen in Niederschlagswolken bilden können. Da sich bei tiefen Temperaturen weniger Feuchtigkeit in der Luft befindet, sind ergiebige Schneefälle mit großen Schneeflocken meist bei Temperaturen um 0 °C zu beobachten. Kommt zum Schneefall auch noch Wind hinzu, führt das häufig zur Ausbildung von Verwehungen, wenn am Boden liegender Schnee verfrachtet wird und sich hinter Hindernissen oder in Senken ablagert. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021b,).

Nebel besteht aus mikroskopisch kleinen Wassertröpfchen, die in der bodennahen Luftschicht schweben und die Sichtweite verringern. Gewöhnlich wird "Nebel" benutzt, um eine Sichtweite von unter einen Kilometer in Bodennähe zu bezeichnen. Von "Feuchtem Dunst" wird gesprochen, wenn die Sichtweiten zwischen einem und weniger als 8 km liegen. Nebel entsteht hauptsächlich aus der Abkühlung der bodennahen Luftschicht unter den Taupunkt (Abkühlungsnebel). Er kann aber auch aus der Zunahme des Wasserdampfes durch Evaporation eines warmen und sehr feuchten Untergrundes (Verdunstungsnebel, Dampfnebel) und bzw. oder aus der Mischung von feuchtwarmer Luft mit kalter Luft, vor allem im Bereich von Fronten (Mischungsnebel) entstehen, sowie aus Kombinationen dieser Prozesse (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021b).

Tauwetter liegt vor, wenn die Lufttemperatur in Bodennähe nach einer längeren Frostperiode den Gefrierpunkt übersteigt, was meist auf die Zufuhr warmer Luft zurückzuführen ist. Unter diesen Bedingungen tauen der gefrorene Boden sowie eventuell vorhandene Schneedecke auf. Niederschläge können zusätzlich zu positiven Temperaturen das Auftauen der Schneedecke und des gefrorenen Bodens verstärken (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021b).

Einen Wechsel von Frostwetter zu Tauwetter oder zurück wird als **Frost-Tau-Wechsel** bezeichnet. Frosttage sind Tage, an denen die Tiefsttemperatur des Tages unter null Grad Celsius aber die Höchsttemperatur über null Grad liegen kann. Eistagen hingegen bleiben durchgehend im negativen Temperaturbereich.

4.6.2. Räumliche Gegebenheiten

Da insbesondere der Anstieg der Häufigkeit eines Wechsels von Frost- zu Tauwetter und zurück zum Gefährdungsrisiko und Schäden beiträgt, werden dessen Auswirkungen im Folgenden weiter betrachtet. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die Mittelgebirge Hessens gelegt, da dort dieser Anstieg besonders groß ist.

Auswirkungen der Topografie

Ein Anstieg des Frost-Tau-Wechsels kann vor allem für Mittelgebirge und deren sonnenexponierte Standorte erwartet werden, da dort durch die Sonneneinstrahlung während des Tages der Boden über den Gefrierpunkt erwärmt und in der Nacht wieder entsprechend abkühlt. Diese Sonneneinstrahlungen sind auf Bergkuppen und in West-Ost-ausgerichteten Tälern gegeben. Bei Nord-Süd-ausgerichteten Tälern erfolgt dies, je nach Breite des Tals nur auf dem Südhang.

Ein ständiger Frost-Tau-Wechsel führt zur häufigen Änderung des Porenwasser- und Aggregatzustands und führt zu Frostsprengungen, die gravitative Massenbewegungen auslösen können (s. Kap. 4.2).

Auswirkungen der Bodenzusammensetzung

Im Boden bewirkt Frost irreversible Änderungen der Bodeneigenschaften. Bei frostempfindlichen Böden (mit entsprechendem Feinkornanteil, Kornverteilung, Mineralart) findet während des Gefrierprozesses eine Unterteilung des Wassergehaltsprofils in Richtung der Frostausbreitung statt. Selbst nach dem Tauen des Bodens stellt sich nicht wieder die ursprüngliche Wassergehaltsverteilung ein. Während des Kühlens können zudem Kontraktionsrisse entstehen, die während des Tauens unter Umständen mit Erosionsmaterial gefüllt werden und zu Inhomogenitäten im Boden führen. Infolge der geringen Durchlässigkeit und der dadurch eingeschränkten Wasserzufuhr in den gefrierenden Bereich stellen sich nach einem Frost-Tau-Wechsel keine stabilen Verhältnisse ein. Vielmehr treten während mehrerer aufeinanderfolgender Frost-Tau-Zyklen weitere Änderungen in den Bodeneigenschaften auf. Dies kann zu einer signifikant geänderten Scherfestigkeit führen. (Spektrum 2014a)

Auswirkungen der Landnutzung

Eine Landnutzung kann häufigem Frost-Tau-Wechsel entgegenwirken, indem Vegetation auch in den Wintermonaten durch entsprechende Verschattung die Erwärmung des Bodens und damit sein Auftauen verhindert. Dies kann einerseits durch unmittelbaren Bewuchs aber auch durch Verschattung mittels Bäumen oder Sträuchern erfolgen.

4.6.3. Zusammenfassung

Auch wenn ein Anstieg der Häufigkeit des Frost-Tau-Wechsels für ganz Hessen erwartet werden kann, wird sich dieser vor allem in solchen Mittelgebirgslagen stärker auswirken, in denen bisher längere

Dauerfrostperioden durch den Temperaturanstieg entfallen. Allerdings wird sich dies eher sehr kleinräumig ergeben, so dass konkrete Lokalisierungen nur eingeschränkt möglich sind.

4.7. Zwischenfazit

Tabelle 5 fasst die Komplexität der Auswirkungen des Klimawandels und den dadurch entstehenden Gefährdungen zusammen, die einen direkten oder indirekten Bezug zur Straßeninfrastruktur aufweisen. Dabei werden zu jeder Art der Gefährdung die klimatischen Einflüsse und deren Kenngrößen in Verbindung mit den klimatischen Folgen und deren Beeinflussungsfaktoren dargestellt. Der Bezug zu den in Kapitel 4 beschriebenen Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur wird über die Datenblätter (s. Anhang) hergestellt.

Die für die Entstehung der jeweiligen Gefährdung beitragenden Faktoren wurden in diesem Kapitel ausführlich beschrieben. In der Tabelle sind die wesentlichen Kenngrößen zusammengefasst ausgeführt und in zwei Kategorien unterteilt:

- primäre Kenngrößen, die für die Entstehung der Gefährdung ausschlaggebend sind und
- sekundäre Kenngrößen, die die Gefährdungslage zuspitzen können.

Wie genau jede Kenngröße zur Entstehung der Gefährdung beitragen kann, ist der Spalte „Klimatische Folge“ zu entnehmen. Die dazugehörigen "Klimagrößen" geben Hinweise darauf, wie die klimatischen Folgen zu messen sind und vorhergesagt werden können. Die Größen gehören zu den üblich vom DWD gemessenen Daten und können somit ohne größeren Aufwand abgerufen werden.

Räumliche lokale Gegebenheiten, wie vor allem die Topografie, die Bodenzusammensetzung und die Landnutzung können zudem zur Eskalation oder zur Milderung der Gefährdungssituation beitragen. In diesem Kapitel und in der untenstehenden Tabelle sind die wesentlichen Faktoren zu jeder Gefährdungsart und Kenngröße ausgeführt. Diese Faktoren können aber lokal stark variieren und es können Synergien entstehen, die deren Effekte verschärfen. Auf eine umfassende Erarbeitung weiterer Kaskadeneffekte wird hier aufgrund der fehlenden Datenlage und des Erhebungsaufwands verzichtet. Sollte dennoch eine Gefährdung erwartet werden, so können die hier gelisteten Faktoren in dem relevanten Einzugsbereich genauer betrachtet und ihre Wechselwirkungen im Detail geprüft werden.

Tabelle 5: Gefährdungsanalyse

Gefährdung durch	Klimatischer Einfluss	Kenngröße	Einordnung der Kenngröße	Klimatische Folge	Klimagröße	Beeinflusst durch			Folgen beschrieben in Datenblatt...
						Bodeneigenschaft	Gelände	Weitere Faktoren	
Hochwasser	Niederschlag	Starkregen	Primär	Hoher Abfluss	Anzahl Starkregentage	Wasserdurchlässigkeit	Neigung & Einzugsgebietsgröße	Nutzung wie z.B. (Hoher) Versiegelungsgrad, Landwirtschaftliche Nutzung ==> erhöhter Abfluss	N1
		Veränderter jahreszeitlicher Niederschlag	Sekundär	Ausgetrockneter Boden durch Dürrebedingung	Ø Regenmenge Sommer				
				Aufgeschwemmter Boden durch Dauerniederschlag	Ø Regenmenge Winter				
				Aufgeschwemmter Boden durch Regen statt Schnee	Ø Temperatur Winter				
Primär	Dauerniederschlag	Ø Regen							
Sturmwurf	Wind	Starkwind	Primär	Hohe Windgeschwindigkeiten	Anzahl Starkwindtage	x	Relief	große Freiflächen ohne Windbrecher	S1
	Niederschlag	Veränderter jahreszeitlicher Niederschlag	Sekundär	Aufgeschwemmter Boden durch Dauerniederschlag	Ø Regenmenge Winter	Wasserdurchlässigkeit	Neigung	Forstwirtschaftliche Nutzung (Monokulturen)	
				Aufgeschwemmter Boden durch Regen statt Schnee	Ø Temperatur Winter				
				Ausgetrockneter Boden durch Dürrebedingung	Ø Regenmenge Sommer				
Massenbewegung	Niederschlag	Starkregen	Primär	Hoher Abfluss	Anzahl Starkregentage	Erodierbarkeit/Wasserempfindlichkeit	Neigung & Einzugsgebietsgröße	Landnutzung (Oberflächenabfluss: Flächenversiegelung & Widerstandskörper)	G1
		Veränderter jahreszeitlicher Niederschlag	Sekundär	Ausgetrockneter Boden durch Dürrebedingung	Ø Regenmenge Sommer	Wasserempfindlichkeit	Neigung		
				Aufgeschwemmter Boden durch Dauerniederschlag	Ø Regenmenge Winter	Wasserdurchlässigkeit			
				Aufgeschwemmter Boden durch Regen statt Schnee	Ø Temperatur Winter				
	Temperatur	Frost-Tau-Wechsel (Tagesgang)	Sekundär	Frostsprengung im umgebenden Gelände	[kein geeigneter Indikator verfügbar]	Wasserempfindlichkeit	x		

Hitzeschäden	Temperatur	Heiße Tage (Hitzewellen)	Primär	Hitzeinwirkung	Anzahl Heiße Tage	Wasserempfindlichkeit	Hanglage	Landnutzung (Flächenversiegelung & Begrünung)	T1
			Primär	Dauerhafte Hitzeinwirkung	Anzahl Hitzewellen				
Dürreschäden und Niedrigwasser	Niederschlag	Veränderter jahreszeitlicher Niederschlag	Primär	Niedrigwasserstand durch Dürrebedingungen	Ø Regenmenge Sommer	Wasserempfindlichkeit	Einzugsgebiet	Landnutzung	N3
	Niederschlag	Veränderter jahreszeitlicher Niederschlag	Primär	Ausgetrockneter Boden durch Dürrebedingung	Ø Regenmenge Sommer				
	Temperatur	Heiße Tage (Hitzewellen)	Sekundär	Ausgetrockneter Boden durch Dürrebedingung	Anzahl Heiße Tage Anzahl Hitzewellen		Hanglage		
	Starkwind	Starkwind	Sekundär	Staubaufwirbelung	Anzahl Starkwindtage		Relief	Landnutzung (Auflockerung der obersten Erdschicht)	
Kälteschäden	Temperatur	Frost-Tau-Wechsel (Tagesgang)	Primär	Frostsprengung im Oberbau	[kein geeigneter Indikator verfügbar]	Wasserempfindlichkeit	Hanglage	Landnutzung	T3
		Kalte Temperaturen (zwischen +4 und -5°C)	Sekundär	Glättebildung			Relief	Landnutzung	

5. Bauwerke

Neben den in Kap. 3 beschriebenen räumlichen Gegebenheiten sind der Zustand der Verkehrsinfrastruktur sowie das Verkehrs- und Transportaufkommen entscheidend für die Vulnerabilität und somit Anfälligkeit für Systemstörungen (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 81). Daher bedarf es der Betrachtung der verschiedenen für die Landesinfrastruktur relevanten Bauwerke. Für den Begriff „Bauwerk“ gibt es bisher keine allgemeingültige Definition. Daher wird in diesem Kapitel dargelegt, was in diesem Gutachten unter dem Begriff „Bauwerk“ verstanden wird, nämlich „Ingenieurbauwerke“ (Kap. 5.1.) und „Fahrbahnen und Seitenräume“ (Kap. 5.2.).

5.1. Ingenieurbauwerke

Im Folgenden werden verschiedene Ingenieurbauwerke angelehnt an die DIN 1076 (Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung) vorgestellt.

Brücken

Ein Bauwerk, das als Überführung eines Verkehrsweges über andere Verkehrswege oder Gewässer oder zur Überbrückung tiefer liegender Gelände dient, und zugleich eine lichte Weite von mindestens zwei Metern zwischen den Widerlagern aufweist, wird als Brücke bezeichnet (DIN 1076). Brücken können in sehr unterschiedlichen Dimensionen, abhängig von strukturellen Gegebenheiten der direkten Umgebung und infrastrukturellen Anforderungen dimensioniert werden. Hessen Mobil betreut insgesamt 4.989 Brückenbauwerke, die sich neben dem Landesstraßennetz auch auf das Bundes- und Kreisstraßennetz verteilen (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021).

Verkehrszeichenbrücken

Unter Verkehrszeichenbrücken sind Tragkonstruktionen zu verstehen, an denen Schilder und Zeichengeber angebracht sind und die ganz oder zum Teil über die Fahrbahn reichen. Sie können abhängig von ihrer Größe als Gelenkrahmen ausgebildet sein bzw. einseitige oder beidseitige Auskragungen aufweisen. (DIN 1076)

Tunnel

Zu den Tunneln werden Bauwerke zugeordnet, die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche verlaufen und in geschlossener Bauweise hergestellt wurden. Auch Bauwerke, die länger als 80 m sind und in offener Bauweise hergestellt wurden, zählen zu den Tunnelbauwerken. Erforderliche Nebenanlagen sind – sofern baulich integriert – ebenfalls Teil der Tunnelbauwerke. Teilabgedeckte unter- oder oberirdische Verkehrsbauwerke, oberirdische Einhausungen, Kreuzungsbauwerke und Galeriebauwerke, die ebenfalls eine Länge von mindestens 80 m aufweisen, werden auch als Straßentunnel bezeichnet (DIN 1076). Das von Hessen Mobil betreute Streckennetz umfasst insgesamt 9 größere, technisch aufwändig ausgestattete Tunnel mit einer Streckenlänge von zusammen über 4 km sowie rund 30 kleinere Tunnel (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021).

Trogbauwerke

Ein Trogbauwerk ist ein Stütz- oder auch Rampenbauwerke aus seitlichen Stützwänden, das mit einer geschlossenen Sohle (Grundwasserwanne) hergestellt wird (DIN 1076). Auf der Rampe, die für gewöhnlich als Einfahrt in einen Tunnel oder eine Unterführung dient, wird in der Regel der Verkehrsweg geführt. Das Trogbauwerk muss, wenn es sich innerhalb der Grundwasserzone befindet, wasserdicht errichtet werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Bauwerk durch das Eigengewicht oder eine Verankerung im Boden gegen Auftrieb (aufschwimmen) gesichert ist. (Lufsky und Cziesielski 2006)

Stützbauwerke

Stützbauwerke bzw. Stützmauern sind Bauwerke, die der Sicherung von Einschnitt- und Dammböschungen dienen. Insbesondere innerhalb von Siedlungen und an topografisch sehr ausgeprägten Steigungen ist das übliche Abböschchen ohne Bauwerk nicht möglich. Stützbauwerke üben somit eine Stabilitätsfunktion gegenüber dem Erdreich, dem Straßenkörper oder einem Gewässer aus. Sie weisen eine sichtbare Höhe von mindestens 1,50 m auf. (DIN 1076). Ist die Stützmauer nicht in ausreichender Dicke dimensioniert, um Frost auf der zum Erdreich hingewandten Seite zu verhindern, so ist die Herstellung einer Drainage zur Entwässerung erforderlich, um eine Ausdehnung und damit eine Verschiebung bzw. Beschädigung des Bauwerks und eine Gefährdung der Standsicherheit zu verhindern. Wenn an der Mauerkrone bindiger Boden vorzufinden ist, so sollte bereits bei Verfüllungen ab 10 cm Stärke eine Drainage errichtet werden. Für die Abfuhr von Sickerwasser können auch Bohrungen in der Wand selbst vorgenommen oder bei Schwergewichtswänden ein Verzicht des Verfüllens der Fugen vorgenommen werden (Natzschka 2003). Je nach Einsatzgebiet können unterschiedliche Typen von Stützbauwerken eingesetzt werden, die im Folgenden aber nicht weiter ausgeführt werden (Bohrpfahlwand, Futtermauer, Schwergewichtswand, Krainerwand, Kunststoff-Bewehrte Erde, Rucksackmauer, Spundwand, Trockenmauer, Winkelstützwand). Das Straßennetz von Hessen Mobil umfasst in Summe 2.982 Stützwände, verteilt auf Bundes-, Landes- und Kreisstraßen. (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021)

Lärmschutzbauwerke

Um Lärmemissionen von linien- oder flächenförmigen Schallquellen zu reduzieren, werden Lärmschutzbauwerke als Wände mit einer Höhe von mindestens 2 m errichtet (DIN 1076). Lärmschutzbauwerke können sehr unterschiedlich hergestellt (Materialien, Gestaltung) oder bei ausreichender Flächenverfügbarkeit in Form von Lärmschutzwällen errichtet werden (Wälle fallen jedoch nicht unter Ingenieurbauwerke). Im Straßennetz von Hessen Mobil sind insgesamt 211 Lärmschutzwände, verteilt auf Bundes-, Landes- und Kreisstraßen, vorzufinden. (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021)

Sonstige Ingenieurbauwerke

Nach DIN 1076 sind sonstige Ingenieurbauwerke alle Bauwerke, bei deren Errichtung es eines Einzelstandsicherheitsnachweises bedarf (bspw. bei Rohr- und Brandstraßenbrücken, Regenrückhaltebecken aus Stahlbeton, Schachtbauwerken).

Andere Bauwerke

Andere Bauwerke, die nach DIN 1076 nicht als Ingenieurbauwerke klassifiziert werden, sind:

- Durchlässe, deren Öffnung bzw. lichte Weite kleiner als 2 m ist
- einfache Rohr- und Peitschenmasten, die der Beschilderung mit Verkehrszeichen und der Befestigung von Lichtsignalanlagen dienen
- Stützbauwerke mit einer Höhe von weniger als 1,50 m
- Lärmschutzwände mit einer sichtbaren Höhe von weniger als 2 m
- Steilwälle
- Gabionen

5.2. Fahrbahnen und Seitenräume

Die Fahrbahnen der 7.200 km Landesstraßen sind in verschiedenen Breiten und Ausführungen vorzufinden. (Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement 2021).

Zudem sind beispielsweise Busverkehrsflächen, Rad- und Gehwege, Entwässerungsanlagen, Erdbauwerke, Fels- und Hangsicherungen sowie weitere Systemelemente Teil der Landesstraßeninfrastruktur von Hessen Mobil, die abhängig von ihrer Lage, Dimensionierung und Bedeutung bei Risikoabschätzungen ebenfalls zu berücksichtigen sind.

6. Auswirkungen der klimatischen Einflüsse auf das Straßenverkehrssystem

Die Straßenverkehrsinfrastruktur war schon immer von meteorologischen Einflüssen und Naturgefahren betroffen. Die Zukunftsprojektionen der Klimamodelle deuten jedoch auf eine Zunahme der Gefährdung des hessischen Straßennetzes hin, insbesondere aufgrund von Veränderungen der Niederschlags- und Temperaturextreme und einer zu erwartenden Zunahme der Häufigkeit und Intensität schwerer Stürme. Als **besonders kritisch** sehen Vertreter der Nutzer und Betreiber der Straßen- und Schieneninfrastruktur⁷ die Folgen und Herausforderung von **Starkregen und Dauerregenerereignissen**. Als **zweitgrößte Herausforderung** werden **Sturmereignisse** genannt. **Temperaturextreme und -schwankungen** werden als **leicht weniger problematisch** identifiziert (Hoffmann et al. 2009b, S. 4). Von sonstigen Folgen des Klimawandels, die in öffentlichen Berichten häufig genannten werden, wie dem Anstieg des Meeresspiegels oder dem Rückgang der ganzjährigen Schnee- und Eiskecke sowie von Permafrostböden, ist Hessen aufgrund seiner Lage nicht betroffen (Vgl. Kap. 2.5).

Klimaveränderungen werden sich auf das Verkehrswesen vor allem durch Extremwetterereignisse und Ereignisse von langer Dauer auswirken. Das hessische Straßennetz wurde, wie alle Straßensysteme, für die typischen Wetter- und Klimabedingungen vor Ort gebaut, einschließlich einer angemessenen Bandbreite von Extremen. Wenn die Klimaveränderungen wie prognostiziert eintreten – und die wissenschaftlichen Erkenntnisse lassen erwarten, dass dies der Fall sein wird – werden die Grenzen der Umweltbedingungen, für die das System konzipiert wurde, überschritten. Die resultierenden Auswirkungen können erheblich sein. Sie werden je nach Bauwerkstyp, dessen Zustand und der spezifischen Region des Landes variieren und sowohl positiv als auch negativ ausfallen. Im Allgemeinen werden die Auswirkungen weitreichend und kostspielig sein, sowohl in menschlicher als auch in wirtschaftlicher Hinsicht. Sie werden erhebliche Änderungen in der Planung, dem Bau, dem Betrieb und der Instandhaltung der Verkehrssysteme erfordern (Transportation Research Board 2008).

Die Gefährdungen für die hessische Straßeninfrastruktur selbst, als Folge von Extremwetterereignissen und langfristigen Klimaveränderungen, treten vor allem in Form von Überschwemmungen, Hangrutschungen und Fahrbahnverformung auf. Diese führen zu einer tendenziell stärkeren Abnutzung der Infrastruktur, die sowohl eine verkürzte Lebensdauer, erhöhte Erhaltungskosten als auch erhöhte Ersatzinvestitionen mit sich zieht. Daher ist auch der Bau und Betrieb der Straßeninfrastruktur von dem Klimawandel und den damit einhergehenden, immer häufiger auftretenden, Witterungsextreme betroffen. Störungen in den Bereichen Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit sind ebenfalls zu berücksichtigen, da sie mit Mehraufwand im Bereich Bau und Betrieb verbunden sind. (BMVI-Expertennetzwerk 2020b; Transportation Research Board 2008; Hoffmann et al. 2009a, S. 7).

Klimawandelbedingte Änderungen, sowohl Extremwetterereignisse als auch langfristige Klimaveränderungen, können sich auf zwei unterschiedliche Arten auf das Straßensystem auswirken.

⁷ Stakeholder aus verschiedenen Bereichen: Wirtschafts- und Verbandsvertreter/innen des Straßen- und Schienenbaus, Schienenverkehrsbetreiber, Wissenschaftler/innen, Behördenvertreter/innen und Nicht-Regierungs-Organisationen.

Handelt es sich um einen direkten Auslöser, so sind Infrastrukturen selbst direkt betroffen (wie z.B. Beschädigung von Bauwerken). Die zweite Auswirkungsart ergibt sich aus indirekten Auslösern (wie z.B. Niedrigwasser) und den damit verbundenen Kaskadeneffekten, die über Knoten anderer Systeme die Verkehrsinfrastruktur beeinträchtigen. Diese Auslöser beeinflussen somit nicht direkt die Straßeninfrastruktur, sondern andere Verkehrsträger wie Schienen oder Wasserstraßen, so dass durch Verkehrsverlagerungsprozesse eine erhöhte Auslastung der Straßeninfrastruktur die Folge sein kann. Einige meteorologische Ereignisse können sich sogar auf beide Arten auf die Straßeninfrastrukturen auswirken, da sie potenziell mehrere Verkehrsträger gleichzeitig beeinträchtigen können, wie z.B. Flusshochwasserereignisse. In einem solchen Fall, bei dem direkte und indirekte Effekte gleichzeitig wirken, wird von einer eskalierenden Kaskade gesprochen.

In den nächsten Unterkapiteln werden die klimatischen Einflüsse, die aufgrund der prognostizierten Klimaänderungen für die hessischen Straßen besonders relevant sind und werden (Niederschläge, Wind/Stürme und Temperaturen) auf ihre direkten sowie indirekten Wirkungen, sowohl auf die Straßeninfrastrukturen selbst als auch auf die Bereich Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und -sicherheit im Detail untersucht.

6.1. Niederschlag – Starkniederschläge & lang andauernde Niederschlagsperioden, Veränderungen der saisonalen Niederschlagsmuster sowie Trockenperioden

Die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Starkniederschlägen sind wichtige Faktoren bei der Planung von Verkehrsinfrastrukturen. Bauingenieure stützen sich auf Wahrscheinlichkeitsschätzungen der Niederschlagsintensität, -dauer und -wiederkehrperioden für die Planung von Straßendurchlässen, Regenwasserableitungssystemen sowie Straßen- und Gleisbetten (Transportation Research Board 2008, S. 89).

Starkniederschläge sowie lang andauernde Niederschlagsperioden können, wenn die Rohrdurchmesser für den erhöhten Durchfluss unterdimensioniert sind, zur **Überlastung von Straßentwässerungssystemen** führen. Dies kann zu lokalen **Überflutungen** von Straßen sowie insbesondere von Tunneln und Unterführungen führen, die Schäden an der Straßeninfrastruktur verursachen können (Hoffmann et al. 2009a, S. 5). In bereits gesättigten Böden kann bei Starkregen keine Versickerung erfolgen, was zu Hochwasser in Folge von erhöhtem Oberflächenabfluss führen kann (s. Kap. 4.1). Hochwasser und das darin enthaltene Treibgut können sowohl **Schäden an Bauwerken (z.B. Brücken) – bis hin zum Versagen – und an der Straße** als auch **Störungen und Schäden an den elektronischen Ausstattungen** wie z.B. Lichtsignalanlagen und Stromversorgungsanlagen und **Beeinträchtigung der Verkehrsleittechnik** verursachen (Rauthe et al. 2020a, 32ff.). Kritisch sind Überschwemmungen insbesondere für tiefliegende Brücken (Hoffmann et al. 2009b, S. 4; Transportation Research Board 2008, S. 89).

Durch Überflutungen der Schieneninfrastruktur oder Sperrungen von Wasserstraßen auf Grund der Hochwassersituation in Flüssen kann es auf Straßen, neben den genannten Auswirkungen zusätzlich zu einer erhöhten Verkehrsbelastung kommen. (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 26).

Starkniederschläge sowie **lang andauernde Niederschlagsperioden** können zudem zu einer Zunahme der Bodenfeuchte bis hin zu **Erosionen** (s. Kap. 4.2) und **Unterspülungen** führen. Dies kann für die

Straßeninfrastrukturen **langfristige Straßenschäden** z.B. durch **Bodenerosion an Fahrbahnböschungen oder Erosion und Absenkung von Straßen** zur Folge haben. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2008; Umweltbundesamt (UBA) 2021a, S. 44, 2021c, S. 44).

Noch kritischer ist die mögliche **Unterspülung von Brückenpfeilern**, bei der Sedimente (Sand, Schluff und Steine) vom Grund eines Flusses weggespült werden. Obwohl Unterspülungen jederzeit auftreten können, sind sie bei Hochwasser besonders stark, da schnell fließendes Wasser mehr Energie als ruhiges Wasser besitzt, um Sedimente anzuheben und flussabwärts zu transportieren. Die Entfernung von Sedimenten im Bereich von Brückenpfeilern⁸ oder -widerlagern⁹ kann die Standsicherheit von Brücken schwächen und schließlich untergraben (Transportation Research Board 2008, S. 89; Warren 1993).

Überschwemmungen, die das bestehende Regenwasserabflusssystem überfordern, führen zu **Bodensättigung und Oberflächenerosion**. Sie können die Erosion des Bodens im Bereich von Straßen, Brückenfundamenten und Stützmauern verschärfen. Sowohl eine überdurchschnittlich hohe **Bodenfeuchte als auch Erosion und Unterspülungen gefährden die Stabilität von Brücken, Tunneln und Straßenfahrbahnen** und können sich sogar auf im Boden verlegte Leitungen auswirken (Savonis et al. 2008, S. 4–20; Hoffmann et al. 2009a).

Bodenerosion kann durch den Wind verstärkt auftreten und sich negativ auf die Wasserkapazität des Oberbodens auswirken und somit die Bodenstruktur sowie die darauf liegenden Verkehrsinfrastrukturen schädigen (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 44). Aktuell nimmt Winderosion in Hessen zwar nur eine untergeordnete Rolle ein, allerdings könnte sich dies durch längere Trockenperioden in der Zukunft ändern. Insbesondere die flachen Ackerflächen des Wetterau und der Untermainebene könnten daher in der Zukunft von Winderosion betroffen sein. (CDU / SPD 2021, S. 24)

Darüber hinaus können Witterungen und extreme Wetterereignisse wie **Dauerniederschlag, Starkregenereignisse in ansonsten trockenen Perioden oder Frost-Tau-Wechsel gravitative Massenbewegungen** (häufig als „**Hangrutschungen**“ oder „**Erdrutsche**“ bezeichnet) auslösen. Gravitative Massenbewegungen sind „hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fest- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft“ (Glade und Dikau 2001). Sie können in Form von Rutschungen/Gleit-, Sturz- oder Fließprozessen auftreten (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 55; Hoffmann et al. 2009a; Lohrengel et al. 2020).

Gravitative Massenbewegungen können **direkte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur** verursachen: Hangrutsche und Unterspülungen führen z.B. zur **Destabilisierung und Zerstörung von Straßenabschnitten**. Sie können zusätzlichen Aufwand für die Aufrechterhaltung des Verkehrsablaufs bedeuten, wenn sie zu **Hindernissen auf Verkehrswegen** führen. Unter der Annahme des Weiterwie-bisher-Szenarios werden in Zukunft weitere Strecken potenziell gefährdet. Eine genaue „Schwellenwertanalysen“ soll im Rahmen der 2. Forschungsphase (2020-2025) des Themenfelds 1

⁸ Säulen, die eine Brücke tragen

⁹ Stützen an beiden Enden einer Brücke

durch BAST/EBA/DWD erfolgen (BMVI-Expertenetzwerk 2020b, S. 55; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2008; Lohrengel et al. 2020).

Sollten auch andere Verkehrsinfrastrukturen vor denselben Herausforderungen stehen, ist mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf den Straßen zu rechnen. Dies kann zum einen aus überfluteten Bahnstrecken, Schäden an den Stützkonstruktionen des Gleisbettes durch Erosion, Unterspülung, Erdbeben oder Schlammlawinen und zum anderen aus gesperrten Wasserstraßen auf Grund von Hochwassersituationen in den Flüssen resultieren. (Hoffmann et al. 2009a, S. 5; Transportation Research Board 2008).

Zudem zählen zu den von Starkregen und Dauerregenereignissen potenziell verursachten Störungen neben den **Verkehrsbehinderungen** und **Streckenunterbrechungen bzw. -sperrungen** auch die **wetterbedingte Unterbrechung von Bauarbeiten, Auswirkungen** der meteorologischen Änderungen **auf die Sicherheit und den Wartungsbetrieb** sowie **Störungen der elektronischen Ausstattungen** wie z.B. Lichtsignalanlagen und **Beeinträchtigung der Verkehrsleittechnik** (Hoffmann et al. 2009b, S. 4; Transportation Research Board 2008).

Veränderungen der jahreszeitlichen Niederschlagsmengen, bei denen **mehr Niederschlag in Form von Regen als von Schnee** fällt, können in bestimmten Gebieten zu Problemen führen. Sie führen zu **sofortigem Abfluss** und erhöhen das **Risiko von Überschwemmungen, Erdbeben und Hangrutschen** und den daraus resultierenden Schäden an Straßen, insbesondere in den Winter- und Frühjahrsmonaten (Du Vair et al. 2002). Bei **schiffbaren Flüssen**, die sowohl auf Niederschläge als auch auf die Schneeschmelze reagieren, werden im Winter wahrscheinlich größere Volumenströme auftreten, die mit einem **höheren Hochwasserrisiko** verbunden sind und die die **nahliegenden Straßen ebenso überfluten** können (Transportation Research Board 2008, S. 90).

Veränderungen bei Regen, Schneefall und saisonalen Überschwemmungen wirken sich auch auf die **Sicherheit und den Wartungsbetrieb** aus. Einen Wechsel von Schnee- zu Regenniederschlägen kann Vorteile für die Sicherheit und den Betrieb haben, wenn weniger Schneeräumungen benötigt werden. Es können aber auch vermehrte Winterdienstesätze bei Temperaturen um den Gefrierpunkt ausgelöst werden (vgl. Kap. 4.6.).

Langanhaltende **Trockenperioden** (z.B. mit niederschlagsarmen und heißen Sommern) **trocknen den Boden aus und verhärten die Oberfläche**. Die Auswirkungen der Trockenheit und der schlechten Bodenqualität verstärken sich gegenseitig in einem Teufelskreis: je trockener der Boden ist, desto mehr heizt er sich in der Sonne auf. Je wärmer es wird, desto mehr Wasser wird von den Pflanzen verdunstet und damit dem Boden entzogen. Sollte es dann stark regnen, kann das Wasser nicht in den Boden einsickern. Dies führt zu **verstärktem Oberflächenabfluss und zur Bodenerosion**. Das Wasser fließt dann direkt in tiefer gelegene Gebiete und kann durch **Überflutung** große Schäden in Siedlungen und bei Infrastrukturen verursachen (Hübener et al. 2017, S. 17).

Trockenperioden können zur erhöhten Anfälligkeit für **Waldbrände** führen, welche die Verkehrsinfrastruktur direkt bedrohen. Gebiete, auf denen Waldbrände den Baumbestand geschädigt und stark reduziert haben, weisen bereits bei üblichen Niederschlagsereignissen eine erhöhte Anfälligkeit für **Schlammlawinen** auf.

Trockenperioden in Gebieten mit hoher Grundwasserförderung können zu einem **Absinken des Grundwasserspiegels** führen. Dies wiederum kann erkennbare **Wald- und Straßenschäden** zur Folge haben, wie es bereits in den 70er und 90er Jahren im hessischen Ried der Fall war¹⁰ (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2005). Massive Störungen des Wasserhaushalts führen einerseits auf Grund von Wassermangel zu Waldschäden, die den Straßenverkehr und Betrieb stören können sowie andererseits zu Schäden an Gebäuden, Straßen und Wegen als Folge von Geländesetzungen (Absinken und Nachgeben des Untergrundes) (Bannick et al. 2008, S. 23).

Trockenperioden können in Folge von **Niedrigwassersituationen und damit Abladebeschränkungen auf den Wasserstraßen** auch indirekt zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf den Straßen führen. (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 26).

6.2. Starke Winde und Stürme

Stürme und starke Winde sind wie Starkniederschläge, Ereignisse, die die Straßeninfrastruktur bereits belasten und herausfordern. Durch den Klimawandel ist jedoch mit einem Anstieg der lokalen Häufigkeit und des Ausmaßes von solchen Ereignissen zu rechnen, was zusätzliche Auswirkungen auf die Straßen mit sich zieht (vgl. Kap. 2.4). Sehr hohe Windgeschwindigkeiten können sich über verschiedene Wirkungspfade auf die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland auswirken (z.B. starke Seitenwinde, entwurzelte Bäume, Bodenerosion, Stürme).

Starke Stürme gehen oft mit längeren Intervallen intensiver Niederschläge und erhöhten Windgeschwindigkeiten einher, wodurch Anzahl und Intensität der **Windschäden zunehmen**. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit von Infrastrukturausfällen bei Stürmen und starken Winden, insbesondere wenn die Infrastrukturen – aufgrund der Zeit oder sonstige Stressoren – schon geschwächt sind (Transportation Research Board 2008, S. 90).

Das BMVi-Expertennetzwerk hat eine Literaturanalyse der Elemente, die potentiell durch Sturmgefahren beeinträchtigt werden könnten, durchgeführt. Die Elemente wurden dabei in die Kategorien „ortsfesten Risikoelemente“ (Ingenieurbauwerke und Strecke) und „mobile Risikoelemente“ (Verkehrsfluss), gegliedert und hinsichtlich ihrer Bedeutung untersucht. Folgende Ingenieurbauwerke könnten durch starke Winde und Stürme gefährdet sein: schwingungsanfällige Bauteile an Brücken, Verkehrszeichenbrücken, Bauwerksausstattungen sowie Lärmschutzwände, im Extremfall auch Brücken (Tragwerke) und hohe Brückenpfeiler. Im Bereich „Strecke“ werden die Ausstattung (auch elektrisch), die Vegetation (Bäume) sowie die Geologie und Böschungen gelistet, wobei die Vegetation von vorrangiger Bedeutung bei Sturmgefahren ist. Im Bereich „Verkehrsfluss“ sind lediglich „Verkehrsteilnehmer/Fahrzeuge“ gelistet. Diese sind von mittleren Bedeutung für Sturmgefahren (Bott et al. 2020).

¹⁰ In den Jahren 1989 – 1992 wurden Setzrissschäden an Gebäude, Straßen und Wegen in 29 Städte und Gemeinden im Hessischen Ried gemeldet. Für die auf tiefe Grundwasserstände zurückgeführten Setzungsschäden an Straßen und Wegeschäden wurde eine Schadenssumme von rund 1,4 Millionen Euro ermittelt .

Stürme können direkt zu Behinderungen führen oder über **Windwurf** Straßen, Gleise und Stromleitungen schädigen. Auf Grund von Stürmen ist mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Infrastrukturausfällen und einer erhöhte **Gefahr für die Stabilität von Brückenfahrbahnen** zu rechnen (Transportation Research Board 2008, S. 90).

Extremwinde, die in Form von **starken Seitenwinden und Windböen** auftreten, können den **Straßenverkehr in exponierten Lagen gefährden** und sogar die Infrastruktur in exponierten Lagen beschädigen. Im Straßenverkehr besonders gefährdet sind Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche (z.B. LKWs) sowie Motorradfahrer auf Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 54).

Starke Winde führen außerdem häufig zu **abgeknickten oder entwurzelten Bäumen (Sturmwurf/Windbruch) auf den Fahrwegen**, wodurch es zu einem zusätzlichen Aufwand für die Aufrechterhaltung des Straßennetzes kommt. Mögliche Unfallgefahren für Verkehrsteilnehmer sowie gegebenenfalls temporäre Sperrungen von Straßenabschnitten müssen schnellstmöglich aufgehoben werden können. Schienenabschnitte können ebenso von den Auswirkungen starker Winde betroffen sein und zu einer Verkehrsverlagerung auf die Straßen führen (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 37).

Die Baumarten und -höhen sind maßgeblich für die Bestimmung der zu erwartenden Sturmschäden. Douglasie, Fichte und ggf. auch Tanne gehören zu den am stärksten sturmgefährdeten Baumarten. Nadelbäume sind grundsätzlich anfälliger gegenüber Starkwinden als Laubbäume. Dies liegt zum einen an ihrer Angriffsfläche und zum anderen an den unterschiedlichen Wurzelarten. Während Nadelbäume im Winter eine große Angriffsfläche aufweisen, sind Laubbäume kahl. Außerdem sind die meisten Nadelhölzer flachwurzelnd, wodurch sich ihre Standfestigkeit bei Starkwinden gegenüber tiefwurzelnden Laubbäumen zusätzlich verringert. **Potenziell gefährdet (exponiert) sind vor allem Straßenabschnitte mit Bäumen in einem Abstand von ≤ 20 m.** Grundlegende Informationen zu dem Vorkommen von Vegetation entlang der Verkehrswege kann das „bundesweite Digitale Basis-Landschaftsmodell“ (Basis-DLM) liefern (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 52–53; Albrecht 2009; Hetzel 2007).

Stürme können auch zur **Beschädigung** bis hin zur Zerstörung und bzw. oder zum Verlust von **Straßenschildern und elektronischer Ausstattungen** wie z. B. Lichtsignalanlagen führen (Transportation Research Board 2008, S. 90).

Winde (und zwar nicht nur starke Winde) lösen **Bodenerosionen** aus, die maßgeblich durch die Bodenbedeckung sowie -beschaffenheit beeinflusst ist. Anfällig sind vor allem ausgetrocknete, nicht ausreichend vegetationsgeschützte Böden. Faktoren wie Trockenheit oder Starkwindereignisse erhöhen die Anfälligkeit der Böden für Winderosion (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 44).

Auch die anderen Verkehrsinfrastrukturen können durch Stürme und starke Winde beeinträchtigt werden und somit indirekt ein erhöhtes Verkehrsaufkommen auf den Straßen auslösen. Das Schieneninfrastruktursystem kann zum Erliegen kommen, wenn Hindernisse auf den Schienenwegen wie bspw. abgestürzte Äste und Bäume liegen oder andere Infrastrukturelemente der Schieneninfrastruktur gestört und zerstört werden. Es kann zu Beeinträchtigungen des Flugbetriebs

kommen und auch Wasserstraßen können von Sturmgefahren betroffen sein, da Schäden an Binnenwasserstraßen, Häfen und maritimen Einrichtungen möglich sind (Bott et al. 2020).

6.3. Temperatur – erhöhte mittlere Lufttemperatur & Hitzewellen sowie vermehrte Frost-Tau-Wechsel

Klimaprojektionen zeigen, dass zukünftig die mittlere Lufttemperatur zunehmen wird, wodurch auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen steigt (vgl. Kap. 2.2). Gleichzeitig ist immer seltener mit Frostereignissen und möglicherweise mit mehr lokalen Frost-Tau-Wechseln zu rechnen.

Wesentliche Folgen können **hohen Temperaturen sowie insbesondere Hitzewellen** auf die Fahrbahn haben, indem sie **Material- und Strukturschäden sowie Verformungen an Straßenbelägen** (Spurrillen) verursachen. Die für den Straßenbau verwendeten Baumaterialien können sehr sensitiv auf Veränderungen der Temperatur, insbesondere auf Hitzewellen, reagieren: Straßenbeläge können beschädigt werden, z.B. durch Aufweichung des Straßenbelags auf Grund hoher Oberflächentemperaturen, verkehrsbedingte Spurrinnenbildung (wenn Fahrzeuge auf dem aufgeweichten Straßenbelag fahren), oder Migration von flüssigem Asphalt. Dadurch können langfristige Schäden für die Straßen entstehen. Eine anhaltende Lufttemperatur von über 32°C ist dabei ein wichtiger Schwellenwert (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 24; Hoffmann et al. 2009a; Transportation Research Board 2008; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2008).

Der amerikanische Transport Research Board nennt als zu erwartende Folgen des Anstieg von sehr heißen Tagen und Hitzewellen zudem (Transportation Research Board 2008, 117 ff):

- **Auswirkungen auf die Bauweise des Straßenoberbaus**
- **Thermische Ausdehnung des Betons bzw. des Bauteils an Brückendehnungsfugen** mit gegebenenfalls nicht ausreichenden Dilatationswegen von Übergangskonstruktion an Bauwerken
- Zwängungen bei der Überschreitung der normgemäß statisch anzusetzenden Differenztemperaturen für thermische Ausdehnung von hydraulischen Baustoffen

Heiße Tage können auch die Gefahr von Überhitzung mit sich ziehen und damit verbundene **Ausfallrisiken bei elektronischer Ausstattung** wie z. B. Lichtsignalanlagen verursachen (Hoffmann et al. 2009a).

Zudem können die Straßen in Hitzeperioden vor der zusätzlichen Herausforderung eines erhöhten Verkehrsaufkommens stehen. Die für die **Schienen** verwendete Materialien, wie z.B. Gleiskörper können **ähnlich betroffen** sein (Verformung von Schienen ab 43°C) und auch die **Binnenschifffahrt** kann durch Mangel der erforderlichen Wassertiefe wegen höheren Temperaturen **gefährdet** sein (BMVI-Expertennetzwerk 2020b, S. 24).

Überdies **verstärken** erhöhte Lufttemperaturen und insbesondere sehr heiße Tage die **Anfälligkeit für Erosion von Böden**, die unzureichend von Vegetation geschützt sind. Dies kann die Straßeninfrastrukturen direkt beeinflussen (s. Kap. 6.1) (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 44).

Einen Anstieg der Anzahl sehr heißer Tage und Hitzewellen kann auch Einfluss auf den Bau neuer Straßen sowie auf die Betriebsabläufe haben, indem die **Bauzeiten** aufgrund von Gesundheits- und Sicherheitsbedenken beschränkt werden müssen. Beschränkungen können bei 29,5°C beginnen und Hitzeerschöpfung ist bei 40,5°C möglich (Transportation Research Board 2008, 117 ff).

Wärmere, längere Sommer **wirken sich auf die Bäume und Grünflächen aus** und erfordern mehr Unterhaltung (Hoffmann et al. 2009a, S. 6):

- Bei trocken-warmen Sommern und langen Hitzeperioden, ist mit vermehrter **Astbruchgefahr** bei trockenen und abgestorbenen Bäumen zu rechnen, was einen höheren Aufwand bei der Unterhaltung erfordert. Frühzeitige und vermehrte **Laubfälle** sind ebenso zu erwarten, so dass eine erhöhte Rutschgefahr durch Laub auf den Straßen besteht.
- Bei feuchtwarmen Sommern ist eine **Verlängerung der Vegetationsperiode von Laubbäumen** zu erwarten, was zu vermehrtem Wachstum und Laubfall führt. Auch mit einer deutlichen **Erhöhung des Wachstums von Gras und Gehölze** ist zu rechnen. Bei vermehrtem Wachstum, ist gegebenenfalls mit vermehrtem Pflegeaufwand zum Freischneiden der Sichtfelder, mit mehr regelmäßigen Mäharbeiten im Unterhaltungsdienst und aufwendigerem Gehölzrückschnitt, der nur in der Zeit vom 1. Oktober bis 28. Februar zulässig ist (§39 Abs. 5 BNatSchG), im Herbst und Winter zu rechnen.

Trockenheit kann zu verstärkte Bodenerosion führen und negative Einflüsse auf die Verkehrsteilnehmer haben. Sollten Erd- oder Gesteinspartikel sich auslösen und mit dem Wind transportiert werden, kann dies **zu Sichtbeeinträchtigungen** infolge von **Staub oder Smog führen**. Landwirtschaftliche Flächen, die sich in der Nähe von Straßen befinden, können auch nach der Ernte von Erosion betroffen sein und als Quelle für Staubwolken dienen (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 44). Sichtbehinderungen durch Rauch von Waldbränden oder Straßensperrungen wegen Waldbränden sind auch mögliche Folgen von Trockenperioden (Transportation Research Board 2008, S. 86).

Der allgemeine Temperaturanstieg in Hessen verändert insgesamt den jahreszeitlichen Verlauf und es wird ein **späteres Einsetzen des saisonalen Frostes und früheres Einsetzen des saisonalen Tauwetters** erwartet, was leicht positive Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur sowie auf den Betrieb hat. Eine **geringere Verschlechterung der Straßenbeläge** durch weniger Frost, Schnee und Eis, und damit weniger Räumeeinsätze aber **möglicherweise mehr Frost-Tau-Wechsel** an einigen Stellen sind zu erwarten. Die meteorologischen Änderungen können auch zu einer längeren Bausaison führen (Transportation Research Board 2008, S. 86). Bei verkürzten Wintern werden zudem eine Verlängerung der Vegetationsperiode von Laubbäumen sowie eine deutliche Erhöhung des Wachstums von Gras und Gehölzen erwartet, mit den oben schon erwähnten Auswirkungen im Bereich Betrieb und Unterhaltung.

Mit den ansteigenden Temperaturen können einige Regionen eine lokale Abnahme der Anzahl der Eis- und Frosttage erwarten (s. Kap. 2.5), wobei andere Regionen dahingegen **möglicherweise vermehrt von Frost-Tau-Wechsel betroffen** sein werden, wenn an Frosttagen die Höchsttemperaturen nun über null Grad liegen, wo bisher durchgehend negativen Temperaturen herrschten. Temperaturen zwischen +4 und -5°C sind hinsichtlich der Glättebildung besonders kritisch, weshalb solche Bedingungen mit

einer erheblichen Zahl an Einsätzen verbunden sind, um vorbeugend Salz (NaCl) und Salzlösung (NaCl, CaCl₂, MgCl₂) zu streuen. Vermehrter Frost-Tau-Wechsel führte auch zu **einer Zunahme an Frostaufbrüchen und Schlaglöchern** auf Straßen und Brücken (Transportation Research Board 2008, S. 86). Besonderes beachtenswert ist daher die Aktualität der Frostzonen in Hessen, da sie über die RStO¹¹ Einfluss auf die Bauweise haben. **Gravitative Massenbewegungen** können auch, wie bereits erwähnt, sowohl auf Straßen als auch auf Schienenwegen durch **Frost-Tau-Wechsel** begünstigt werden (s. Kap. 6.1). Zudem stellen solche Wetterbedingungen eine **Gefahr für die Straßennutzer** dar, da die Fahrer von Eisplatten in schattigen und generell kühleren Bereichen überrascht werden können.

In diesem Kapitel wurden die möglichen Anfälligkeiten von Straßeninfrastrukturen gegenüber Extremwetterereignissen sowie langfristiger Klimaveränderungen dargelegt. Die hier ausgeführten Auswirkungen treten jedoch nicht vollumfänglich bei allen Straßen gleich auf. So wie die Infrastruktur lokal und regional ist, so sind auch die Auswirkungen des Klimawandels lokal und regional. Obwohl einige klimatische Auswirkungen, wie Überschwemmungen und Erosionen, ganze Regionen betreffen können, können ihre Folgen je nach Standort, Art und Zustand der Verkehrsinfrastruktur variieren. Die Infrastruktur wird nämlich Auswirkungen ausgesetzt, die für jede Objektart einzigartig sind (z.B. Unterspülung an Brückenstützen) und deren Umfang von dem ursprünglichen Zustand der Infrastruktur selbst beeinflusst werden kann. So könnten beispielsweise vermehrt intensive Niederschläge stärker zur Verschlechterung der Oberflächen von Straßen in bereits schlechtem Zustand beitragen als von Straßen in gutem Zustand.

¹¹ Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Veränderung der klimatischen Bedingungen wirkt sich auf den Verkehrssektor und insbesondere auf die Straßeninfrastruktur – abhängig von verschiedenen lokalen und regionalen Einflussfaktoren – unterschiedlich stark aus. Dadurch können zusätzliche Gefahrenpotenziale für die Straßeninfrastruktur entstehen.

In diesem Gutachten wurden die Veränderungen der Klimagrößen Temperatur, Niederschlag und Wind allgemein sowie für alle Klimaregionen in Hessen dargelegt. Der Einfluss der wichtigsten räumlichen Gegebenheiten (Topografie, Bodentypen und -arten sowie Landnutzung) auf Grad und Maß der durch Extremwetterereignisse induzierten Auswirkungen wurde daran anschließend offengelegt. So konnte mit der topografischen Betrachtung gezeigt werden, dass bestimmte Gebiete aufgrund ihres Reliefs und ihrer Lage in Gewässereinzugsgebieten in Kombination mit unterschiedlichen Klimagrößen besonders anfällig für bestimmte Schadensereignisse sind. Bei den Bodentypen und Bodenarten sind Wasserspeicherkapazität und die Wasserdurchlässigkeit wichtige Kenngrößen, die für Erodierbarkeit und Massenbewegungen in der kleinräumigen strukturellen Betrachtung Berücksichtigung finden müssen. Landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Flächen sind die vorwiegende Landnutzung, die direkt an das Landesstraßensystem angrenzt und deren Bewirtschaftung ebenfalls vor dem Hintergrund von Bodenabtragungsprozessen in die Gefahrenanalyse einzubeziehen ist. Die aus dem Klimawandel resultierenden Gefährdungen wurden für die Ereignisse Hochwasser, Massenbewegung, Sturm, Dürre und Niedrigwasser, Hitze sowie Kälte hinsichtlich der Entstehung, der Rolle der klimatischen Einflüsse und der Relevanz räumlicher Gegebenheiten erarbeitet. Darauf aufbauend wurden die für das Landesstraßennetz von Hessen Mobil relevanten Bauwerke zusammengetragen und die Auswirkungen der klimatischen Einflüsse auf diese in Datenblätter zusammengefasst.

Die Gefährdungsanalyse für das Land Hessen hat gezeigt, dass keine hessenweit einheitlichen Maßnahmen zur Gefährdungsminimierung von Landesstraßen möglich sind. Es reichen auch keine klimaregionsspezifischen Maßnahmen aus, sondern für jedes Bauwerk müssen dessen individuelle Gefährdung und geeignete Maßnahmen zu deren Minimierung bestimmt werden. Hierzu können die für die verschiedenen Gefährdungen in unterschiedlicher Auflösung vorliegenden Daten bauwerksbezogen analysiert werden.

Um dies für die Praxis effizient handhabbar zu gestalten, sind zunächst die in den verschiedenen Klimaregionen besonders gefährdeten Bauwerke und die Bauwerke, bei denen im Schadensfall erhebliche Beeinträchtigungen im Verkehrssystem zu erwarten sind, zu bestimmen. Hierfür bietet es sich an entsprechende Analyseverfahren noch zu entwickeln.

In einem weiteren Schritt gilt es, die Ergebnisse zu nutzen und Strategien für den Umgang mit den zu erwartenden Klimaauswirkungen in Planung, Bau, Erhalt, Unterhalt und Betrieb zu formulieren. Der Fokus ist insbesondere auf dem Betrieb zu setzen, um vorsorgende Maßnahmen einzurichten und im Störfall mit geeigneten Konzepten frühzeitig zu reagieren. Zum einen sollen durch baulich vorsorgende Maßnahmen Störungen möglichst vermieden, zumindest jedoch in ihren Auswirkungen vermindert werden. Zum anderen soll der Betrieb insbesondere für kritische Standorte mit gefährdeten

Infrastrukturbauwerken ein mögliches Schadensausmaß abschätzen und Sicherungsmaßnahmen frühzeitig im Schadensfall treffen können.

Aktuelle Richtlinien im Verkehrswegebau berücksichtigen bereits in ihren Formulierungen Klimafolgewirkungen und setzen Sicherheitsbeiwerte fest, die eine Absorption von Störpotenzialen für bestimmte Extremwetterereignisse ermöglichen. Somit liegt ein vorsorgender Rahmen an Empfehlungen vor, der aber hinsichtlich neuer Erkenntnisse und angelehnt an die durch die Trendentwicklung zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels regelmäßig zu prüfen und anzupassen ist. Zudem ist es aufgrund zahlreicher Klimagrößen, unterschiedlicher geografischer Lagen und diverser lokaler Strukturen schwierig, allgemeingültige Empfehlungen für den Schutz von Verkehrsinfrastrukturen auszusprechen.

In einem nächsten Schritt sollten Strategien und konkrete Handlungsempfehlungen ausgearbeitet werden, um bei Vorhaben konkrete Aussagen zu erhalten. Mithilfe von Expertenwissen aus verkehrsplanerischen Bereichen und Wissen aus den lokalen Betriebsabläufen sollten bereits jetzt festgestellte Einflussgrößen, die nicht über die Literatur- und Dokumentenanalyse dieser Untersuchung erfasst wurden, ergänzt und hinsichtlich ihres Störpotenzials klassifiziert werden. Zudem soll das Wissen genutzt werden, um Handlungsempfehlungen zu formulieren, die neben den technischen und lokalen Aspekten auch die organisatorischen Strukturen berücksichtigen. Die lokale Identifizierung von Handlungsbedarfen soll mithilfe geeigneter Instrumente umgesetzt werden. Digitale Strukturblätter könnten beispielsweise dazu dienen, mithilfe der in diesem Gutachten zusammengetragenen Einflussfaktoren sich interaktiv eine Gefährdungsanalyse für Bauwerke an einem bestimmten Ort mit bestimmten Gegebenheiten erstellen zu lassen. Im Ergebnis würden dann die durch die Einflussfaktoren sowie deren Zusammenspiel entstehenden Risiken für die zu untersuchende Bauwerke dargestellt werden. Hierbei könnte ein in Modulbausteinen zusammengesetzter Handlungsleitfaden mit geeigneten Präventions- und Schutzmaßnahmen für Planung, Bau, Erhalt, Unterhalt und Betrieb ausgegeben werden.

Die vorstehenden Analysen zeigen aber auch, dass nicht nur Maßnahmen bezogen auf die Bauwerke zur Minderung der klimawandelbedingten Gefährdungen beitragen können, sondern dass auch Maßnahmen im Umfeld einer Straße mitberücksichtigt werden sollten. So kann beispielsweise auch durch eine geänderte Landnutzung im Umfeld einer Landesstraße oder durch die Anlage von Hochwasserrückhaltebecken am Oberlauf eines Gewässers eine Gefährdung in einem zu definierenden Bereich von Eintrittswahrscheinlichkeiten minimiert werden.

Das Gutachten macht deutlich, dass die durch den Klimawandel bedingten Auswirkungen große Risiken für die Funktionsfähigkeit der Straßeninfrastrukturen mit sich bringen. Daher stellen Entscheidungshilfen und Risikoabschätzungen für Bauwerke ein wichtiges Instrument dar, um Maßnahmen den verantwortlichen Akteuren an die Hand zu geben und schließlich die Resilienz der hessischen Landesstraßen gegenüber klimabedingten Auswirkungen zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

Albrecht, Axel (2009): Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. In: *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung* (42).

Bannick, Claus Gerhard; Engelmann, Bernd; Fendler, Roland; Frauenstein, Jörg; Ginzky, Harald; Hornemann, Corinna et al. (2008): Grundwasser in Deutschland. Reihe Umweltpolitik. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf>.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2021): Bodentypen. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/boden/erdausstellung/bodentypen/index.htm>, zuletzt aktualisiert am 10.10.2021, zuletzt geprüft am 10.10.2021.

BGR (o. J.a): Bodenerosion durch Wasser. BGR. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Resourcenbewertung/Bodenerosion/Wasser/BodenerosionWasser_node.html, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

BGR (o. J.b): Potentielle Gefährdung - Erodierbarkeit der Ackerböden durch Wasser (K-Faktor). Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Resourcenbewertung/Bodenerosion/Wasser/K_Faktor_inhalt.html;jsessionid=D7414ABB549DE97B38C442FC98C2FE9B.2_cid321?nn=4919548.

BMVI-Expertennetzwerk (2020a): Glossar des Themenfeldes 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Expertennetzwerk.

BMVI-Expertennetzwerk (2020b): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die

Forschungsphase 2016 – 2019. Unter Mitarbeit von Stephanie Hänsel, Carina Herrmann, Kerstin Jochumsen, Martin Klose, Enno Nilson, Maike Norpoth et al. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin.

bodenwelten (2021): Glossar. Online verfügbar unter <https://www.bodenwelten.de/lexicon/glossar>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Bolte, Andreas; Eisenhauer, Dirk-Roger; Ehrhart, Hans-Peter; Groß, Joachim; Hanewinkel, Marc; Kölling, Christian et al. (2009): Klimawandel und Forstwirtschaft - Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. In: *Landbauforschung Volkenrode* 59, S. 269–278.

Bott, Frederick; Lohrengel, Anne-Farina; Forbriger, Markus; Haller, Michael; Jensen, Corinna; Löwe, Peter et al. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext von Stürmen. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Brienen, Susanne; Walter, Andreas; Brendel, Christoph; Fleischer, Claudius; Ganske, Anette; Haller, Michael et al. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Brunotte, Ernst (2007): Schichtstufen und Schichtkämme. In: Hans Gebhardt, Rüdiger Glaser, Ulrich Radtke, Paul Reuber und Andreas Vött (Hg.): *Geographie. Physische Geographie und*

Humangeographie. 3., [überarbeitete und erweiterte] Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Lehrbuch).

Brunotte, Ernst; Gebhardt, Hans; Meurer, Manfred; Meusburger, Peter; Nipper, Josef (Hg.) (2002a): Lexikon der Geographie in vier Bänden. A bis Gasg. 4 Bände. Berlin: Spektrum Akad. Verl. (Lexikon der Geographie, 1).

Brunotte, Ernst; Gebhardt, Hans; Meurer, Manfred; Meusburger, Peter; Nipper, Josef (Hg.) (2002b): Lexikon der Geographie in vier Bänden. Gast bis Ökol. 4 Bände. Berlin: Spektrum Akad. Verl. (Lexikon der Geographie, 2).

Brunotte, Ernst; Gebhardt, Hans; Meurer, Manfred; Meusburger, Peter; Nipper, Josef (Hg.) (2002c): Lexikon der Geographie in vier Bänden. Ökos bis Wald. 4 Bände. Berlin: Spektrum Akad. Verl. (Lexikon der Geographie, 3).

Brunotte, Ernst; Gebhardt, Hans; Meurer, Manfred; Meusburger, Peter; Nipper, Josef (Hg.) (2002d): Lexikon der Geographie in vier Bänden. Walk bis Z. 4 Bände. Berlin: Spektrum Akad. Verl. (Lexikon der Geographie, 4).

Brunotte, Ernst; Gebhardt, Hans; Meurer, Manfred; Meusburger, Peter; Nipper, Josef (2002e): Lexikon der Geographie in vier Bänden: Gast bis Ökol. Unter Mitarbeit von Tillmann K. Buttschardt, Eckhard Jedicke, Manfred Meurer, Joachim Vogt und [u.a.] (Lexikon der Geographie, 2).

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (Hg.) (2015): KRITIS-Sektorstudie. Transport und Verkehr. Bonn.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

CDU / SPD (2021): Herausforderungen gemeinsam anpacken - Zukunft gestalten.

Koalitionsvereinbarung. Online verfügbar unter https://www.spd-wetterau.de/wp-content/uploads/sites/543/2021/05/2021_KOA_Vertrag_final.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Auswirkungen von Wetterereignissen. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/schon_gewusst/auswirkungenwetterereignisse/auswirkungenwetterereignisse_node.html, zuletzt geprüft am 30.11.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Beaufort-Skala. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100310&lv3=100390>, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD): Erläuterungen zu den Karten der Normalwerte. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/normalwerte/normalwerte_node.html, zuletzt geprüft am 23.09.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD): Unwetterklimatologie: Glatteis. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/glatteis/glatteis.html>, zuletzt geprüft am 23.09.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Unwetterklimatologie: Starkregen. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/starkregen/starkregen.html>.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2015): Berg- und Talwind. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/7/19.html, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021a):
Deutscher Klimaatlas. Online verfügbar unter
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html, zuletzt geprüft am
01.09.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021b):
Wetter- und Klimalexikon. Online verfügbar unter
https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021c):
Zeitreihen und Trends. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?>, zuletzt geprüft am 01.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021d):
Änderung des Extremverhaltens von Temperatur,
Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Online
verfügbar unter
https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/extremereignisse/extremereignisse_node.html, zuletzt aktualisiert am
16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021e):
Tornado. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?lv2=102672&lv3=102774>, zuletzt
aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am
16.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021f):
Eistag. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?nn=103346&lv2=100652&lv3=100720>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt
geprüft am 17.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021g):
Frosttag. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?nn=103346&lv2=100784&lv3=100912>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt
geprüft am 17.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021h):
Heißer Tag. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?lv2=101094&lv3=101162>, zuletzt

aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt geprüft am
17.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021i):
Hitzewelle. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?nn=103346&lv2=101094&lv3=624852>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt
geprüft am 17.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021j):
Sommertag. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?lv2=102248&lv3=102522>, zuletzt
aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt geprüft am
17.12.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2021k):
Starkregen. Online verfügbar unter
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Function/s/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=102572>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2021, zuletzt
geprüft am 17.12.2021.

dpa (2021): Verkehr: Hessen investiert mehr als
100 Millionen in Landesstraßen. In: *Die Zeit*,
18.04.2021. Online verfügbar unter
https://www.zeit.de/news/2021-04/18/hessen-investiert-mehr-als-100-millionen-in-landesstrassen?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F, zuletzt geprüft am
14.12.2021.

Du Vair, Pierre; Wickizer, Douglas; Burer, Mary
Jean (2002): Climate Change and the Potential
Implications for California's Transportation System.
In: Federal Research Partnership Workshop (Hg.):
The Potential Impacts of Climate Change on
Transportation, Summary and Discussion Papers.
Oct. 1-2. Washington D.C., S. 125–134.

Duttmann, R.; Bach, M.; Herzig, A. (2011):
Bodenerosion durch Wasser. In: Hans-Peter Blume,
Rainer Horn und Sören Thiele-Bruhn (Hg.):
Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und
-belastung ; vorbeugende und abwehrende
Schutzmaßnahmen. 4., vollständig überarbeitete
Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (2019): Wälder schützen Pflanzen und Tiere vor Klimaerwärmung. Hg. v. WSL. Online verfügbar unter <https://www.wsl.ch/de/newsseiten/2019/04/waelder-schuetzen-pflanzen-und-tiere-vor-klimaerwaermung.html>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Eitel, B.; Bork, Hans-Rudolf (2008): Bodenerosion und Desertifikation. In: Carsten Felgentreff (Hg.): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Energieland Hessen (Hg.) (o. J.): Windpotenzialkarten Hessen nach Landkreisen. Online verfügbar unter <https://www.energieland.hessen.de/windpotenzialkarten>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Europa Zollportal (2021): Definition: Ackerland. Online verfügbar unter <https://www.zolltarifnummern.de/info/abkuerzungen/192>, zuletzt aktualisiert am 09.10.2021, zuletzt geprüft am 09.10.2021.

Friedrich, Klaus; Heyn, Johannes; Hüther, Jörg; Mollenhauer, Konrad; Schaumberg, Gotthard; Vorderbrügge, Thomas; Zerr, Walter (2006): *Bodenerosion in Hessen - Einschätzung und Vorsorge*.

GeoHilfe (2020): Verwitterung - Physikalische, Chemische, Biogene - Geographie. Online verfügbar unter <https://geohilfe.de/physische-geographie/bodengeographie/bodenbildung/prozesse-der-bodenbildung/verwitterung-physikalische-chemische-biogene/>, zuletzt aktualisiert am 15.03.2020, zuletzt geprüft am 10.10.2021.

Glade, Thomas; Dikau, Richard (2001): Gravitative Massenbewegungen - vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* (145), S. 42–53. Online verfügbar unter <https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade&Dikau2001.pdf>.

Glaser, Rüdiger; Hauter, Christiane; Faust, Dominik; Glawion, Rainer; Saurer, Helmut; Schulte, Achim; Sudhaus, Dirk (2010): *Physische Geographie kompakt*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz307195473cov.htm>.

Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement (2021): *Über Uns. Daten & Fakten*. Online verfügbar unter <https://mobil.hessen.de/%C3%BCber-uns/daten-fakten>.

HessenForst (2021): Umweltministerium warnt vor Waldbrandgefahr. Online verfügbar unter <http://www.hessenforst.net/post/aktuelles/umweltministerium-warnt-vor-waldbrandgefahr-2/#>, zuletzt aktualisiert am 07.04.2021, zuletzt geprüft am 15.10.2021.

Hessisches Landesamt für geschichtliche Landeskunde (HLGL) (2021): *Geschichtlicher Atlas von Hessen*. Online verfügbar unter <https://www.lagis-hessen.de/de/subjects/browse/viewmethod/zoomify/current/8/sn/ga>, zuletzt aktualisiert am 10.10.2021, zuletzt geprüft am 10.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hg.) (2018): *BodenViewer Hessen*. Online verfügbar unter <https://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021a): C-Faktor. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/c-faktor>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021b): *Erosionsbewertung ABAG*. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung>

/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/erosionsbewertung-abag, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021c): Boden. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden>, zuletzt aktualisiert am 09.10.2021, zuletzt geprüft am 09.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021d): Boden (Dürre). Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/dossiers/duerre/boden>, zuletzt aktualisiert am 09.10.2021, zuletzt geprüft am 09.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021e): K-Faktor. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/k-faktor>, zuletzt aktualisiert am 10.10.2021, zuletzt geprüft am 10.10.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021f): Bodenerosion. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/gefaehrdung/bodenerosion>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021g): Gravitative Massenbewegungen (Rutschungen und Felsstürze). Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/geologie/georisiko-und-ingenieurgeologie/gravitative-massenbewegungen-rutschungen-und-felsstuerze>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021h): Städtische Wärmeinsel. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/nachhaltigkeit-indikatoren/indikatorensysteme/klimafolgenindikatoren-hessen/staedtsche-waermeinsel>, zuletzt

aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (Hg.) (2005): Das Hessische Ried zwischen Vernässung und Trockenheit: eine komplexe wasserwirtschaftliche Problematik. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/das_hessische_ried_zwischen_vernaessung_und_trockenheit.pdf.

Hetzl, Gerhard (2007): Vegetationskontrolle. In: Lothar Fendrich (Hg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 812–822.

Hiller, D. A. (2007): Bodenerosion durch Wasser Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW.

HLNUG (o. D.): Erosionsbewertung ABAG | Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/erosionsbewertung-abag>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Hoffmann, Esther; Rotter, Maja; Welp, Martin (2009a): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholder Dialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Verkehrsinfrastruktur. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Hoffmann, Esther; Rotter, Maja; Welp, Martin (2009b): Ergebnis des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Verkehrsinfrastruktur. Dessau.

Hübener, Heike; Bülow, Katharina; Fooker, Cornelia; Früh, Barbara; Hoffmann, Peter; Höpp, Simona et al. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht.

DIN 1076, 1999: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the

Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Core Writing Team. Hg. v. Rajendra K. Pachauri und Leo A. Meyer. IPCC. Geneva, Switzerland. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2015): Climate change 2014. Synthesis report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IVA (2016): Der Grundwasserboden ist Boden des Jahres 2016. Online verfügbar unter <https://www.iva.de/iva-magazin/umwelt-verbraucher/der-grundwasserboden-ist-boden-des-jahres-2016>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Koppe, Wolfgang (2019): Infoblatt Braunerden. Hg. v. Ernst Klett Verlag. Online verfügbar unter <https://www.klett.de/alias/1012452>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Kremer, Pascal (2017): Die Zuckerrübe im Klimawandel – Analyse agrarökologischer Auswirkungen in Südwestdeutschland. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/320131239_Die_Zuckerrube_im_Klimawandel_-_Analyse_agrarokologischer_Auswirkungen_in_Suedwestdeutschland.

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2021): Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen. Online verfügbar unter <https://lau.sachsen-anhalt.de/analytik-service/indikatoren-nachhaltigkeit/klimafolgen-indikatoren-fuer-sachsen-anhalt/schiffbarkeit-der-binnenwasserstrassen/>, zuletzt aktualisiert am 12.03.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK-NRW) (2007): Bodenerosion durch Wasser. Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW.

Lenz, Susanne (2009): Vulnerabilität Kritischer Infrastrukturen. Online verfügbar unter <https://repository.publisso.de/resource/fri:6401770/data>, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Lohrengel, Anne-Farina; Brendel, Christoph; Herrmann, Carina; Kirsten, Jens; Forbriger, Markus; Klose, Martin; Stube, Kathrin (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Lufsky, Karl; Cziesielski, Erich (Hg.) (2006): Lufsky Bauwerksabdichtung. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2006. Wiesbaden: Teubner (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz280555385cov.htm>.

Martel, Jean-Luc; Mailhot, Alain; Brissette, François; Caya, Daniel (2018): Role of Natural Climate Variability in the Detection of Anthropogenic Climate Change Signal for Mean and Extreme Precipitation at Local and Regional Scales. In: *Journal of Climate* 31 (11), S. 4241–4263. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0282.1.

Mattheck, Claus (1992): Mechanisches Versagen von Bäumen durch Windbruch. In: *Phys. Unserer Zeit* 23 (2), S. 79–83. DOI: 10.1002/piuz.19920230210.

Michael, Thomas (Hg.) (2020): Diercke Atlas Heimat und Welt. Gesellschaftslehre, Erdkunde, Geschichte, Politik & Wirtschaft. Westermann Gruppe; Westermann Schulbuchverlag. Hessen, Druck A. Braunschweig: Westermann.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (Hg.) (2021a): Entstehung einer Hitzewelle. Online verfügbar unter <https://www.planat.ch/de/wissen/klimawandel/hitzewelle/entstehung-hw>, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (Hg.) (2021b): Rutschung und Felssturz. Online verfügbar unter

<https://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz>, zuletzt geprüft am 29.11.2021.

Natur erforschen (2014): Pseudogley. Online verfügbar unter <https://www.natur-erforschen.net/unterrichtsprojekte/waldboden/materialien-waldboden/pseudogley.html>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Natzschka, Henning (2003): Strassenbau. Entwurf und Bautechnik; mit 178 Tab. 2., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Teubner.

Nilson, Enno; Astor, Birgit; Fischer, Helmut; Fleischer, Claudius; Haunert, Gundula; Helms, Martin et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.

Paar, Uwe; Evers, Jan; Dammann, Inge; König, Nils; Schulze, Andreas; Schmidt, Marcus et al. (2016): Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Göttingen: Göttingen University Press. Online verfügbar unter https://univerlag.uni-goettingen.de/bitstream/handle/3/isbn-978-3-86395-293-8/NWFVA15_waldboden_hessen.pdf?sequence=1 &, zuletzt geprüft am 11.10.2021.

Patt, Heinz; Jüpner, Robert (2020): Hochwasser-Handbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Rauthe, Monika; Brendel, Christoph; Helms, Martin; Lohrengel, Anne-Farina; Meine, Lennart; Nilson, Enno et al. (2020a): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Hg.

v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Rauthe, Monika; Brendel, Christoph; Helms, Martin; Lohrengel, Anne-Farina; Meine, Lennart; Nilson, Enno et al. (2020b): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.

Regierungspräsidium Darmstadt (2015): Hochwasserrisikomanagementplan für das Gewässersystem der Nidda. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hochwasser/hwrm/nidda/berichte/HWRM-Nidda-Langfassung.pdf>, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Savonis, Michael J.; Burkett, Virginia R.; Potter, Joanne R. (2008): Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I: Climate Change Science Program (U.S.). Online verfügbar unter <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12034/>.

Schafbuch, David (2021): Meteorologe Mojib Latif zur Unwetterserie: "Unsere Sommer werden extremer". In: *t-online*, 29.06.2021. Online verfügbar unter https://www.t-online.de/nachrichten/panorama/id_90354148/meteorologe-mojib-latif-zur-unwetterserie-unsere-sommer-werden-extremer-.html, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Schwalm, Christopher R.; Glendon, Spencer; Duffy, Philip B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. In: *Proc Natl Acad Sci USA* 117 (33), S. 19656–19657. DOI: 10.1073/pnas.2007117117.

Schwanke, Karsten; Podbregar, Nadja; Lohmann, Dieter; Frater, Harald (2009): Naturkatastrophen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Spektrum (Hg.) (2014a): Frost-Tau-Zyklus. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaft>

ten/frost-tau-zyklus/5298, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Spektrum (Hg.) (2014b): Hohlformen. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/hohlformen/3546>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Spektrum (Hg.) (2014c): Massentransport. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/massentransport/10062>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Spektrum (Hg.) (2014d): Waldwind. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/waldwind/17864>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Spektrum Akademischer Verlag (2000): Lexikon der Geowissenschaften. Gravitative Massenbewegungen. Heidelberg. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/gravitative-massenbewegungen/6296>.

Stahr, Alexander (2014a): Bodendurchlässigkeit | Ahabc.de. Online verfügbar unter <http://www.ahabc.de/bodeneigenschaften/bodendurchlaessigkeit/#>, zuletzt aktualisiert am 14.12.2021, zuletzt geprüft am 14.12.2021.

Stahr, Alexander (2014b): Bodentyp: Gley | Ahabc.de. Online verfügbar unter <http://www.ahabc.de/bodentypen/bodensystematische-einheiten-semiterrestrische-boeden/bodentyp-auengley/>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Stahr, Alexander (2014c): Bodentyp: Rendzina | Ahabc.de. Online verfügbar unter <http://www.ahabc.de/bodentypen/klasse-typen-oder-bodensystematische-einheiten/bodentyp-rendzina/#>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Statistik.Hessen (2021): Landwirtschaftliche Bodennutzung in Hessen. Online verfügbar unter

<https://statistik.hessen.de/pressemitteilungen/pm-85-2021-landwirtschaftliche-bodennutzung-in-hessen>, zuletzt aktualisiert am 23.06.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Strahler, Alan H.; Strahler, Arthur Newell (2009): Physische Geographie. 4., vollständig überarb. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB Geowissenschaften, 8159).

Transportation Research Board (2008): TRB Special Report 290: The Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation. Washington D.C.: Transportation Research Board (Transportation Research Board special report, 290).

umwelt.hessen.de (2021): Zahlen, Daten, Fakten, Wald in Hessen. Online verfügbar unter <https://umwelt.hessen.de/Wald>, zuletzt aktualisiert am 09.10.2021, zuletzt geprüft am 10.10.2021.

Umweltbundesamt (2010): Bodentypen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/kleine-bodenkunde/bodentypen>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2021, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Umweltbundesamt (UBA) (2010): Die Böden Deutschlands. sehen, erkunden, verstehen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4161.pdf>, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Umweltbundesamt (UBA) (2019): WW-I-4: Niedrigwasser. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-i-4-das-indikator#ww-i-4-niedrigwasser>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2021a): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Grundlagen. Unter Mitarbeit von Walter Kahlenborn, Manuel Linsenmeier, Luisa Porst, Maike Voß, Lukas Dorsch, Stephanie Lacombe et al. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2021b): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für

Deutschland – Integrierte Auswertung. Unter Mitarbeit von Maike Voß, Walter Kahlenborn, Enno Nilson, Elisabeth Rudolph, Anne-Farina Lohrengel, Konstanze Schönthaler et al. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2021c): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung. Unter Mitarbeit von Maike Voß, Walter Kahlenborn, Luisa Porst, Uta Fritsch, Kathrin Renner, Marc Zebisch et al. Dessau-Roßlau.

Wang, Jiamin; Guan, Yuping; Wu, Lixin; Guan, Xiaodan; Cai, Wenju; Huang, Jianping et al. (2021): Changing Lengths of the Four Seasons by Global Warming. In: *Geophys Res Lett* 48 (6). DOI: 10.1029/2020GL091753.

Warren, Linda P. (1993): Scour at Bridges - What's It All About? Stream Stability and Scour

Assessment at Bridges in Massachusetts. Prepared by the U.S. Geological Survey in cooperation with the Massachusetts Highway Department (Open File Report 93-W0487). Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Scour-at-Bridges-What%27s-It-All-About-Stream-and-at-Warren/e0058a0132ab49c12076d15f86dc5b0513297b2b>.

Wegmann, E. (2010): Verminderung der Sturmgefährdung unserer Wälder - eine Art Checkliste. Online verfügbar unter <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/sc hadensmanagement/wind-schnee-und-eis/checkliste-sturmgefaehrdung>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Glossar

Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG)

$$A = R * K * S * L * C * P$$

mit

A = langjährig zu erwartender, mittlerer
Bodenabtrag [t/(ha*a)]

R = Regenerositätsfaktor

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor

S = Hangneigungsfaktor

L = Hanglängenfaktor

C = Bodenbedeckungs- und
Bodenbearbeitungsfaktor

P = Faktor zur Berücksichtigung von
Erosionsschutzmaßnahmen

K = Erodierbarkeit des Bodens

Teilfaktoren

K_b = der bodenartabhängige Anteil des K-
Faktors,

K_h = der humusgehaltsabhängige Anteil des K-
Faktors,

K_s = der grobbodenabhängige Anteil des K-
Faktors.

$$K = K_b * K_h * K_s$$

S = Hangneigungsfaktor

Der S-Faktor der ABAG beschreibt den Einfluss der Hangneigung auf das Erosionsgeschehen. Je steiler die Hänge, desto früher setzt Oberflächenabfluss ein, der Bodenmaterial transportieren kann. Zudem erreicht das abfließende Wasser bei größerer Hangneigung eine höhere Fließgeschwindigkeit, was die Transportkapazität des Abflusses steigert. Somit sind steilere Hänge grundsätzlich durch eine höhere Erosionsgefahr gekennzeichnet als flachere.

$$S = -1,5 + [17 / (1 + e^{2,3-6,1 * \sin \alpha})]$$

L = Hanglängenfaktor

Der L-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) ist ein Maß für die Auswirkung der Hanglänge auf das Erosionsgeschehen. Bei langen Hängen ohne Abflussbarrieren sammelt sich im Hangverlauf mehr oberflächlich abfließendes Wasser. Die Abflussgeschwindigkeit erhöht sich ebenfalls. Durch beide Effekte steigt die Transportkapazität des Abflusses und so auch die Erosionsgefahr mit zunehmender Hanglänge.

Der L-Faktor berechnet sich nach:

$$L = (0,046 \cdot I)^m$$

Der Hanglängenexponent m ist von der Hangneigung abhängig und nimmt bei einer Neigung α ab 4° den Wert 0,5 an. In flachem Gelände ergibt sich m aus $1,2 \cdot \sin \alpha^{1/3}$.

C = Bodenbedeckungs- und
Bodenbearbeitungsfaktor

Der Faktor C bewertet relativ die schützende Wirkung der Acker- und Grünlandvegetation für den Oberboden im Vergleich zu einem vegetationslosen bzw. brachliegenden Acker (Schwarzbrache). Hierbei wird zugrunde gelegt, dass Pflanzenbewuchs und Erntereste in Abhängigkeit von der Art der Bodenbearbeitung, der Fruchtfolge, der Vegetationsentwicklung und dem Bedeckungsgrad durch die Pflanzen und Mulch die Aufprallenergie von Niederschlägen mildern und das Gefüge des Oberbodens stabilisiert.

Um eine langfristige Aussage treffen zu können, müssen die typischen Fruchtfolgen auf den Ackerschlägen bekannt sein. Dazu wurden die C-Faktoren der verfügbaren Einzeljahre

2011 bis 2016 gemittelt. Ackerschläge, für die keine mindestens dreijährig ununterbrochene Zeitreihe verfügbar war, erhielten den Gemarkungsmittelwert der C-Faktoren für den genannten Zeitraum zugewiesen. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2021b)

Anpassungskapazität

Fähigkeit von Institutionen, Lebewesen und Systemen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen und auf Auswirkungen des Klimawandels zu reagieren. (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014)

Bodentypen

Im nachfolgenden werden die in Hessen vorherrschenden Bodentypen mit ihren Eigenschaften beschrieben:

Braunerde und Parabraunerde

Typischerweise besitzen Braunerden einen humosen oberen A-Horizont, der gleitend in den braun gefärbten B-Horizont übergeht. Der höhere Humusanteil ist hierbei für die dunklere Farbe des A-Horizonts verantwortlich. In unterschiedlicher Tiefe von 25 bis zu 150 cm Tiefe folgt das Ausgangsgestein, der C-Horizont. Abhängig vom Grad der Verwitterung kann die Körnung der Braunerde von steinig über sandig bis lehmig variieren. Dementsprechend verhalten sich auch die Gehalte an organischer Substanz (vorwiegend an feines Material gebunden) und das Porenvolumen. Ist das Bodenmaterial feiner, so lässt sich ein höherer Anteil organischer Substanz binden. Das Porenvolumen und die Verteilung der Poren sind wichtige Faktoren für

die Durchlüftung des Bodens, die Wasserleitfähigkeit und das Wasserrückhaltevermögen. Aus der Kombination dieser Eigenschaften leiten sich Fruchtbarkeit und Nutzung ab. (Koppe 2019)

Die genannten Eigenschaften beeinflussen den ackerbaulichen Wert von Braunerde. Flachgründige Böden – also Böden von geringer Mächtigkeit, bei denen der A-Horizont rasch in den C-Horizont übergeht – und steinreiche Böden werden häufig nur forstwirtschaftlich genutzt. Allgemein sind Braunerden nicht sehr fruchtbar, weswegen eine umfangreiche Düngung nötig ist, um gute ackerbauliche Erträge zu erreichen. (Koppe 2019)

Parabraunerden sind vermehrt im Tiefland zu finden. Aufgrund ihres lösshaltigen B-Horizont sind sie fruchtbarer als Braunerden und werden in der Landwirtschaft benutzt (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2021)

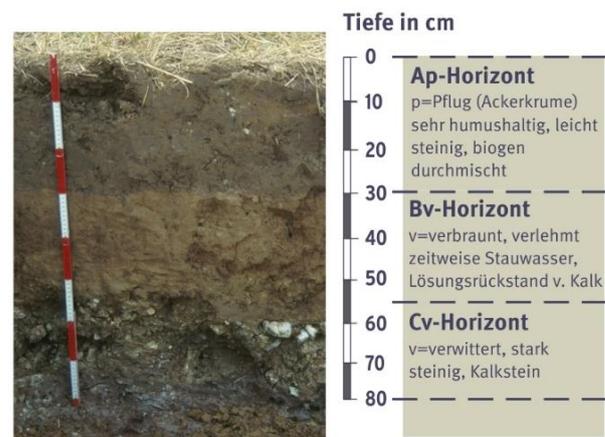


Abbildung 24: Bodenprofil von typischen Braunerden (Umweltbundesamt (UBA) 2010)

Rendzina und Pararendzina

Die Topografie Hessens ist, wie im vorherigen Unterkapitel dargestellt, von Hügel- und Mittelgebirgslandschaften geprägt. Insbesondere im Norden und Osten des Bundeslandes begünstigt der kalkhaltige Untergrund der Mittelgebirge die Bildung der Bodentypen Rendzina und Pararendzina. Diese Bodentypen bestehen aus zwei Horizonten, wobei die obere Schicht meist eine flachgründige Locker-erde ist, welche auf einem Karbonat- oder gipsreichen Gesteinshorizont aufliegt. Aufgrund seiner flachgründigen Eigenschaften kann dieser Typ von Boden landwirtschaftlich nur bedingt genutzt werden. Er eignet sich als Weideland oder für die forstwirtschaftliche Nutzung. (Stahr 2014c)

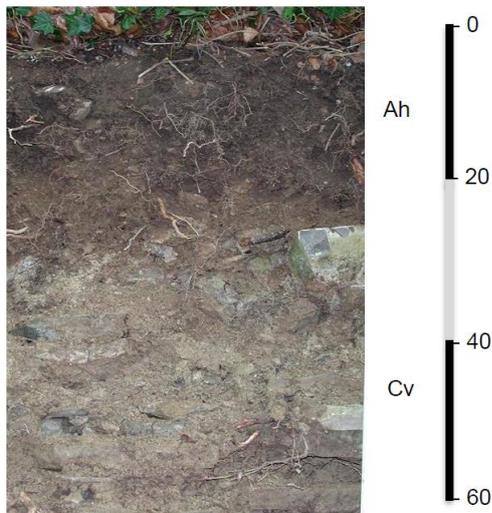


Abbildung 26: Bodenprofil einer Rendzina (In Anlehnung an (Stahr 2014c)

Auenböden und Gley

Neben dem Rhein, dessen Verlauf mit einem großen Teil der Grenze zwischen Hessen und Rheinland-Pfalz übereinstimmt, gibt es in Hessen viele weitere große und kleine Flüsse und Bäche. Zudem gibt es zahlreiche stehende Gewässer. Die Böden in der Umgebung der Wasserläufe Hessens lassen sich in die Bodentypen Auenböden und Gley einteilen.

Auenböden umfassen dabei die Unterkategorien Vega und Tschernitze, welche sich zumeist im regelmäßig überfluteten Auenbereich von Flüssen befinden. Dies trifft vor allem auf die Unterläufe der Flüsse im Tiefland zu. Schmalere und steilere Oberläufe im Bergland weisen nur selten größere Auen auf. Der braune Auenboden ist prinzipiell ein gut landwirtschaftlich nutzbarer Boden. Allerdings besteht die Gefahr der Überschwemmung bei Hochwasser. In den Tälern muss man mit Spätfrösten rechnen. Im Winterhalbjahr ist der Boden sehr feucht, was eine zeitige Erwärmung und Bearbeitung im Frühjahr behindert. Daher ist Grünland die vorwiegende Nutzungsart. An geschützten Standorten finden sich allerdings intensive Landwirtschaft und Sonderkulturen. (IVA 2016)

Im Unterschied zu den Auenböden, befinden

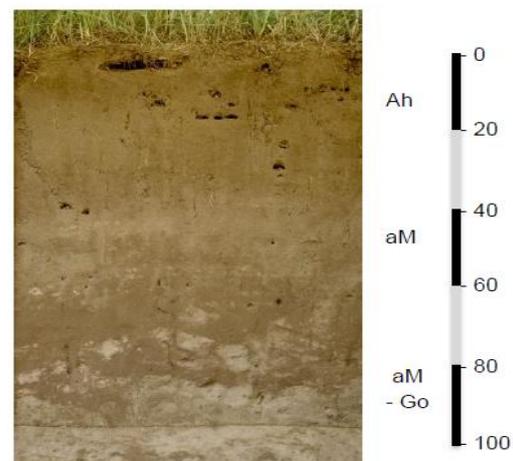


Abbildung 25: Bodenprofil eines Auenbodens in Anlehnung an (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2004)

sich bei den Gleyen keine Horizonte ohne deutliche Hydromorphierung über dem G-Horizont. Gleye werden maßgeblich vom Grundwasser und dessen Schwankungen beeinflusst; man findet sie vermehrt an Standorten, an denen sich das Sickerwasser der Umgebung sammelt. Infolge des stark schwankenden Grundwasserstandes ist der

Go-Horizont der Gleye im Sommer oft trocken, im Winter und Frühjahr bei hohem Grundwasserstand häufig luftarm, nass und kalt. Gleye werden daher landwirtschaftlich als Dauergrünland (Weide) genutzt. Die ackerbauliche Nutzung ist nur bei Gleyen mit geringen Grundwasserständen oder nach einer Entwässerung möglich. Eine forstliche Nutzung ist mit nässeliebenden Baumarten wie etwa Erle, Esche und Pappel möglich. (Stahr 2014b)

Stauwasserböden, wie beispielsweise der Pseudogley, sind ebenfalls in Hessen zu finden.

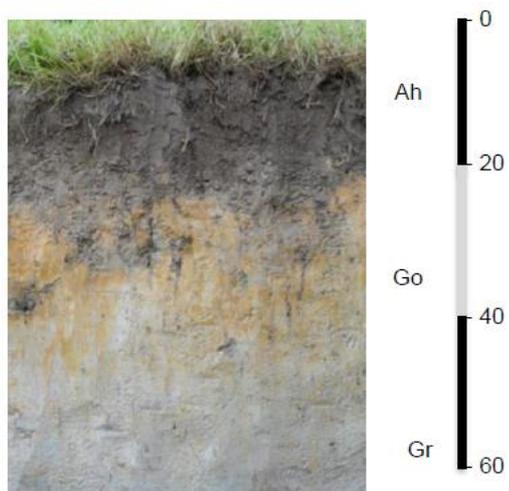


Abbildung 27: Bodenprofil eines Gleys in Anlehnung an (Stahr 2014b)

Die Vergleyung findet hier jedoch nicht durch Grundwasser, sondern durch von Regenwasser herbeigeführte abwechselnde Staunässe und Austrocknung statt. Dieser Bodentyp enthält große Mengen an Ton, wobei der tonhaltige Stofftransport von oben nach unten stattfindet. Der Ah-Horizont ist mit ca. 20 cm deutlich mächtiger als der der Braunerde mit ca. 5 – 8 cm. Er bildet ein Krümelgefüge mit Aggregaten aus Tierkot, Verwitterungspartikeln und Ton-Humuskomplexen und vielen großen, luftgefüllten Hohlräumen. Unterhalb des Ah-Horizonts schließt sich als erster Horizont des Unterbodens ein bleicher, vergrauter Sew-

Horizont an. Unter dem wasserleitenden Sew-Horizont befindet sich durch Mineralverlagerung, vor allem durch Tonverlagerung, und Porenverdichtung ein wasserstauer Sd-Horizont mit stark wechselndem Wasserstand, der aus schluffigem Lehm, teils aus tonigem Lehm besteht (Natur erforschen 2014). Während Pseudogleye bei Regenfall einer hohen Feuchtigkeitsbelastung ausgesetzt sind, neigen sie bei Trockenheit zu starkem Austrocknen, was zu Rissen im Boden führt. Diese beiden Extrembelastungen gestalten eine Bepflanzung und somit die landwirtschaftliche Nutzung von Pseudogleyen als schwierig (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2021).

Eistag

An einem Eistag liegt die Höchsttemperatur im Tagesverlauf unter null Grad Celsius.



Abbildung 28: Bodenprofil eines Pseudogleys in Anlehnung an (Natur erforschen 2014)

(Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021f)

Frosttag

An einem Frosttag liegt die Tiefsttemperatur im Tagesverlauf unter null Grad Celsius. Die Tageshöchsttemperatur kann aber über oder unter null Grad Celsius liegen. Falls auch die Höchsttemperatur unter null Grad Celsius liegt,

wird von einem Eistag gesprochen. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021g)

Gefahr/Gefährdung

Zustand oder Vorgang, der das Potential besitzt, Schaden für Lebewesen und/oder Sachgüter zu verursachen. Dieser Schaden kann als Folge einer langfristigen Entwicklung auftreten, jedoch auch das Resultat kurzfristig auftretender Extreme sein. (BMVI-Expertennetzwerk 2020a)

Heißer Tag

An einem heißen Tag beträgt das Maximum der Lufttemperatur mindestens 30 Grad Celsius während des Tagesverlaufs. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021h)

Hitzewelle

Als Hitzewelle wird eine mehrtägige Periode mit anhaltend hoher thermischer Belastung bezeichnet. Aufgrund der hohen Temperatur haben Hitzewellen das Potential gesundheitliche, ökologische und infrastrukturelle Schäden zu verursachen. In den in Deutschland zu findenden Klimaregionen sind Hitzewellen das Resultat anhaltender sommerlicher Hoch-druckgebiete (Gebiete, in denen sich die Luft durch großräumiges Absinken ebendieser erwärmt). Hitzewellen werden vom Deutschen Wetterdienst auf folgende Weise bestimmt: „Individuell für jeden Rasterpunkt wird aus den täglichen Temperaturmaxima der Referenzperiode (1961-1990) ein Schwellenwert für jeden Tag - entsprechend dem 98-Perzentil - berechnet. Um die Datenbasis von 30 Werten (1961-1990) zu

vergrößern, werden auch die 15 Tage vor und nach dem Termin verwendet, was die Datenbasis auf 930 Werte erhöht und auch zu einer Glättung führt. Liegen die aktuellen Raster-werte des Temperaturmaximums an 3 auf-einanderfolgenden Tagen oder mehr über diesem Klima-Schwellenwert und über 28°C so liegt für das markierte Gebiet und die Periode eine Hitzewelle vor.“ (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021i)

Klimaanpassung

Einführung umfassender Maßnahmen, um ökologische, soziale und ökonomische Systeme an die Auswirkungen des Klima-wandels anzupassen und potentielle Klima-wirkungen zu reduzieren. Dies umfasst die Anpassung an aktuelle oder zukünftige klimatische Einflüsse. (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014)

(Klima-)risiko

Unter einem Risiko versteht man die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Szenarios, welches negative Folgen mit sich bringt. Der Begriff Klimarisiko beschreibt demnach die Eintrittswahrscheinlichkeit dafür, dass eine Klimawirkung eintritt, welche sich nachteilig auf ein soziales, technisches, ökologisches oder ökonomisches System auswirkt. Ein Risiko kann auch als die Interaktion zwischen Gefährdung und Vulnerabilität beschrieben werden. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 15)

Klimatischer Einfluss

Ein sich ändernder Faktor innerhalb des Klimasystems. Der klimatische Einfluss stellt

eine Voraussetzung für eine Klimawirkung dar. Relevante Kenngrößen zur Beschreibung des klimatischen Einflusses sind beispielsweise Temperatur, Niederschlag oder Wind. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 14)

Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe Bevölkerungsdichte oder eine hohe Dichte an kritischen Infrastrukturen zur räumlichen Exposition eines Gebiets. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 14))

Klimawirkung

Beschreibt die Auswirkung eines klimatischen Einflusses auf ökologische und technische Systeme. Eine Klimawirkung kann sowohl positiv als auch negativ sein. So hat beispielsweise ein Starkregenevent das Potential, eine negative Klimawirkung auf ein städtisches Abwassersystem auszuüben. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c)

Kritikalität

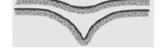
Die von Lenz (2009) formulierte Definition umfasst alle wesentlichen Aspekte, welche für diese Studie von Bedeutung sind: „[Kritikalität ist ein] relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat.“ (Lenz 2009)

Räumliche Exposition

Die räumliche Exposition ist die Lage eines Objekts in Bezug auf ein bestimmtes Klimaelement. Im Falle einer Infrastruktur in Hanglage wird die geographische Position des Hangs als räumlich exponiert beschrieben. Diese wird durch starke Winde und Schneeschmelze beeinflusst. Die räumliche Exposition kann jedoch auch durch nicht-geographische Kenngrößen beschrieben werden. So führen auch demographische

Relief, Hohlformen

Tabelle 6: Relieftypen, (Brunotte et al. 2002c)

formale Haupttypen/ Bezeichnung	Charakteristika	Durchmesser : Tiefe	max. Hangwinkel
 schalenförmig	flache Schale, konkave und konvexe Übergänge, sanft geschwungen	10 : <1	>0° bis 10°
 schüsselförmig	Hänge insgesamt konkav, allmählich in den Boden übergehend, relativ kurzes konvexes Segment	4 : 1 bis etwa 10 : 1	10° bis 30°
 trichterförmig	Hänge überwiegend konvex, nach unten steiler werdend, evtl. mit geradem Segment	2 : 1 bis etwa 8 : 1	15° bis 45°
 wannen- bis kesselförmig	gestreckte, meist relativ steile Hänge, scharf gegen den flachen Boden und die Umgebung abgegrenzt	1 : 1 bis etwa 20 : 1	30° bis 90°
 brunnen- oder schachtförmig	sehr steile Wände, scharfer Rand	1 : >1	60° bis >90°

Relief, Schichtstufen

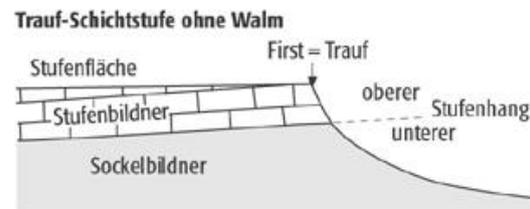
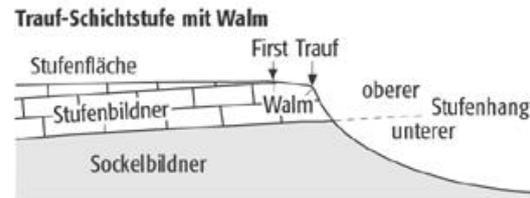
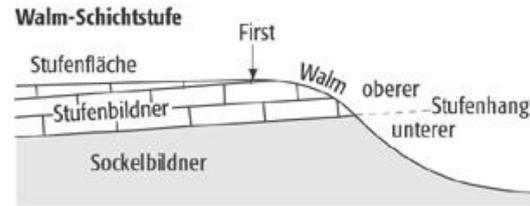


Abbildung 29: Schichtstufen, (Brunotte et al. 2002c)

Resilienz

Bezogen auf ein technisches System beschreibt Resilienz die Fähigkeit, sich an Störungen anzupassen, sich auf sie vorzubereiten, ihnen zu widerstehen und möglichst schnell in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren.

(Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014)

Sensitivität

Die Sensitivität beschreibt, in welchem Maße ein System (z.B. Wirtschaftssektor, Bevölkerungsgruppe, Ökosystem) aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (Alter, Diversität) negativ oder positiv auf einen klimatischen Einfluss reagiert. Diese Reaktion kann sich sowohl sofort nach Auftreten des klimatischen Einflusses als auch über einen längeren Zeitraum hinweg äußern. (IPCC, 2016)

→ räumliche Sensitivität (vgl. *Sensitivität (Anfälligkeit oder Empfindlichkeit)* (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 14))

Sommertag

An einem Sommertag beträgt das Maximum der Lufttemperatur mindestens 25 Grad Celsius während des Tagesverlaufs. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021j)

Splash-Effekt

Teilprozess der Bodenerosion durch Wasser. Hierbei werden Bodenaggregate durch die Energie des auf den Boden auftreffenden Regens zerstört. (BGR o. J.a)

Starkregen

Starkregen kennzeichnet sich durch eine große Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit aus. Er lässt sich in 3 Stufen mit ansteigender Intensität unterteilen. Eine Warnung vor markantem Wetter wird bei Regenmengen von 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder von 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden ausgesprochen. Von einem Unwetter spricht man bei Regenmengen von 25 bis 40 l/m² in 1 Stunde oder von 35 l/m² bis 60 l/m² in 6 Stunden. Übersteigt die Regenmenge 40 l/m² in 1 Stunde oder 60 l/m²

in 6 Stunden, so hat dies eine Warnung vor extremen Unwettern zur Folge. (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2021k)

In diesem Bericht wird unter einem Starkregen ein Tag verstanden, an welchem die kumulierte Niederschlagssumme größer als 20mm ist.

Vorgelagerte Wirkung

Eine vorgelagerte Wirkung ist ein Wetterereignis, welches eine Klimawirkung zur Folge hat. Vorgelagerte Wirkungen bedingen das Ausmaß der übrigen Klimawirkungen. (Umweltbundesamt (UBA) 2021c, S. 14)

Vulnerabilität/Verletzbarkeit

Die Vulnerabilität kann sich sowohl auf ein Objekt selbst als auch auf die gesellschaftliche Abhängigkeit von diesem beziehen. Im Falle einer Infrastruktur beschreibt die Vulnerabilität die Neigung dazu, nachteilig von (klimatischen) Einflüssen betroffen zu sein. Diese Neigung setzt sich aus der räumlichen Exposition des Objekts und dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Gefahren zusammen. Im Falle einer kritischen Infrastruktur bringt die Abhängigkeit von der permanenten Verfügbarkeit dieser eine Verletzbarkeit der Gesellschaft mit sich. Durch die Fähigkeit der Gesellschaft, Vorsorgemaßnahmen bereitzustellen, kann die Vulnerabilität begrenzt werden. (Lenz 2009; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014)

Wärmeperiode

Eine Wärmeperiode besteht aus mindestens sechs zusammenhängenden Tagen, an denen die maximale Tagestemperatur höher ist als die

der 10 % wärmsten Tage in der Referenzperiode.

→ Weitere relevante Begriffe können z.B. aus dem „*Glossar des Themenfeldes 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Expertenetzwerk*“ entnommen werden;

Die allgemein verwendete Referenzperiode (DWD, HLNUG etc) bezieht sich auf den Zeitraum 1971 – 2000.

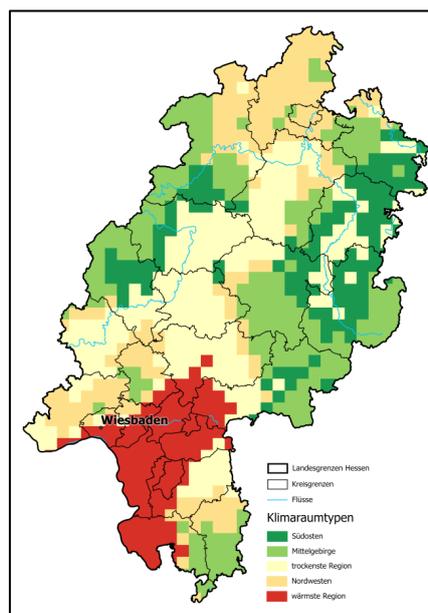
Anhang: Datenblätter zu den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf das Straßenverkehrssystem

Liste der Datenblätter:

- N1 - Zunahme von Starkniederschlagsereignissen & lang andauernde Niederschlagsperioden
- N2 - Veränderte Niederschlagsmuster: Zunahme der Niederschläge in Form von Regen anstelle von Schnee
- N3 - Zunahme der Dürrebedingungen in einigen Regionen
- S1 - Zunahme der Häufigkeit von starken Winden und Stürme
- T1 - Zunahme an heißen Tagen und an Hitzewellen
- T2 - Späteres Einsetzen des saisonalen Frostes und früheres Einsetzen des saisonalen Tauwetters
- T3 - Vermehrter Frost-Tau-Wechsel
- M1 - Gravitative Massenbewegung und Massentransport

Hinweis zu den Klimaraumtypen und Clusterregionen:

Die in den folgenden Datenblättern erwähnten Klimaraumtypen und Clusterregionen beziehen sich auf die deutschlandweite Kategorisierung der räumlichen Klimaarten des Umweltbundesamtes, welche „[...] hinsichtlich ihres Klimas relativ homogene, voneinander abgrenzbare Räume [sind], die mittels einer Clusteranalyse identifiziert wurden“ (Quelle: Klimawirkungs- und Risikoanalyse; Bezugszeitraumes 1971 – 2000).



Klimaraumtypen in Hessen. Nach *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021* (UBA)



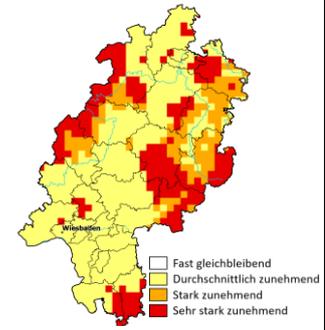
Niederschläge

N1 - Zunahme von Starkniederschlagsereignissen & lang andauernde Niederschlagsperioden

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Aktuell werden im Mittel vier Starkregentage im Jahr in Hessen beobachtet. Laut Prognose ist eine Zunahme um bis zu 40 % möglich. Dabei wird die Intensität einzelner Ereignisse vermutlich zunehmen, ebenso wie die Häufigkeit von langanhaltenden Niederschlagsereignissen, welche zu einer Übersättigung der Böden führen können. Damit steigt das Risiko von Hochwasserereignissen. In den Klimaraumtypen „Südosten“ und „Mittelgebirge“ wird ein stärkerer Anstieg der durchschnittlichen Starkregentage prognostiziert als in den anderen Regionen.

Gefährdete Regionen:



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst	
Auslöser: Hochwasser	<ul style="list-style-type: none"> Überlastung der Straßenentwässerungssysteme: führt zu Rückstau und Straßenüberflutung
	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme der Überflutung von Straßen, Unterführungen, Trogbauwerken und Tunneln
	<ul style="list-style-type: none"> Beschädigungen bis hin zum Versagen von gewässerkreuzenden Bauwerken durch Hochwasser und darin enthaltenen Treibguts
	<ul style="list-style-type: none"> Störungen elektronischer Ausstattungen wie z.B. Lichtsignal- und Stromversorgungsanlagen sowie Beeinträchtigungen der Verkehrsleittechnik
Auslöser: Gravitative Massenbewegungen und Massentransport	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme von Straßenschäden durch Erosionen und Unterspülungen, sowie Erdbeben und Schlammlawinen: Bodenerosion an Fahrbahnböschungen, Erosion und Absenkung von Straßen
	<ul style="list-style-type: none"> Destabilisierung und Zerstörung von Straßenabschnitten durch gravitative Massenbewegung (Hangrutsche und Unterspülungen)
	<ul style="list-style-type: none"> Destabilisierung von Straßenausstattung, z.B. passive Schutzeinrichtungen
	<ul style="list-style-type: none"> Unterspülung von Gründungen von Ingenieurbauwerke (z.B. Widerlager und Brückenpfeilern)

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit	
Auslöser: Hochwasser	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme der Verkehrsbehinderungen und Streckenunterbrechungen bzw. -sperrungen durch Überflutungen
	<ul style="list-style-type: none"> Beräumung von Treibgut an Gewässerkreuzungen
Auslöser: Gravitative Massenbewegungen	<ul style="list-style-type: none"> Hindernisse auf Straßen durch gravitative Massenbewegung

und Massentransport	
Auslöser: Starkregen	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Unfällen durch Aquaplaning
	<ul style="list-style-type: none"> • Witterungsbedingte Unterbrechung von Bauarbeiten
	<ul style="list-style-type: none"> • Behinderung des Straßenbetriebsdienstes und zusätzliche Sicherheitsrisiken durch Starkregenereignisse und langanhaltende Niederschlagsereignisse
Auslöser: wassergesättigten Böden	<ul style="list-style-type: none"> • Umstürzende Bäume aufgrund fehlendem Bodenhalt bei wassergesättigten Böden, vor allem in hängigem Gelände
Auslöser: Folgen	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Verkehrsbeeinträchtigungen durch Instandsetzung von Witterungsschäden
	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung von Unfallfolgen durch Versagen der Schutzeinrichtungen

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none"> • Überflutung von Bahnstrecken
<ul style="list-style-type: none"> • Schäden am Gleisbett und an Sicherungsanlagen durch Erosionen und Unterspülungen, Erdbeben und Schlammlawinen
<ul style="list-style-type: none"> • Sperrung von Wasserstraßen aufgrund Hochwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Sperrung (z.B. wegen Überflutung bzw. Reparatur) von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)



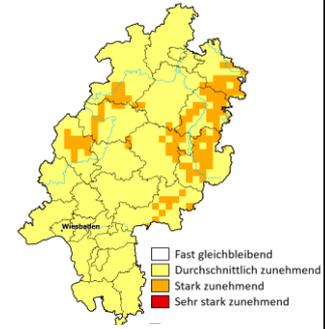
Niederschläge

N2 - Veränderte Niederschlagsmuster: Zunahme der Niederschläge in Form von Regen anstelle von Schnee

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Derzeit liegen die Temperaturen im Winter bei 0,9 °C im hessischen Mittel. Durch den Klimawandel ist von einem Anstieg um 2 °C auszugehen, der regional recht gleichmäßig ausfällt, in der Clusterregion „Südosten“ (Deutschland) etwas stärker als in den übrigen Regionen. Durch die erhöhten Temperaturen muss damit gerechnet werden, dass winterliche Niederschläge in Zukunft immer seltener als Schnee und stattdessen als Regen niedergehen.

Gefährdete Regionen:



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
<ul style="list-style-type: none"> • Sofortiger Abfluss und Risiko von Überschwemmungen, Erdrutschen, Hangrutschungen und daraus resultierenden Schäden
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Hochwasserrisiko von Flüssen und Überflutung der naheliegenden Straßen
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Glatteis- und Eisregenereignissen
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Eisbruch an Bäumen und Gehölzen
<ul style="list-style-type: none"> • + Auswirkungen aus der Klimaveränderung "N1-Zunahme von Starkniederschlagsereignissen & lang andauernde Niederschlagsperioden"

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
<ul style="list-style-type: none"> • Auswirkungen (ggf. vorteilhaft) auf die Sicherheit und den Unterhaltungsdienst
<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung des Aufwands für Schneeräumung
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Winterdienstaufwand zur Verhinderung von Glätte
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Unfällen auf nassen oder vereisten Fahrbahnen
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Aufwand zur Beseitigung von Eisbruch

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Risiko von Sperrungen von Wasserstraßen bedingt durch Hochwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Sperrung (z.B. wegen Überflutung bzw. Reparatur) von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)



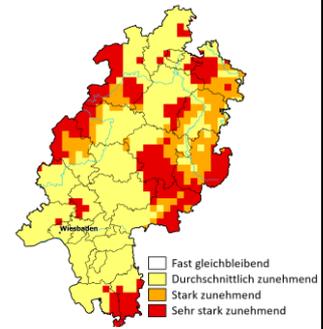
Niederschläge

N3 - Zunahme der Dürrebedingungen in einigen Regionen

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Aktuell ist die Niederschlagssumme in Hessen im Sommer am größten. Mit den Veränderungen durch den Klimawandel verschieben sich die Niederschlagsmuster, und es kann zukünftig von sinkenden Sommerniederschlägen ausgegangen werden (50. Perzentil des Szenarios RCP8.5). Dies führt zu einer steigenden Anzahl von Trockentagen (durchschnittlich + 2 Tage), wie in der Abbildung dargestellt. Über-durchschnittlich gefährdet sind hierbei die „Mittelgebirge“ (+ 2,5 Tage) als auch das Cluster „Südosten“ (+ 2,4 Tage). Die gleichzeitig steigenden Temperaturen intensivieren die Verdunstung (Evaporation) und können so die Wahrscheinlichkeit für Dürren in einigen Regionen Hessens erhöhen.

Gefährdete Regionen:



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
<ul style="list-style-type: none"> • Austrocknung der Böden und Verhärtung der Oberfläche. Bei Starkregen verstärkter Oberflächenabfluss (bis zur Überflutung) und Bodenerosion
<ul style="list-style-type: none"> • Wald- und Straßenschäden wegen des Absinkens des Grundwasserspiegels
<ul style="list-style-type: none"> • erhöhtes Setzungsrisiko von Bauwerken durch Austrocknen von Böden unterhalb der Gründungssohle
<ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Anfälligkeit für Waldbrände, die die Verkehrsinfrastruktur direkt bedrohen
<ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Anfälligkeit von durch Waldbrände brach liegende Gebiete für Schlammlawinen infolge von sogar üblichen Niederschlagsereignissen

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
<ul style="list-style-type: none"> • Instandsetzungsaufwand an Bauwerken
<ul style="list-style-type: none"> • Astbruchgefahr bei trockenen / abgestorbenen Bäumen
<ul style="list-style-type: none"> • Sichtbeeinträchtigungen durch Staub, auf Grund zunehmenden Bodenerosionen infolge von Trockenheit
<ul style="list-style-type: none"> • Sichtbehinderungen durch Rauch von Waldbränden / Straßensperrungen wegen Waldbränden

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none"> • Niedrigwassersituationen und damit Abladebeschränkungen auf den Wasserstraßen
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Risiko von Sperrung (z.B. wegen Absetzen bzw. Reparatur oder Waldbrände) von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Risiko von Sperrung (z.B. wegen Absetzen bzw. Reparatur oder Waldbrände) von Bahnstrecken

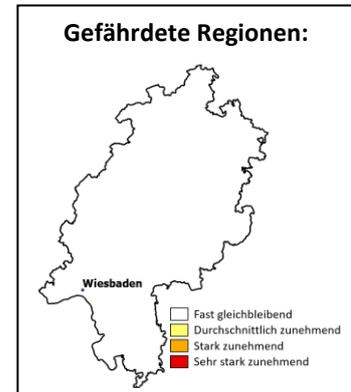


Winde/Stürme

S1 - Zunahme der Häufigkeit von starken Winden und Stürme

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Aussagen über die Häufigkeit und Intensität von Starkwindereignissen sind mit großen Unsicherheiten verbunden und können nur begrenzt prognostiziert werden. Für mittlere Windgeschwindigkeiten sowie für Starkwinde werden derzeit nur geringfügige Änderungen von $\pm 5\%$ erwartet. Dementsprechend wird eine geringfügig erhöhte Schadenswahrscheinlichkeit durch Windwurf erwartet.



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Wahrscheinlichkeit von Infrastrukturausfällen aufgrund von Windwurf
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Gefahr für die Ausleger von Verkehrszeichen (v.a. Wegweisern), Verkehrszeichenbrücken und Lichtsignalanlagen
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Bodenerosion

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
<ul style="list-style-type: none"> • Gefährdung der Verkehrsteilnehmer durch Seitenwind
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Windbruch auf den Straßen, die eine Unfallgefahr darstellen und daher einen zusätzlichen Aufwand für die Unterhaltung des Straßennetzes erfordern

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none"> • Hindernisse auf den Schienenwegen
<ul style="list-style-type: none"> • Schäden an der Schieneninfrastruktur, an den Verkehrsleitsystemen und Stromversorgungsanlagen oder an Bahnhöfen
<ul style="list-style-type: none"> • Störungen des Flugbetriebs
<ul style="list-style-type: none"> • Schäden an Binnenwasserstraßen und Häfen
<ul style="list-style-type: none"> • Sperrung wegen Schäden von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)

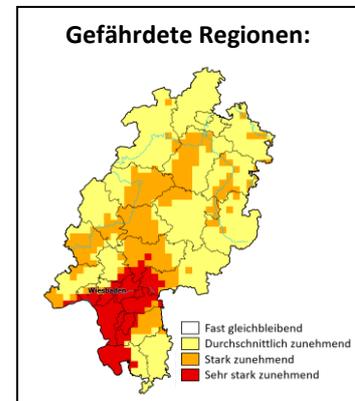


Temperaturen

T1 - Zunahme an heißen Tagen und an Hitzewellen

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Die Anzahl heißer Tage (mindestens erreichte Tageshöchsttemperatur von 30 °C) in Hessen ist regional unterschiedlich. Derzeit beträgt die Anzahl jährlich durchschnittlich in den kühleren, höheren Lagen 0 – 2 Tage, in den wärmsten Regionen dagegen über 10 Tage. Erwartet wird hessenweit ein Anstieg, welcher in den Klimaraumtypen „wärmste Region“ und „Mittelgebirge“ am stärksten sein wird (bis zu 18 heiße Tage pro Jahr), dagegen im Klimaraumtyp „Nordwesten“ etwas geringer (bis zu 6 heiße Tage pro Jahr). Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit von Hitzeperioden: Es wird für möglich gehalten, dass die Anzahl der Hitzewellen (an 3 aufeinanderfolgenden Tagen eine mindestens erreichte Tageshöchsttemperatur von 28 °C) pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts sich auf 6,4 erhöht.



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
• Material- und Strukturschäden
• Verformungen an Straßenbelägen: Aufweichung des Straßenbelags, verkehrsbedingte Spurrinnenbildung, Waschbrettbildung an Knotenpunkten oder Migration von flüssigem Asphalt Schwellenwert: anhaltende Lufttemperatur von über 32°C
• Auswirkungen auf die Bauweise des Straßenoberbaus
• Ggf. nicht ausreichende Dilatationswege von Übergangskonstruktion an Bauwerken
• Zwängungen bei der thermischen Ausdehnung von hydraulischen Baustoffen
• Überhitzung und damit Ausfallrisiken elektronischer Ausstattungen wie z. B. Lichtsignalanlagen
• Verstärkte Anfälligkeit für Bodenerosionen und damit die Gefahr von gravitativen Massenbewegungen auf Straßen an Hanglagen
• Bedrohung der Infrastrukturen durch Waldbrände
• Gefahr von Bränden der Grasflächen im Bankett und an Böschungen

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
• Beschränkungen der Zeiträume für Bautätigkeiten aufgrund von Gesundheits- und Sicherheitsbedenken; Beschränkungen beginnen bei 29,5°C; Hitzeerschöpfung möglich bei 40,5°C
• Bei trocken-warmen Sommern und langen Hitzeperioden: Astbruchgefahr bei trockenen / abgestorbenen Bäumen und damit höheren Aufwand bei der Unterhaltung
• Bei trocken-warmen Sommern und langen Hitzeperioden: Frühzeitiger Laubfall, das zu höheren Aufwand bei der Unterhaltung des Straßennetzes führt, um Rutschgefahr durch Laub auf Straßen zu vermeiden

- Bei feuchtwarmen Sommern: Verlängerung der Vegetationsperiode von Laubbäumen, das zu vermehrtem Wachstum und Laubfall führt und daher einen höheren Aufwand bei der Unterhaltung des Straßennetzes einfordert, um Rutschgefahr durch Laub auf Straßen zu vermeiden
- Bei feuchtwarmen Sommern: deutliche Erhöhung des Wachstums von Gras und Gehölze. Bei vermehrtem Wachstum, ist ggfs. mit vermehrtem Pflegeaufwand zum Freischneiden der Sichtfelder zu rechnen. Dies bedeutet mehr regelmäßiger Mäharbeiten im Unterhaltungsdienst und aufwendigeren oder früherem Gehölzrückschnitt im Herbst / Winter
- Sichtbeeinträchtigungen durch Staub, auf Grund zunehmenden Bodenerosionen infolge von Trockenheit
- Sichtbehinderungen durch Rauch von Waldbränden / Straßensperrungen wegen Waldbränden

- Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich**
- Material- und Anlagenschäden an Schienen (Verformung von Schienen ab 43°C möglich (Quelle: US Transport Research Board))
 - Eingeschränkte Binnenschifffahrt, mangels der erforderlichen Wassertiefe
 - Sperrung wegen Schäden von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)



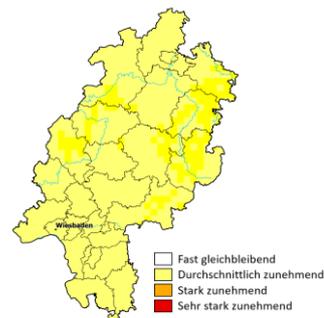
Temperaturen

T2 - Späteres Einsetzen des saisonalen Frostes und früheres Einsetzen des saisonalen Tauwetters

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Der allgemeine Temperaturanstieg in Hessen verändert insgesamt den jahreszeitlichen Verlauf. Erwartet werden eine Verkürzung des Winters um bis zu drei Wochen und die Verschiebung des Beginns aller Jahreszeiten. Gleichzeitig zum früheren Beginn des Frühlings liegt auch das saisonale Tauwetter früher im Jahr (bis zu 14 Tage). Im Dezember wird der saisonale Frost um bis zu sechs Tage später einsetzen.

Betroffene Regionen:



Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst

- Geringere Verschlechterung der Straßenbeläge durch geringere Belastung durch Frost, Schnee und Eis, aber möglicherweise mehr Frost-Tauwetter an einigen Stellen

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit

- Längere Bausaison
- Bei verkürzten Wintern: Verlängerung der Vegetationsperiode von Laubbäumen, das zu vermehrtem Wachstum und Laubfall führt und daher einen höheren Aufwand bei der Unterhaltung des Straßennetzes einfordert, um Rutschgefahr durch Laub auf Straßen
- Bei verkürzten Wintern: deutliche Erhöhung des Wachstums von Gras und Gehölze. Bei vermehrtem Wachstum, ist ggfs. mit vermehrtem Pflegeaufwand zum Freischneiden der Sichtfelder zu rechnen. Dies bedeutet mehr regelmäßiger Mäharbeiten im Unterhaltungsdienst und aufwendigeren oder früherem Gehölzrückschnitt im Herbst / Winter

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich

- keine



Temperaturen

T3 - Vermehrter Frost-Tau-Wechsel

Kurzbeschreibung der Klimaveränderung in Hessen:

Mit den steigenden Temperaturen kommt es zu einer Abnahme von Frosttagen und höheren winterlichen Durchschnittstemperaturen. Liegen diese in Zukunft leicht über den bisherigen 0,9 °C, könnte dies dazu führen, dass im Tagesverlauf häufiger Frost-Tau-Wechsel entstehen. Denkbar wäre jedoch auch eine Überschreitung jener Temperaturspanne, innerhalb derer häufige Frost-Tau-Wechsel vorkommen. Da keine Daten zum Temperaturveränderungen innerhalb einzelner Tage erhoben werden können, kann hierzu keine sichere Aussage getroffen werden.

Gefährdete Regionen:

< Die Datenlage lässt zum derzeitigen Zeitpunkt die Erstellung einer Karte nicht zu >

Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme an Frostaufbrüchen und Schlaglöchern auf Straßen und Brücken • Erhöhtes Risiko an gravitativen Massenbewegungen (Erdrutsche)

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
<ul style="list-style-type: none"> • Gefährdung der Verkehrsteilnehmer aufgrund von nicht erwarteter Glätte in kühleren Bereichen • Tendenz zu mehr Streueinsätze (präventiv gegen Reif, kurativ gegen Eis) • Mehr Sofortmaßnahmen an Fahrbahnen (Schlaglochbeseitigung) • Mehr Verkehrsbeschränkungen aufgrund von Fahrbahn- und Brückenschäden

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Risiko von Sperrungen von Schienenwegen aufgrund gravitativer Massenbewegungen (Erdrutsche) • Sperrung (z.B. wegen Überflutung bzw. Reparatur) von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)



Kurzbeschreibung der betrachteten Prozesse:

Hier werden sowohl **gravitativen Massenbewegungen**, die durch Schwerkraft in Gang gesetzt werden, und der **Massentransport**, der zusätzlich auch eine treibende Kraft wie beispielsweise Wasser, Eis oder Wind umfasst betrachtet (Brunotte et al. 2002b).

Gravitative Massenbewegungen (häufig als „Hangbewegungen“ bezeichnet) umfassen alle Prozesse der **Materialverlagerung durch den Einfluss der Schwerkraft** ohne Transport durch Agenzien (Wasser, Eis, Luft). Sie können in Form von Sturzdenudation (Felssturz, Bergsturz, Steinschlag), Rutschungen und Gleitungen (Blockrutschung, Bergrutsch, Erdrutsch) sowie Fließ- und Kriechdenudation (Mure, Erdfließen, Solifluktion) auftreten. Wasser ist durch Änderungen des Porenwasser- und Aggregatzustandes (z.B. durch Frostwechsel) maßgeblicher Auslöser vieler gravitativen Massenbewegungen (Quelle: Lexikon der Geowissenschaften).

Massentransport ist dahingegen die **Verlagerung von Lockermaterial durch verschiedene Agenzien** (Wasser, Eis, Wind). Daneben gibt es alle Übergangsformen zwischen gravitativen Massenbewegung und Massentransport (Quelle: Lexikon der Geowissenschaften).

Häufig nehmen solche Prozesse die Form von Erdrutschen und Schlammlawinen infolge von Bodensättigung an; oder die Form von Oberflächenerosionen und Unterspülungen infolge von Erosionsmechanismen.

Gefährdete Regionen:

<Die Datenlage lässt zum derzeitigen Zeitpunkt die Erstellung einer Karte nicht zu

>

Faktoren, die gravitative Massenbewegungen auslösen können
• Starkniederschlagsereignissen & lang andauernde Niederschlagsperioden (N1) → Bodensättigung
• Starkregenereignisse in ansonsten trockenen Perioden (N1/N3)
• starke Winde und Stürme (S1) → erhöhte Bodenerosion
• heiße Tagen und Hitzewellen (T1) → verstärkte Anfälligkeit für Bodenerosion
• von Waldbränden beschädigte Böden und abgeholzte Gebieten (T1) → verstärkte Anfälligkeit für Schlammlawinen infolge von sogar üblichen Niederschlagsereignissen
• Frost-Tau-Wechsel (T4) → erhöhtes Risiko an gravitativen Massenbewegungen (Erdrutsche)

Zu erwartende Folgen und daraus resultierender Schäden:

Auswirkungen auf die Straßeninfrastrukturen selbst
• Straßenbeschädigungen durch Erosionen und Unterspülungen, sowie Erdrutsche und Schlammlawinen: Bodenerosion an Fahrbahnböschungen oder Erosion und Absenkung von Straßen
• Destabilisierung und Zerstörung von Straßenabschnitten durch gravitative Massenbewegung (Hangrutschungen und Unterspülungen)
• Destabilisierung von Straßenausstattung, z.B. passive Schutzeinrichtungen
• Unterspülung von Gründungen von Ingenieurbauwerken (z.B. Brückenpfeilern)

Auswirkungen auf die Bereiche Bau, Betrieb, Verkehrsablauf und –sicherheit
<ul style="list-style-type: none">• Instandsetzungsaufwand an Bauwerken• Hindernisse auf Straßen

Indirekte negative Auswirkungen → bei regionalen Beeinträchtigungen anderer Verkehrswege, Verlagerung des Verkehrs auf Landesstraßen möglich
<ul style="list-style-type: none">• Sperrung von Wasserstraßen• Sperrung von Bahnstrecken• Sperrung von Straßen anderer Baulastträger (Bund, Kommunen)

TU Darmstadt, Darmstadt/Wiesbaden, 2022

Technische Universität Darmstadt
FB Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Fachgebiet Raum- und Infrastrukturplanung
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



raum
infrastruktur | planung