

CLIMATE CHANGE

29/2020

Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen

Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation
Klimawandel und -anpassung“, Teil 1

CLIMATE CHANGE 29/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 48 1030

FB000207/1

Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen

Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation
Klimawandel und -anpassung“, Teil 1

Dr. Philip Bubeck, Sarah Kienzler, Lisa Dillenardt,
Guilherme S. Mohor, Prof. Dr. Annegret H. Thieken
UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Dr. Axel Sauer, Dr. Marco Neubert
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung,
Dresden

Prof. Dr. Jürgen Blazejczak, Dr. Dietmar Edler

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

adelphi research gGmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung Dresden
Weberplatz 1
01217 Dresden

UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam
Am Neuen Palais 10
14469 Potsdam

Prof. Dr. Jürgen Blazejczak

Abschlussdatum:

Dezember 2018

Redaktion:

Fachgebiet I 1.6 KomPass-Klimafolgen und Anpassung
Andreas Vetter

Publikationen als pdf:
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Bewertung klimawandelgebundener Risiken

Mit der in diesem Bericht dargestellten Analyse wurde die Vertiefung des Wissens zu Schadenspotentialen ausgewählter Klimawirkungen und zu Anpassungsmaßnahmen, in Zusammenarbeit mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“, in Deutschland angestrebt. Zum einen wurden Schadenspotenziale prioritärer klimawandelgebundener Risiken für Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme in Deutschland bestimmt und, wo möglich, volkswirtschaftlich bewertet. Zum anderen wurden beispielhaft Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kosten erörtert.

Für die Schwerpunkte Starkregen und Sturmfluten wurden derzeitige Schadenspotenziale, mögliche Veränderungen aufgrund des Klimawandels sowie, wo möglich, die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen abgeschätzt. Für die Schwerpunkte hitzebedingte Todesfälle (Hitzetote), menschliche Leistungsfähigkeit, Waldbrand und Wassererosion wurden mögliche Veränderungen durch den Klimawandel und entsprechende Schadensprozesse eingehend betrachtet. Wo die Datenlage es erlaubte, wurden zukünftige Veränderungen des Schadenspotenzials aufgrund des Klimawandels oder sozio-ökonomischer Veränderungen (wie verstärkte Bebauung) quantifiziert. Im zweiten Teil der Untersuchung wurden Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und ausgewiesene Kosten beispielhaft erörtert. Tendenziell dämpfen makroökonomische Interdependenzen die Folgewirkungen der Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen. Jedoch können die sektoralen und lokalen Wirkungen gravierend ausfallen. Soweit rechenbar, berühren Klimaschäden den Wachstumspfad der gesamten Volkswirtschaft nur wenig. Gesamteinschätzungen der Schäden durch den Klimawandel, soweit sie monetär bewertbar sind, kommen für mitteleuropäische Länder unter Berücksichtigung von Folgewirkungen in einem 2°C-Klimaszenario bis zur Mitte des Jahrhunderts zu Kostenschätzungen unter 0,2% des BIP. Die Wohlfahrtsverluste fallen aber deutlich höher aus.

Der vorliegende Bericht entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „Behördenkooperation Klimawandel und Anpassung“, welches das übergeordnete Ziel verfolgte, systematisch die fachwissenschaftlichen Leistungen zu erarbeiten, die erforderlich sind, um die potenziellen Schäden durch den Klimawandel sowie die Möglichkeiten einer erfolgreichen und effizienten Klimaanpassung in Deutschland zu identifizieren.

Abstract: Bewertung klimawandelgebundener Risiken

The aim of the analysis presented in this report was to deepen the technical knowledge on the damage potential of selected climate change impacts as well as on adaptation goals and adaptation measures in Germany. In collaboration with the government agency network „Climate change and adaptation“ the damage potential of high-priority climate change-related risks for Germany's society, economy, and ecosystems was determined and, where possible, economically assessed. Furthermore, an exemplary analysis of measures and instruments and their costs was conducted.

For a number of key impacts, namely mortality, productivity, wild fires and soil erosion, the possible changes in damage potentials caused by climate change were examined in further detail. In those cases, where a sufficient data basis was available, the future changes in damage potential related to climate change or socio-economic changes (such as increased land development) were also analysed and monetarily quantified. In the second analysis, measure and instrument analyses and their costs were exemplarily explained. Climate-related damage and adaptation measures to climate change have a variety of economic consequences. Macroeconomic interdependencies tend to attenuate the knock-on effects. As far as can be

calculated, climate damage has little impact on the growth track of the economy as a whole. Sectoral and local effects, however, can be severe. Overall assessments of the damage caused by climate change, to the extent that they can be quantified in monetary terms, will lead to cost estimates of less than 0.2% of GDP for Central European countries by the middle of the century, taking into account the consequences in a 2°C climate scenario. Welfare losses, however, are significantly higher.

The present report was developed as part of the research project “Cooperation between authorities on climate change and adaptation” with the overall objective to systematically develop the technical knowledge that is required to identify potential climate change related damages and possibilities of a successful and efficient climate adaptation in Germany.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung	21
Summary	25
1 Einleitung	29
2 Bewertung von Klimawirkungen.....	31
2.1 Potentielle Klimawirkungen für ausgewählte Wirkungsketten in den Bereichen Starkregen und Sturmfluten	31
2.1.1 Auswahl und Modellierung der bewerteten Wirkungsketten.....	32
2.1.1.1 Auswahl der bewerteten Wirkungsketten.....	32
2.1.1.2 Einführung in die Modellierung von Schäden durch Starkregen und Sturmfluten	33
2.1.1.3 Szenarien.....	35
2.1.2 Wirkungskette: Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen.....	38
2.1.2.1 Einleitung	38
2.1.2.2 Methodische Vorgehensweise	40
2.1.2.3 Ergebnisse und Diskussion	49
2.1.2.4 Handlungsempfehlungen	63
2.1.3 Wirkungskette: Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten	64
2.1.3.1 Einleitung	64
2.1.3.2 Methodische Vorgehensweise	65
2.1.3.3 Ergebnisse und Diskussion	71
2.1.3.4 Handlungsempfehlungen	76
2.1.4 Wirkungskette: Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten	77
2.1.4.1 Einleitung	77
2.1.4.2 Methodische Vorgehensweise	78
2.1.4.3 Ergebnisse und Diskussion	82
2.1.4.4 Handlungsempfehlungen	86
2.1.5 Wirkungskette: Schäden an Gewerbe/Industrie durch Sturmfluten	87
2.1.5.1 Einleitung	87
2.1.5.2 Methodische Vorgehensweise	88
2.1.5.3 Ergebnisse und Diskussion	94
2.1.5.4 Handlungsempfehlungen	97

2.1.6	Kosten-Nutzen-Betrachtung der privaten Bauvorsorge.....	97
2.2	Potentielle Klimawirkungen für die Wirkungsketten „Hitzetote“, „Leistungsfähigkeit“ und „Waldbrand“	99
2.2.1	Klimatische Exposition für die Wirkungsketten „Hitzetote“, „Leistungsfähigkeit“ und „Waldbrand“	99
2.2.2	Konzeptionelle Einführung in die Modellierung von Schäden für die menschliche Gesundheit und Leistungsfähigkeit.....	104
2.2.2.1	Gefahrenanalyse.....	105
2.2.2.2	Dosis-Wirkungs-Analyse.....	106
2.2.2.3	Rezeptoranalyse	106
2.2.2.4	Expositionsanalyse	106
2.2.3	Schäden durch Hitzebelastung: Leistungsfähigkeit.....	106
2.2.3.1	Hintergrund	107
2.2.3.2	Methodische Vorgehensweise	107
2.2.3.3	Sensitivität.....	108
2.2.3.4	Ergebnisse	108
2.2.4	Schäden durch Hitzebelastung: Hitzetote	111
2.2.4.1	Hintergrund	111
2.2.4.2	Methodische Vorgehensweise	112
2.2.4.3	Sensitivität.....	113
2.2.4.4	Ergebnisse	113
2.2.5	Schäden durch Wassererosion.....	121
2.2.5.1	Hintergrund	121
2.2.5.2	Methodische Vorgehensweise	122
2.2.5.3	Ergebnisse	125
2.2.5.4	Validierung/Plausibilisierung	129
2.2.6	Schäden durch Waldbrand	137
2.2.6.1	Hintergrund	137
2.2.6.2	Methodische Vorgehensweise	137
2.2.6.3	Schadensmodell	139
2.2.6.4	Ergebnisse	140
2.2.6.5	Handlungsempfehlungen	141
3	Beispielhafte Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kosten	143
3.1	Volkswirtschaftliche Bewertung von Schäden verursacht durch den Klimawandel	144
3.1.1	Hintergrund, Ziel, Vorgehensweise.....	144

3.1.2	Konzeptioneller Rahmen	146
3.1.2.1	Impulse und Folgewirkungen von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen.....	146
3.1.2.2	Einkommens- versus Wohlfahrtswirkungen	149
3.1.2.3	Grenzen ökonomischer Analysen	151
3.1.3	Qualitative Bewertung gesamtwirtschaftlicher Impulse und Folgewirkungen.....	152
3.1.3.1	Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen.....	152
3.1.3.2	Gesundheitsschäden durch Hitzebelastung.....	159
3.1.3.3	Beeinträchtigung von Böden	165
3.1.3.4	Kombinierte Klimawirkungen.....	169
3.1.4	Quantitative Illustration makroökonomischer Folgewirkungen: Multiplikatoranalyse	171
3.1.4.1	Zur Methode.....	172
3.1.4.2	Höhere Investitionen.....	173
3.1.4.3	Technischer Fortschritt	177
3.1.4.4	Zusammenfassung	178
3.1.5	Quantitative Illustration sektoraler Interdependenzen: Input-Output-Analyse.....	179
3.1.5.1	Zur Methode.....	179
3.1.5.2	Schäden an Schieneninfrastruktur	181
3.1.5.3	Schäden an Wohngebäuden	195
3.1.5.4	Schäden an gewerblicher Infrastruktur.....	207
3.1.5.5	Wassererosion	217
3.1.5.6	Zusammenfassung	220
3.1.6	Zusammenfassung	221
4	Schluss	223
4.1	Modellierung von Schadenspotentialen.....	223
4.2	Schadenspotential des Klimawandels	224
5	Quellenverzeichnis	226

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Methodisches Vorgehen zur Berechnung der Wirkungsketten in den Bereichen Starkregen und Sturmfluten.....	35
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Modellierungskonzepts für Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen.....	41
Abbildung 3:	Übersicht der gewonnenen Fallstudienstädte im Vorhaben ...	43
Abbildung 4:	Schadensfunktionen des Modells FLEMO-Starkregen für die Abschätzung von Wohngebäudeschäden durch Starkregen unter Berücksichtigung der Faktoren Wassertiefe, Gebäudetyp und Gebäudequalität	45
Abbildung 5:	Eingangsdaten für das Modell FLEMO-Starkregen	46
Abbildung 6:	Übersicht der Starkregengefahrenkarten der verschiedenen Fallstudienstädte	50
Abbildung 7:	Ausschnitte aus den Starkregengefahrenkarten der Städte Unna und Köln	51
Abbildung 8:	Potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit der betrachteten Niederschlagsmenge für die verschiedenen Bezirke/Ortsteile der Fallstudienstädte in NRW (N = 63; Mindestwassertiefe von 2 cm)	55
Abbildung 9:	Normierte potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit von der betrachteten Niederschlagsmenge für die verschiedenen Bezirke/Ortsteile der Fallstudienstädte in NRW (N = 63; Mindestwassertiefe von 2 cm). Die Normierung erfolgte pro Risikogebiet mit dem Gesamtwohnvermögen (oben), der Siedlungsfläche (Mitte) und der Einwohnerzahl (unten).....	57
Abbildung 10:	Transferfunktion für potenzielle flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit vom flächenspezifischen Wohnvermögenswert des Risikogebietes	59
Abbildung 11:	Potenzielle flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in NRW.....	60
Abbildung 12:	Potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch (extreme) Starkregen in NRW pro Gemeinde (abgeleitet mithilfe einer Transferfunktion)	61
Abbildung 13:	Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten	66
Abbildung 14:	Sturmflut-Gefahrenkarten der Küstenbundesländer für die Extremszenarien ohne Hochwasserschutz gemäß HWRM-RL	68
Abbildung 15:	Streckennetz der Deutschen Bahn in den Küstenbundesländern	69
Abbildung 16:	Schadensklassen des RAIL-Modells.....	70

Abbildung 17:	Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten	79
Abbildung 18:	Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden in Unternehmen durch Sturmfluten	88
Abbildung 19:	Eingangsdaten für die Abschätzung von Schäden in Unternehmen durch Sturmfluten.....	93
Abbildung 20:	Ausdehnung der EuroCORDEX-EUR-11-Domäne und Lage des Teilausschnittes.....	102
Abbildung 21:	Lage der EUR-11-Gitterpunkte im Teilausschnitt „Deutschland“.....	103
Abbildung 22:	Energieaufwand in jährlichen Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit für einen ausgewählten Gitterpunkt	109
Abbildung 23:	Energieaufwand in Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit zusammengefasst nach Klimaperioden für einen ausgewählten Gitterpunkt.....	110
Abbildung 24:	Energieaufwand in Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit zusammengefasst nach Klimaperioden und Ensemble für einen ausgewählten Gitterpunkt.....	111
Abbildung 25:	Hitze-Mortalitätsfunktion für nördliche kontinentale Länder nach Kendrovski et al. (2017)	113
Abbildung 26:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität (Projektionen 1–9)	115
Abbildung 27:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität (Projektionen 10–17)	116
Abbildung 28:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität zusammengefasst nach Klimaperioden für einen ausgewählten Gitterpunkt.....	117
Abbildung 29:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität zusammengefasst nach Klimaperioden und Ensemble für einen ausgewählten Gitterpunkt	118
Abbildung 30:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % der Basismortalität für die Projektionskaskade MOHC-HadGEM2-ES_RCP4.5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day mit dem Antrieb RCP4.5.....	119
Abbildung 31:	Anteil hitzebedingter Mortalität in % der Basismortalität für die Projektionskaskade MOHC-HadGEM2-ES_RCP4.5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day mit dem Antrieb RCP8.5.....	120
Abbildung 32:	Potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) im 10-Meter-Raster	126

Abbildung 33:	Mittlere potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) auf Gemeindeebene.....	127
Abbildung 34:	Mittlere potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) auf Kreisebene	128
Abbildung 35:	Räumliche Plausibilisierung der Erosionsgefährdung mit in Orthophotos sichtbaren Erosionsspuren	129
Abbildung 36:	Lage der Gebiete für die räumliche Validierung der Bodenerosionsgefährdung	130
Abbildung 37:	Validierungsgebiet 1 für die Bodenerosionsgefährdung	131
Abbildung 38:	Validierungsgebiet 2 für die Bodenerosionsgefährdung	132
Abbildung 39:	Validierungsgebiet 3 für die Bodenerosionsgefährdung	133
Abbildung 40:	Validierungsgebiet 4 für die Bodenerosionsgefährdung	134
Abbildung 41:	Validierungsgebiet 5 für die Bodenerosionsgefährdung	135
Abbildung 42:	Validierungsgebiet 6 für die Bodenerosionsgefährdung	136
Abbildung 43:	Komponenten und Variablen des Canadian Forest Fire Weather Index-Systems.....	138
Abbildung 44:	Rasterbasierte Berechnung des FWI für einen Gebietsausschnitt mit Eingangsdaten (TEMP, RH, WS, PREC) und Ergebnissen (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI, DSR).....	139
Abbildung 45:	Tageswerte des FWI für einen ausgewählten Gitterpunkt (Reihe 31, Zeile 61; Brandenburg a. d. H.) einer Projektionskaskade (CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1) mit RCP4.5-(oben) und RCP8.5-Antrieb (unten)	140
Abbildung 46:	Vorgehensweise bei Szenarioanalysen und Sensitivitätsrechnungen	172
Abbildung 47:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007	182
Abbildung 48:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007	183
Abbildung 49:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten inversen Koeffizienten (ohne den intrasektoralen inversen Koeffizienten) für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007	184
Abbildung 50:	Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau.....	186
Abbildung 51:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche) ...	187
Abbildung 52:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Sektoren)	188

Abbildung 53:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	189
Abbildung 54:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	190
Abbildung 55:	Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau.....	191
Abbildung 56:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte Bruttoproduktion nach Wirtschaftsbereichen (10 wichtigste Bereiche).....	192
Abbildung 57:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Bereiche)	193
Abbildung 58:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	194
Abbildung 59:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)	195
Abbildung 60:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	196
Abbildung 61:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion in den 10 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen.....	197
Abbildung 62:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion nach direkten und indirekten Effekten in den 5 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen.....	198
Abbildung 63:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	199
Abbildung 64:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Bereiche)	200
Abbildung 65:	Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden.....	202
Abbildung 66:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche).....	203
Abbildung 67:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Bereiche).....	204

Abbildung 68:	Durch 1 Mrd. € in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	205
Abbildung 69:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)	206
Abbildung 70:	Kapitalintensität nach Wirtschaftsbereichen (Sektoren mit den höchsten Kapitalintensitäten).....	207
Abbildung 71:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Lieferungen der 10 Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Kapitalkoeffizienten	208
Abbildung 72:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Lieferungen der 10 Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Kapitalkoeffizienten	209
Abbildung 73:	Durchschnittliche Nutzungsdauer der Anlagen in den Branchen des Verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2015 in Jahren	211
Abbildung 74:	Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur	212
Abbildung 75:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche).....	213
Abbildung 76:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Wirtschaftsbereiche).....	214
Abbildung 77:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen.....	215
Abbildung 78:	Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)	216
Abbildung 79:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft	217
Abbildung 80:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft	218
Abbildung 81:	Wirtschaftsbereiche mit den höchsten inversen Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft	219

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Berechnung der Wirkung des Klimawandels und sozioökonomischer Entwicklungen für betrachtete Wirkungsketten.....	36
Tabelle 2:	Berechnung der Wirkung von Anpassungsmaßnahmen für betrachtete Wirkungsketten	38
Tabelle 3:	Ausgewählte Charakteristika der Starkregengefahrenkarten der Fallstudienstädte	52
Tabelle 4:	Korrelationen nach Pearson zwischen normierten potenziellen Wohngebäudeschäden durch Starkregen und Eigenschaften der Risikogebiete in den Fallstudien (N = 41; nur maximales Szenario pro Ortsteil/Bezirk berücksichtigt).....	58
Tabelle 5:	Von den Küstenbundesländern verwendete Szenarien und Annahmen für die Erstellung der Sturmflutgefahrenkarten gemäß HWRM-RL	67
Tabelle 6:	Absolute Schäden an Schieneninfrastruktur durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)	72
Tabelle 7:	Flächenspezifische Schäden (EUR pro 100 m Streckennetz) an Schieneninfrastruktur durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien als Vulnerabilitätsmaß (gerundet auf drei signifikante Stellen)	73
Tabelle 8:	Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit des 100-jährlichen Ereignisses an Nord- und Ostsee für die Zeiträume 2014 und 2100 nach Voudoukas et al. (2016). Für Zeiträume und Szenarien ohne Angaben liegen keine robusten Ergebnisse vor	74
Tabelle 9:	Veränderung des Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadens Erwartungswert für Hamburg und Schleswig-Holstein für unterschiedliche Zeitscheiben und Klimaszenarien nach Voudoukas et al. (2016) in EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)	75
Tabelle 10:	Risikoreduktion durch eine Ertüchtigung der Deichinfrastruktur zum Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus (EUR pro Jahr) in EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen).....	75
Tabelle 11:	Zusätzlicher Schadensgrad aufgrund von Salzwasser gemäß Penning-Rowell (1992)	80
Tabelle 12:	Absolute Schäden an Wohngebäuden durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)	82
Tabelle 13:	Flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden (EUR/km ² Wohnfläche in den Bundesländern) durch Küstenhochwasser	

	für unterschiedliche Szenarien (gerundet auf drei signifikante Stellen)83
Tabelle 14:	Flächenspezifische Gebäudeschäden (EUR/m ² Wohnfläche in den Überflutungsgebieten) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern84
Tabelle 15:	Veränderung des Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert (Wohngebäude) für Hamburg und Schleswig-Holstein für unterschiedliche Zeitscheiben und Klimaszenarien nach Vousdoukas et al. (2016) in EUR pro Jahr (gerundet auf drei signifikante Stellen)85
Tabelle 16:	Risikoreduktion durch eine Ertüchtigung der Deichinfrastruktur zum Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus in EUR pro Jahr (gerundet auf drei signifikante Stellen)85
Tabelle 17:	Absolute Schäden an Wohngebäuden mit optimaler Bauvorsorge durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen) 86
Tabelle 18:	Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Vermögenswerte zu Waren, Produkten und Lagerbeständen als Anteil des Vermögens an der Betriebseinrichtung in Abhängigkeit vom ökonomischen Sektor und der Betriebsgröße.....90
Tabelle 19:	Schadensanfälligkeit von Unternehmen gegenüber Hochwasser in Abhängigkeit von der Wassertiefe91
Tabelle 20:	Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Schadensanfälligkeit von Unternehmen gegenüber Hochwasser in Abhängigkeit vom ökonomischen Sektor und der Betriebsgröße (BG; (wobei 3: >100 Beschäftigte, 2: 11-100 Beschäftigte und 1: 1-10 Beschäftigte).....91
Tabelle 21:	Schäden an Unternehmen durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)94
Tabelle 22:	Flächenspezifische Schäden an Industrie und Gewerbe (EUR/km ² Gesamtfläche des jeweiligen Bundeslandes) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern (in EUR)95
Tabelle 23:	Flächenspezifische Schäden an Industrie und Gewerbe (EUR/m ² Fläche in den Überflutungsgebieten) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern96
Tabelle 24:	Schäden an Unternehmen mit optimaler Bauvorsorge durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien (in Mio. EUR).....97
Tabelle 25:	Nutzen-Kostenverhältnisse für unterschiedliche Maßnahmen der Bauvorsorge für unterschiedliche Hochwasserszenarien, berechnet mit unterschiedlichen Abschreibungsraten.....99
Tabelle 26:	Variablen der Klimaprojektionen..... 100

Tabelle 27:	Übersicht über die Klimaprojektionsketten des EuroCORDEX-Ensembles für die EUR11-Domäne mit den Antrieben RCP4.5 und RCP8.5	100
Tabelle 28:	Einstufung der Wertausprägungen für die Komponenten des Canadian Forest Fire Weather Index-Systems	138
Tabelle 29:	Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario.....	174
Tabelle 30:	Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario, Endogene öffentliche Investitionen‘	174
Tabelle 31:	Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – – Alternativszenario, Adaptive Erwartungen‘	175
Tabelle 32:	Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario.....	176
Tabelle 33:	Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario, Endogene Wohnungsbauinvestitionen‘	176
Tabelle 34:	Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario, Verstärkter Impuls‘	177
Tabelle 35:	Höhere Unternehmensinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario.....	177
Tabelle 36:	Niedrigere Rate des Technischen Fortschritts – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario	178
Tabelle 37:	Niedrigere Rate des Technischen Fortschritts – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario, Endogener Technischer Fortschritt`	178

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AGM	Allgemeine(s) Gleichgewichtsmodell(e)
APA	Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
ATKIS	Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BUI	Buildup Index
CC-LandStraD	Strategien für eine nachhaltige Landnutzung im Zeichen des Klimawandels für Deutschland (Climate Change - Land Use Strategies)
C-Faktor	Crop-Faktor der USLE/ABAG (Pflanzenbedeckungsfaktor)
CFFDRS	Canadian Forest Fire Danger Rating System
COIN	Cost of Inaction: Assessing the Costs of Climate Change for Austria
CORINE	Koordinierung von Informationen über die Umwelt (Coordination of Information on the Environment)
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DC	Drought Code
Destatis	Statistisches Bundesamt
DGM	Digitales Geländemodell (mit nachgestellter Zahl der Rasterweite in Metern, z.B. DGM10)
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
Basis-DLM	Digitales Basis-Landschaftsmodell
DMC	Duff Moisture Code
DSR	Daily Severity Rating
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESGF	Earth System Grid Federation
EU	Europäische Union
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FLEMOcs	Flood Loss Estimation Model for the commercial sector (Hochwasserschadensmodell)

FLEMOps	Flood Loss Estimation Model for the private sector (Hochwasserschadensmodell)
FuE	Forschung und Entwicklung
FWI	Fire Weather Index des CFFDRS
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GERICS	Climate Service Center Germany
GIS	Geoinformationssystem
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung
HWRM-RL	EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
IMA	Interministerielle Arbeitsgruppe
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISI	Initial Spread Index
K-Faktor	Erodibilität- Faktor der USLE/ABAG
KomPass	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
KOSTRA-DWD	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
L-Faktor	Length-Faktor der USLE/ABAG (Hanglängenfaktor)
LS-Faktor	Kombinierter Hanglängen- und Neigungsfaktor der USLE/ABAG (insbesondere bei der Nutzung von Raster-DGMs als Datengrundlage)
NRW	Nordrhein-Westfalen
PREC	Precipitation (Niederschlag) des CFFDRS
RAIL	Railway Infrastructure Loss (Hochwasserschadensmodell)
RCP	Representative Concentration Pathway
R-Faktor	Regenerositäts-Faktor der ABAG
RH	Relative Humidity (Relative Feuchte) des CFFDRS
S-Faktor	Slope-Faktor der USLE/ABAG (Hangneigungsfaktor)
T	Wiederkehrintervall einer Niederschlagshöhe (oder einer anderen Größe, z.B. Durchfluss) in Jahren
TEMP	Temperature (Temperatur) des CFFDRS
UBA	Umweltbundesamt
UK	United Kingdom
USLE	Universal Soil Loss Equation
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

WS

| Wind Speed (Windgeschwindigkeit) des CFFDRS

Zusammenfassung

Die ersten Zeichen des Klimawandels, wie die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen, sind bereits feststellbar. Die internationale Gemeinschaft hat daher beschlossen, die Erderwärmung auf 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Neben dem Klimaschutz durch Minderung bzw. Vermeidung von Emissionen spielt auch die Anpassung an den nicht mehr zu vermeidenden Klimawandel eine essentielle Rolle. Dies beinhaltet die Verringerung der Vulnerabilität von Gesellschaft und Ökosystemen sowie die Stärkung der Anpassungsfähigkeit natürlicher und sozio-ökonomischer Systeme. Ziel hierbei ist es, Schäden an Ökosystemen und der Gesellschaft, insbesondere an der menschlichen Gesundheit sowie Infrastruktur, möglichst gering zu halten.

Um diesen neuen Anforderungen an unsere Gesellschaft zu begegnen, hat die Bundesregierung 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und 2011 den Aktionsplan Anpassung (APA) beschlossen. Die DAS skizziert die Vorgehensweise zur Minderung der Vulnerabilität und der Erhöhung der Anpassungsfähigkeit, während der APA sie mit konkreten Maßnahmen unterlegt. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde die Vertiefung des Wissens zu Schadenspotentialen ausgewählter Klimawirkungen und zu Anpassungsmaßnahmen in Deutschland angestrebt. Das Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und Anpassung“, in dessen Rahmen diese Analyse durchgeführt wurde, wurde durch ein von adelphi research geleitetes Konsortium umgesetzt, welches das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), UP Transfer der Universität Potsdam sowie Prof. Jürgen Blazejczak (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung) umfasste. Das Vorhaben verfolgte das übergeordnete Ziel, systematisch die fachwissenschaftlichen Leistungen zu erarbeiten, die erforderlich sind, um die potenziellen Schäden durch den Klimawandel sowie die Möglichkeiten einer erfolgreichen und effizienten Klimaanpassung in Deutschland zu identifizieren. Der vorliegende Bericht umfasst einen Teil der in diesem Vorhaben erarbeiteten Analysen und Ergebnisse. Zum einen wurden Schadenspotenziale prioritärer klimawandelgebundener Risiken für Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme in Deutschland bestimmt und, wo möglich, volkswirtschaftlich bewertet. Zum anderen wurden beispielhaft Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kosten erörtert. Damit entstand Teil der Grundlage für ein transparentes und integriertes Bewertungsverfahren von Maßnahmen der Klimaanpassung. Dieses Verfahren wird ausführlich im Teilbericht „Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur integrierten Bewertung von Maßnahmen und Politikinstrumenten der Klimaanpassung“ dargelegt.

Die Ergebnisse des Vorhabens dienen dem Zweck, die Arbeiten der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (IMAA) zum Fortschrittsbericht der DAS und zum APA III zu beraten. Der Forschungsprozess beinhaltete eine regelmäßige Abstimmung mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“, das aus insgesamt 28 Bundesbehörden und -institutionen besteht (Stand: September 2019). Dieses Netzwerk wurde 2017 durch die IMAA mandatiert. Es hat die Aufgabenstellung, die fachliche Zuarbeit und Abstimmung wissenschaftlicher Inhalte der zentralen Produkte der DAS unterstützend zu begleiten.

Der erste Teil dieses Berichts behandelt die Bewertung von Klimawirkungen. Als Basis für diese Arbeiten dienten die im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse 2015 erstellten Wirkungsketten für die einzelnen Handlungsfelder der DAS, die schematisch die Verbindung zwischen Klimasignalen und Klimawirkungen darstellen (adelphi et al., 2015). Im Rahmen dieser ersten Vulnerabilitätsanalyse wurden von den Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität Klimawirkungen und damit Wirkungsketten identifiziert, die für Deutschland aufgrund ökonomischer, sozialer, kultureller, ökologischer und/oder räumlicher Aspekte von

besonderer Bedeutung sind. Aufbauend auf diesen Bewertungen wurden für das Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und Anpassung“ vorwiegend Klimawirkungen/Wirkungsketten für die weitere Bearbeitung ausgewählt, deren Bedeutung von den Netzwerkpartnern in der Gegenwart oder der nahen Zukunft als „mittel“ oder „hoch“ eingestuft wurden. Zudem wurde darauf geachtet, möglichst unterschiedliche Handlungsfelder der DAS abzudecken bzw. Klimawirkungen/Wirkungsketten auszuwählen, deren Auswirkungen mehrere Handlungsfelder betreffen. Für diese Wirkungsketten wurde, wo dies als möglich und sinnvoll war, eine ökonomische Schadensanalyse durchgeführt. Für die Schwerpunkte Starkregen und Sturmfluten wurden derzeitige Schadenspotenziale, mögliche Veränderungen aufgrund des Klimawandels sowie, wo möglich, die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen abgeschätzt. Für die Schwerpunkte hitzebedingte Todesfälle (Hitzetote), menschliche Leistungsfähigkeit, Waldbrand und Wassererosion wurden mögliche Veränderungen durch den Klimawandel und entsprechende Schadensprozesse eingehend betrachtet. Wo die Datenlage es erlaubte, wurden zukünftige Veränderungen des Schadenspotenzials aufgrund des Klimawandels oder sozio-ökonomischer Veränderungen (wie verstärkte Bebauung) quantifiziert.

Das Schadenspotenzial an Wohngebäuden durch Starkregen wurde anhand von Fallstudien in NRW untersucht. Hierbei ergab sich ein Risikopotenzial von 13 Mrd. €, welches bis 2030 aufgrund zunehmender Wohnbauflächen um weitere 5,8 % steigen könnte. Die Anpassung der Bauvorsorge (z.B. Abdichten von Kellern, Installation von Rückstausicherungen und Wassersperren) verspricht ein Schadenminderungspotential von 36 % und könnte durch rechtliche oder ökonomische Anreize gefördert werden. Die Erstellung von Starkregenkarten (mit Mindest- und Qualitätsstandards) sollte systematisch und flächendeckend erfolgen, um so Risikomanagement und Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung zu stärken. Schadenspotenziale an Wohngebäuden aufgrund von Sturmfluten unterscheiden sich stark zwischen den Küstenbundesländern und reichen von 11,4 Mio. € bis 14 Mrd. € pro Bundesland. Auch hier könnte mit zunehmender Wohnbaufläche das Schadenspotenzial bis 2030 um 4,7 % steigen. Weitere Schäden durch eine zukünftigerhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit von Sturmfluten sind möglich. Diesen könnte jedoch durch eine Aufrechterhaltung des derzeitigen Schutzniveaus des Küstenschutzes entgegengewirkt werden. Durch eine optimale Bauvorsorge könnte eine durchschnittliche Minderung des Schadenspotentials um 59 % erzielt werden. Die Erstellung der Sturmflut-Gefahrenkarten durch die Länder sollte durch die Verwendung einheitlicher Überflutungsszenarien (Wiederkehrintervalle) weiter harmonisiert werden. Derzeit ist eine überregionale Risikoanalyse aufgrund der sehr unterschiedlichen Überflutungsszenarien der Länder nicht möglich. Um das Schadenspotenzial von Sturmfluten an Industrie und Gewerbe abzuschätzen, wurden Schäden an Gebäuden, Betriebseinrichtungen, Waren, Produkten und Lagerbeständen in Betracht gezogen. Auch hier variieren die Schadenspotenziale stark zwischen den unterschiedlichen Küstenbundesländern und reichen von 22 Mio. € bis 25 Mrd. €. Eine Zunahme der Industrie- und Gewerbeflächen wird das Schadenspotenzial bis 2030 um vermutlich 4,8 % ansteigen lassen. Dies könnte durch eine optimale Bauvorsorge in Bezug auf Gebäude (- 33 %), Betriebseinrichtungen (- 28 %) sowie Waren, Produkte und Lagerbestände (- 25 %) verringert werden. In dem Bereich Industrie und Gewerbe bestehen aufgrund der hohen Heterogenität der Unternehmen aber große Unsicherheiten in der Abschätzung potenzieller Schäden. Dieser Bereich sollte deshalb bei zukünftigen Forschungsvorhaben verstärkt Berücksichtigung finden. Potenzielle Schäden an der Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern reichen von ca. 20 Mio. € bis 3 Mrd. € pro Bundesland. Es treten große regionale Unterschiede auf. Anpassungsmaßnahmen werden hier voraussichtlich nicht direkt an der Schieneninfrastruktur vorgenommen, sondern diese wird durch eine Anpassung der Deichinfrastruktur geschützt. Der Bund als Eigentümer der Bahn könnte jedoch auf eine

verbesserte Datenlage zur Entwicklung und Modellierung von Schadensmodellen für die Schieneninfrastruktur hinwirken. Hitzebedingte Sterbefälle (Hitzetote) werden robust für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 zunehmen. Für die nahe Zukunft wurde ein möglicher szenariounabhängiger Anstieg um das Vierfache und für die ferne Zukunft ein möglicher Anstieg um das Sechsfache (RCP 4.5) bis Zwölffache (RCP 8.5) ermittelt. Die Auswirkung von Hitzebelastung auf die menschliche Leistungsfähigkeit wurde exemplarisch durch die Veränderung der Arbeitsproduktivität an Büroarbeitsplätzen veranschaulicht. Hierbei ist mit einer deutlichen Zunahme der Kosten für die Kompensation einer hitzebedingten Verringerung der Leistungsfähigkeit (z.B. durch Klimatisierung, Verschattung) zu rechnen. In der nahen Zukunft ist unabhängig von der Projektion eine mittlere Steigerung der mittleren Kühlgradtage um das Dreifache möglich. Für die ferne Zukunft wurde eine mittlere Steigerung um das Vier- (RCP 4.5) bis mehr als das Achtfache (RCP 8.5) ermittelt. Potentielle Schäden durch Wassererosion lassen sich nur bedingt ermitteln. Die absoluten Abtragsmengen auf konkreten Flächen lassen sich mangels Kenntnis sowohl aktueller als auch der zukünftigen Nutzungen bzw. Fruchtfolgen sowie des Saldo der Erosion (=Erosion – Deposition) nicht belastbar analysieren, weshalb die Ermittlung von Schäden derzeit nicht möglich ist. Es empfiehlt sich eine bundesweit vereinheitlichte und zentral verfügbare Dokumentation von Erosionsschadensfällen unter besonderer Berücksichtigung der on- und off-site Schäden und deren Kosten. Aussagen zu Schäden durch Waldbrand sind derzeit aufgrund der aus den anderen Wirkungsketten sichtbaren großen Bandbreiten wenig aussagekräftig. Für die nahe Zukunft zeigt sich eine Zunahme der Brandanfälligkeit um den Faktor 2 bis 4, für die ferne Zukunft ein Rückgang der Brandanfälligkeit auf Referenzniveau, vermutlich hervorgerufen durch Änderungen der Niederschlagsverhältnisse. Zur Ergänzung der Waldbrandstatistik des Bundes sollte eine einheitliche Datenbank mit allen Waldbrandereignissen in Deutschland und Beschreibungen zu Ort und Zeit der Brände aufgebaut werden, um zukünftig die Einflussfaktoren bei der Brandentstehung und dem Brandverlauf besser untersuchen zu können. Die Verringerung der bestandsbedingten Brandanfälligkeit durch Maßnahmen des Waldumbaus hat weiterhin hohe Bedeutung.

In der zweiten Analyse wurden Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kostenangaben beispielhaft erörtert. Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel lösen vielfältige ökonomische Folgewirkungen aus. Tendenziell dämpfen makroökonomische Interdependenzen die Folgewirkungen. Soweit rechenbar, berühren Klimaschäden den Wachstumspfad der gesamten Volkswirtschaft nur wenig. Jedoch können die sektoralen und lokalen Wirkungen gravierend ausfallen, zumal sie sich über Lieferverflechtungen auch auf Wirtschaftsbereiche ausbreiten, die direkt nur wenig betroffen sind. Positive Wachstumseffekte können erreicht werden, wenn Wiederherstellungs- und Anpassungsmaßnahmen für eine Modernisierung des Kapitalstocks genutzt werden, die zu Produktivitätssteigerungen führt.

Die direkten Kosten des Klimawandels und von Anpassungsmaßnahmen wirken als Impulse, die über vielfältige Interdependenzen im ökonomischen System auch weit verzweigte Folgewirkungen für wirtschaftliche Zielgrößen entfalten. Impulse durch Klimaschäden an Gebäuden und Infrastrukturen und durch darauf bezogene Anpassungsmaßnahmen können bereits vor Schadenseintritt die Renditeerwartungen von Investoren dämpfen, sie können zu Produktionsausfällen führen, wenn sie eintreten, und durch die Inanspruchnahme volkswirtschaftlicher Ressourcen Opportunitätskosten verursachen, wenn sie beseitigt werden. Wenn der Kapitalstock dabei modernisiert wird, sind Wachstumsimpulse denkbar.

Erhöhte Mortalitäts- und Morbiditätsrisiken durch Hitzebelastung führen zu einem geringeren Arbeitsangebot und zu höheren Behandlungskosten. Erheblich stärkere negative

volkswirtschaftliche Wirkungen sind von hitzebedingten Leistungseinbußen zu erwarten. Anpassungsmaßnahmen erfordern zusätzliche Investitionen sowie Ausgaben für Personal und Energie. Impulse aus der Beeinträchtigung von Böden stellen sich vor allem als verringerte Produktivität des Produktionsfaktors Boden und als Verluste an Anbaufläche der Landwirtschaft dar, daneben als Ausgaben für die Schadensbeseitigung. Anpassungsmaßnahmen lösen ökonomische Impulse in Form von Investitionen, laufenden Personal- und Sachausgaben sowie Beeinträchtigungen der Bodenproduktivität aus. Im Allgemeinen werden die Impulse von zusätzlichen Investitionen zur Klimaanpassung und zur Schadensbeseitigung durch indirekte makroökonomische Folgewirkungen gedämpft, aber nicht aufgehoben. Wenn allerdings zusätzliche Investitionen über eine Verjüngung des Kapitalstocks zu Produktivitätssteigerungen führen, kann der ursprüngliche Impuls der zusätzlichen Investitionen verstärkt werden. Produktivitätseinbußen führen mittel- und längerfristig zu Wachstumseinbußen, dabei können sich die Produktivitätseinbußen verstärken.

Gesamteinschätzungen der Schäden durch den Klimawandel, soweit sie monetär bewertbar sind, kommen für mitteleuropäische Länder unter Berücksichtigung von Folgewirkungen in einem 2°C-Klimaszenario bis zur Mitte des Jahrhunderts zu Kostenschätzungen unter 0,2% des BIP. Die Wohlfahrtsverluste fallen aber deutlich höher aus. Mit höherem Temperaturanstieg könnten die Schadenskosten überproportional steigen. Aufgrund der Lieferverflechtungen zwischen den Wirtschaftsbereichen wirken die Impulse von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen weit über die unmittelbar betroffenen Branchen hinaus. Das Hauptgewicht der Produktions- und Beschäftigungseffekte liegt meist bei der Bauwirtschaft, je nach Art der Schäden allerdings bei unterschiedlichen Teilbereichen. Schließlich breiten sich die Impulse auch auf die Dienstleistungsbereiche aus. Produktionsstörungen wirken sich nicht nur im unmittelbar betroffenen, sondern auch in nachgelagerten Wirtschaftsbereichen aus; nach Klimawirkungsbereichen gibt es dabei große Unterschiede; es kann auch zu einer Selbstverstärkung der Produktionsstörungen im unmittelbar betroffenen Sektor kommen.

Summary

The impacts of climate change, including the increased frequency and intensity of extreme weather events, are already noticeable. The international community has thus decided to limit global warming to 2°C above pre-industrial levels. Besides mitigating climate change by decreasing or preventing greenhouse gas emissions, adapting to the unavoidable changes of the global climate has become essential. This implies the reduction of the vulnerability of societies and ecosystems as well as strengthening the adaptive capacity of natural and socio-economic systems. The goal is to minimise damages to ecosystems and society, particularly with regard to public health and infrastructure.

In 2008, the German Federal Government developed the German Adaptation Strategy (Deutsche Anpassungsstrategie DAS) followed by the Action Plan on Adaption (APA) in 2011 in order to meet adaptation demands. The DAS outlines the strategic approach for the decrease of the vulnerability and the strengthening of the adaptive capacity, while the APA outlines the related measures and projects. The aim of the analysis presented in this report was to deepen the technical knowledge on the damage potential of selected climate change impacts as well as on adaptation goals and adaptation measures in Germany. The project “Cooperation between authorities on climate change and adaptation” was implemented by a consortium led by adelphi research gGmbH. The members of the consortium were the Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development (IOER), UP Transfer of the University of Potsdam and Prof. Jürgen Blazejczak (German Institute for Economic Research). The overall aim of the project was to systematically build the technical knowledge needed in terms of the potential damage from climate change as well as opportunities for a successful and efficient climate change adaptation process in Germany. This final report includes parts of the analyses and results developed in the project. In collaboration with the government agency network „Climate change and adaptation” the damage potential of high-priority climate change-related risks for Germany’s society, economy, and ecosystems was determined and, where possible, economically assessed. Furthermore, an exemplary analysis of measures and instruments and their costs was conducted. This provided part of the basis for a transparent and integrated evaluation approach for climate change adaptation measures. Details of this approach are presented in the report “Development and trial of an integrated approach for the evaluation of measures and policy instruments for climate change adaptation”.

The results of the project serve the purpose of advising the Interministerial Working Group Adaptation Strategy (IMAA) on the progress report of DAS and the APA III. The project’s research process included a close coordination and communication between the project consortium and the government agency network „Climate change and adaptation”, in which 28 federal state agencies and institutions participate (as of September 2019).

The first part of this report dealt with the analysis of climate change impacts. The basis for this analysis were the impact chains for the individual fields of action of the DAS, which were created as part of the Vulnerability Analysis 2015, and which schematically illustrate the connection between climate signals and climate impacts (adelphi et al., 2015). In the first Vulnerability Analysis, authorities and institutions of the Vulnerability Network identified climate impacts and impact chains, which are of particular importance to Germany, on the basis of economic, social, cultural and / or spatial aspects. Based on these evaluations, climate impacts / impact chains, which were rated “medium” or “high” in significance, were selected by network partners for the project “Government cooperation climate change and adaptation”. In addition, fields of action of the DAS as different as possible and climate impacts / impacts chains affecting several fields of action were considered. The impact chains schematically illustrate the interconnection between

climate signals and climate change impacts. Social, ecological, economic, cultural, and spatial aspects were considered in the overall analysis. In this context, an analysis of the economic damages was included, where possible. An analysis of climate change adaptation goals, which followed, helped to reveal conflicts and synergies within and across sectors. Within AP 2, eight impact chains were analysed in detail. For the impacts of heavy rainfall events and storm surges, (a) the current damage potentials, (b) possible changes related to climate change, and, (c) the effectiveness of adaptation measures were analysed, where possible. For a number of key impacts, namely mortality, productivity, wild fires and soil erosion, the possible changes in damage potentials caused by climate change were examined in further detail. In those cases, where a sufficient data basis was available, the future changes in damage potential related to climate change or socio-economic changes (such as increased land development) were also analysed and monetarily quantified.

The potential damage on residential buildings caused by heavy rainfall events was evaluated using case studies from North Rhine-Westphalia. The study's results revealed risk potential of over 13 billion Euros, which, in the case of the continued development of open spaces, could rise further by 5.8% until 2030. Adaptation in the construction sector (e.g. sealing of basements; installation of backflow prevention devices and water barriers) promise a damage reduction potential of 36% and could be achieved through the provision of legal or economic incentives. Hazard maps for heavy rainfall events (based on minimum and quality standards) should be developed systematically and nationwide to strengthen risk management and the ability of the population to help itself. In regard to residential buildings, potential damage caused by storm surges varies considerably among federal states located at the coast, ranging from € 11.4 million to € 14 billion. This potential is likely to further increase by 4.7% until 2030 given that the development of open spaces is likely to continue. Additional damages can be expected due to an increase of the frequency of storm surges. However, the maintenance of the current coastal protection level could help to counteract this. Optimal provisions in construction may help to achieve an average reduction of the potential damage by 59%. The development of storm surge maps by the federal states should be harmonised by applying standardised flood scenarios (recurrence intervals). As of now, a nationwide risk analysis is not possible due to different flood scenarios of federal states. In order to estimate the damage potential of storm surges in the industry and commerce sector, damage to buildings, facilities, goods, products, and stock was taken into account. Again, the damage potential varies greatly between the different coastal federal states and ranges from € 22 million to € 25 billion. The continued loss of open spaces due to industrial and commercial use is expected to increase the damage potential by 4.8% by 2030. This could be avoided by adaptive measures with regard to buildings (- 33%), facilities (- 28%), goods, products and stock (- 25%). In the sector "industry and commerce, however, considerable uncertainties exist in estimating potential damages, which is due to the differences in the sizes of the affected companies. This sector should therefore be given more consideration in future research projects in order to be able to identify the specific damage potential of different company types. Potential damage that storm surges in coastal federal states cause to the rail infrastructure ranges from approx. € 20 million to € 3 billion per federal state, with large regional differences being observed. Effective adaptation may not take place in the form of the adjustment of the rail infrastructure itself, but by the enforcement of its protection, such as dikes. However, the Federal Government, which is the owner of the German railway system, is advised to improve the collection of data that is required to enhance the modelling of damages to rail way infrastructure.

Human mortality due to heat stress will increase robustly for the Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and RCP 8.5 scenarios. A possible, scenario-independent, fourfold increase in the near future and a possible increase by six (RCP 4.5) to twelve times (RCP 8.5) in the distant

future were determined. The impact of heat stress on human productivity was exemplified by changes in productivity levels in office workplaces. In this case, a significant increase in the cost of compensating for a heat-related reduction in productivity (for example, through air conditioning or installing shades) is expected. In the near future, an average increase of heat days by three times is possible. For the distant future, a median fourfold (RCP 4.5) to eightfold (RCP 8.5) increase in heat days was determined.

Potential damage due to water erosion can only be determined to a limited extent. The absolute removal rates of specific surfaces cannot be analysed reliably due to a lack of knowledge on current and future land uses and crop rotations as well as lacking data on net erosion (= erosion - deposition). Therefore, determining the damages is currently not possible. The development of a standardised, nationwide and centrally available documentation of damage by erosion with specific consideration given to on- and off-site damages and their costs is thus recommended. Similarly, statements on damage caused by forest fires are currently of little significance due to the wide ranges of damage potential apparent in the other impact chains. For the near future, there is a projected increase in the susceptibility to fire by a factor of 2 to 4. For the distant future, however, a decrease in the susceptibility to fire at the reference level is projected, presumably due to changes in precipitation. In addition to the Federal Government's forest fire statistics, a uniform database with all forest fire events in Germany including descriptions of the location and time of the fires should be set up to create new avenues for improved investigation of factors influencing fire formation and course in the future. Decreasing existing forests' susceptibility to fire through forest conversion measures also remains very important.

In the second analysis, measure and instrument analyses and their costs were exemplarily explained. Climate-related damage and adaptation measures to climate change have a variety of economic consequences. Macroeconomic interdependencies tend to attenuate the knock-on effects. As far as can be calculated, climate damage has little impact on the growth track of the economy as a whole. Sectoral and local effects, however, can be severe, especially as they spread to economic sectors that are only marginally impacted directly, due to supply interdependencies. Positive growth effects can be achieved, if recovery and adaptation measures are used to modernise the capital stock, which in turn lead to productivity gains.

The direct costs of climate change and adaptation measures act as stimuli which, through a variety of interdependencies in the economic system, also have far-reaching consequences for economic targets. Impulses from climate-related damage to buildings and infrastructure and from related adaptation measures can dampen investors' expectations of returns even before the damage occurs, they can lead to production losses if they do occur and, finally, cause opportunity costs through the use of economic resources if they are eliminated. If the capital stock is modernised, however, growth impulses are also imaginable.

Increased mortality and morbidity risks due to heat stress lead to a decrease in labour supply and an increase in medical expenses. Yet, significantly stronger impulses and economic effects are to be expected from heat-related losses in performance. Adaptation measures require additional investments as well as increased expenditure on personnel and energy. Besides creating additional expenditures for damage repair, the effect of soil impairment manifests itself mainly as reduced productivity of soil as a factor of production and as a loss of acreage suitable for agriculture. Adaptation measures create economic stimuli in the form of investments, ongoing personnel and material expenses and imply material expenses in the impairment of soil productivity. Generally, the economic impulses of additional investments in climate adaptation and damage repair are dampened by indirect macroeconomic consequences, but they can however not be offset. Yet, if additional investment leads to productivity gains because it is used to modernise the capital stock, the initial economic effect of the investment can be reinforced.

Productivity losses lead to a decline in growth in the medium and long term, which in turn may lead to further productivity losses.

Overall assessments of the damage caused by climate change, to the extent that they can be quantified in monetary terms, will lead to cost estimates of less than 0.2% of GDP for Central European countries by the middle of the century, taking into account the consequences in a 2°C climate scenario. Welfare losses, however, are significantly higher. With a higher temperature increase, the damage costs could rise disproportionately. Due to the interdependency of supply chains between economic sectors, the impulse of damages from climate change and adaptation measures reach far beyond the directly affected industries. The main emphasis of the production and employment effects is usually on the construction industry, although depending on the type of damage, different sub-sectors are affected. Eventually, the consequences also reach the service sectors. Disruptions of production have an impact not only on the industries directly affected, but also on downstream sectors; there are major differences according to the areas affected by climate change; self-reinforcing production disruptions in the sector directly affected may also occur.

1 Einleitung

Die ersten Zeichen des Klimawandels, wie die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen, sind bereits feststellbar. Die internationale Gemeinschaft hat daher beschlossen, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, wenn möglich unter 1,5 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Neben dem Klimaschutz durch Minderung bzw. Vermeidung von Emissionen spielt daher auch die Anpassung an den nicht mehr zu vermeidenden Klimawandel eine essentielle Rolle. Dies beinhaltet die Verringerung der Vulnerabilität von Gesellschaft und Ökosystemen sowie die Stärkung der Anpassungsfähigkeit natürlicher und sozio-ökonomischer Systeme. Ziel hierbei ist es, Schäden an Ökosystemen und der Gesellschaft, insbesondere an der menschlichen Gesundheit sowie Infrastruktur, möglichst gering zu halten.

Um diesen neuen Anforderungen an unsere Gesellschaft zu begegnen, hat die Bundesregierung 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und 2011 den Aktionsplan Anpassung (APA) beschlossen. Die DAS skizziert die Vorgehensweise zur Minderung der Vulnerabilität und der Erhöhung der Anpassungsfähigkeit, während der APA sie mit konkreten Maßnahmen unterlegt. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde die Vertiefung des Wissens zu Schadenspotenzialen ausgewählter Klimawirkungen und zu Anpassungszielen und -maßnahmen in Deutschland angestrebt. Das Vorhaben wurde durch ein von der adelphi research gGmbH geleitetes Konsortium umgesetzt, welches das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), UP Transfer der Universität Potsdam sowie Prof. Jürgen Blazejczak (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung) umfasste.

Das Vorhaben verfolgte das übergeordnete Ziel, systematisch die fachwissenschaftlichen Leistungen zu erarbeiten, die erforderlich sind, um die potenziellen Schäden durch den Klimawandel sowie die Möglichkeiten einer erfolgreichen und effizienten Klimaanpassung in Deutschland zu identifizieren. Der vorliegende Bericht umfasst einen Teil der in dem Vorhaben erarbeiteten Analysen und Ergebnisse. In Zusammenarbeit mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ wurden zum einen Schadenspotenziale prioritärer klimawandelgebundener Risiken für Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme in Deutschland bestimmt und, wo möglich, volkswirtschaftlich bewertet. Zum anderen wurden beispielhaft Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kosten erörtert. Die Ergebnisse der weiteren Analysen zu sektoralen Anpassungszielen und der Auswahl und Bewertung von Politikinstrumenten werden in dem Bericht „Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur integrierten Bewertung von Maßnahmen und Politikinstrumenten der Klimaanpassung“ aufgeführt.

Die Ergebnisse des Vorhabens dienen dem Zweck, die Arbeiten der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (IMAA) zum Fortschrittsbericht der DAS und zum APA III zu beraten. Der Forschungsprozess im Vorhaben beinhaltete eine stetige Abstimmung und Zusammenarbeit des Behördennetzwerkes „Klimawandel und Anpassung“, das aus insgesamt 28 Bundesbehörden und -institutionen besteht (Stand: September 2019), und dem Projektkonsortium sowie den Austausch von Expertenwissen, Erfahrungen, Daten und Modellen mit Netzwerkpartnern und externen Experten. Operationell strebte das Vorhaben weiterhin an, einen Rahmen für die Fortführung der Behördenkooperation zum Klimawandel und Anpassung zu schaffen sowie den informellen Austausch über Wissensstand und Aktivitäten der Bundesoberbehörden im Bereich Schadenspotenziale und Risiken des Klimawandels sowie Anpassungsoptionen zu verstärken.

Der erste Teil dieses Berichts behandelt die Bewertung von Klimawirkungen. Die Basis für diese Arbeiten bildeten eigens erstellte Wirkungsketten für die einzelnen Handlungsfelder der DAS,

die schematisch die Verbindung zwischen Klimasignalen und Klimawirkungen darstellen. Es wurden dabei soziale, ökologische, ökonomische, kulturelle und flächenmäßige Überlegungen berücksichtigt. Aus der Reihe von Wirkungsketten wurden von dem Netzwerk 8 thematische Schwerpunkte identifiziert, die als besonders wichtigerachtet und daher vom Projektkonsortium im Detail analysiert wurden: Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen; Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten; Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten; Schäden an Gewerbe/Industrie durch Sturmfluten; Hitzetote; Menschliche Leistungsfähigkeit und Hitzebelastung; Waldbrand und Wassererosion.

Im zweiten Teil dieses Bereichs werden Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kostenangaben beispielhaft erörtert. Hierbei wurde vor allem das volkswirtschaftliche Schadenspotenzial des Klimawandels analysiert, um Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen vor dem Hintergrund der Folgewirkung bewerten zu können. Anhand eines Analyserahmens, der auf einer Zuordnung ökonomischer Impulse durch Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen zu Elementen volkswirtschaftlicher Rechensysteme und Analysemodelle basiert, wurden ausgewählte Klimawirkungen analysiert. Neben qualitativ-deskriptiven Analysen fand eine quantitative Abschätzung ausgewählter Klimawirkungen statt.

2 Bewertung von Klimawirkungen

2.1 Potentielle Klimawirkungen für ausgewählte Wirkungsketten in den Bereichen Starkregen und Sturmfluten

Die Auswirkungen des Klimawandels machen sich zunehmend auch in Deutschland durch steigende Temperaturen, feuchtere Winter und vermehrte Extremereignisse bemerkbar (Umweltbundesamt 2015). Der "Rekordsommer" des Jahres 2018 hat die möglichen Auswirkungen des Klimawandels wie der verstärkt in das öffentliche Bewusstsein gerückt. So wies der Zeitraum April bis Juli 2018 eine Temperaturanomalie von 3,6°C gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 auf und ist somit die höchste Anomalie für diese Monate seit 1881 (DWD 2018a). Gleichzeitig ging diese Hitze- und Trockenperiode an vielen Orten mit einem gehäuftem Auftreten von extremen Starkniederschlägen einher (DWD 2018a), die bereits in den letzten Jahren zu enormen Schäden geführt haben (GDV 2018). Wie vulnerabel Deutschland gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels ist, hat das Netzwerk Vulnerabilität in den vergangenen Jahren analysiert – sektoral sowie sektorenübergreifend (vgl. adelphi et al. 2015). Grundlage der Studie des Netzwerks waren Wirkungsketten für die einzelnen Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS), die schematisch die Wirkbeziehungen zwischen klimatischer Exposition und Klimawirkungen darstellen.

Im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks Vulnerabilität wurden über 70 der in den Wirkungsketten dargestellten Klimawirkungen operationalisiert – zum Teil über Wirkmodelle, zum Teil über Proxyindikatoren oder Experteninterviews (adelphi et al. 2015). Die Ergebnisse zeigen zeitliche und (mit Ausnahme einiger Interviewergebnisse) räumliche Muster der Klimawirkungen in Deutschland. Sie zeigen jedoch relative Tendenzen, aber nicht die Stärke oder das zu erwartende Ausmaß der jeweiligen Klimawirkung an. Auf Basis der Ergebnisse konnten die Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität aber die Bedeutung der betrachteten Klimawirkungen für Deutschland für die Gegenwart und die nahe Zukunft (2021-2050) bewerten. Sie haben dabei ökologische, ökonomische, soziale, kulturelle und flächenbezogene Überlegungen berücksichtigt. Darauf aufbauend wurden sechs thematische Schwerpunkte des Klimawandels in Deutschland identifiziert, die regional verortet werden konnten, und zwar über klimatisch ähnliche charakterisierte und damit ähnlich betroffene Regionen (sogenannte „Klimaraumtypen“). Ein weiteres Ergebnis der Studie war, dass Ballungsregionen durch ihre hohe Dichte an Bevölkerung, Infrastruktur und damit Vermögenswerten besonders sensitiv gegenüber vielen Auswirkungen des Klimawandels sind (adelphi et al. 2015).

Die sechs thematischen Schwerpunkte des Klimawandels in Deutschland sind (vgl. adelphi et al. 2015):

- ▶ Schäden durch ansteigende Hitzebelastung in Verdichtungsräumen,
- ▶ Beeinträchtigung der Wassernutzungen durch zunehmende Erwärmung und (in ferner Zukunft) vermehrte Sommertrockenheit,
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen und Sturzfluten in urbanen Räumen,
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Flussüberschwemmungen,

- Schäden an Küsten infolge von (in ferner Zukunft verstärktem) Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten,
- Veränderung der Artenzusammensetzung und der natürlichen Entwicklungsphasen durch einen graduellen Temperaturanstieg.

Logischer nächster Schritt in der Analyse wichtiger Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland als Basis für eine bundesweite Anpassungspolitik war es nun, für ausgewählte bedeutende Klimawirkungen eine (möglichst quantitative) Abschätzung der potenziellen Schäden vorzunehmen. Nur so können verschiedene Klimawirkungen hinsichtlich ihrer potenziellen Schäden verglichen werden. Wo eine ökonomische Bewertung dieser potenziellen Schäden möglich ist, können zudem die Kosten und der Nutzen von Anpassungsmaßnahmen und Politikinstrumenten zur Förderung von Anpassung gegeneinander abgewogen werden. Auch sind quantitative Abschätzungen möglicher Schäden ein guter Indikator, die Dringlichkeit des Themas ‚Anpassung an den Klimawandel‘ zu kommunizieren.

In Abschnitt 1 des vorliegenden Berichts wird die Auswahl der bewerteten Wirkungsketten dargestellt sowie eine Einführung in den Modellierungsansatz für die Schadensberechnungen gegeben. In den weiteren Unterkapiteln 2 bis 5 werden für jede der betrachteten Wirkungsketten die spezifische Methodik und die Ergebnisse detailliert beschrieben und diskutiert sowie Handlungsempfehlungen daraus abgeleitet. Der Bericht schließt mit einer übergeordneten Zusammenfassung der Ergebnisse und politischen Empfehlungen.

2.1.1 Auswahl und Modellierung der bewerteten Wirkungsketten

2.1.1.1 Auswahl der bewerteten Wirkungsketten

Im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse wurden von den Behörden und Institutionen des Netzwerks jede betrachtete Klimawirkung für die Gegenwart und zwei Szenarien der nahen Zukunft (starker und schwacher Wandel bis zum Jahr 2030) in die drei Kategorien „gering“, „mittel“ oder „hoch“ eingestuft. Diese Bewertung findet sich im Anhang 2 zum Fortschrittsbericht zur DAS der Bundesregierung vom 09.11.2015 (Bundesregierung 2015).

Aufbauend auf diesen Bewertungen wurden für die vorliegenden Modellierungen vorwiegend Klimawirkungen bzw. Wirkungsketten ausgewählt, deren Bedeutung von den Netzwerkpartnern in der Gegenwart oder der nahen Zukunft als „mittel“ oder „hoch“ eingestuft wurde. Zudem wurde darauf geachtet, möglichst unterschiedliche Handlungsfelder der DAS abzudecken bzw. Klimawirkungen/Wirkungsketten auszuwählen, deren Auswirkungen mehrere Handlungsfelder betreffen.

In Bezug auf hydrometeorologische Extremereignisse wurden folgende Wirkungsketten ausgewählt (hitze- bzw. trockenheitsbezogene Wirkungsketten werden in Abschnitt X thematisiert):

- Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen (Handlungsfeld „Bauwesen“),
- Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten (Handlungsfeld „Küsten und Meeresschutz“),
- Belastung von Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten (Handlungsfeld „Küsten und Meeresschutz“),

- Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Sturmfluten (Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“) mit einer mittleren Bedeutung (schwacher und starker Wandel) in naher Zukunft.

Bei der Auswahl ging es auch darum, den Einfluss von verschiedenen Hochwassertypen, wie Überschwemmungen in Folge von Starkregen oder Sturmfluten, auf potenzielle Schäden zu untersuchen. Auswirkungen durch den Hochwassertyp Flusshochwasser konnten jedoch nicht betrachtet werden, da die Hochwassergefahrenkarten aller Bundesländer dem Vorhaben nicht zur Verfügung standen.

2.1.1.2 Einführung in die Modellierung von Schäden durch Starkregen und Sturmfluten

Auch wenn sich sowohl verschiedene Hochwassertypen (Starkregen, Flusshochwasser, Sturmfluten) als auch unterschiedliche Sektoren (Gebäude, gewerbliche Infrastruktur oder Verkehrsinfrastruktur) in ihren Schädigungsprozessen und Schadensanfälligkeiten unterscheiden (Thieken et al. 2005, Nadal et al. 2010), werden für die Berechnung direkter Hochwasser- oder Überflutungsschäden standardmäßig folgende Eingangsgrößen verwendet und Modellierungsschritte durchgeführt (Merz et al. 2010).

Informationen über die räumliche Ausdehnung einer Überschwemmung (Risikogebiete), mögliche Überflutungstiefen (Überstauhöhen) sowie die dazugehörigen Eintritts- oder Überschreitungswahrscheinlichkeiten werden als Hochwassergefahrenkarten (= klimatische Exposition) dargestellt. Diese Karten sind in der Regel das Ergebnis hydraulischer Modellierungen für Hochwasserereignisse, denen eine bestimmte Jährlichkeit zugeordnet ist, die z.B. mithilfe von Extremwertstatistik aus Abflussdaten ermittelt wurde.

Neben den Gefahrenkarten werden für eine Berechnung potenzieller Hochwasserschäden Informationen über exponierte Werte in Risikogebieten benötigt (= Sensitivität). Bei großräumigeren Berechnungen potenzieller Schäden werden Vermögenswerte einzelner Sektoren (z. B. Gebäude, Verkehrsinfrastruktur, Industrie und Gewerbe) auf Basis verschiedener Statistiken aggregiert abgeschätzt und mit Hilfe von Flächennutzungsinformationen pro Landnutzungs-kategorie regionalisiert (Merz et al. 2010). Dabei wird jeder Landnutzungs-kategorie ein flächenspezifischer Vermögenswert zugewiesen, der maximal geschädigt werden könnte. Diese Größe wird auch oft als Schadenspotenzial bezeichnet.

Informationen zu Wasserstand (aus den Gefahrenkarten) und Landnutzung (bzw. den zugehörigen Vermögenswerten) werden dann mit Hilfe von Schadensfunktionen/-modellen zu einem potenziellen Schaden verschnitten (= Klimawirkung). Diese Schadensfunktionen quantifizieren z. B. den Zusammenhang zwischen Überflutungstiefe einerseits und sektoralen Schäden z. B. an Wohngebäuden oder gewerblicher und industrieller Infrastruktur andererseits. Da sich Schädigungsprozesse zwischen verschiedenen Hochwassertypen und Landnutzungs-kategorien unterscheiden (z. B. Wohngebäude und Schieneninfrastruktur), werden sektor- oder objektspezifische Schadensfunktionen verwendet. Mögliche Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Verhaltens- und Bauvorsorge (z. B. Abdichten von Wänden und Türen, Einsatz mobiler Wassersperren) können durch ein Anpassen der Schadensfunktionen (Poussin et al. 2012, Thieken et al. 2016a) oder durch empirisch abgeleitete Minderungsfaktoren abgebildet werden (Büchle et al. 2006).

Diese generische methodische Vorgehensweise, die auch die Grundlage für die Berechnung von potenziellen Schäden durch Starkregen und/oder Sturmfluten im Rahmen des hier durchgeführten Vorhabens bildet, ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

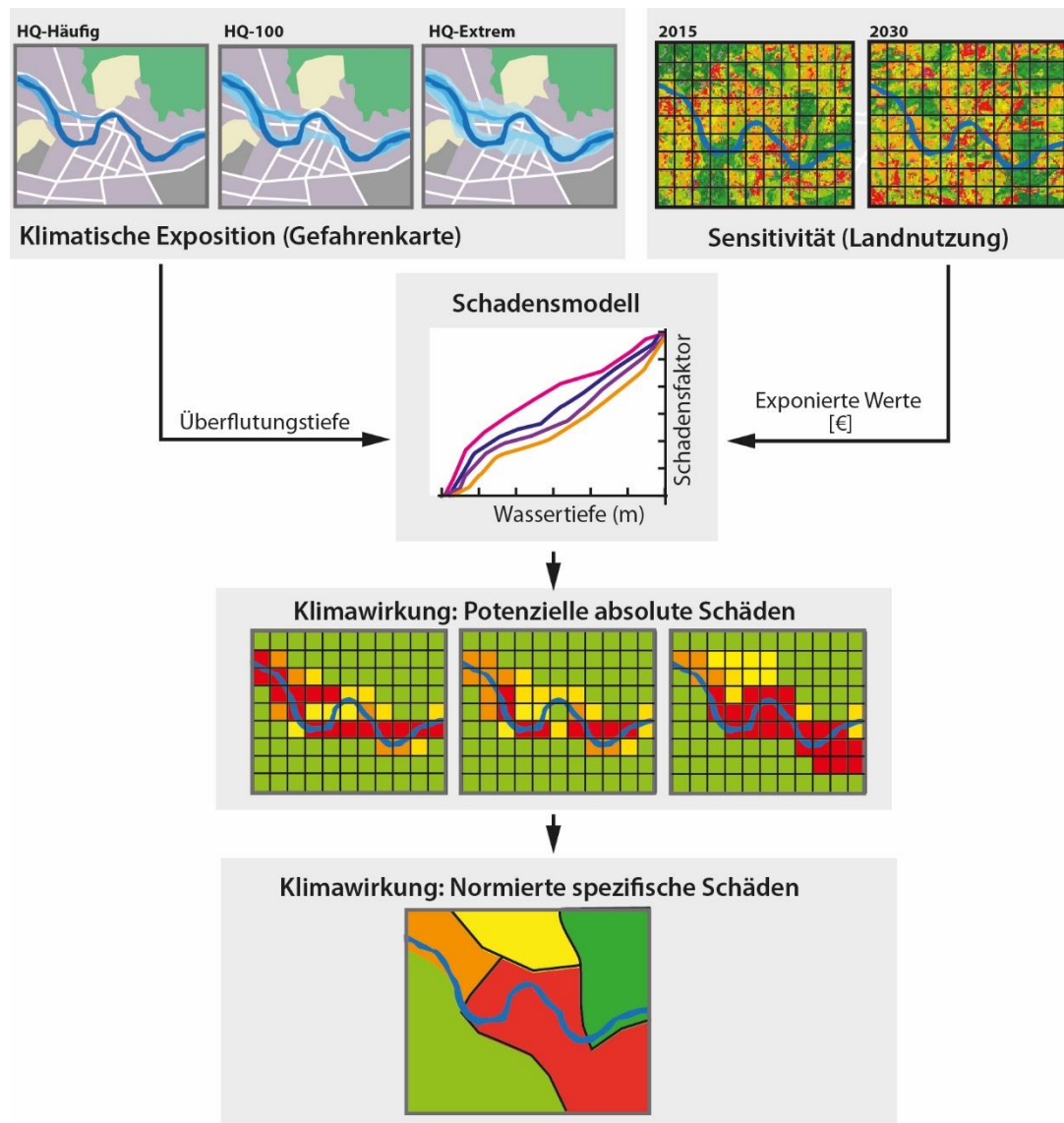
Um verschiedene Gebiete und Schadensarten besser vergleichen zu können, werden aus den potenziellen absoluten Schäden, die in diesem Bericht in EUR zum Preisniveau von 2016 angegeben werden, verschiedene Indikatoren abgeleitet. Dies erfolgt durch eine Normierung der absoluten Schäden mithilfe des Gesamtvermögens, der Siedlungsfläche oder der Einwohner. Im Vorhaben werden folgende Schadensindikatoren definiert und verwendet: Grundsätzlich ist der relative Schaden der Anteil des (absoluten) Schadens am Gesamtvermögen. Bei der Schadensmodellierung wird der relative Schaden oft als Schadensgrad oder Schädigungsgrad bezeichnet; in Abhängigkeit vom Wasserstand und anderen Größen wird mit dem Schadensgrad der (potenzielle) absolute Schaden aus dem exponierten Vermögen (pro Rasterzelle oder Objekt) abgeleitet. Bei der Auswertung der so abgeschätzten potenziellen Schäden (aufsummiert für eine Gebietseinheit, z. B. eine Gemeinde) wird der relative Schaden als Anteil des absoluten Schadens am Gesamtvermögen im Risikogebiet oder in einer administrativen Einheit berechnet. In der Versicherungswirtschaft wird diese Größe auch als Schadenssatz bezeichnet. Relative Schäden nehmen generell Werte zwischen 0 und 1 (bzw. zwischen 0 % und 100 %) an.

Um die Anfälligkeit verschiedener Gebiete miteinander vergleichen zu können, werden darüber hinaus spezifische Schäden ermittelt. Zum einen werden – analog zur Abflussspende in der Hydrologie, bei der der Abfluss aus einem Gebiet durch die Größe des zugehörigen Einzugsgebiets dividiert wird – die absoluten Schäden in einem Gebiet durch die Gesamtfläche der schadensrelevanten Flächennutzungen, meistens der Siedlungsfläche, dividiert. Da der zur Hydrologie analoge Begriff „Schadensspende“ irritierend wäre, wird dieser Wert im Vorhaben als flächenspezifischer Schaden (angegeben in EUR pro m²) bezeichnet. Analog zur Abflussspende gibt er das Potenzial eines Gebietes, Schaden zu generieren, an. Je nach Kontext kann bei der Normierung die Siedlungsfläche im Risikogebiet oder die gesamte Siedlungsfläche in einer administrativen Bezugseinheit herangezogen werden.

Zum anderen werden die absoluten Schäden auf die Anzahl der Einwohner (in einem Risikogebiet oder in einer administrativen Einheit) bezogen und in EUR pro Einwohner angegeben. Diese Größe wird im Vorhaben als einwohnerspezifischer Schaden bezeichnet.

Da bei jeder Normierung die Bezugsfläche eine wichtige Rolle spielt, ist diese anzugeben. Als Risikogebiet wird dabei die Fläche bezeichnet, die sich aus der klimatischen Exposition ergibt. Als administrative Einheiten werden Gemeinden oder auch die Bundesländer verwendet.

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zur Berechnung der Wirkungsketten in den Bereichen Starkregen und Sturmfluten



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.1.3 Szenarien

Zusätzlich zum Referenzzustand (Ist-Zustand) sollten im Rahmen des Vorhabens die Veränderung des potenziellen Schadens aufgrund der erwarteten klimatischen Veränderungen sowie die schadensreduzierende Wirkung von Anpassungsmaßnahmen betrachtet werden. Als Zeithorizont wurde generell angestrebt, die Zeitspannen aus dem Netzwerk Vulnerabilität zu verwenden. Für die nahe Zukunft war dies der Zeitraum 2021-2050, für die ferne Zukunft der Zeitraum 2071 bis 2100.

Aufgrund der Datenverfügbarkeit oder -qualität waren Berechnungen für die gewählten Betrachtungszeiträume und Anpassungsmaßnahmen jedoch nicht für alle betrachteten Wirkungsketten umsetzbar. Nähere Erläuterungen hierzu sind in den jeweiligen Abschnitten der Wirkungsketten zu finden.

Szenario mit Klimawandel und ohne Anpassungsmaßnahmen

Trendanalysen aus vergangenen Hochwasserzeitreihen (1951-2002) in Deutschland zeigten eine Zunahme der jährlichen Höchstabflüsse für größere Flüsse, insbesondere an Rhein und Donau (Bronstert et al. 2017). Aber auch die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen, insbesondere die Niederschlagssumme in den Wintermonaten, hat in der Vergangenheit zugenommen (Becker et al. 2016, Bronstert et al. 2017). Grundsätzlich ist zu vermuten, dass sich diese Tendenzen auch in Zukunft fortsetzen werden, wodurch es unter anderem zu häufigeren Überschwemmungen und hydraulischen Belastungen der Siedlungsentwässerungssysteme kommen kann. Letztendlich lässt sich aufgrund großer Unsicherheiten in den Projektionen bislang jedoch nur schwer beurteilen, welchen Einfluss der Klimawandel auf die Niederschläge und das zukünftige Abschlussgeschehen tatsächlich haben wird (Bronstert et al. 2017).

Im Vorhaben wurde der Einfluss des Klimawandels auf potenzielle Schäden über eine Abschätzung der Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten abgebildet, da (erneute) klimatische, hydrologische oder hydraulische Modellierungen im Rahmen des Vorhabens nicht durchführbar waren. Änderungsfaktoren wurden, möglichst regional differenziert, aus der Literatur (z. B. Voudoukas et al. 2016) bzw. auf Basis von Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) abgeleitet (siehe dazu z. B. Abschnitt 2.1.3.3).

Zusätzlich zum Einfluss des Klimawandels wurde für die nahe Zukunft auch die Veränderung des potenziellen Schadens aufgrund sozioökonomischer Entwicklungen abgeschätzt, sofern die Datenlage dies zuließ. Hierfür wurde für einige Wirkungsketten das CC-LandStraD Szenario des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)¹ verwendet, das mögliche Veränderungen der Landnutzung gemäß eines möglichen gesellschaftlichen Entwicklungspfad bis 2030 abbildet. Eine Fortschreibung der sozioökonomischen Entwicklungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist aufgrund fehlender Daten (z. B. Landnutzungsszenarien) und der erheblichen Unsicherheiten nicht möglich.

Der Einfluss des Klimawandels bzw. der sozioökonomischen Veränderungen konnte aus verschiedenen Gründen nicht für alle ausgewählten Wirkungsketten bestimmt werden. Genauere Erläuterungen hierzu sind in den jeweiligen Abschnitten der betroffenen Wirkungsketten zu finden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht darüber, für welche Wirkungsketten welche Berechnungen durchgeführt werden konnten.

Tabelle 1: Berechnung der Wirkung des Klimawandels und sozioökonomischer Entwicklungen für betrachtete Wirkungsketten

Wirkungsketten	Klimawandel	Sozioökonomische Entwicklung
Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen	Nein	Ja
Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten	Ja	Ja
Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten	Ja	Nein
Schäden an gewerblicher Infrastruktur durch Sturmfluten	Nein	Ja

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

¹ http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/Flaechenpolitik/Projekte/Archiv/CCLandStraD/03_Ergebnisse.html?nn=413036; zuletzt aufgerufen am 19.11.2018.

Szenario mit Anpassungsmaßnahmen sowie mit zusätzlichem Klimawandel

In einem weiteren Szenario wurde untersucht, in welchem Umfang potenzielle Schäden durch Anpassungsmaßnahmen verringert werden könnten. Im Rahmen des Vorhabens wurden beispielhaft die Wirkung der privaten Bauvorsorge sowie die Ertüchtigung der Deiche an der Nord- und Ostseeküste betrachtet.

Die deutliche Schadensminderung von Bauvorsorgemaßnahmen konnte bereits in verschiedenen Studien aufgezeigt werden (Kreibich et al. 2005, Büchele et al. 2006, Thieken et al. 2016a). Mit den von UP Transfer mitentwickelten Schadensmodellen FLEMOps und FLEMOcs (Flood Loss Estimation MOdel for the private bzw. commercial sector) ist es möglich, Maßnahmen der Bauvorsorge auf Gebäudeebene (u. a. Sicherung von Heizungsanlagen, Verwendung widerstandsfähiger Materialien) sowie den Einfluss der Kontamination des Hochwassers (Öl/Benzin, Chemikalien, Abwasser) durch eine Anpassung der Schadensfunktion bzw. empirisch abgeleiteten Änderungsfaktoren abzubilden (vgl. Büchele et al. 2006, Thieken et al. 2008, Kreibich et al. 2010). Für das Vorhaben wurden diese Faktoren auf Grundlage einer erweiterten empirischen Datenbasis aktualisiert. Dafür liegen Schadensfälle aus bis zu 4969 Privathaushalten und 1317 Unternehmen vor, wobei nicht für alle Fälle die für das Modell notwendigen Informationen vorliegen, sodass sich die Stichproben für die Ableitung von Modellparametern verringern. Die Daten sind zum großen Teil in der Hochwasserschadendatenbank HOWAS21² enthalten. Hintergrundinformationen zur Datenerhebung sowie eine Übersicht aller Befragungen sind in Thieken et al. (2017) zu finden.

Die Wirkungsweise von Anpassungsmaßnahmen konnte ebenfalls aus verschiedenen Gründen nicht für alle ausgewählten Wirkungsketten gleichermaßen durchgerechnet werden. Für den Bereich der Schieneninfrastruktur waren dem Konsortium beispielsweise keine Objektschutzmaßnahmen bekannt, die am Regelquerschnitt durchgeführt werden, um Hochwasserschäden zu verringern. Der Schutz der Schiene erfolgt vielmehr durch Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes. Eine Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes führt zu geringeren Überflutungstiefen und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Nähere Erläuterungen hierfür sind ebenso in den jeweiligen Abschnitten der betroffenen Wirkungsketten zu finden. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht, für welche Wirkungsketten Berechnungen durchgeführt wurden.

Sofern möglich, wurden in einem letzten Schritt die schadensbeeinflussenden Effekte durch den Klimawandel und durch mögliche Anpassungsmaßnahmen in Kombination betrachtet.

² <http://howas21.gfz-potsdam.de/howas21/>

Tabelle 2: Berechnung der Wirkung von Anpassungsmaßnahmen für betrachtete Wirkungsketten

Wirkungsketten	Anpassungsmaßnahmen	
	Bauvorsorge	Deichertüchtigung
Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen	Ja	Nein
Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten	Ja	Ja
Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten	Nein	Ja
Schäden an gewerblicher Infrastruktur durch Sturmfluten	Ja	Nein

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.2 Wirkungskette: Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen

2.1.2.1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben Überschwemmungen durch Starkniederschläge in Deutschland wiederholt zu erheblichen Sachschäden geführt und auch Menschenleben gefordert. Beispiele sind die Ereignisse in Dortmund 2008 (GDV 2012), Osnabrück 2010 (GDV 2012), Münster 2014 (GDV 2015; Spekkers et al. 2017), Braunsbach 2016 (Landratsamt Schwäbisch Hall 2016, Vogel et al. 2017, Laudan et al. 2017), Duisburg 2016 (WAZ 2014) oder Berlin 2017 (GDV 2017) mit Sachschäden jeweils in Millionenhöhe. Die deutsche Versicherungswirtschaft geht davon aus, dass etwa die Hälfte der regulierten Überflutungsschäden auf lokal begrenzte Extremereignisse, d. h. Starkniederschläge mit nachfolgenden Überflutungen, zurückzuführen sind (Kron 2009).

Unter Starkregenereignissen werden außergewöhnlich hohe Niederschlagsmengen verstanden, die in kurzer Zeit fallen. Eine allgemeingültige Definition ist nicht vorhanden, da charakteristische Niederschlagsmengen von der jeweiligen Klimazone abhängen. Der DWD spricht von starkem Regen bei einer Niederschlagsintensität (gefallene Regenmenge pro Zeiteinheit) von 10 l/m^2 in einer Stunde oder $1,7 \text{ l/m}^2$ in zehn Minuten (DWD 2018b). Amtliche Warnungen vor Starkregen werden vom DWD herausgegeben, wenn die folgenden Schwellenwerte überschritten werden³: Bei Niederschlagsmengen von $>25 \text{ l/m}^2$ in einer Stunde oder $>35 \text{ l/m}^2$ in sechs Stunden wird eine Unwetterwarnung herausgegeben. Bei Regenmengen von $>40 \text{ l/m}^2$ in einer Stunde oder $>60 \text{ l/m}^2$ in sechs Stunden wird vor extremem Unwetter gewarnt.

Solche Starkregenereignisse resultieren meist aus konvektiven Prozessen mit räumlich sehr geringer Ausdehnung, die zeitlich von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden andauern können. Sie treten zumeist im Sommerhalbjahr auf und können zu viel Oberflächenabfluss, schnell ansteigenden Wasserständen in Bächen und/oder Überschwemmungen führen (DWD 2018c). In Gebieten mit einer hohen Reliefenergie, z. B. in Mittelgebirgslagen, können durch Starkregen ausgelöste Oberflächenabflüsse eine starke Erosionskraft entfalten und als Sturzflut mit großen Sedimentfrachten niedergehen. Aber auch in flacheren und urbanen Gebieten können die in kurzer Zeit anfallenden Wassermengen die Bemessungsgrenzen der Kanalnetze, Grundstücksentwässerung oder lokalen Fließgewässer übersteigen und Flächen überfluten. Insbesondere in Senken gelegene Gebäude und Infrastruktursysteme können dadurch erhebliche Schäden erleiden (Ahlhelm et al. 2016, LUBW 2016). Ein Beispiel ist der

³ https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882

brandenburgische Ort Leegebruch, in dem nach einem Starkniederschlag im Juli 2017 das Wasser monatelang stehen blieb (GDV 2018).

In den vorliegenden Analysen wurde nur der letztgenannte Hochwassertyp, d. h. Überflutung von urbanen Gebieten infolge einer Überlastung der Kanalisation, berücksichtigt. Bei Sturzfluten spielt der Einfluss der Fließgeschwindigkeit und des transportierten Materials (Geschiebe) eine wesentlich größere Rolle, wodurch sie sich bezüglich der Schädigungsprozesse und möglicher Anpassungsmaßnahmen deutlich von den zuletzt beschriebenen Starkregenereignissen unterscheiden.

Aktuelle Auswertungen des DWD zur radargestützten Niederschlagsklimatologie in Deutschland zeigen, dass im Zeitraum von 2001 bis 2016 Starkregenereignisse kurzer Dauer in nahezu allen Regionen aufgetreten sind. Im Gegensatz zu Fluss- und Küstenhochwasser kann eine Gefährdung durch solche Starkregenereignisse auch abseits von Gewässern auftreten und ist nicht von der geographischen Lage abhängig (Winterrath et al. 2017). In Folge dessen bedeutet das Auftreten eines großen Schadensereignisses an einem Ort nicht grundsätzlich eine höhere Starkregengefährdung dort für die Zukunft. Vielmehr ist die Eintrittswahrscheinlichkeit an Orten, die zuvor nicht von Starkregen betroffen waren, gleichermaßen hoch (LAWA 2017). Entsprechend wichtig ist es, insbesondere Städte und Gemeinden mit bisher wenig oder keiner Erfahrung durch Starkregen für die potenzielle Gefährdung zu sensibilisieren, zumal sich Schäden durch Starkniederschläge vor dem Hintergrund des Klimawandels in Zukunft möglicherweise noch erhöhen werden: Der Weltklimarat (IPCC) geht in seinem Synthesebericht „Klimaänderung 2014“ davon aus, dass extreme Niederschlagsereignisse in Europa sehr wahrscheinlich bis zum Ende des Jahrhunderts an Häufigkeit und Intensität zunehmen werden (IPCC 2014).

Aus physikalischer Sicht sind mit steigenden Temperaturen grundsätzlich zunehmende Niederschlagsmengen zu erwarten, da wärmere Luftmassen größere Mengen an Wasserdampf aufnehmen können als kältere (Becker et al. 2016). Aufgrund der geänderten meteorologischen Verhältnisse, insbesondere bei der Entstehung von Schauern und Gewittern, kann es zudem zu einer Intensivierung der ablaufenden wolken- und niederschlagsbildenden Prozesse kommen, die mitunter zu einer Zunahme von Starkniederschlägen führen kann. Dabei sind insgesamt regionale Unterschiede zu erwarten. Die Aussagefähigkeit von Trendanalysen und Klimaprojektionen zu Starkniederschlägen hinsichtlich der Häufigkeit, Intensität oder räumlichen Verteilung in Deutschland muss dabei jedoch nach saisonalem Auftreten und unterschiedlichen Dauerstufen der Niederschläge differenziert betrachtet werden. So zeigen Auswertungen des DWD von Niederschlägen der Dauerstufe 24 Stunden (Tagesniederschläge) an 1000 Messstationen in Deutschland (Zeitraum 1951 bis 2006) für Wintermonate eine Zunahme der hohen Niederschläge von etwa 25 %. Regionale Klimaprojektionen lassen ebenfalls vermuten, dass sich dieser Anstieg bis zum Jahr 2100 ähnlich fortsetzt. Für die Sommermonate lässt sich hingegen bislang keine Tendenz erkennen. Vielmehr zeigt sich hier eine große zeitliche und räumliche Variabilität der Niederschläge (Becker et al. 2016, Murawski et al. 2016).

Für Trendanalysen von Starkregenereignissen mit Dauerstufen von weniger als 24 Stunden besteht im Besonderen die Problematik, dass gerade die intensiven kleinräumigen (Sommer-)Niederschläge bisher nicht immer von den weit auseinanderliegenden meteorologischen Messstationen erfasst werden. Mit Hilfe von flächendeckenden Radardaten wird seit 2001 die räumliche Erfassung von Ereignissen verbessert. So werden die Messwerte der Bodenstationen ergänzt (s. o.). Diese zusätzlichen Informationen geben Anhaltspunkte, dass zumindest eine regionale Zunahme von Starkniederschlägen kurzer Dauer zu erwarten ist. Jedoch ist die

Zeitreihe der Radardaten insgesamt noch zu kurz, um robuste Trends daraus ableiten zu können (Becker et al. 2016).

Neben dem möglichen Einfluss des Klimawandels können weitere Treiber für ansteigende Schäden durch Starkregen zudem in einer zunehmenden Verstädterung und Verdichtung urbaner Gebiete liegen. Mit einer ansteigenden Versiegelung von Flächen vermindert sich die direkte Infiltrationsmöglichkeit des Niederschlags in den Boden, der ohne nennenswerte Verzögerung verstärkt als Oberflächenabfluss abfließt und zu Infrastrukturüberlastungen und nachfolgenden Überschwemmungen führen kann (Ashley et al. 2005, Ahlhelm et al. 2016). Neben neuen Siedlungsgebieten kann sich zusätzliches Schadenspotenzial durch eine steigende Anhäufung von Werten (Verdichtung) und eine Bevölkerungszunahme in urbanen Gebieten aufbauen (Spekkers 2015, Ahlhelm et al. 2016).

Anders als Flusshochwasser können Überflutungen durch Starkregenereignisse grundsätzlich überall auftreten (LAWA 2017a) und somit auch Gebiete betreffen, die über keine Hochwassererfahrung verfügen. Aus der mangelnden Erfahrung mit Hochwassern ergibt sich oftmals auch eine erhöhte Anfälligkeit: Aufgrund des geringen Risikobewusstseins werden weniger Vorsorge- und Notmaßnahmen durch die Betroffenen durchgeführt, als dies bei Flusshochwassern der Fall ist (Rözer et al. 2016). Infolgedessen können auch geringe Wassertiefen zu erheblichen Schäden führen.

Um die in dieser Wirkungskette adressierte Anfälligkeit von Wohngebäuden gegenüber Überflutungen durch Starkregen künftig zu verringern, ist es erforderlich, sich zunächst mit möglichen Auswirkungen von Starkregenereignissen auseinanderzusetzen und potenzielle Schäden quantitativ abzuschätzen. Auf dieser Grundlage können Anpassungsstrategien geplant werden. Allerdings liegen für Starkregen – im Gegensatz zu Sturmfluten – keine flächendeckenden Gefahrenkarten für Deutschland vor. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass dem Oberflächenabfluss aus Starkregen, der letztlich den Schaden auslöst, im Gegensatz zum Durchfluss an Fließgewässern keine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann (LAWA 2017). Daher wurde ein Ansatz entwickelt, der ausgehend von Fallstudien eine verallgemeinerbare, aber nur grobe Abschätzung von Gebäudeschäden durch Starkregen ermöglicht. Ziel dieser Analyse ist es also, potenzielle monetäre Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen für ausgewählte Fallstudien zu berechnen und daraus eine Transfer-/Regionalisierungsfunktion abzuleiten. Damit sollen Risikogebiete für Starkregen und Größenordnungen monetärer Schäden im regionalen Maßstab veranschaulicht und Anpassungsbedarfe abgeleitet werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden dabei explizit Starkregenereignisse betrachtet, die im siedlungsgeprägten Flachland oder Hügelland auftreten und vorrangig aufgrund einer Überlastung der Stadtentwässerungssysteme zu Überflutungen führen. In Abgrenzung dazu wurden keine durch Starkregen induzierten Sturzflutereignisse betrachtet, wie sie in Gebirgsgebieten auftreten können.

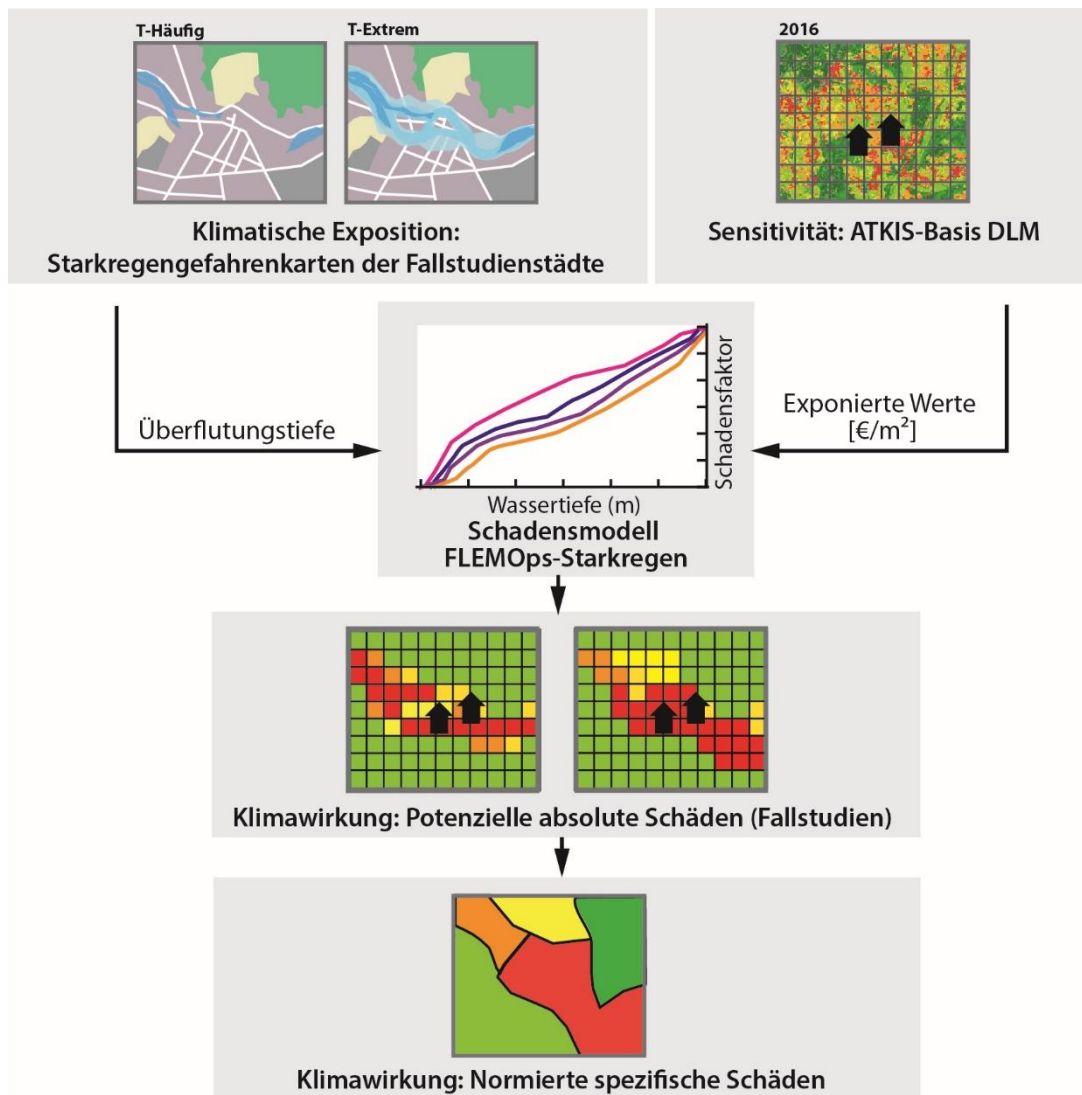
In den folgenden Abschnitten sollen das methodische Vorgehen sowie die Ergebnisse der Schadensmodellierung dargestellt und diskutiert werden.

2.1.2.2 Methodische Vorgehensweise

In den nachstehenden Abschnitten soll zunächst das Modellierungskonzept für die Abschätzung von Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen beschrieben werden. Zudem wird eine Übersicht zu den Fallstudien gegeben. Des Weiteren werden Ansätze für die Regionalisierung und die Berücksichtigung von Klimawandel- und Anpassungsszenarien vorgestellt.

Das angewandte Modellierungskonzept zur Berechnung potenzieller Schäden aufgrund von Überflutungen durch Starkregenereignisse ist zusammenfassend in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Modellierungskonzepts für Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.2.2.1 Klimatische Exposition

Für die Modellierung von monetären Schäden an Wohngebäuden werden grundsätzlich Informationen zu potenziellen Starkregenüberflutungsflächen und -tiefen benötigt. Obwohl Starkregenereignisse aufgrund von schadensträchtigen Ereignissen wie z. B. in Münster am 28. Juli 2014 mit 72,5 Mio. EUR versicherten Sachschäden (GDV pers. Mitteilung) zunehmend in den Fokus von Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik rücken, wurden in Deutschland und den meisten anderen Mitgliedsstaaten Überschwemmungen durch Starkregenereignisse nicht in den Hochwassergefahrenkarten der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie⁴ (HWRM-RL; 2007/60/EC) berücksichtigt (Ausnahmen sind z. B. Österreich, Belgien und Luxemburg).

⁴

http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/richtlinie_management_hochwasser_risiken.pdf; zuletzt aufgerufen am 20.11.2018.

(European Commission 2016). Demzufolge liegen im Unterschied zu Flusshochwassern und Sturmfluten derzeit keine großflächigen und einheitlichen Gefahrenkarten für Starkregenereignisse vor, die Überflutungstiefen ausweisen. Eine deutschlandweite Analyse des Schadenpotenzials für Wohngebäude durch Starkregen ist somit derzeit nicht realisierbar. Deswegen wurde im Vorhaben ein Fallstudienansatz verfolgt: Starkregengefahrenkarten zu ausgewählten Repräsentanten wurden, soweit möglich, aus anderen Vorhaben oder von verschiedenen Städten bezogen. Um eine (grobe) Schadensschätzung auch für größere Gebiete zu ermöglichen, wurde aus den Fallstudienresultaten nachfolgend eine Transferfunktion abgeleitet (siehe Abschnitt 2.1.2.2.4).

Die Auswahl der Fallstudien erfolgte in Absprache mit dem Auftraggeber. Hierbei ergab sich ein räumlicher Schwerpunkt auf Nordrhein-Westfalen (NRW). Dieser resultierte vorrangig aus dem Rechercheergebnis, dass von vielen Städten und Gemeinden in NRW bereits eine Reihe von Untersuchungen, Projekten und Konzepten zu Auswirkungen und zum Management von Starkregengefahren durchgeführt bzw. entwickelt wurde. Für das Vorhaben konnte darüber auf umfangreiche Kenntnisse und insbesondere auf schon vorhandene Starkregengefahrenkarten zurückgegriffen werden. So erklärten sich sechs Städte aus NRW bereit, ihre Starkregengefahrenkarten zur Verfügung zu stellen: Dortmund, Köln, Münster, Remscheid, Solingen und Unna. Im Laufe des Vorhabens konnten weitere Kooperationen mit den Städten Bremen und Lübeck für einen Kartenaustausch aufgebaut werden. Die räumliche Verteilung der Fallstudien ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Vergleich der Gefahrenkarten erfolgt in Abschnitt 2.1.2.3.1. Da die großräumige Abschätzung von Schäden durch Starkregen für ganz NRW erfolgen sollte, wurde die Transferfunktion vorrangig auf Basis der Fallstudien aus NRW entwickelt. Die Fallstudie Bremen wurden insbesondere zur Validierung/Verifizierung der Transferfunktion herangezogen. Die Ergebnisse für die Stadt Lübeck wurden im Vorhaben nicht weiter verwendet, da hier im Gegensatz zu allen anderen Fallstudien keine Stundenniederschläge, sondern 10-Minuten-Niederschläge verwendet wurden (vgl. Tabelle 3 in Abschnitt 2.1.2.3.1).

Abbildung 3: Übersicht der gewonnenen Fallstudienstädte im Vorhaben



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Für die Bewertung und insbesondere für den Vergleich von potenziellen Schäden ist es grundsätzlich wichtig, der Modellierung eine qualitativ möglichst ähnliche und konsistente Datenbasis zugrunde zu legen. Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungskontexte der Gefahrenkarten aus den Fallstudien und aufgrund von Unterschieden in der Methodik sind die Eingangsdaten zur klimatischen Exposition vergleichsweise heterogen. Daher ist es von Bedeutung, die Gefahrenkarten detailliert zu beschreiben, Unterschiede zu verdeutlichen und mögliche Konsequenzen für die Schadensmodellierung zu diskutieren. Dies erfolgt in Abschnitt 2.1.2.3.1.

2.1.2.2.2 Sensitivität

Die Ermittlung der potenziell von Starkregen betroffenen bebauten Fläche in den Fallstudien erfolgte in einem Geoinformationssystem (GIS) mittels einer Verschneidung der Überflutungsflächen (klimatische Exposition) mit Landnutzungsdaten. Als Basis der Landnutzungsdaten wurde das ATKIS-Basis-DLM des Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie (BKG) verwendet. Diese Daten liegen deutschlandweit mit einer Lagegenauigkeit von ± 3 m vor und wurden dem Vorhaben zur Verfügung gestellt. Für die Schadensanalyse wurde dabei ausschließlich die bebaute Fläche als Landnutzungstyp betrachtet. Konkret wurden die Objektarten „Wohnbaufläche“ und „Fläche gemischter Nutzung“ zusammengefasst.

Um potenzielle Schäden an Wohngebäuden berechnen zu können, werden ferner Informationen zu Vermögenswerten auf den bebauten Flächen benötigt. Spezifische Vermögenswerte für Wohngebäude wurden auf Basis von Kleist et al. (2006) aktualisiert. Kleist et al. (2006) haben mithilfe verschiedener Daten, beispielsweise zur Anzahl und Typen von Gebäuden pro Gemeinde, Bruttogrundflächen und Wohnflächen sowie Normalherstellungskosten (Quellen: INFAS Geodaten, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, statistisches Bundesamt), die

Wiederherstellungskosten für das Wohnvermögen pro Gemeinde für das Bezugsjahr 2000 errechnet. Für dieses Vorhaben wurde die Wohngebäudemasse, d. h. die Änderungen im Wohngebäudebestand durch Neubau oder Abriss, auf Basis von INFAS Geodaten (2011), von 2000 auf das Jahr 2011 aktualisiert. Das auf Gemeindeebene aggregierte Wohnvermögen wurde dann mit Hilfe eines Regionalisierungsverfahrens auf die gewählten Objektarten der ATKIS-Basis-DLM-Landnutzungsklassen disaggregiert. Da die Untersuchung von Wunsch et al. (2009) gezeigt hat, dass bei ATKIS-Daten ein binäres Verfahren gute Ergebnisse erzielt, wurde das Wohnvermögen gänzlich auf die Objektarten „Wohnbaufläche“ und „Fläche gemischter Nutzung“ verteilt; allen anderen Objektarten wurde kein Wohnvermögen zugewiesen. Da unterhalb der Gemeindeebene keine weiteren Informationen zur Gebäudezusammensetzung vorlagen, erhalten innerhalb einer Gemeinde alle Flächen der Objektarten „Wohnbaufläche“ und „Fläche gemischter Nutzung“ dasselbe flächenspezifische Wohnvermögen (oder Einheitswohnvermögen in EUR/m²). Daher wurde bei der Schadensmodellierung auch eine mittlere Gebäudezusammensetzung pro Gemeinde bzw. Fallstudie verwendet.

Das Einheitswohnvermögen wurde im Anschluss mithilfe des Baupreisindex für Wohngebäude zuerst auf das Jahr 2011 und dann abschließend auf das Jahr 2016 hochgerechnet.

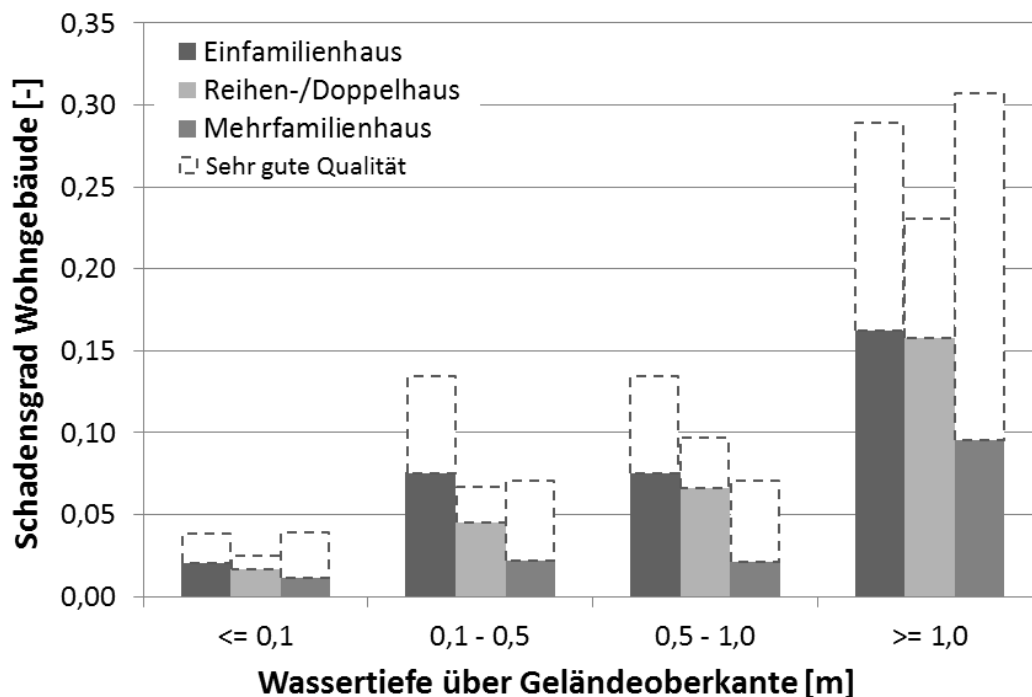
2.1.2.2.3 Schadensmodell (Fallstudien)

Die Einwirkung von Starkregen auf Wohngebäude wurde mit dem Modell FLEMOps (Flood Loss Estimation Model for the Private Sector) abgeschätzt (Thieken et al. 2008), das für dieses Vorhaben allerdings auf Starkregen angepasst wurde und daher im Weiteren als „FLEMO-Starkregen“ bezeichnet wird.

Im Modell wird der direkte monetäre Schaden für Wohngebäude anhand von Einwirkungs- und Widerstandsparametern berechnet: der Überflutungstiefe, differenziert in vier Wasserstandsklassen, dem Gebäudetyp, unterteilt nach Einfamilienhaus, Reihen-/Doppelhaus und Mehrfamilienhaus, sowie der Gebäudequalität, klassifiziert nach sehr guter bzw. mittel/geringer Qualität. Das Modell wurde aus empirischen Schadensdaten von Haushalten abgeleitet, die durch Hochwasser oder Starkregen in Deutschland geschädigt wurden. Die gesamte Datenbasis umfasst mittlerweile 4969 Fälle von den Hochwassern der Jahre 2002, 2005, 2006, 2010, 2011 und 2013 und Starkregenaus den Jahren 2010 (Osnabrück) und 2014 (Münster und Greven), die jedoch nicht immer alle für das Schadensmodell notwendigen Informationen enthalten (vgl. Thieken et al. 2017). Um die besonderen Schädigungsprozesse von Starkregen zu berücksichtigen, konnten bei der Ableitung des Modells für diese Wirkungskette etwa 500 Schadensfälle berücksichtigt werden, deren Schäden (nach Angaben der Befragten) auf Starkregen oder Oberflächenabfluss zurückzuführen waren und alle notwendigen Informationen enthielten. Die resultierenden Schadensgrade pro Wasserstandsklasse, Gebäudetyp und -qualität zeigt Abbildung 4.

Der Vorteil des Modells FLEMOps besteht darin, dass in einer weiteren Modellkomponente Effekte von Bauvorsorge (Objektschutzmaßnahmen an Gebäuden) berücksichtigt werden können (siehe Abschnitt 2.1.1.3 bzw. 2.1.2.2.5).

Abbildung 4: Schadensfunktionen des Modells FLEMO-Starkregen für die Abschätzung von Wohngebäudeschäden durch Starkregen unter Berücksichtigung der Faktoren Wassertiefe, Gebäudetyp und Gebäudequalität



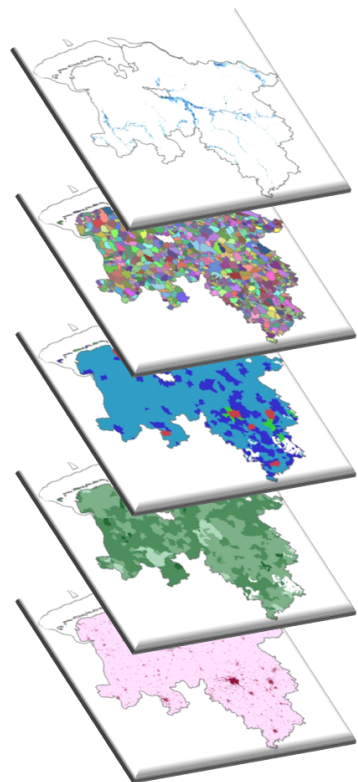
© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Die Schadensabschätzung erfolgte letztendlich auf Rasterbasis. Die in Abbildung 5 genannten Eingangsdaten wurden mit Hilfe der Software ArcGIS in ein Rasterformat mit einer einheitlichen räumlichen Auflösung von 5x5 m konvertiert und pixelweise miteinander verschnitten. Die Informationen je Rasterzelle wurden dann in einem Matlab-Skript mit den Schadensfunktionen aus FLEMO-Starkregen verknüpft, sodass ein Schadensgrad für jede einzelne Rasterzelle ermittelt werden konnte. Durch die Multiplikation der einzelnen Schadensgrade mit dem jeweils zugehörigen Einheitswohnvermögen wurde schließlich der finanzielle Wohngebäudeschaden je Rasterzelle berechnet und zuletzt für das jeweilige Untersuchungsgebiet aufsummiert.

Im Rahmen des Vorhabens wurden die abgeschätzten Schäden innerhalb der Fallstudien auf Stadtbezirks- bzw. auf Ortsteilebene aufsummiert. Damit konnte die Fallzahl für die Ableitung der Transferfunktion insgesamt deutlich erhöht werden (s. u.). Für die Stadtbezirke/Ortsteile, für die keine flächendeckende Überflutung in den Starkregengefahrenkarten ausgewiesen wurde, beziehen sich die geschätzten potenziellen Wohngebäudeschäden auf die im Stadtbezirk/Ortsteil vorliegende Überflutungsausdehnung, d. h. auf das untersuchte Risikogebiet.

Als Ergebnis der Modellierung konnte schließlich ein potenzieller Wohngebäudeschaden durch Starkregen für die ausgewählten Fallstudien beziffert werden. Sofern mehrere Gefahrenkarten unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Niederschlagshöhen von den Fallstudienstädten bereitgestellt wurden, erfolgte die Schadensabschätzung für jedes Szenario (vgl. Abschnitt 2.1.2.3.2).

Abbildung 5: Eingangsdaten für das Modell FLEMO-Starkregen



Variable	Wert	Ebene	Quelle
Wassertiefe	m (klassifiziert bzw. kontinuierlich)	Raster	Gefahrenkarte Fallstudien
Kennziffer	Stadt Bezirke/Ortsteile	Gemeinde/ Stadt	Fallstudien
Gebäudetyp- zusammensetzung	Anteil Einfamilienhaus Reihen-/Doppelhaus Mehrfamilienhaus	Gemeinde/ Stadt	Infas Geodaten, 2011
Gebäudequalität	1: hoch 2: gering/mittel	Gemeinde/ Stadt	Infas Geodaten, 2011
Wohngebäude- wert	€/m ² (Stand 2016)	ATKIS- Basis DLM	Kleist et al. (2006)

© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Für Flusshochwasser wurde das Modell FLEMOps vor allem für das Hochwasser 2002 erfolgreich validiert (vgl. Thielen et al. 2008, Wunsch et al. 2009). Da für Starkregen bislang keine Erfahrungen mit dem Modell vorliegen, wurde FLEMO-Starkregen anhand des Ereignisses in Münster im Juli 2014 getestet. Zu diesem Ereignis wurden laut Angaben des GDV (pers. Mitteilung) im Stadtkreis Münster 5000 versicherte Gebäudeschäden (Wohngebäude und Firmenkunden-Gebäude) mit einem Schadensaufwand von 75,2 Mio. EUR gemeldet. Der durchschnittliche Schaden betrug somit 15.000 EUR. Ende 2013 betrug die Versicherungsdichte von Elementarschadenzusatzversicherungen für Gebäude in Münster laut Angaben des GDV (pers. Mitteilung) 38 %. Die Befragung von geschädigten Haushalten in Münster (vgl. Thielen et al. 2017; Spekkers et al. 2017) ergab einen ähnlichen Wert der Versicherungsdichte von 33 % und einen durchschnittlichen Gebäudeschaden von 10.005 EUR. Die genannten Angaben wurden in vier verschiedenen Varianten kombiniert. Daraus resultierte ein Gesamtschaden von 131,6 Mio. EUR bis 227,9 Mio. EUR (Mittelwert: 177,3 Mio. EUR; alle Angaben zum Preisniveau 2014).

Da 2014 fast der gesamte Stadtkreis Münster (mit Ausnahme der Ortschaft Roxel) von Starkregen betroffen war, wurde für die Validierung die dem Vorhaben bereitgestellte Starkregengefahrenkarte für Münster herangezogen. Mit FLEMO-Starkregen wurden die Gebäudeschäden wie oben beschrieben abgeschätzt, wobei verschiedene Mindestwassertiefen (keine, 1 cm, 2 cm, 5 cm und 10 cm) getestet wurden. Für Rasterzellen, deren Wassertiefen die Mindestwassertiefe nicht überschritten, wurde kein Schaden berechnet. Die Gesamtschäden wurden mithilfe des Baupreisindex auf das Preisniveau im Jahr 2014 bezogen. Die so geschätzten Gesamtschäden wurden mit dem (mittleren) beobachteten Gesamtschaden verglichen. Die Variante, die die geringste Abweichung zeigte, wurde dann für alle anderen Fallstudien verwendet. Die Mindestwassertiefe ist als neuer Modellparameter zu verstehen, der

mithilfe des Ereignisses vom Juli 2014 kalibriert wurde. Das Ergebnis findet sich in Abschnitt 2.1.2.3.1.

2.1.2.2.4 Entwicklung einer Transferfunktion

Um potenzielle Starkregenschäden für ein größeres Gebiet, z. B. für das Bundesland NRW, abschätzen zu können, müssen die Ergebnisse der Fallstudien zunächst durch Normierung vergleichbar gemacht werden. Sodann ist eine Transferfunktion zu entwickeln, die in Abhängigkeit von Ereignis- oder Gebietseigenschaften eine Übertragbarkeit der (normierten) Fallstudienresultate erlaubt. Eine solche Vorgehensweise wurde eigens für dieses Vorhaben entwickelt. Der methodische Ansatz ist generell vergleichbar mit (etablierten) Regionalisierungsverfahren in der Hydrologie, d. h. der Berechnung der Abflussmenge und den Transferfunktionen, die entwickelt wurden, um Hochwasserabflüsse aus Einzugsgebieten abzuschätzen, in denen keine Abflussmessstellen vorhanden sind (ungauged catchments/unbeobachtete Gebiete). Auch Abfluss- oder Durchflusswerte an unterschiedlichen Messstellen (Pegeln) oder aus verschiedenen Einzugsgebieten sind zunächst einmal nicht vergleichbar. Durch die Normierung des Durchflusses mit der Einzugsgebietsfläche wird eine Vergleichbarkeit erreicht: Die Abflussmenge gibt an, wie viel Abfluss im Mittel pro Quadratmeter in einem Einzugsgebiet gebildet wird. Um weiterhin abzuschätzen, wie hoch extreme Hochwasserabflüsse aus unbeobachteten Einzugsgebieten ausfallen können, werden die Abflussmengen den Einzugsgebietsgrößen in einer doppeltlogarithmischen Abbildung gegenübergestellt. Durch lineare Regression wird der Zusammenhang zwischen bei den Größen ermittelt. Schließlich wird durch Parallelverschiebung der Regressionsgeraden eine Umhüllende gebildet, aus der sich die maximalen Hochwasserabflussmengen ablesen lassen. Diese werden letztlich verwendet, um extreme Hochwasserabflüsse abzuschätzen (vgl. Merz und Thielen 2009; Disse 2013).

Das in diesem Vorhaben entwickelte Regionalisierungsverfahren orientiert sich an den gerade skizzierten Ansätzen aus der Hydrologie. Da nur wenige Erfahrungen mit Regionalisierungsverfahren in der Schadensabschätzung vorliegen, wurden mehrere Varianten in diesem Vorhaben getestet. Zuerst wurden die absoluten Schäden mithilfe verschiedener Eigenschaften normiert: Verwendet wurden das Gesamtvermögen, die Siedlungsfläche sowie die Zahl der Einwohner in den Risikogebieten. Danach wurde mithilfe der Korrelation nach Pearson getestet, ob es einen (linearen) Zusammenhang zwischen den normierten Schäden einerseits und der Niederschlagsmenge der zugrundeliegenden Szenarien oder den für die Normierung verwendeten Größen andererseits gibt. Dabei gehen zunächst alle Szenarien ein; in einer zweiten Variante wurde nur das jeweils maximale Szenario pro Stadtteil verwendet.

Für die Variante mit der höchsten Korrelation wurden dann eine Regressionsanalyse und eine Parallelverschiebung so durchgeführt, dass ca. 90 % der Werte unterhalb der Regressionsgeraden (Umhüllenden) liegen. Bei diesem Schritt wurde nur das jeweils maximale Szenario pro Stadtteil verwendet, da es sich um eine worst-case-Abschätzung handelt. Die Regressionsbeziehung wird schließlich auf die Landnutzungs- bzw. Vermögensdaten für ganz NRW angewendet, um einen potenziellen Wohngebäudeschaden durch Starkregen (pro Gemeinde) abzuschätzen.

Zur Plausibilisierung des Verfahrens wurden zudem aus den Fallstudien mittlere normierte Werte für den flächen- und einwohnerspezifischen Schaden ermittelt, die dann mit der Gesamtsiedlungsfläche in NRW bzw. der Einwohnerzahl multipliziert wurden. Damit wurde überprüft, ob die Größenordnung der Schadensschätzung für ganz NRW übereinstimmen.

2.1.2.2.5 Szenarien

Neben den verschiedenen Niederschlagsintensitäten sollten – dem Modellkonzept folgend – auch Szenarien für den Klimawandel sowie für Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Wie schon aus Tabelle 1 und Tabelle 2 deutlich wird, konnten nicht alle erwünschten Szenarien für diese Wirkungskette berücksichtigt werden. So erfolgte für diese Wirkungskette keine Berücksichtigung von Klimawandeleinflüssen auf potenzielle Schäden in naher und ferner Zukunft. Dies ist in der grundsätzlichen Schwierigkeit begründet, Eintrittswahrscheinlichkeiten und deren Änderungen für (extreme) Oberflächenabflüsse aus Starkregenereignissen zu bestimmen. Diese Einschätzung erfolgt in Übereinstimmung mit der gegenwärtigen Position der LAWA (2017a). Zum einen können Starkniederschlagsereignisse mit einer Ausdehnung von wenigen Kilometern häufig nicht durch die weit auseinander liegenden, punktuellen Niederschlagsmessstationen erfasst werden. Daraus resultiert, dass diese sehr lokal auftretenden Ereignisse nicht immer in die Niederschlagsstatistik eingehen. Entsprechend sind Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten wegen lokal nicht prognostizierbarer und räumlich abgrenzbarer Wettergeschehen derzeit nicht ausreichend statistisch abgesichert (Stemplewski et al. 2015, LAWA 2017). Zum anderen werden bei der Erstellung von Starkregengefahrenkarten die vorliegenden Oberflächen- und Bodeneigenschaften parametrisiert, aus denen sich dann in Kombination mit den Niederschlagsdaten Oberflächenabflusswerte je Flächeneinheit berechnen lassen. Da Niederschlags-Abflussprozesse nicht-linear sind, kann den Abflusswerten keine Eintrittswahrscheinlichkeit mehr direkt zugeordnet werden (LUBW 2016). Das heißt, selbst wenn man grundsätzlich davon ausginge, dass Starkniederschlagsereignisse in Zukunft häufiger aufträten, ließen sich aufgrund der Schwierigkeit, Oberflächenabflüssen durch Starkregen eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen, keine Rückschlüsse auf Veränderungen der potenziellen Schäden ziehen.

Die Berücksichtigung von sozioökonomischen Änderungen wurde für diese Wirkungskette auf Bundeslandebene exemplarisch für NRW durchgeführt. Dafür wurden der Datensatz CC-LandStraD des BBSR verwendet, der Landnutzungsänderungen zwischen 2007 und 2030 anzeigt.

Schließlich wurde im Rahmen des Vorhabens als Anpassungsmaßnahme ein optimaler Zustand der Eigenvorsorge von Privathaushalten angenommen, d. h. die Durchführung von sehr guter Bauvorsorge (klassifiziert anhand der Anzahl und Art der durchgeführten Maßnahmen), die gleichzeitig verhindert, dass eine Kontamination des Hochwassers/ Oberflächenabflusses durch Öl, Benzin oder Abwasser auftritt.

Unter Bauvorsorge wurden die folgenden Maßnahmen zusammengefasst:

- ▶ Gebäudeabdichtung,
- ▶ Einbau einer Rückstausicherung,
- ▶ Installation/ Anschaffung stationärer/ mobiler Wassersperren,
- ▶ Anpassung der Gebäudenutzung,
- ▶ Anpassung der Inneneinrichtung,
- ▶ Verlegung der Heizungsanlage in obere Stockwerke
- ▶ Sicherung der Heizungsanlage/ des Öltank.

Auf Basis der Haushaltsbefragungen (vgl. Thieken et al. 2017) wurde für diesen optimalen Vorsorgezustand ein mittlerer Wohngebäudeschaden berechnet. Dieser wurde dann mit dem mittleren Wohngebäudeschaden des Gesamtdatensatzes verglichen. Im Mittel lagen die Wohngebäudeschäden von Haushalten, die eine sehr gute Bauvorsorge durchgeführt haben und bei denen keine Kontamination des Wassers aufgetreten ist, um ca. 36 % niedriger als der durchschnittliche Wohngebäudeschaden von allen Befragten. Für die Berechnung des Einflusses der durchgeführten Eigenvorsorge werden die mit FLEMO-Starkregen geschätzten potenziellen Wohngebäudeschäden für dieses Anpassungsszenario daher pauschal mit einem Skalierungsfaktor von 0,64 multipliziert.

2.1.2.3 Ergebnisse und Diskussion

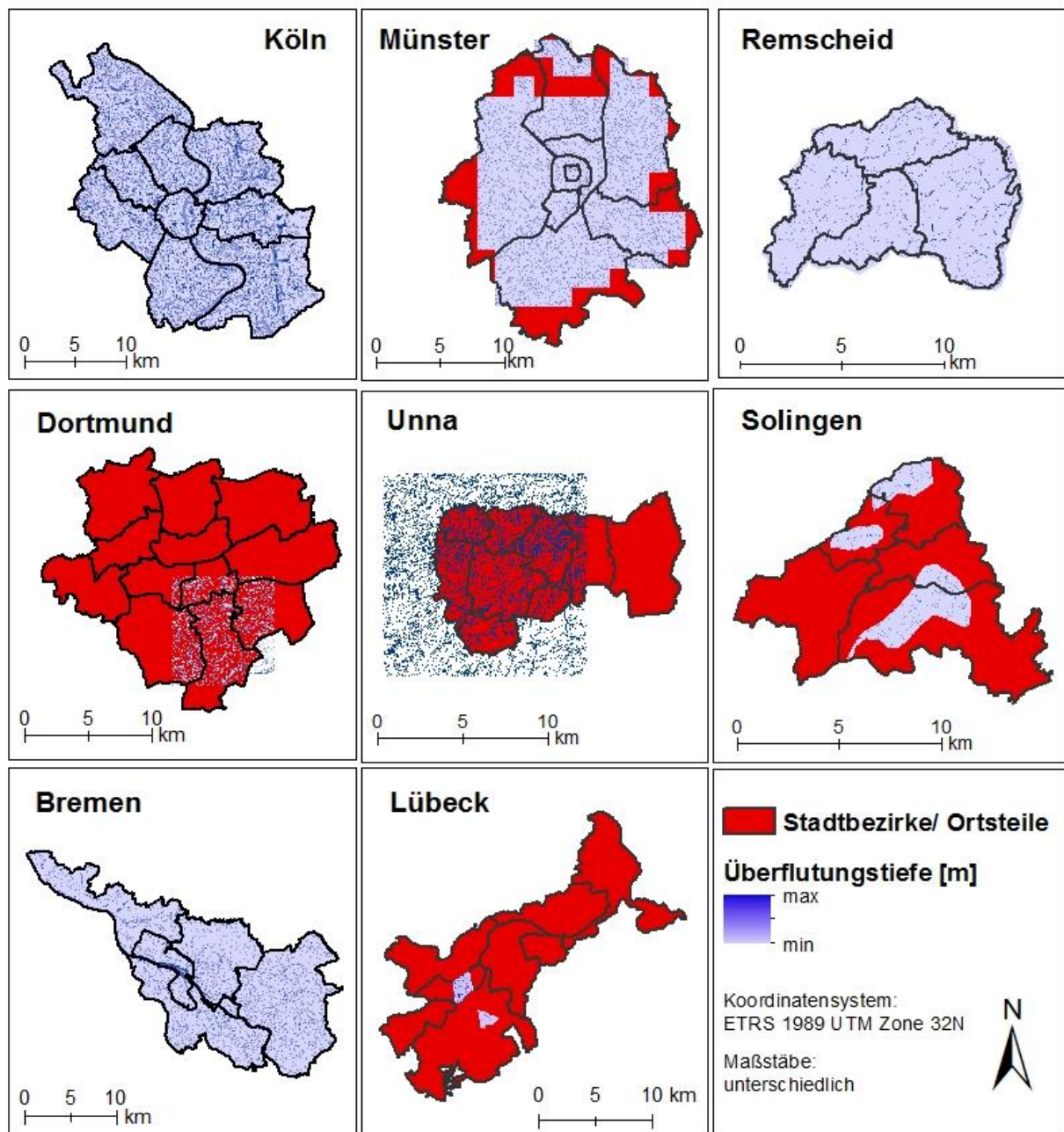
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schadenspotenziale für Wohngebäude durch Starkregen für ausgewählte Fallstudien präsentiert und diskutiert. Zunächst werden die dafür bereitgestellten Starkregengefahrenkarten näher charakterisiert und verglichen. Im Anschluss wird die Regionalisierung (Transferfunktion) vorgestellt. Schließlich werden die Szenario-Ergebnisse einer möglichen schadensreduzierenden Wirkung bei der Durchführung von Anpassungsmaßnahmen (Eigenvorsorge) dargestellt.

2.1.2.3.1 Charakteristika und Unterschiede der Starkregengefahrenkarten und Anpassung des Schadensmodells

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der bereitgestellten Starkregengefahrenkarten der verschiedenen Fallstudienstädte. Bei der Betrachtung der einzelnen Karten fallen bereits visuell erste Unterschiede bezüglich der jeweiligen räumlichen Ausdehnung auf. Städte wie Köln, Remscheid und Bremen haben Gefahrenkarten erstellt, die das gesamte Stadtgebiet abdecken und es somit als Risikogebiet einordnen. In den übrigen Städten erfolgte die Erstellung der Karten hingegen für ausgewählte Stadtausschnitte bzw. einzelne Bezirke oder Einzugsgebiete (Risikogebiete).

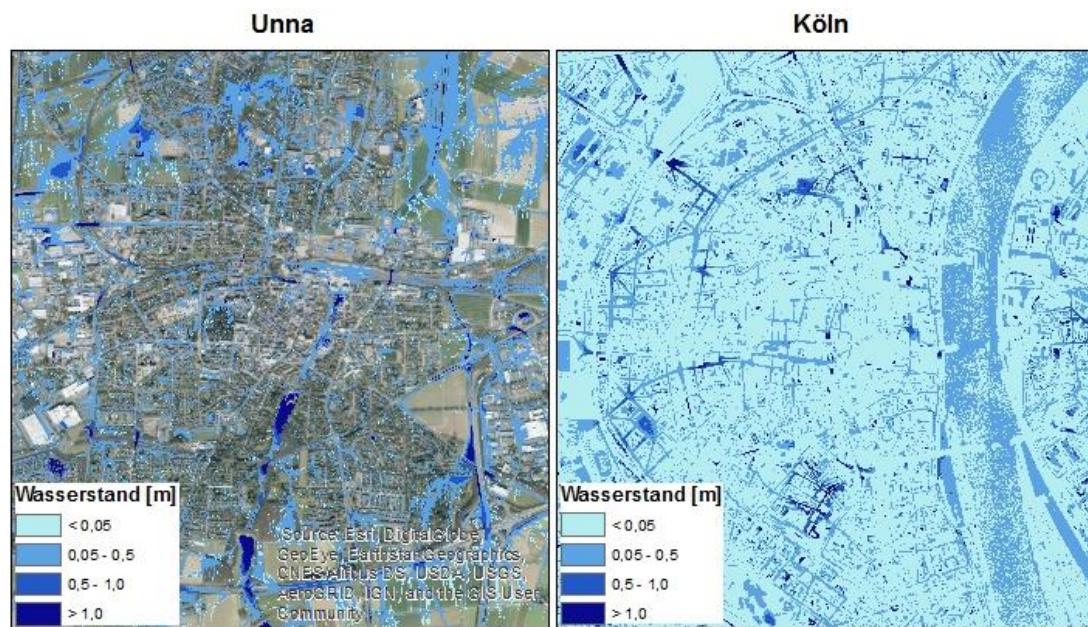
Ein weiterer Unterschied ist, dass in manchen Karten flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet Überflutungsflächen und Wasserstände berechnet wurden (z. B. Köln, Münster, Remscheid, Solingen, Bremen). In anderen Karten wurden hingegen keine flächendeckenden Überschwemmungstiefen ausgegeben, sondern vielmehr nur bestimmte Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebiets als tatsächlich überflutet abgebildet. Die übrigen Bereiche wurden als Rasterzellen ohne Wasserstandsdaten („NoData“) ausgewiesen (z. B. Unna, Dortmund, Lübeck). Vermutlich wurde hier eine Mindestwassertiefe verwendet. Bei der Fallstudie Solingen wurden hingegen die Dachflächen nicht direkt überregnet, sondern das Niederschlagswasser von dort wurde entweder in die Kanalisation geleitet oder der verbleibende Überschuss auf die umliegenden Flächen verteilt. Entsprechend war der ausgewiesene Wasserstand auf den Dachflächen gleich Null. Zum Vergleich sind in Abbildung 7 jeweils Ausschnitte der Gefahrenkarten von Köln (flächendeckende Überflutung) und Unna (keine flächendeckende Überflutung) dargestellt. Um die Unterschiede zwischen den Fallstudien auszugleichen, wird bei der Schadensmodellierung eine einheitliche Mindestwassertiefe angewendet (s.u.).

Abbildung 6: Übersicht der Starkregengefahrenkarten der verschiedenen Fallstudienstädte



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam; Quellen der Gefahrenkarten und administrativen Grenzen: Köln: Stadtentwässerungsbetriebe Köln/ Stadt Köln - offenedaten-koeln.de, Juli 2014; Münster: Stadt Münster/ Stadt Münster; Remscheid: Stadt Remscheid/ Stadt Remscheid; Solingen: Technische Betriebe Solingen/ Technische Betriebe Solingen; Dortmund: Emschergenossenschaft, Essen/ Land NRW (2017), Stadt Dortmund, Vermessungs-und Katasteramt, dl-de/by-2-0; Unna: Lippeverband, Essen/ Kreisstadt Unna, 3-61 / GIS-Koordination; Bremen: Projekt KLAS, Freie Hansestadt Bremen / Projekt KLAS, Freie Hansestadt Bremen; Lübeck: FH Lübeck (LSA)/ Hansestadt Lübeck

Abbildung 7: Ausschnitte aus den Starkregengefahrenkarten der Städte Unna und Köln



© Unna: Lippeverband, Essen; Köln: Stadtentwässerungsbetriebe Köln

Maßstab 1:10000

Grundsätzlich wurden die Wasserstände der Gefahrenkarten als kontinuierliche Daten von den Fallstudienstädten bereitgestellt. Lediglich im Fall von Unna waren die Wasserstände bereits vorab in vier Klassen eingeteilt. Die Wasserstandsklassen (3 cm, 5 cm, 50 cm und 100 cm) ließen sich aber gut den Wasserstandsklassen des FLEMO-Starkregen-Modells zuordnen (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 7). Dennoch kann eine Beeinflussung der Modellergebnisse durch die Klassifizierung nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Weitere inhaltliche Kartenunterschiede sind in Tabelle 3 aufgeführt. Diese betreffen unter anderem die Anzahl und Auswahl der Starkregen-Szenarien (Jährlichkeiten T bzw. Niederschlagshöhen) für die Gefahrenkarten. Die Anzahl der verschiedenen Szenarien variierte zwischen einem und fünf, wobei die betrachteten Jährlichkeiten von $T = 2$ a bis $T = 100$ a bzw. Niederschlagshöhen von 22 mm bis 90 mm reichten, wobei nicht allen Niederschlägen eine Jährlichkeit zugeordnet wurde. Als Datengrundlage für die Ermittlung der Niederschlagshöhen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten zog die Hälfte der Fallstudien Werte des KOSTRA - DWD-2000 bzw. -2010 (DWD 2018) heran. Die Städte Dortmund, Münster und Unna haben hingegen Niederschlagsmengen von 90 mm verwendet, die sich zwar in ihrer Größenordnung an den KOSTRA-Werten orientieren, denen sie jedoch bewusst keine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet haben (vgl. Tabelle 3). Hintergrund ist die Schwierigkeit der Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen und daraus resultierenden Oberflächenabflüssen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2.5; Stemplewski et al. 2015). Demzufolge besteht für das einheitliche Vorgehen zur Ausweisung von Überschwemmungsflächen durch Starkregen oder ein Vergleich von Karten auf Basis von Niederschlag-Eintrittswahrscheinlichkeiten derzeit noch weiterer Abstimmungsbedarf.

Immerhin wurde für den betrachteten Niederschlag einheitlich eine Dauerstufe von 60 Minuten gewählt. Einzige Ausnahme bildete hier die Fallstudie Lübeck, für die eine Dauerstufe von 10 Minuten gewählt wurde und die daher nicht weiter im Vorhaben berücksichtigt wurde.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen den Starkregengefahrenkarten der Fallstudien zeigt sich zudem in der Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung des vorhandenen Siedlungsentwässerungssystems. So haben die Städte Köln, Münster und Bremen bei der Kartenerstellung die Wirkung des Kanalnetzes vernachlässigt. Bei den übrigen Fallstudien wurde es berücksichtigt, indem beispielsweise die Kanalleistungsfähigkeit vom Niederschlag abgezogen wurde – unter der vereinfachten Annahme, dass der Kanal stets über die volle Leistungsfähigkeit verfügt (z. B. in Dortmund, Unna und Remscheid). Oder aber es wurden noch detailliertere Ansätze verfolgt, bei denen das Kanalnetz und der Oberflächenabfluss direkt miteinander gekoppelt wurden und darüber Prozesse wie Kanalüberstau und Abfließen dynamisch berücksichtigt werden konnten (z. B. in Solingen und Lübeck).

Tabelle 3: Ausgewählte Charakteristika der Starkregengefahrenkarten der Fallstudienstädte

Fallstudie	Gebiet	Anzahl Szenarien	T [a]	Niederschlag [mm]	Dauerstufe [min]	Kanalnetz-berücksichtigung
Köln	Stadtweit	3	20	36,6	60	nein
			50	43,1		
			100	48,0		
Münster	Stadtausschnitt	1	--	90,0	60	nein
Remscheid	Stadtweit	1	100	52,0	60	Ja
Dortmund	Stadtausschnitt	1	--	90,0	60	Ja
Unna	Stadtausschnitt	1	--	90,0	60	Ja
Solingen	Gräfrath: Stadtausschnitt	1	50	50,0	60	Ja
	Weinsberger Bach: Stadtausschnitt	1	30	43,1		
	Krausen: Stadtausschnitt	5	2	22,4		
			5	30,3		
			20	42,9		
			50	50,0		
			100	56,0		
Bremen	Stadtweit	5	10	27,0	60	nein
			20	30,6		
			30	32,7		
			50	35,4		
			100	39,0		
Lübeck	St. Lorenz Süd: Stadtausschnitt	1	100	26,0	10	Ja

Fallstudie	Gebiet	Anzahl Szenarien	T [a]	Niederschlag [mm]	Dauerstufe [min]	Kanalnetz-berücksichtigung
	St. Jürgen: Stadtausschnitt	1	100	26,0	10	Ja

© Köln: Stadtentwässerungsbetriebe Köln; Münster: Stadt Münster; Remscheid: Stadt Remscheid; Solingen: Technische Betriebe Solingen; Dortmund: Emschergerossenschaft, Essen; Unna: Lippeverband, Essen; Bremen: Projekt KLAS – KlimaAnpassungsStrategie Extreme Regenerereignisse der Freien Hansestadt Freie Hansestadt Bremen (www.klas-bremen.de); Lübeck: FH Lübeck (LSA)

Insgesamt zeigt sich, dass die Starkregengefahrenkarten der verschiedenen Fallstudien sehr heterogen sind (vgl. Tabelle 3). Gründe dafür sind vor allem in den unterschiedlichen Zielsetzungen und Herangehensweisen zur Erstellung der Karten und folglich den jeweils unterschiedlich herangezogenen Datengrundlagen zu suchen. Für Fallstudien, die für einzelne Stadtausschnitte Gefahrenkarten erstellt haben, war es meistens Ziel, möglichst genaue Karten der Überflutungssituation zu erstellen, was insbesondere die Berücksichtigung der Wirkung des Kanalnetzes im Detail erforderte (HSB 2017). Dies bedeutet jedoch einen hohen Daten- und Rechenaufwand, wodurch die Größe des Untersuchungsgebiets durch die (begrenzt) verfügbaren Ressourcen limitiert ist. Auf der anderen Seite spielen besonders bei der Betrachtung von seltenen Starkregenereignissen, welche oberhalb der Bemessungsgrenzen der Siedlungsentwässerung liegen, die wasserstandreduzierende Wirkung der Kanalnetze eher eine untergeordnete Rolle. Bei solchen Extremereignissen kann es in kurzer Zeit, u. a. durch Eintrag von Sediment oder Schwemmgut, zum Kanalüberstau kommen, bevor die Kanalisation überhaupt ausgelastet ist (Stemplewski et al. 2015, StEB Köln & Stadt Köln 2016). Aus diesem Grund sowie der fehlenden Rechenkapazität und zum Teil fehlenden Eingangsdaten für das gesamte Stadtgebiet verzichteten die Städte Köln, Münster und Bremen wissentlich auf eine Berücksichtigung des Kanalnetzes bei der Berechnung der Starkregengefahrenkarten. Es ist jedoch zu erwarten, dass in diesen Gefahrenkarten insgesamt etwas höhere Wassertiefen angegeben und damit auch höhere potenzielle Schäden abgeschätzt werden.

Die Heterogenität der Gefahrenkarten und der dahinter liegenden Methoden hat letztendlich auch Auswirkungen auf die nachfolgenden Schadensanalysen und Versuche zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Regionen. Um die Unterschiede in den Gefahrenkarten auszugleichen, wurden nur Szenarien mit Stundenniederschlägen berücksichtigt. Zudem wurde über alle Fallstudien hinweg eine Mindestwassertiefe bei der Schadensabschätzung verwendet, d. h. erst bei Überschreitung dieser Mindestwassertiefe wird ein Schaden berechnet. Dieser (neue) Modellparameter wurde aus einer Anwendung von FLEMO-Starkregen anhand des Starkregens in Münster im Juli 2014 abgeleitet. Aus Beobachtungsdaten wurde für dieses Ereignis ein mittlerer Gesamtschaden an Wohngebäuden von 177,3 Mio. EUR ermittelt, wobei dieser „beobachtete“ Gesamtschaden eine Spannweite von 131,6 Mio. EUR bis 227,9 Mio. EUR aufweist (alle Angaben zum Preisniveau 2014; vgl. Abschnitt 2.1.2.2.3). Aus fast allen Modellvarianten resultierte eine Schadensschätzung, die innerhalb der Spannweite des „beobachteten“ Gesamtschadens lag: So ergab eine Mindestwassertiefe von 1 cm einen Gesamtschaden von 224,7 Mio. EUR, eine Mindestwassertiefe von 2 cm 192,1 Mio. EUR, eine Mindestwassertiefe von 5 cm 154,7 Mio. EUR und die Variante mit mindestens 10 cm 130,8 Mio. EUR (alle Angaben zum Preisniveau 2014). Lediglich die Variante, in der alle im Datensatz angegebenen Wassertiefen im Schadensmodell berücksichtigt wurden, ergab mit 402,5 Mio. EUR einen deutlich zu hohen Schaden.

Da die Berechnungsvariante mit einer Mindestwassertiefe von 2 cm die geringste Abweichung zum mittleren Gesamtschaden an Wohngebäuden aufwies, wurde dieser Wert für alle Fallstudien genommen. Damit konnten auch die klassifizierten Wassertiefen der Fallstudie Unna

(s. o.) gut integriert werden: Die kleinste Wasserstandsklasse mit Tiefen von 3 cm übersteigt (knapp) die Mindestwassertiefe von 2 cm. Gleiches gilt für die Fallstudie Dortmund: Auch hier beginnen die Wassertiefen im Datensatz bei 3 cm. Die Wasserstände auf den Dachflächen in Solingen gehen dadurch ebenfalls nicht in die Schadensmodellierung ein. Somit wird erst mal eine plausible Schadensabschätzung ermöglicht.

Angesichts von höheren kleineren Hindernissen in Stadtgebieten, z. B. Bordsteinkanten, könnte eine Mindestwassertiefe von 2 cm tendenziell (immer noch) zu insgesamt zu hohen Schadensschätzungen führen. Eine weitere Verbesserung ließe sich jedoch nur durch eine Verifizierung anhand weiterer vergangener Schadensereignisse erreichen. Hierfür fehlen aktuell jedoch Ereignis- und Schadensdokumentationen.

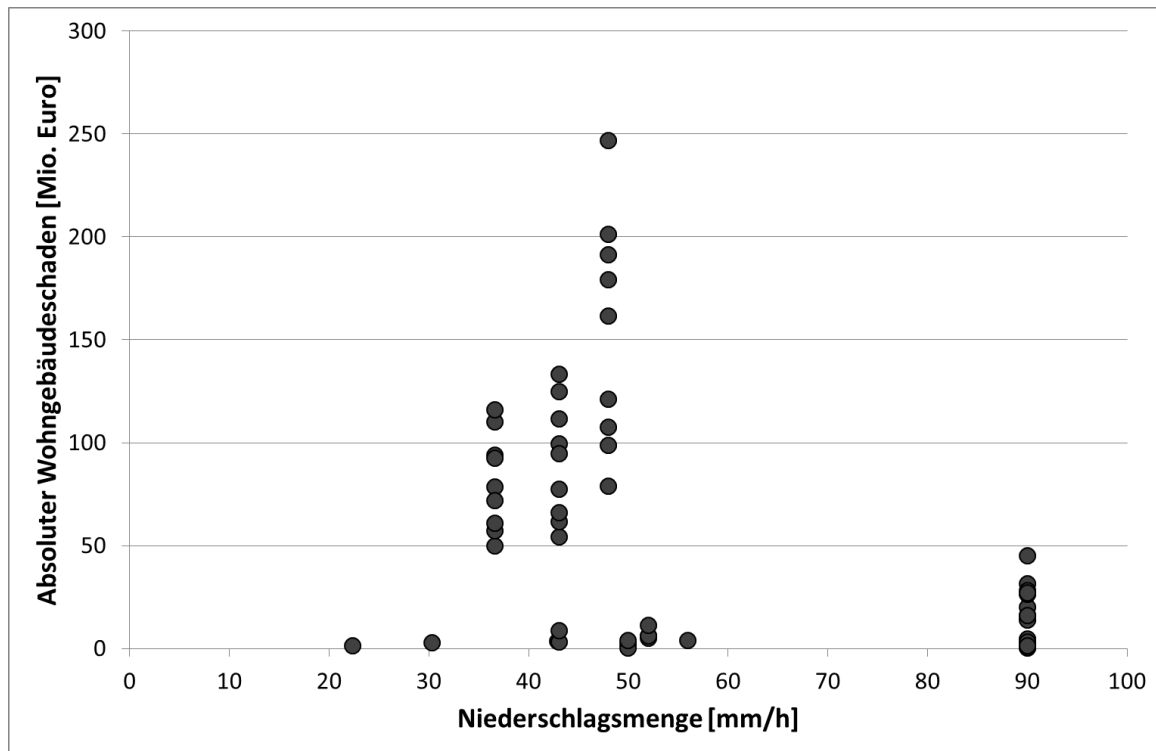
Grundsätzlich lassen sich Verfahren zur Analyse der Starkregengefährdung mit unterschiedlichem Aufwand an Daten-, Rechen- und Bearbeitungsbedarf betreiben. Wesentlich ist dabei jedoch, eine Angleichung der Methodik zur Erstellung von Starkregengefahrenkarten zu erreichen. Entsprechende Empfehlungen und detaillierte Beschreibungen zu Vorgehensweisen für die Erstellung von Starkregengefahrenkarten wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Fachbeiträgen und Leitfäden veröffentlicht, u. a. DWA (2013), DWA (2016), LUBW (2016), HSB (2017), die dabei Hilfestellung leisten können.

2.1.2.3.2 Potenzielle Wohngebäudeschäden in den Fallstudien

Potenzielle Wohngebäudeschäden durch Starkregen wurden für alle verfügbaren Szenarien mit dem Schadensmodell FLEMO-Starkregen (vgl. Abbildung 4) und einer Mindestwassertiefe von 2 cm (vgl. Abschnitt 2.1.2.3.1) abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 als absolute Wohngebäudeschäden in den einzelnen Bezirken/ Ortsteilen innerhalb der jeweiligen Überflutungsflächen für die Fallstudien in NRW dargestellt. Die Ergebnisse für Bremen sind nicht dargestellt, da diese im Weiteren zur Verifizierung der Transferfunktion herangezogen wurden (vgl. Abschnitt 2.1.2.3.3). Da Eintrittswahrscheinlichkeiten von Oberflächenabflüssen aus Starkregenereignissen derzeit statistisch nicht ausreichend genau bestimmbar sind, wurden die geschätzten potenziellen Wohngebäudeschäden zunächst den Szenarien zugrundeliegenden Niederschlagsmengen gegenübergestellt.

Wie die Gefahrenkarten, so sind auch die potenziellen absoluten Schadenshöhen sehr heterogen, da sie natürlich auch von der Größe des untersuchten Gebietes und den darin befindlichen Vermögenswerten abhängen. Insgesamt variierten die Schäden an den Wohngebäuden zwischen ca. 0,2 und 247 Mio. EUR für die überschwemmten Gebiete in den Bezirken bzw. Ortsteilen.

Abbildung 8: Potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit der betrachteten Niederschlagsmenge für die verschiedenen Bezirke/Ortsteile der Fallstudienstädte in NRW (N = 63; Mindestwassertiefe von 2 cm)



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Grundsätzlich kann man erwarten, dass bei steigenden Niederschlagshöhen ein ansteigender potenzieller Wohngebäudeschaden in den Fallstudien zu verzeichnen ist. Dieser Zusammenhang lässt sich jedoch anhand der absoluten Schadensabschätzungen nicht ableiten, da diese absoluten Schäden zwischen den untersuchten Städten und Stadtteilen aufgrund der unterschiedlichen Gebietsgrößen, Siedlungsflächen und Vermögenswerte erst mal nicht vergleichbar sind. Um eine Vergleichbarkeit der Gebäudeschäden zu erreichen und damit Unterschiede in der Schadenssensitivität (z. B. unterschiedliche Gebäudetypzusammensetzung oder auch Bodenbeschaffenheiten wie Bodennutzung, Versiegelungsgrad, Infiltrationskapazitäten etc.) untersuchen zu können, ist es erforderlich, die geschätzten Schäden mithilfe von Gebietseigenschaften zu normieren (vgl. Abschnitt 2.1.2.2.4).

Auf eine weitere Limitierung der Schadensabschätzung sei aber bereits an dieser Stelle hingewiesen: die räumliche Skala der Schadensanalyse, die Mesoskala. Die Berechnung von Wasserständen in einem Stadtgebiet steuert maßgeblich die Aussage über die Betroffenheit einzelner Gebäude durch Überflutung. Faktoren, wie die Unterkellerung und Schwellen vor einem Gebäude, die das Eindringen von Wasser behindern, können ausschlaggebend für die Flutung und damit für die Höhe der entstehenden Schäden am Wohngebäude sein. Diese sehr detaillierten Faktoren auf Gebäudeebene konnten beim Modellierungsansatz auf der Mesoskala jedoch nicht berücksichtigt werden. Da es jedoch Ziel des Vorhabens war, möglichst großräumige und wenn möglich verallgemeinerbare Aussagen zu Schadenspotenzialen treffen zu können, wurde trotz dieser Einschränkungen eine mesoskalige Schadensabschätzung durchgeführt. Insofern wurde mit flächenhaften Sensitivitätsdaten, nicht aber mit punktuellen Gebäudedaten zur Vulnerabilität gearbeitet.

Die geschätzten potenziellen Schäden an Wohngebäuden stellen demnach insgesamt eine erste Annäherung dar. Hierbei sind insbesondere die Kenntnisse zu Schädigungsprozessen durch Starkregen noch zu verbessern, da sich die Wassereintrittspfade in das Gebäude und Schäden z. B. im Vergleich zu Flusshochwasser durchaus unterscheiden, aber wenige Informationen dazu vorliegen (Rözer et al. 2016). In diesem Zusammenhang ist ebenfalls die Ermittlung der Schadenshöhe in Abhängigkeit zur maßgeblichen Wassertiefe (Überstauhöhe) und weiterer Einflussfaktoren noch weiter zu untersuchen. Die Wassertiefe im geschädigten Gebäude, wie sie in den Schadensdaten erhoben und dokumentiert ist, entspricht bei Starkregen vermutlich nicht notwendigerweise der Wassertiefe außen am Gebäude. Bei Flusshochwasser ist die Übereinstimmung dieser beiden Werte wahrscheinlicher, was die Anwendung von Wasserstand-Schadensfunktionen erlaubt. Ob sich dieser Ansatz uneingeschränkt für die Abschätzung von Schäden durch Starkregen eignet, bedarf weiterer Untersuchungen. Daher ist eine Verbesserung der Datenlage zu Gebäudeschäden durch Starkregen zur Ableitung von Schadensmodellen dringend erforderlich. Zudem zeigte sich in den Starkregengefahrenkarten, dass ca. 90 % aller Wasserstände im Bereich unterhalb von 50 cm (über der Geländeoberfläche) lagen. Daraus lässt sich ein Bedarf an Schadensmodellen für niedrige Wasserstände ableiten. Allerdings ist zu beachten, dass insbesondere die Modellierung niedriger Wasserstände mit Unsicherheiten behaftet ist, da diese Wasserstände bereits im Bereich der Modellfehler liegen können.

Zusammenfassend lassen sich anhand der bisherigen Ergebnisse folgende Erkenntnisse als Zwischenfazit ziehen: Für eine vergleichende Schadensanalyse für Starkregen ist eine Vereinheitlichung der Methoden zur Erstellung der Gefahrenkarten erforderlich. Hierfür sollten insbesondere bereits vorhandene Empfehlungen und einschlägige Leitfäden herangezogen werden. In diesem Zusammenhang kann es unter Umständen sinnvoll sein, die Schadenspotenzialanalyse differenziert nach der Art der Berücksichtigung des Siedlungsentwässerungssystems zu betrachten (mit/ohne Berücksichtigung), da unterschiedlich genau modellierte Wasserstände in den Starkregengefahrenkarten die Analyseergebnisse beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund ist es für eine Vergleichbarkeit und eine mögliche regionale Übertragbarkeit der modellierten Gebäudeschäden essenziell, die Schäden vorher zu normieren. Nicht zuletzt ist es aufgrund der allgemeinen Unsicherheiten bezüglich der Schadensmodelle und Daten von großer Wichtigkeit, die Ergebnisse der Schadensmodellierung anhand von Informationen vergangener Niederschlagsereignisse und daraus resultierenden Schäden besser abzusichern.

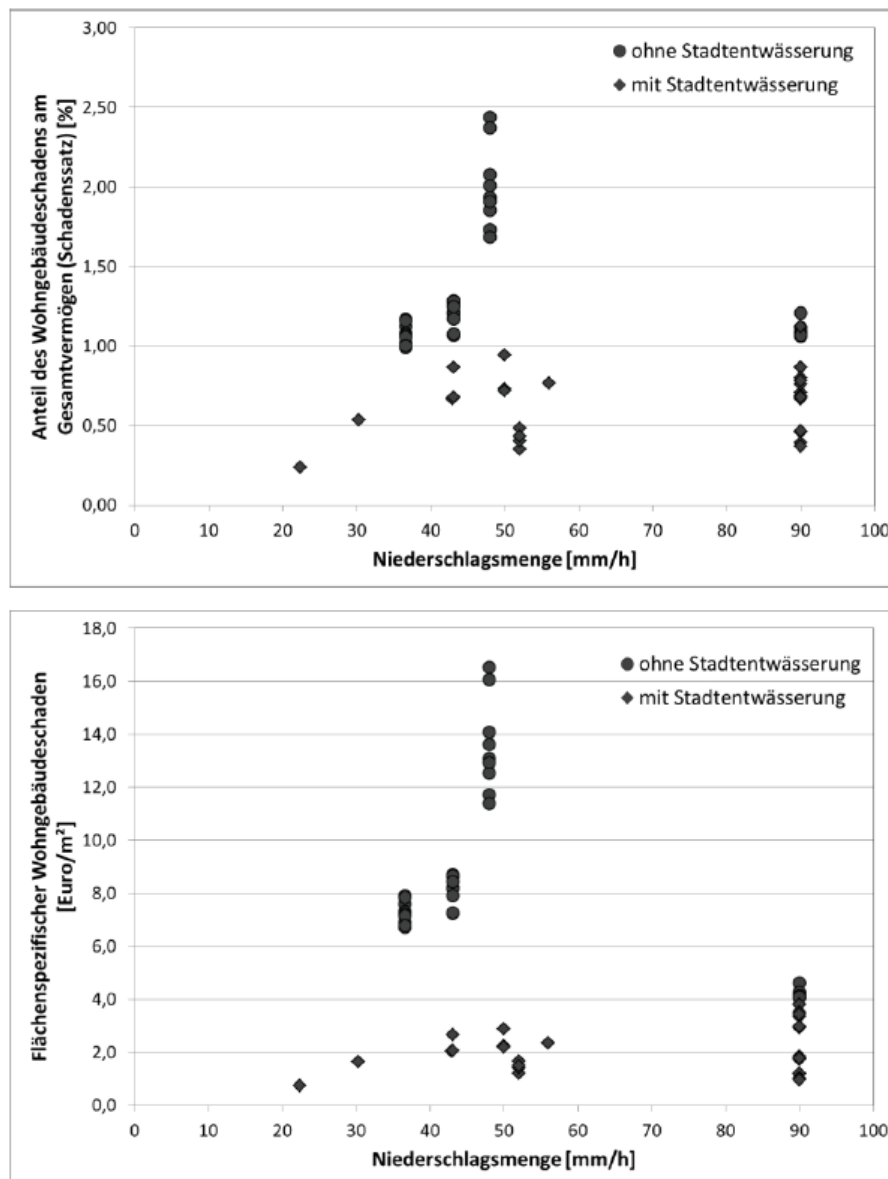
2.1.2.3.3 Regionale Übertragbarkeit der Fallstudienresultate

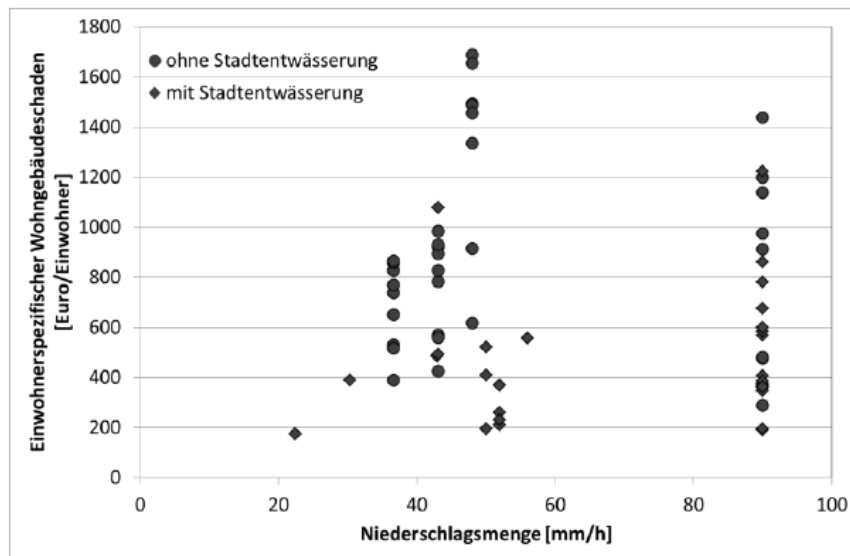
Um die Fallstudienresultate auf ein größeres Gebiet übertragen zu können, müssen die Ergebnisse der Fallstudien zunächst durch Normierung vergleichbar gemacht werden. Sodann ist eine Transferfunktion zu entwickeln, die in Abhängigkeit von Ereignis- oder Gebietseigenschaften eine Übertragung der (normierten) Fallstudienresultate erlaubt. Das für dieses Vorhaben realisierte Regionalisierungsverfahren wurde in Abschnitt 2.1.2.2.4 beschrieben.

Der erste Schritt besteht aus einer Normierung der absoluten Schäden mit Eigenschaften der Risikogebiete. Das Ergebnis zeigt Abbildung 9, und zwar differenziert für Fallstudien, in denen der Effekt der Stadtentwässerung bei der Erstellung der Starkregengefahrenkarten berücksichtigt bzw. vernachlässigt wurde. Man sieht zum einen, dass die Ergebnisse für die unterschiedlichen Ortsteile durch die Normierungen zusammenrücken und sich zum Teil durchmischen (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Zum anderen ist zu erkennen, dass insbesondere die flächenspezifischen Schäden in Fallstudien, die die Stadtentwässerung bei der Erstellung der Gefahrenkarten vernachlässigt haben, etwas höhere normierte Schäden aufweisen als Fallstudien, die die Stadtentwässerung berücksichtigt haben. Eine Abhängigkeit

der normierten Schäden von der Niederschlagsmenge ist jedoch in keiner Variante zu erkennen. Daher wurde mithilfe einer Korrelationsanalyse die Abhängigkeit der normierten Schäden von anderen Größen getestet. Da es insgesamt um eine Worst-Case-Abschätzung geht, wurde ab diesem Schritt nur noch das jeweils maximale Szenario pro Ortsteil bzw. Bezirk berücksichtigt.

Abbildung 9: Normierte potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit von der betrachteten Niederschlagsmenge für die verschiedenen Bezirke/Ortsteile der Fallstudienstädte in NRW (N = 63; Mindestwassertiefe von 2 cm). Die Normierung erfolgte pro Risikogebiet mit dem Gesamtwohnvermögen (oben), der Siedlungsfläche (Mitte) und der Einwohnerzahl (unten).





© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 4 dargestellt. Insgesamt zeigen alle drei Schadensindikatoren (mittlere) negative Korrelationen mit der Niederschlagsmenge, aber (hohe) positive Korrelationen mit allen Gebietseigenschaften. Die höchsten Korrelationen zeigt der flächenspezifische Schaden: Neben einer hohen Korrelation mit der Anzahl der Einwohner ergeben sich ebenfalls sehr hohe Korrelationen mit dem Gesamtwohnvermögen und dem flächenspezifischen Wohnvermögen. Nicht gezeigt ist, dass auch die drei Schadensindikatoren untereinander korrelieren.

Tabelle 4: Korrelationen nach Pearson zwischen normierten potenziellen Wohngebäudeschäden durch Starkregen und Eigenschaften der Risikogebiete in den Fallstudien (N = 41; nur maximales Szenario pro Ortsteil/Bezirk berücksichtigt)

Normierter Schaden	Niederschlagsmenge	Gesamtwohnvermögen	flächenspez. Wohnvermögen	Siedlungsfläche	Einwohner
Schadenssatz	-0,651	0,830	0,891	0,711	0,873
Flächenspez. Schaden	-0,630	0,889	0,949	0,765	0,938
Einwohnerspez. Schaden	-0,627	0,772	0,653	0,745	0,599

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Alle Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (einseitig) signifikant.

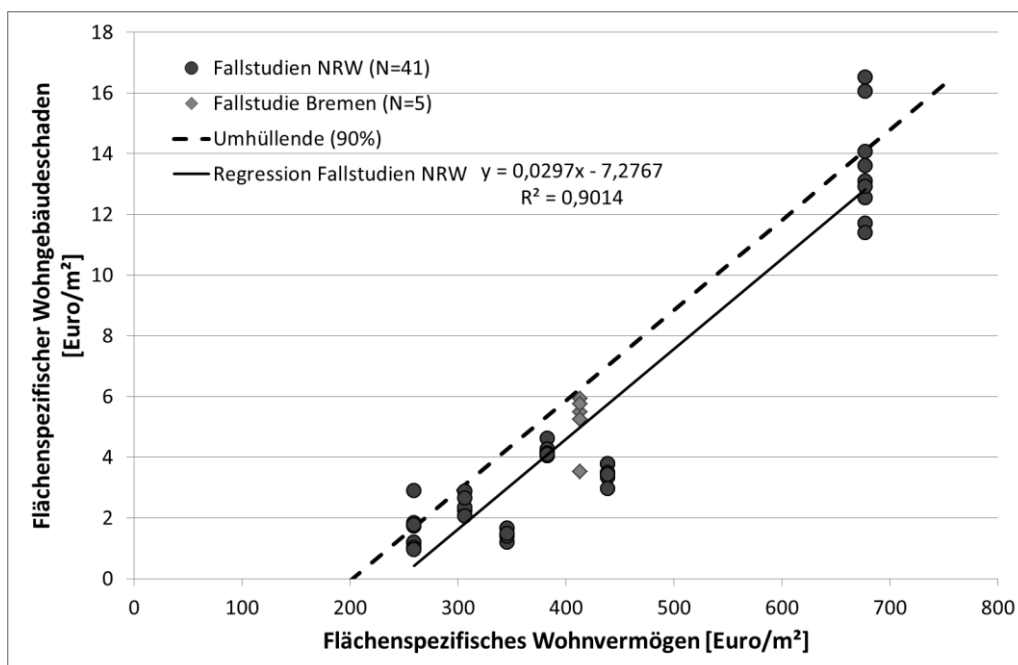
Die insgesamt höchste Korrelation ergibt sich für den flächenspezifischen Schaden und das flächenspezifische Wohnvermögen (vgl. Tabelle 4). Dieses Ergebnis wurde auch mit anderen Teildatensätzen (d. h. mit allen Szenarien, mit/ohne Fallstudie Bremen und bei Differenzierung zwischen Berechnungen mit/ohne Stadtentwässerung) erzielt. Daher wurde für dieses Paar eine Regressionsanalyse mit nachfolgender Parallelverschiebung so durchgeführt, dass 90 % der Wertepaare unter der Umhüllenden liegen. Das Ergebnis dieses Schrittes zeigt Abbildung 10. Aus der Umhüllenden ergibt sich folgende Transferfunktion:

$$\text{Flächenspezifischer Schaden [EUR/m}^2\text{]} = 0,0297 \cdot \text{flächenspezifisches Wohnvermögen [EUR/m}^2\text{]} - 6$$

Die resultierende Umhüllende impliziert, dass Starkregenschäden erst in Gebieten auftreten, deren flächenspezifischer Vermögenswert 200 EUR/m² übersteigt. Dies erscheint plausibel: Gebiete mit geringeren flächenspezifischen Vermögenswerten sind in der Regel ländliche Gebiete, in denen der Niederschlag auf mehr unversiegelte Fläche trifft und daher leichter infiltriert.

In Abbildung 10 sind auch die Wertepaare für die Fallstudie Bremen dargestellt. Diese wurden bei der Regressionsanalyse nicht berücksichtigt, fügen sich aber sehr gut in das Gesamtbild ein und bestätigen daher die Anwendbarkeit der Transferfunktion.

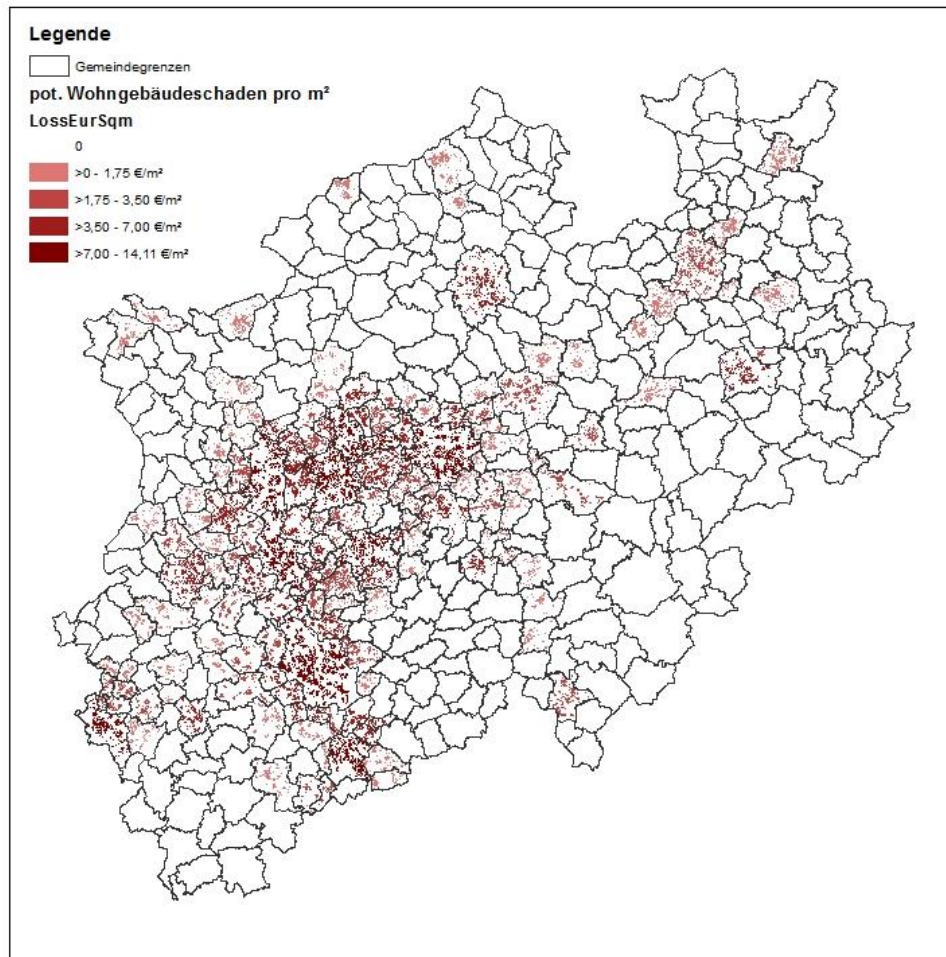
Abbildung 10: Transferfunktion für potenzielle flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in Abhängigkeit vom flächenspezifischen Wohnvermögenswert des Risikogebietes



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

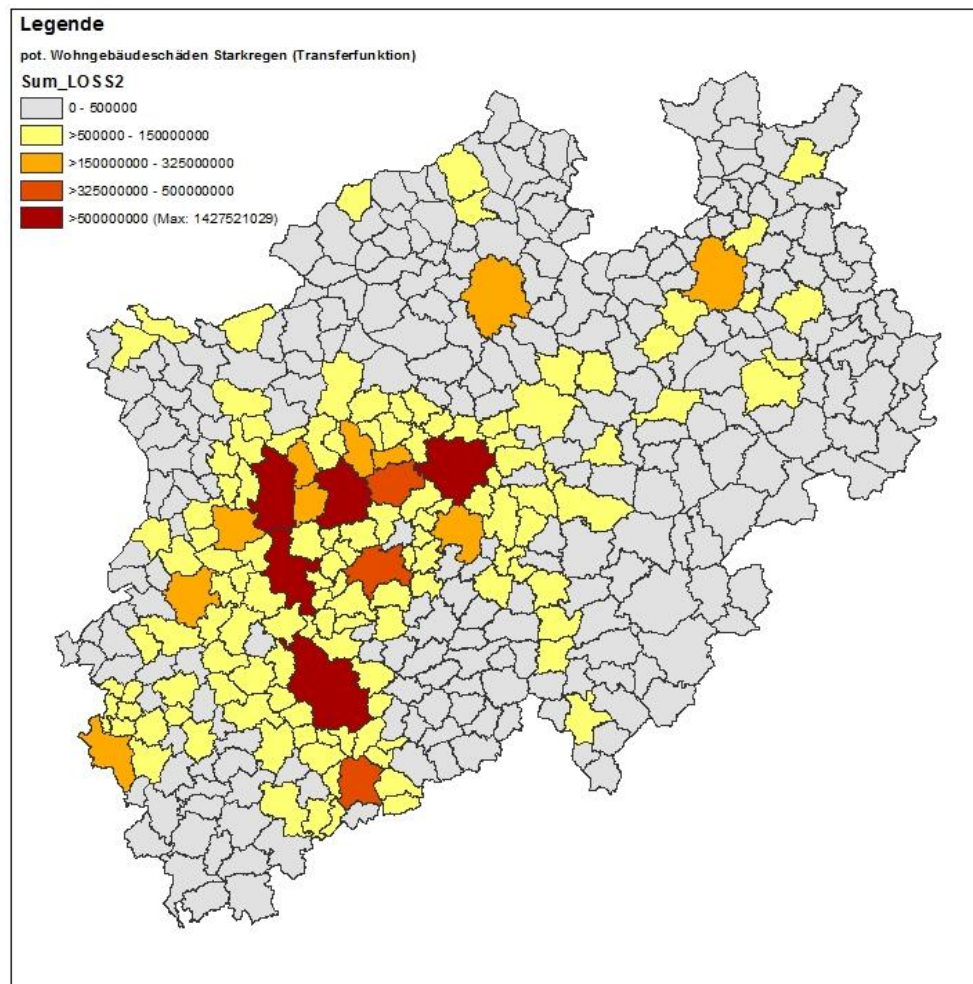
Für eine flächendeckende Abschätzung des potenziellen Wohngebäudeschadens in ganz NRW wurde die so abgeleitete Transferfunktion auf den Datensatz mit flächenspezifischen Wohnvermögenswerten angewendet. Die Ergebnisse sind flächenspezifisch in Abbildung 11 und aufsummiert pro Gemeinde in Abbildung 12 dargestellt. Während den ländlichen Gemeinden (mit einem flächenspezifischen Wohnvermögen <200 EUR/m²) gar kein Schaden zugeordnet wird, zeigen urbane Gebiete in Mittel- und Großstädten deutlich höhere potenzielle Schäden.

Abbildung 11: Potenzielle flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden durch Starkregen in NRW



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Abbildung 12: Potenzielle Schäden an Wohngebäuden durch (extreme) Starkregen in NRW pro Gemeinde (abgeleitet mithilfe einer Transferfunktion)



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Wenn man alle in Abbildung 12 dargestellten potenziellen Schäden pro Gemeinde aufsummiert, erhält man für NRW eine Summe von 10,632 Mrd. EUR. Es sei darauf hingewiesen, dass dieser Schaden nie durch ein einzelnes Starkregenereignis verursacht werden könnte, da ein solches Ereignis flächendeckend in ganz NRW auftreten müsste. Dies ist bei konvektiven Ereignissen nicht zu erwarten. Der Wert gibt eine Größenordnung für das Risikopotenzial an und soll in einem letzten Schritt plausibilisiert werden. Dazu wurden die flächenspezifischen und einwohnerspezifischen Schäden pro Ortsteil/Bezirk und das jeweils maximale Szenario ausgewählt und der Median für die normierten Schäden über alle Fallstudien bzw. Bezirke hinweg ermittelt. Dies ergab einen flächenspezifischen Schaden von 3,51 EUR/m² und einwohnerspezifischen Schaden von 582 EUR/Einwohner. Diese Median-Werte wurden dann mit der Gesamtsiedlungsfläche in NRW (3820 km²; Stand: 2007 aus CC-LandStraD) bzw. der Gesamteinwohnerzahl von NRW (17,57 Mio.; Stand 2014) multipliziert. Dies ergab ein Risikopotenzial durch Starkregen für Wohngebäude von 13,408 Mrd. EUR bzw. 10,227 Mrd. EUR. Das Risikopotenzial, das durch die Transferfunktion ermittelt wurde, liegt also in derselben Größenordnung, aber aufgrund der Vernachlässigung der ländlichen Gebiete eher am unteren Rand. (Für eine alternative Transferfunktion, die analog zu Abbildung 10 zwischen dem Schadenssatz und dem flächenspezifischem Wohnvermögen aus den Fallstudien entwickelt wurde und direkt durch den Nullpunkt geht (Schadenssatz = flächenspezifisches

Wohnvermögen [EUR/m²] * 0,000034), ergibt sich für NRW übrigens ein etwas höheres Risikopotenzial von 12,585 Mrd. EUR.)

Insgesamt ergibt die Abschätzung mit einem flächenspezifischen Schaden von 3,51 EUR/m² und der Gesamtsiedlungsfläche (von 2007) das höchste Risikopotenzial. Da für die Siedlungsflächen durch CC-LandStrad eine Zukunftsprojektion bis 2030 vorliegt, wurde dieses abschließend verwendet, um die Änderung des Risikopotenzials aufgrund von sozioökonomischen Änderungen abzuschätzen. Zwischen 2007 und 2030 ergibt sich laut CC-LandStrad ein Zuwachs an Siedlungsflächen von 22.265 ha (ca. 968 ha pro Jahr). Mit dem flächenspezifischen Schaden von 3,51 EUR/m² entspricht dieser Zuwachs an Siedlungsfläche einem jährlichen Zuwachs des Risikopotenzials von 33,98 Mio. EUR. Zwischen 2007 und 2030 steigt die Siedlungsfläche in NRW insgesamt um 5,8 % und das Risikopotenzial von Starkregen auf 14,190 Mrd. EUR (in Preisen von 2016).

Die Bevölkerungsprognose für NRW liefert steigende Bevölkerungszahlen: Bis 2030 soll die Bevölkerung auf 17,71 Mio. anwachsen.⁵ Mit einem einwohnerspezifischen Schaden von 582 EUR/Einwohner erhält man einen Zuwachs des Risikopotenzials um 0,78 % auf 10,307 Mrd. EUR.

2.1.2.3.4 Szenario: Anpassungsmaßnahme Bauvorsorge

In diesem Abschnitt soll betrachtet werden, in welchem Umfang potenzielle Wohngebäudeschäden durch Anpassungsmaßnahmen wie die Bauvorsorge verringert werden können. Anhand empirischer Daten wurde ermittelt, dass sich der potenzielle Gebäudeschaden durch einen optimalen Vorsorgezustand (sehr gute Bauvorsorge und keine Kontamination des Wassers) im Vergleich zum durchschnittlichen Vorsorgezustand um ca. 36 % reduzieren lässt (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Damit ergibt sich folgende Wirkung von Bauvorsorge in den Bezirken bzw. Ortsteilen der Fallstudien aus NRW: Der Median des flächenspezifischen potenziellen Wohngebäudeschadens (bezogen auf die bebaute Fläche: ATKIS-Objektarten „Wohnbaufläche“ und „Fläche gemischter Nutzung“) fällt von 3,51 EUR/m² auf 2,55 EUR/m², der einwohnerspezifische Schaden reduziert sich von 582 EUR/Einwohner auf 370 EUR/Einwohner. Für die oben dargestellten Abschätzungen für NRW reduziert sich damit das Risikopotenzial 2030 auf 10,309 Mrd. EUR (auf Basis der Flächenentwicklung) bzw. auf 6,552 Mrd. EUR (auf Basis der Bevölkerungsprognose).

Diese Werte zeigen, dass die Durchführung von privater Bauvorsorge Wohngebäudeschäden deutlich reduzieren kann. Ein weiterer Ausbau solcher Maßnahmen ist insbesondere von Bedeutung, da, anders als bei Flusshochwasser, potenziell jeder von Schäden durch Starkregen betroffen sein kann. Um Menschen noch mehr für das Thema Bauvorsorge zu sensibilisieren, wäre ein weiterer Ausbau von Informationskampagnen und Angeboten zur Eigenvorsorge durch die öffentliche Hand oder gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit der Versicherungswirtschaft wünschenswert, insbesondere in Regionen mit bisher wenig oder ohne Überflutungserfahrung. In dem Zusammenhang bietet der vom HochwasserKompetenzCentrum entwickelte Hochwasserpass⁶ eine mögliche Unterstützung, über den Hauseigentümer einen Risiko-Check des eigenen Gebäudes für verschiedene Gefahren (u. a. Flusshochwasser und Starkregen) und Schwachstellen durchführen lassen können. Dieses Instrument kann dazu beitragen, die Durchführung von Vorsorgemaßnahmen zu verbessern, und sollte von Banken und Versicherungen stärker anerkannt werden (Thieken et al. 2016b). Ferner wäre es eine Überlegung, Beratungsangebote optimaler zu bündeln. Beispielsweise könnten Energieberater

⁵ Quelle: Landesbetrieb für Information und Technik, NRW; RVR-Datenbank. Bevölkerungsprognose, Stand 2014.

⁶ <https://www.hochwasser-pass.com/>

oder Berater zur Verbesserung der Einbruchssicherheit des Hauses auch den Schutz vor Hochwasser oder Überflutungen durch Starkregen in ihr Beratungsangebot aufnehmen. Bei der Beratung zum Hochwasserpass wird diese Beratungskombination bereits so gehandhabt.

Weiterhin wurde im Rahmen des im Vorhaben durchgeführten Fachworkshops am 11.09.2017 in Berlin mit Vertretern aus der Verwaltung (Bund, Länder, Kommunen), Forschung und (Versicherungs-) Wirtschaft mit Bezug zum Thema Klimaanpassung für Starkregen- und/oder Sturmflutereignisse erörtert, dass in den Kommunen das Thema Klimaanpassung noch nicht verankert ist und meist unter dem Klimaschutz subsumiert wird. Zudem fehle es in den Kommunen häufig an Fachkräften, finanziellen Mitteln und rechtlichen Grundlagen, um Anpassungsmaßnahmen effektiv umzusetzen. Um eine optimale Ausführung von Anpassungsmaßnahmen zu gewährleisten, müssten vor allem die Zuständigkeiten des Bundes, der Bundesländer und der Kommunen klarer formuliert werden. In Ergänzung dazu wären insgesamt bessere Kenntnisse und leicht zugängliche Informationen zu möglichen Förderprogrammen unterstützend. An der Stelle könnte die Anzahl der Abrufe eines Förderprogramms nach einem Extremereignis als interessanter Hinweis für ein verändertes Interesse an der Bauvorsorge dienen. Dies könnte auch indikativ für die Wirksamkeit der vorhandenen Förderprogramme sein.

2.1.2.4 Handlungsempfehlungen

Aus der Analyse der Wirkungskette „Starkregenschäden an Wohngebäuden“ ergeben sich verschiedene Handlungsempfehlungen.

- ▶ Für (vergleichende) Schadenspotenzialanalysen ist eine Vereinheitlichung der Methodik zur Erstellung der Gefahrenkarten unbedingt anzuraten, da die Heterogenität der zugrunde liegenden Methoden die darauf aufbauenden Ergebnisse der Schadensanalyse beeinflusst. Da viele Kommunen Starkregengefahrenkarten im Zuge von Klimaanpassungsprogrammen erstellen, könnte der Bund in entsprechenden Förderprogrammen Qualitätsstandards etablieren. Dabei sollten bereits veröffentlichte Empfehlungen und Leitfäden zur Erstellung von Gefahrenkarten, beispielsweise der DWA, herangezogen werden.
- ▶ Für eine Verbesserung der Schadensabschätzung und Risikoanalyse besteht weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Untersuchung von Schädigungsprozessen an Wohngebäuden durch Starkregen sowie der Weiterentwicklung und insbesondere der Validierung von verwendeten Schadensmodellen.
- ▶ Für eine verbesserte Schadensabschätzung ist eine systematische und standardisierte Erfassung von Niederschlagscharakteristika, überfluteten Stadtgebieten sowie entstandenen Gebäudeschäden in Verbindung mit allgemeinen Gebäudecharakteristika nach Starkregenereignissen anzustreben. Eine bessere Dokumentation von Schäden durch Naturgefahren ist insgesamt für die Umsetzung des Sendai-Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge (Sendai-Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030) notwendig. Die Dokumentation von Starkregenereignissen und deren Schäden durch die Kommunen unter Berücksichtigung bundesweiter Leitlinien zur Erfassung (z. B. erstellt durch die LAWA) könnte hier einen wichtigen Baustein bilden.
- ▶ Multipliziert man die errechneten potenziellen Schäden mit der Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Gefahrenkarte, erhält man dadurch einen Schadenserwartungswert. Dieser

gibt den statistisch zu erwartenden jährlichen Schaden an und ist eine zentrale Größe für die ökonomische Bewertung von Maßnahmen im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen. Aufgrund dessen wäre es prinzipiell nützlich, einen Schadenserwartungswert zu berechnen. Wie die in Tabelle 3 gelisteten Ergebnisse jedoch deutlich zeigen, ist eine solche Berechnung aufgrund der Datengrundlage nur für einzelne Fallstudien möglich. Um die Datengrundlage nicht weiter zu verkleinern, wurde daher darauf verzichtet. Stattdessen wurden aus allen Fallstudien die maximalen Szenarien ausgewählt, und es wurde in Sinne einer Worst-Case-Analyse eine Transferfunktion entwickelt. Die Validität des Verfahrens ist weiter zu untersuchen. Insbesondere überrascht der hohe Einfluss des flächenspezifischen Wohnvermögens auf die geschätzten Schäden. Daher sind in Zukunft bessere Verfahren zur räumlichen Verteilung des Wohnvermögens (Disaggregation) durch die Forschung zu entwickeln. Auch die Methoden zur Abschätzung des Wohnvermögens sollten in der Forschung und in Forschungsprojekten des Bundes und der Länder zu den Auswirkungen des Klimawandels einen höheren Stellenwert erhalten.

- **Szenario Anpassung Bauvorsorge:** Die Durchführung von privater Bauvorsorge kann Wohngebäudeschäden deutlich reduzieren und stellt neben dem technischen Schutz eine wichtige Komponente im Hochwasserrisikomanagement dar. Ein Ausbau der privaten Bauvorsorge ist insbesondere von Bedeutung, da eine Gefährdung durch Starkregen nicht von der geographischen Lage abhängig ist, sondern vielmehr potenziell jedervon Schäden betroffen sein kann. Für einen Privathaushalt stellt die Durchführung von Objektschutzmaßnahmen entsprechend eine zusätzliche Schutzmöglichkeit dar, die von staatlicher Seite aus noch umfassender unterstützt und gefördert werden sollte. In diesem Zusammenhang bietet der durch das HochwasserkompetenzCentrum e.V. entwickelte Hochwasserpass für Privathaushalte und Unternehmen eine gute Möglichkeit zur Unterstützung. Die Förderung der Anwendung dieses Instrumentes könnten Länder und Kommunen verstärkt in Risikomanagementplänen berücksichtigen. Zudem gilt es, die Zuständigkeiten und Ressourcen für Klimaanpassung in den verschiedenen Verwaltungsebenen klarer zu formulieren und zu stärken sowie mehr und leicht zugängliche Informationen zu Fördermöglichkeiten bereitzustellen.

2.1.3 Wirkungskette: Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten

2.1.3.1 Einleitung

Vergangene Hochwasser in Deutschland haben gezeigt, dass derartige Ereignisse zu hohen Infrastrukturschäden führen können: Während des Hochwassers 2002 machten Schäden an kommunaler und öffentlicher Infrastruktur mehr als 40 % der Gesamtschäden in Sachsen aus (Sächsische Staatskanzlei 2003). Beim Hochwasser 2013 lag dieser Anteil mit 60 % nochmals höher (Thielen et al. 2016b).

Neben dem hohen Schadenspotenzial werden viele Infrastrukturelemente, wie z. B. die Schieneninfrastruktur, als sogenannte „kritische Infrastrukturen“ eingestuft. Dabei handelt es sich um „Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“ (BMI 2009; S. 3).

Gerade auch aufgrund der Kritikalität von Infrastruktur führt deren Beschädigung oftmals zu weiter-führenden negativen ökonomischen Auswirkungen. Während des Hochwassers 2013 waren zeitweise bis zu 60 Strecken der Deutschen Bahn gesperrt oder von Störungen betroffen. Zudem wurde durch den Deichbruch bei Fischbeck die Hochgeschwindigkeitstrasse bei Stendal beschädigt, die Berlin mit Hannover, den Städten des Ruhrgebietes und Süddeutschlands verbindet, und musste für annähernd fünf Monate gesperrt werden (Thielen et al. 2016b). In Folge dessen verlängerten sich Fahrzeiten; mehr als 10.000 Passagier- und mehr als 3000 Frachtzüge mussten umgeleitet werden. Aufgrund der längeren Reisezeiten entschied sich zudem etwa ein Drittel der Bahnreisenden für andere Verkehrsmittel (Thielen et al. 2016b). Dies zeigt, dass Hochwasserereignisse ein signifikantes Risiko für die Bahninfrastruktur darstellen können.

Inwieweit das Schienennetz in Deutschland von Sturmfluten betroffen sein und zu welchen Schäden dies führen könnte, ist derzeit weitgehend unbekannt. Mehr Wissen darüber ist gerade auch vor dem Hintergrund der erwarteten Auswirkungen des Klimawandels erforderlich. Derzeit wird davon ausgegangen, dass es aufgrund der globalen Erwärmung zu einem Anstieg des Meeresspiegels und somit zu einer erhöhten Gefahr von Sturmfluten an Nord- und Ostseeküste kommt (Umweltbundesamt 2015, Vousdoukas et al. 2016).

Um die in dieser Wirkungskette adressierte Anfälligkeit von Schieneninfrastruktur gegenüber Sturmfluten künftig zu verringern, ist es erforderlich, sich mit den möglichen Auswirkungen auseinanderzusetzen und diese quantitativ abzuschätzen. Ziel dieser Analyse ist es, potenzielle direkte Schäden an der Schieneninfrastruktur mit Hilfe einer Schadensmodellierung für die gesamte Küstenregion Deutschlands zu berechnen.

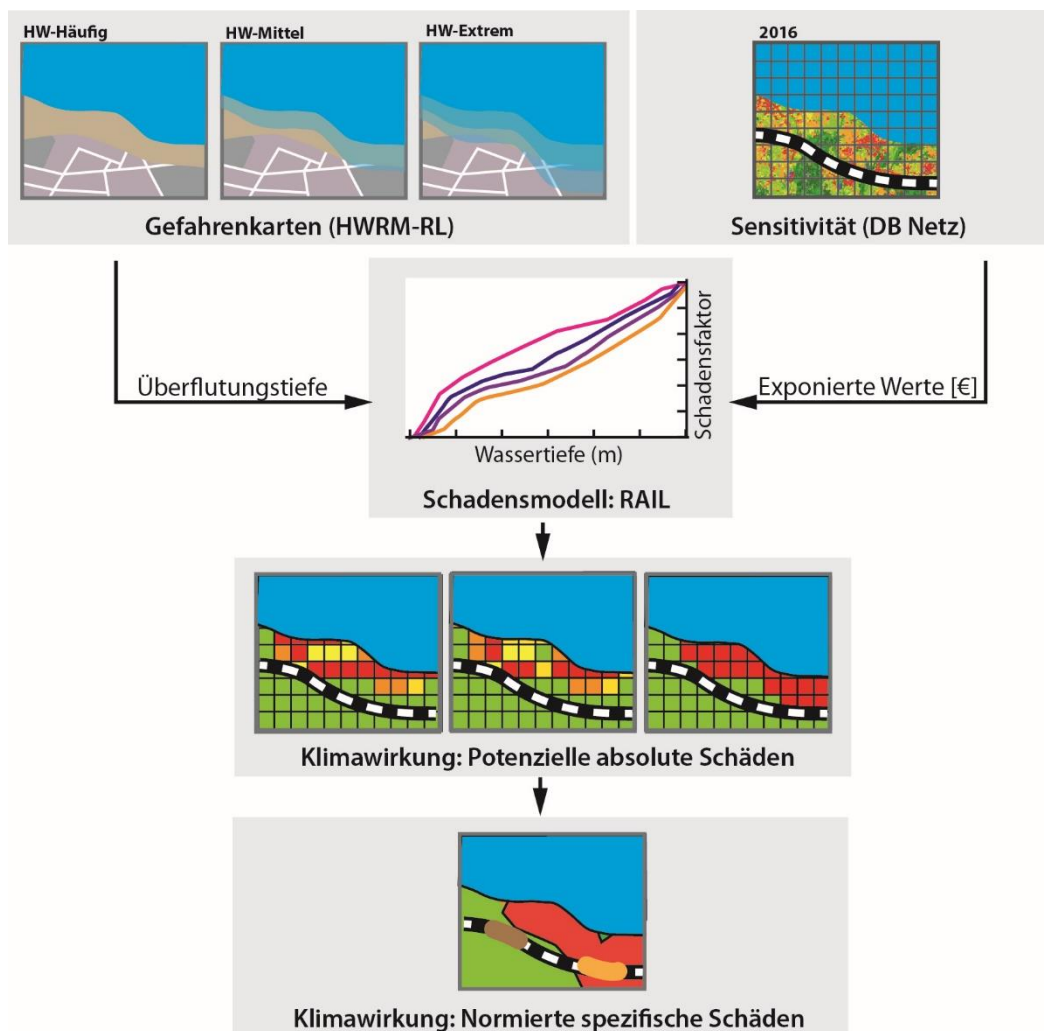
Das verwendete methodische Vorgehen sowie die Ergebnisse der Schadenspotenzialanalyse werden in den folgenden Abschnitten dargestellt und diskutiert.

2.1.3.2 Methodische Vorgehensweise

Trotz des hohen Schadenpotenzials und der Kritikalität gibt es bislang nur wenige methodische Ansätze, um potenzielle Schäden an Infrastrukturen durch Hochwasser zu berechnen. Die wenigen Modelle, die Infrastrukturelemente berücksichtigen, verwenden oftmals eine aggregierte Schadensfunktion und einen ökonomischen Einheitswert für höchst unterschiedliche Sektoren wie Straße, Schiene und Flughäfen (Kellermann et al. 2015). Schadensmodelle, die infrastrukturenspezifische Schädigungsprozesse und ökonomische Werte berücksichtigen, sind bislang nur unzureichend vorhanden (Merz et al. 2010). Für potenzielle Hochwasserschäden an der Schieneninfrastruktur, genauer: für Schäden am Regelquerschnitt einer (zweigleisigen) Eisenbahnstrecke, wurde jedoch ein solches Modell anhand empirischer Schadensdaten der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) von Kellermann et al. (2015) entwickelt und im Rahmen der vorliegenden Studie angewendet.

Die methodische Vorgehensweise zur Berechnung potenzieller Schäden an der Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt und wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Abbildung 13: Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden an Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.3.2.1 Klimatische Exposition

Wie bei anderen Wirkungsketten werden für die Modellierung von monetären Schäden an der Schieneninfrastruktur ebenfalls Informationen zu potenziellen Überflutungsflächen und -tiefen an der Nord- und Ostseeküste benötigt. Informationen zu Überschwemmungen durch Sturmfluten sind in den Hochwassergefahrenkarten enthalten, die die Bundesländer im Rahmen des ersten Bearbeitungszyklus der HWRM-RL der EU erstellt haben. Gemäß der Richtlinie haben die Länder dabei Szenarien mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten betrachtet. Laut Artikel 6 HWRM-RL soll die Hochwassergefährdung für ein häufiges, ein mittleres und ein Extremereignis ausgewiesen werden. Eine Übersicht der Gefahrenkarten, die dem Vorhaben von den Küstenländern zur Verfügung gestellt wurden, findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5 zeigt, dass sich sowohl die Anzahl als auch die grundlegende Annahmen der Szenarien zwischen den Bundesländern teils erheblich unterscheiden. Gefahrenkarten für häufige und mittlere Jährlichkeiten haben Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein erstellt. Alle drei Bundesländer definieren ein 20-jährliches Ereignis als „häufig“. Unterschiede bestehen bei dem mittleren Szenario, welches von Hamburg und Schleswig-Holstein als ein 100-jährliches Ereignis definiert wird, während Mecklenburg-Vorpommern von einem 200-jährlichen Ereignis ausgeht. Gefahrenkarten für das Extremszenario haben alle

Küstenbundesländer vorgelegt. Hinsichtlich der zugrunde gelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten gehen die Annahmen allerdings auch hier stark auseinander. Während Bremen ein Hochwasser ausweist, das statistisch alle 4000-7000 Jahre auftritt, definiert Schleswig-Holstein ein 200-jährliches Ereignis als „extrem“. Niedersachsen weist dem Extremereignis keine Eintrittswahrscheinlichkeit zu. Einige Bundesländer haben zudem Szenarien erstellt, in denen ein Versagen des Hochwasserschutzes (HWS) angenommen wurde. Diese Unterschiede sind auf verschiedene Einschätzungen der regionalen wasserwirtschaftlichen Besonderheiten durch die zuständigen Behörden zurückzuführen. Derzeit wird der Berücksichtigung regionaler Anforderungen eine höhere Bedeutung durch die Bundesländer eingeräumt als der Vergleichbarkeit zwischen den Bundesländern, die durch eine einheitliche Erstellung der Karten zu erreichen wäre.

Tabelle 5: Von den Küstenbundesländern verwendete Szenarien und Annahmen für die Erstellung der Sturmflutgefahrenkarten gemäß HWRM-RL.

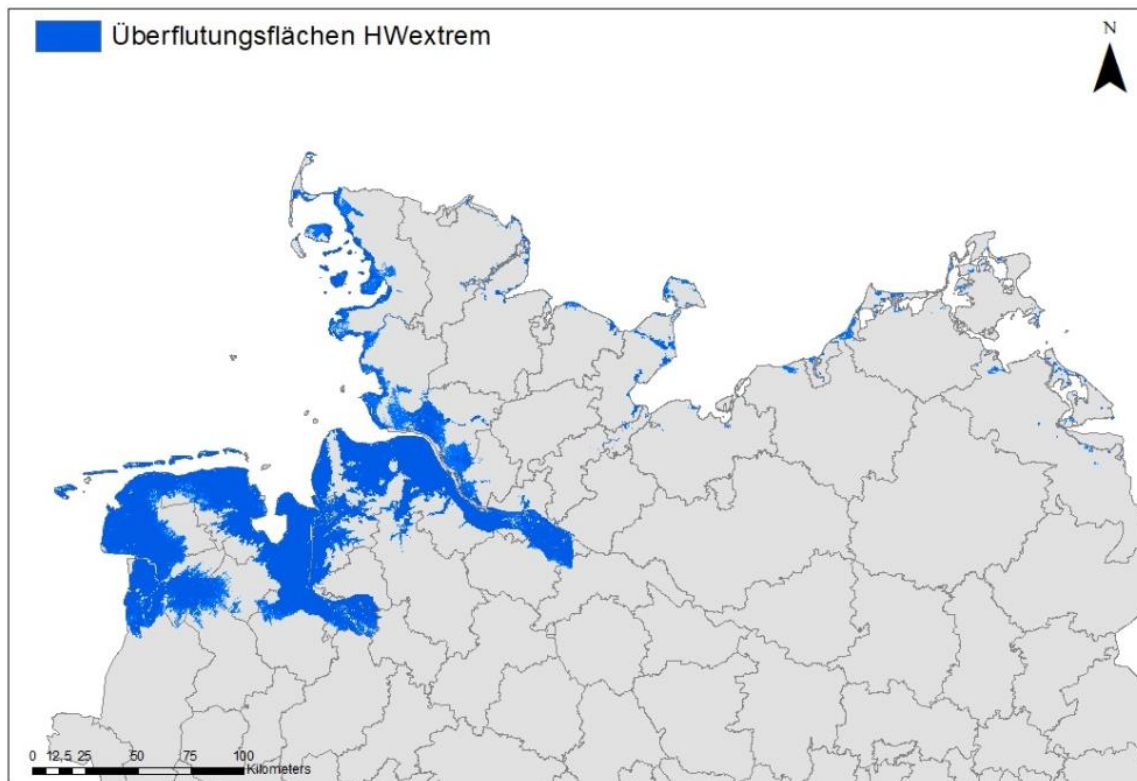
Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen	-	-	HW 4000-7000, HW 4000-7000 + ohne Wirkung HWS*
Hamburg	HW 20	HW 100	>HW 200 + ohne Wirkung HWS
Mecklenburg-Vorpommern	HW 20	HW 200	HW 200 + ohne Wirkung HWS + Zuschlag Klimaanpassung
Niedersachsen	-	-	HW extrem HW extrem + ohne Wirkung HWS
Schleswig-Holstein	HW 20	HW 100	HW 200, HW 200 + definierter Deichbruch

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

*HWS= Hochwasserschutz

Eine Übersicht der Überflutungsflächen in den Küstenbundesländern gemäß dem Extremszenario (ohne Wirkung des Hochwasserschutzes) findet sich in Abbildung 14. Abbildung 14 zeigt, dass besonders Niedersachsen potenziell von großflächigen Überflutungen betroffen sein könnte. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den ausgewiesenen Flächen in allen Bundesländern nicht um ein realistisches Einzelereignis handelt, da niemals die gesamte Küste von einem Ereignis dieser Stärke betroffen sein dürfte, sondern immer nur gewisse Abschnitte. Auch ist nicht davon auszugehen, dass der gesamte Hochwasserschutz flächendeckend versagen könnte. Vielmehr weist Abbildung 14 alle Flächen aus, die potenziell von einer extremen Überflutung betroffen sein könnten. Dies gilt es auch, bei der späteren Interpretation der Schadensschätzung zu berücksichtigen. Dass die Gefahrenkarten kein realistisches Einzelszenario darstellen, zeigt auch das Vorgehen bei der Länder übergreifenden Krisenmanagementübung (LÜKEX) (Deutscher Bundestag 2014). Im Rahmen dieser Übung wurde ein Szenario angenommen, nach dem ca. 15 % (ca. 1350 km²) der potenziell überflutungsgefährdeten Flächen des HW extrem (nach HWRM-RL) u. a. nach Deichbrüchen von Überflutungen betroffen sind.

Abbildung 14: Sturmflut-Gefahrenkarten der Küstenbundesländer für die Extremszenarien ohne Hochwasserschutz gemäß HWRM-RL



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam; Quelle: Gefahrenkarten (seeseitig) der Küstenbundesländer für die Extremszenarien ohne Hochwasserschutz gemäß HWRM-RL.

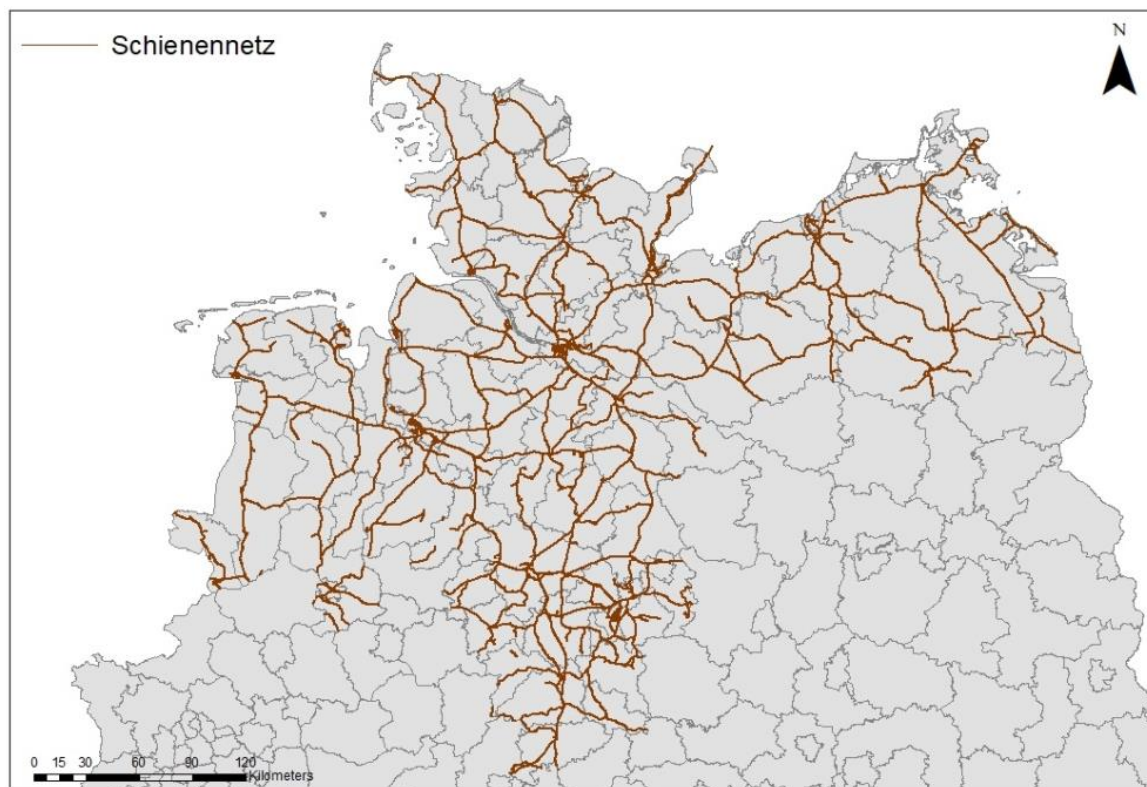
2.1.3.2.2 Sensitivität

Für die Berechnung potenzieller Sturmflutschäden an der Schieneninfrastruktur werden Informationen zu exponierten Strecken benötigt. Da es sich beim Regelquerschnitt um Linienelemente handelt, sind diese nur unzureichend in rasterbasierten Landnutzungsdaten enthalten (Bouwer et al. 2009). Aus diesem Grund wurde bei der Schadensanalyse auf Vektordaten zurückgegriffen. Für die vorliegende Arbeit wurden die öffentlich zugänglichen Daten von OpenRailwayMap⁷ verwendet, welche für Deutschland das offizielle Streckennetz der Deutschen Bahn (DB) beinhalten. Das Streckennetz in den Küstenbundesländern zeigt Abbildung 15.

Die Reparatur- und Wiederherstellungskosten für beschädigte Regelquerschnitte wurden aus der bestehenden Literatur abgeleitet. Laut Kellermann et al. (2015) belaufen sich die Wiederherstellungskosten von 100 Meter Schiene (zweigleisiges Schotterbett) auf 702.200 EUR (Preisniveau 2008). Dieser Wert beruht auf Angaben und Erfahrungen der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB). Spezifische Werte für die Bundesrepublik Deutschland konnten aus Gesprächen mit den Fachbehörden nicht abgeleitet werden. Daher wurden die Modellwerte von Kellermann et al. (2015) verwendet und mithilfe eines Baupreisindex an das Preisniveau 2016 angepasst (=764.700 EUR).

⁷ <http://www.openrailwaymap.org/>

Abbildung 15: Streckennetz der Deutschen Bahn in den Küstenbundesländern



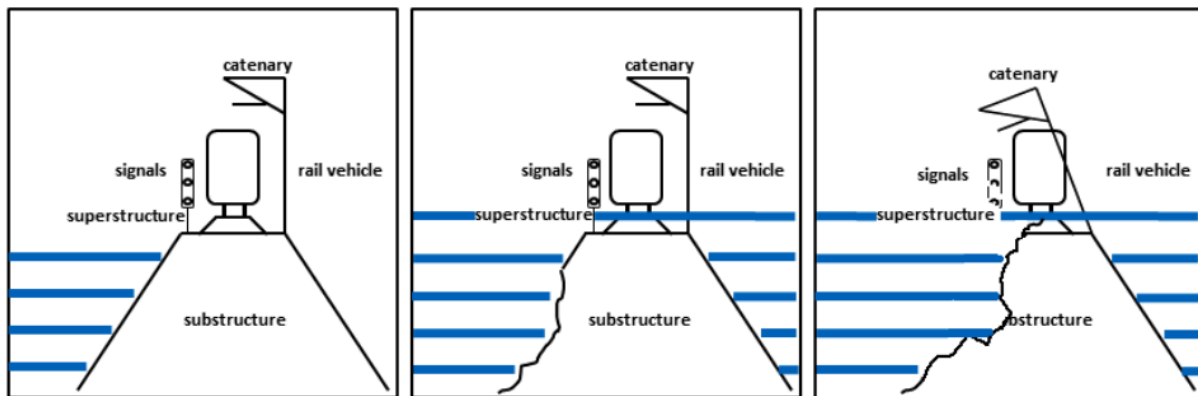
© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam; Daten des Streckennetzes aus Openrailwaymap.org.

2.1.3.2.3 Schadensmodell

Das Einwirken von Küstenhochwassern auf die Schieneninfrastruktur wurde mit Hilfe des RAIL-Modells (RAILway Infrastructure Loss) abgeschätzt (Kellermann et al. 2015). Bei RAIL handelt es sich um ein empirisch abgeleitetes Schadensmodell, welches spezifisch für Schieneninfrastruktur entwickelt wurde. Schäden werden dabei nur für die Gleisinfrastruktur (Regelquerschnitt) berechnet. Schäden an Bahnhöfen oder anderen Werten der Bahn werden von RAIL nicht erfasst.

Das RAIL-Modell unterscheidet drei Schadensklassen in Abhängigkeit der Überflutungstiefe. Dabei erfolgt die Abschätzung der Schäden in zwei Stufen. Im ersten Schritt werden die strukturellen Schäden in Abhängigkeit vom Wasserstand abgeschätzt. Dies resultiert in der Identifizierung von drei Schadensklassen (siehe Abbildung 16). In einem zweiten Schritt werden jeder Schadensklasse entsprechende finanzielle Kosten für Reparatur und Wiederherstellung zugeordnet. Die Kosten, die den drei Schadenklassen zugeordnet sind, beruhen auf Angaben und Erfahrungen der ÖBB. In der Schadensklasse 1 ist der Unterbau teilweise eingestaut, und es liegen nur geringe strukturelle Schäden vor. Kosten fallen für kleinere Reparaturen sowie eine Überprüfung der Strecken und Reinigung an. In Schadensklasse 1 wird von einem Schaden von 12.700 EUR (Preisniveau 2016) pro 100 m Schiene ausgegangen. In Schadensklasse 2 ist das Gleis komplett eingestaut, und es kommt zu substanziellen Schäden am Gleisunterbau. In dieser Schadensklasse fallen Kosten in Höhe von 147.600 EUR (Preisniveau 2016) pro 100 m Schiene an. Schadensklasse 3 umfasst zusätzlich Schäden am Gleisoberbau, wie Signalen und/oder der Oberleitung. Dieses Schadensbild erfordert eine komplette Wiederherstellung und führt zu Kosten in Höhe von 764.700 EUR pro 100 m Schiene. Eine schematische Darstellung der Schadensklassen 1 bis 3 findet sich in Abbildung 16 (von links nach rechts).

Abbildung 16: Schadensklassen des RAIL-Modells



© Kellermann et al. 2015.

Mit Hilfe des RAIL-Modells wurden die potenziellen Schäden an der Gleisinfrastruktur in den deutschen Küstenbundesländern in Abhängigkeit von Sensitivität (Schienennetz) und klimatischer Exposition (Gefahrenkarten der Länder) berechnet und anschließend auf der Ebene der Bundesländer aggregiert.

Da die absoluten Schadenswerte stark von der Größe des exponierten Streckennetzes beeinflusst werden, wurden die absoluten Schäden zusätzlich ins Verhältnis zur Länge des gesamten Streckennetzes des jeweiligen Bundeslandes gesetzt (=flächenspezifischer Schaden). Der flächenspezifische Schaden beziffert den durchschnittlichen Schaden pro hundert Meter Streckennetz und dient als Indikator, wie vulnerabel das Schienennetz des jeweiligen Bundeslandes gegenüber Sturmfluten ist.

2.1.3.2.4 Szenarien

Zukünftig kann sich das Schadenspotenzial aufgrund einer veränderten Gefährdung (klimatische Exposition) oder Sensitivität (Aus- oder Rückbau des Schienennetzes) ergeben.

Räumlich explizite Szenarien für mögliche Veränderungen im Schienennetz liegen derzeit nicht vor. Vor diesem Hintergrund wird bei der Modellierung angenommen, dass die Sensitivität über alle Zeitschritte konstant bleibt. Hieraus ergeben sich weitere Unsicherheiten, die aber gerade im Bereich der Schieneninfrastruktur zumindest für den Zeitraum bis 2040 aufgrund der langen Planungs- und Bauzeiten und der Langlebigkeit der Schieneninfrastruktur unproblematisch erscheinen. Planung und Bau der 230 km Hochgeschwindigkeitstrasse zwischen Berlin und München wurden beispielsweise im Jahr 2017 nach 26 Jahren abgeschlossen.⁸

Zudem kann es aufgrund des Klimawandels zukünftig zu einer steigenden Sturmflutgefährdung an Nord- und Ostsee kommen. Der Meeresspiegel steigt einerseits aufgrund der thermischen Ausbreitung des Meerwassers. Andererseits liefern Gletscher und die Eisschilde der Pole große Mengen von Schmelzwasser (Umweltbundesamt 2015). Gemäß dem fünften Bericht des IPCC ist der globale mittlere Meeresspiegel im Zeitraum von 1901 bis 2010 bereits um etwa 19 cm angestiegen. Derzeit deutet vieles darauf hin, dass sich der Anstieg in den letzten Jahren deutlich beschleunigt hat und bis zum Ende des Jahrhunderts nach derzeit vorliegenden Prognosen um bis zu 82 cm steigen könnte (IPCC 2013), regional aber sehr unterschiedlich ausfällt. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass heutige Aussagen zum Meeresspiegel nur vorläufigen Charakter haben, da bislang wesentliche eisphysikalische Prozesse mangels Formulierung nicht berücksichtigt wurden (BSH 2017). Ein deutlich höherer Anstieg des

⁸ <https://inside.bahn.de/vde-8-schnellfahrstrecke/>. Zuletzt aufgerufen am 5. Juli 2018.

Meeresspiegels bis zum Ende des Jahrhunderts im Falle eines RCP8.5 Szenarios von bis zu 1,70 m scheinen vor diesem Hintergrund nicht mehr ausgeschlossen (BSH 2017). Das RCP8.5 Szenario ist das Worst-Case-Szenario des IPCC. Neue Erkenntnisse wird diesbezüglich ein Sonderbericht des Weltklimarats „Ozeane und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima“ liefern, der im Jahre 2019 veröffentlicht werden soll. Dieser berücksichtigt dann auch Projektionen, die eine verbesserte Kenntnis der Eisphysik und der regionalen Verhältnisse beinhalten.

Eine höhere Gefährdung tiefliegender Küstenregionen kann sich somit sowohl aufgrund häufigerer als auch intensiverer Ereignisse ergeben und somit eine Veränderung von Überflutungsflächen und -tiefen nach sich ziehen. Während der Anstieg des Meeresspiegels auch an Nord- und Ostsee bereits gemessen wurde, ist ein Anstieg der Sturmflutintensitäten allerdings bislang nicht belegt (Umweltbundesamt 2015).

In der verwendeten Modellkette kann der Einfluss des Klimawandels auf die Sturmflutgefährdung einerseits über eine Veränderung der Überflutungsflächen und -tiefen und andererseits über sich verändernde Eintrittswahrscheinlichkeiten abgebildet werden. Da im Rahmen dieses Vorhabens keine erneute Modellierung der Gefahrenkarten der Länder unter Berücksichtigung des Klimawandels möglich war, konnte die Veränderung der Überflutungsflächen und -tiefen nicht abgebildet werden. Somit blieb die Möglichkeit, den Klimawandel über die sich zukünftig verändernden Eintrittswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen.

Welchen Einfluss der Klimawandel zukünftig auf 100-jährliche Sturmflutereignisse an Nord- und Ostsee haben kann, untersuchten Vousdoukas et al. (2016) mittels eines Ensemble aus acht Klimamodellen sowie eines hydrodynamischen 3D-Modells. Die Studie von Vousdoukas et al. (2016) wurde als Grundlage gewählt, da sie ein einheitliches methodisches Vorgehen für Nord- und Ostseeküste anwendet und somit vergleichbare Ergebnisse liefert. Diese Studie wird für das Szenario mit Klimawandel ohne Anpassung herangezogen.

Anpassungsmaßnahmen an der Schiene sind bislang nur im Rahmen der Gleiserneuerung bzw. durch eine Erhöhung des Gleisbetts möglich (Eisenbahn-Bundesamt; persönliche Kommunikation). Im Wesentlichen wird die Schieneninfrastruktur durch den technischen Hochwasserschutz, wie Deiche, geschützt. Bereits heute berücksichtigt z. B. Schleswig-Holstein bei der Ertüchtigung der Deiche den prognostizierten Anstieg des Meeresspiegels über einen „Klimazuschlag“ in Höhe von 0,5 m für die Nordseeküste und Tideelbe sowie 0,3 m für die Ostseeküste (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein 2013).

Für das Szenario Klimawandel und Anpassung wurde davon ausgegangen, dass das 100-jährliche Schutzniveau der Deiche aufgrund von Deichertüchtigungen trotz des projizierten Klimawandels erhalten bleibt. Die Risikoreduktion ergibt sich somit aus der Differenz des heutigen und zukünftigen Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert.

2.1.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Berechnung der Schäden unter Verwendung des RAIL-Modells zeigt, dass extreme Küstenhochwasser substanzielle Schäden an Schieneninfrastrukturen verursachen könnten. Tabelle 6 zeigt die geschätzten Schäden für die in Tabelle 5 aufgelisteten Szenarien. Für die häufigen Szenarien (HW20) liegen die potenziellen Schäden in den Bundesländern Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein zwischen 1,6 Mio. EUR und 14,5 Mio. EUR. Diese Werte steigen bei einem mittleren Hochwasserereignis (HW100 Hamburg; HW200 Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein) auf 15 bis 30,1 Mio. EUR. Für die

Extremszenarien steigen die Werte für diese drei Bundesländer auf bis zu mehrere hundert Mio. EUR an (z. B. 935 Mio. EUR in Hamburg). Auch in den Bundesländern, für die lediglich Extremszenarien vorliegen, können die Schäden mehrere hundert Mio. EUR betragen (z. B. Bremen oder Schleswig-Holstein). Der höchste absolute Schadenswert wird für Niedersachsen berechnet. Für das Extremszenario und die Annahme, dass der Hochwasserschutz versagt, werden dort potenzielle Schäden in Höhe von etwa 3,27 Mrd. EUR berechnet. Allerdings ist hier nochmals darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Gefahrenkarten bundeslandübergreifend nicht um realistische Einzelereignisse handelt (eine Ausnahme können die Stadtstaaten sein). Insofern stellen diese Zahlen nicht die möglichen Schäden für ein Ereignis dar, sondern eine Einschätzung, welche Werte der Schieneninfrastruktur insgesamt betroffen sein und geschädigt werden könnten.

Tabelle 6: Absolute Schäden an Schieneninfrastruktur durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen	-	-	25,8 730
Hamburg	14,5	30,1	935
Mecklenburg-Vorpommern	1,6	15,0	34,3
Niedersachsen	-	-	79,0 3.270
Schleswig-Holstein	11,6	20,8	21,5 177

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Die absoluten Schadenswerte werden stark von der Größe des exponierten Streckennetzes beeinflusst. Um die Vulnerabilität des Schienennetzes eines Bundeslandes gegenüber Sturmfluten einzuschätzen, ist es deshalb zusätzlich von Interesse, die absoluten Schäden ins Verhältnis mit der Größe des gesamten Streckennetzes des jeweiligen Bundeslandes zu setzen. Dieser flächenspezifische Schaden beziffert den durchschnittlichen Schaden pro hundert Meter Streckennetz in dem jeweiligen Bundesland. Tabelle 7 zeigt, dass Hamburg bei den häufigen und mittleren Szenarien hohe flächenspezifische Schäden im Vergleich zu Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein aufweist. Für das Extremszenario weisen Hamburg, Bremen und Niedersachsen hohe flächenspezifische Schäden auf. Allerdings ist hier wiederum auf die sehr heterogenen und somit nicht vergleichbaren Szenarien hinzuweisen (siehe Tabelle 5), denen sehr unterschiedliche Annahmen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten zugrunde liegen.

Tabelle 7: Flächenspezifische Schäden (EUR pro 100 m Streckennetz) an Schieneninfrastruktur durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien als Vulnerabilitätsmaß (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen	-	-	3.740 106.000
Hamburg	1.670	3.480	108.000
Mecklenburg-Vorpommern	60	533	1.220
Niedersachsen	-	-	953 39.500
Schleswig-Holstein	478	862	885 7.320
Mittelwert			19.600

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Aufgrund fehlender empirischer Schadensdaten fällt es schwer, die berechneten Schäden anhand konkreter Ereignisse und deren Auswirkungen auf die Schieneninfrastruktur zu validieren. Allerdings können die Ergebnisse in den Kontext anderer Studiengestellt werden. Für Niedersachsen hat der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) eine Schadenspotenzialanalyse für alle Deichverbandsgebiete an der niedersächsischen Küste vorgelegt. Basis für die Ermittlung der Schadenspotenziale bilden amtliche Landnutzungsdaten und statistische Daten. Laut dieser Studie schützen die Deiche an der Küste Niedersachsens ökonomische Werte in Höhe von 129 Mrd. EUR.⁹ Die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens berechneten 3,27 Mrd. EUR potenziellen Schäden an der Schieneninfrastruktur machen somit etwa 2,5 % der errechneten potenziell betroffenen Werte aus. Dieser Anteil liegt durchaus im Bereich der Schadenserfahrungen aus den Binnenhochwassern 2002 und 2013: 2002 betrugen die Schäden der DB ca. 1 Mrd. EUR (bei 11,6 Mrd. EUR Gesamtschaden, d. h. 8,6 %; vgl. DKKV 2015); allerdings beinhaltet dieser Wert auch Schäden an Bahnhofsgebäuden. 2013 wurde der Schaden der DB letztlich mit 80 Mio. EUR angegeben (vgl. DKKV 2015); bei einem Gesamtschaden von 6 bis 8 Mrd. EUR (Thieken et al. 2016b) ergibt sich ein Anteil von 1 bis 1,3 %.

Szenario mit Klimawandel ohne Anpassung

Zukünftig kann sich das Schadenspotenzial aufgrund einer veränderten Gefährdung (klimatische Exposition) oder Sensitivität (Aus- oder Rückbau des Schienennetzes) ergeben. Wie oben diskutiert bleibt die Sensitivität bei dieser Wirkungskette konstant: Das heutige Streckennetz wird also auch bei der Berechnung zukünftiger Szenarien verwendet.

Zudem kann auch der Klimawandel zu einer höheren klimatischen Exposition führen. Welchen Einfluss der Klimawandel auf 100-jährliche Sturmflutereignisse haben könnte, untersuchten Voudoukas et al. (2016). Ausgehend von dem Zeitraum 1970 bis 2000 wurden dabei die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 für die Zeiträume 2010 bis 2040 und 2070 bis 2100 betrachtet. Konkrete Fragestellung der Untersuchung war, wie häufig das 100-jährliche Ereignis zukünftig auftreten könnte. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass sich für den Zeitraum bis

⁹ <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/kuestenschutz-rechnet-sich-154537.html>

2040 an der Nordsee keine robuste Veränderung feststellen lässt. Für den Zeitraum bis 2100 würde die Eintrittswahrscheinlichkeit auf 80 (RCP4.5) bzw. 81 (RCP8.5) Jahre steigen. An der Ostsee ergibt sich nur für das RCP8.5 Szenario für den Zeitraum 2040 eine robuste Veränderung. Demnach könnte das 100-jährliche Ereignis alle 44 Jahre auftreten. Für den Zeitraum bis 2100 würde die Eintrittswahrscheinlichkeit auf 72 (RCP4.5) bzw. 51 (RCP8.5) Jahre steigen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit des 100-jährlichen Ereignisses an Nord- und Ostsee für die Zeiträume 2014 und 2100 nach Voudoukas et al. (2016). Für Zeiträume und Szenarien ohne Angaben liegen keine robusten Ergebnisse vor

Nordsee	RCP4.5	RCP8.5
2010-2040	--	--
2070-2100	80	81
Ostsee		
2010-2040	--	44
2070-2100	72	51

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Welchen Einfluss diese Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit auf das Risiko für die Schieneninfrastruktur hat, lässt sich näherungsweise aufzeigen, indem man den Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert mit und ohne Klimawandel betrachtet.¹⁰ Der Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert ergibt sich (näherungsweise) aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem zu diesem Ereignis gehörenden Schadenswert. Dies lässt sich für diejenigen Bundesländer ermitteln, die Szenarien für ein 100-jährliches Ereignis berechnet haben. Dies sind Hamburg und Schleswig-Holstein (siehe Tabelle 5). Die Ergebnisse dieser Berechnung finden sich in Tabelle 9. In Fällen, in denen Voudoukas et al. (2016) keine robusten Änderungen angeben, wurde weiterhin von einer 100-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (z. B. RCP4.5 Szenario für den Zeitraum 2010 bis 2040). Die Küstenabschnitte von Schleswig-Holstein grenzen sowohl an die Nord- als auch Ostsee. Dies wurde bei der Berechnung berücksichtigt, indem für die jeweiligen Landkreise die spezifischen Änderungen an Nord- und Ostsee angenommen wurden. Tabelle 9 zeigt, dass der Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert von 301.000 EUR auf bis zu 376.000 EUR in Hamburg und von 208.000 EUR auf 380.000 EUR in Schleswig-Holstein im Jahre 2100 steigen könnte. Für das RCP8.5 Szenario wird für Schleswig-Holstein der höchste Wert (424.000 EUR) für den Zeitraum 2010 – 2040 ausgewiesen.

¹⁰ Um den tatsächlichen Schadenserwartungswert zu berechnen, also den gemittelten jährlich zu erwartenden Schaden, müssten mehrere Szenarien (von häufig bis sehr selten) integriert werden.

Tabelle 9: Veränderung des Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert für Hamburg und Schleswig-Holstein für unterschiedliche Zeitscheiben und Klimaszenarien nach Voudoukas et al. (2016) in EUR (gerundet auf dreisignifikante Stellen)

Szenario	<u>Beitrag des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert (pro Jahr)</u>	
	Hamburg	Schleswig-Holstein
1970-2000	301.000	208.000
2010-2040 (RCP4.5)	301.000	208.000
2010-2040 (RCP8.5)	301.000	424.000
2070-2100 (RCP4.5)	376.000	284.000
2070-2100 (RCP8.5)	372.000	380.000

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Szenario mit Klimawandel und Anpassung

Anpassungsmaßnahmen an der Schiene sind bislang nur im Rahmen der Gleiserneuerung bzw. durch eine Erhöhung des Gleisbetts möglich (Eisenbahn-Bundesamt; persönliche Kommunikation). Im Wesentlichen wird die Schieneninfrastruktur durch den technischen Hochwasserschutz, wie Deiche, geschützt. Für das hier betrachtete Szenario mit „Klimawandel und Anpassung“ wird davon ausgegangen, dass das 100-jährliche Schutzniveau der Deiche aufgrund von Deichertüchtigungen trotz des projizierten Klimawandels erhalten bleibt. Voudoukas et al. (2018) kommen zu dem Ergebnis, dass die Höhe der Hochwasserschutzanlagen an Europas Küsten im Durchschnitt um etwa 50 cm bis 2050 und um etwa 1 m bis 2100 angehoben werden müssten, um den derzeitigen Schadenserwartungswert im Verhältnis zum Bruttoinlandprodukt konstant zu halten. Allerdings bestehen deutliche regionale Unterschiede, und für Deutschland fallen die Schätzungen nochmals höher aus (die konkreten Werte werden nicht genannt sondern nur visuell dargestellt). Die Risikoreduktion ergibt sich somit aus der Differenz des heutigen und zukünftigen Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert. Die mögliche Risikoreduktion für Hamburg und Schleswig-Holstein finden sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Risikoreduktion durch eine Ertüchtigung der Deichinfrastruktur zum Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus (EUR pro Jahr) in EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Szenario	<u>Risikoreduktion durch eine Ertüchtigung der Deichinfrastruktur (pro Jahr)</u>	
	Hamburg	Schleswig-Holstein
2010-2040 (RCP4.5)	0	0
2010-2040 (RCP8.5)	0	215.000
2070-2100 (RCP4.5)	75.300	75.600
2070-2100 (RCP8.5)	70.600	172.000

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Tabelle 10 zeigt, dass die Erhaltung des 100-jährlichen Schutzniveaus auf dem heutigen Stand insbesondere gegen Ende des Jahrhunderts zu einer deutlichen Risikominderung von jährlich bis zu 75.300 EUR in Hamburg und 172.000 EUR in Schleswig-Holstein im Bereich der Schieneninfrastruktur führen würde (215.000 für das RCP8.5 Szenario für den Zeitraum 2010 – 2040). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass zusätzliche Investitionen zur Klimaanpassung in die Küsteninfrastruktur bis zu dieser Höhe ein positives Nutzen-Kostenverhältnis aufwiesen. Würde man in dieser Berechnung die aufgrund des Klimawandels zu erwartende Ausweitung der Überflutungsflächen und -tiefen berücksichtigen, dürfte der Risikominderungseffekt und somit die Höhe der Investitionen mit positivem Nutzen-Kostenverhältnis noch höher ausfallen. Die Berücksichtigung weiterer Eisenbahninfrastruktur wie Bahnhöfe oder Brücken würde ebenfalls zu einem höheren Minderungseffekt führen. Auch die Abbildung des tatsächlichen Schadenerwartungswertes durch die Berücksichtigung der gesamten Bandbreite an Überflutungsszenarien würde zu einem höheren Risikominderungseffekt führen. Welche Kosten den Risikominderungseffekten durch die Investitionen in den Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus entgegengestünden, konnte in dem Vorhaben nicht erhoben werden.

Unsicherheiten ergeben sich aus dem verwendeten Schadensmodell. Dieses wurde aus empirischen Schadensdaten eines Flusshochwassers abgeleitet (Kellermann et al. 2015). Es ist davon auszugehen, dass es bei Küstenhochwassern aufgrund der Wellenaktivitäten zu stärkeren Schädigungen an der Schieneninfrastruktur kommt. Anders als im Bereich der Wohngebäude (siehe Abschnitt 2.1.4) liegen hierzu aber keine empirischen Erkenntnisse oder Informationen aus der Literatur vor, welchen Einfluss dies auf den zu erwartenden Schaden hätte.

2.1.3.4 Handlungsempfehlungen

- ▶ Wie oben aufgeführt, wurden in den bisherigen Szenarien zum Meeresspiegelanstieg eisphysikalische Prozesse nur unzureichend abgebildet. Derzeit wird davon ausgegangen, dass der Anstieg des Meeresspiegels bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich höher als bislang angenommen, d. h. bis zu 1,7 m betragen könnte (BSH 2017). Nach der Veröffentlichung des Sonderberichts des Weltklimarats „Ozeane und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima“, der auch eisphysikalische Prozesse berücksichtigt, sollte eine Neubewertung des Küstenschutzes durch die Bundesländer erfolgen und geprüft werden, wie der Schutz der kritischen Infrastrukturen einschließlich des Schienennetzes langfristig gesichert werden kann.
- ▶ Die Abschätzung von Schäden an Schieneninfrastruktur könnte erheblich von empirischen Schadensdaten profitieren, die für eine Modellableitung oder eine Validierung bestehender Modell benötigt werden. Wie auch in anderen Infrastrukturbereichen liegen derartige empirische Daten in Deutschland nicht oder nur unzureichend vor. Der Bund als Eigentümer der DB könnte auf eine systematische Erfassung von Schäden durch Naturgefahren an der Schieneninfrastruktur hinwirken, die das für die Modellableitung nötige Prozessverständnis und eine Validierung erlauben würde.
- ▶ Die Analyse potenzieller Schäden hat zudem gezeigt, dass die Küstenbundesländer sehr unterschiedliche Gefährdungsszenarien im Rahmen der HWRM-RL vorgelegt haben. Diese Heterogenität der Gefahrenkarten verhindert derzeit eine übergreifende Risikoanalyse sowohl für die Schieneninfrastruktur als auch für andere Sektoren (siehe Abschnitt 2.1.4 und

2.1.5). Derartige bundeslandübergreifende Analysen wären für den Bund als Eigentümer der Bahn aber wichtig, um Handlungsprioritäten für die Schieneninfrastruktur abzuleiten.

- Da Sturmfluten mit hohen Windgeschwindigkeiten, oft Orkanböen, einhergehen, sind neben der strukturellen Schädigung der Infrastruktur auch indirekte Schäden durch Zugausfälle zu betrachten. So waren beim Orkan Xaver im Dezember 2013, der mit einer Sturmflut einherging, die hydrographisch in etwa mit dem Ereignis von 1962 vergleichbar war, etliche Zugausfälle im Bahnverkehr in Norddeutschland und im öffentliche Personennahverkehr in Hamburg zu verzeichnen (CEDIM 2013).
- Über den Schienenverkehr hinaus ist die Anfälligkeit weiterer Infrastrukturbereiche, insbesondere der Energieversorgung, in zukünftigen Forschungsvorhaben des Bundes und der Länder zu betrachten (vgl. Deutscher Bundestag 2014).

2.1.4 Wirkungskette: Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten

2.1.4.1 Einleitung

Sturmfluten entlang der Ost- und Nordseeküste stellen eine seltene, aber potenziell schwerwiegende Gefahr für Menschen in den Küstenbundesländern dar. Das Ereignis mit den schwersten Auswirkungen in der jüngsten Vergangenheit war die Sturmflut an der Nordsee im Februar 1962, die insbesondere in Hamburg katastrophale Auswirkungen hatte (von Storch et al. 2008). Nach dem Bruch mehrerer Deiche starben mehr als 300 Menschen, mehr als 60.000 Menschen wurden obdachlos und 6.000 Gebäude stürzten ein (Safecoast 2008). Nach diesem Ereignis wurde massiv in den Küstenschutz investiert, und Deiche wurden auf bis zu +8,00 m bis +9,30 m erhöht (von Storch et al. 2008).

Heute werden die Küstenbundesländer durch Deiche vor Sturmfluten geschützt, die statistisch gesehen seltener als einmal in 100 Jahren auftreten (Safecoast 2008). Daher wurden selbst durch die deutlich höhere Sturmflut von 1976 und die vergleichbare Sturmflut im Dezember 2013 kaum Schäden verursacht. So führten die extremen Sturmfluten an der Nordseeküste am 1. November 2006¹¹ oder am 6. Dezember 2013¹² trotz Rekordwasserständen nur zu geringen Schäden in Form von Dünenabbrüchen.

Potenziell durch Sturmfluten betroffene Wohngebiete werden in den Hochwasserrisikokarten der Küstenbundesländer ausgewiesen, die diese im Rahmen der europäischen HWRM-RL erstellt haben. Zu welchen Schäden eine Überflutung durch Sturmfluten in den Küstenregionen führen könnte, ist derzeit aber weitgehend unbekannt. Bestehende Studien beschränken sich auf einzelne Fallstudien entlang der Küste und berücksichtigen nicht die amtlichen Gefahrenkarten der Bundesländer (z. B. Meyer 2005). Mehr Wissen darüber ist gerade auch vor dem Hintergrund der erwarteten Auswirkungen des Klimawandels erforderlich. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, wird davon ausgegangen, dass es aufgrund der globalen Erwärmung zu einem Anstieg des Meeresspiegels und somit zu einer erhöhten Gefahr von Sturmfluten an Nord- und

¹¹

https://www.nlwkn.niedersachsen.de/hochwasser_kuestenschutz/kuestenschutz/rueckblick_auf_sturmfluten/sturmflutbilder_2006/bilder-der-sturmflut-vom-1-november-2006-41467.html; zuletzt abgerufen am 20.11.2018.

¹²

https://www.nlwkn.niedersachsen.de/hochwasser_kuestenschutz/kuestenschutz/rueckblick_auf_sturmfluten/sturmflutbilder_2013/nikolausflut-vom-6-dezember-2013-120645.html; zuletzt abgerufen am 20.11.2018.

Ostseeküste kommt könnte (von Storch et al. 2008; Umweltbundesamt 2015; Vousdoukas et al. 2016).

Um die in dieser Wirkungskette adressierte Anfälligkeit von Wohngebäuden gegenüber Sturmfluten künftig zu verringern, ist es erforderlich, sich mit den möglichen Auswirkungen auseinanderzusetzen und diese quantitativ abzuschätzen. Ziel der vorliegenden Analyse ist es entsprechend, potenzielle direkte Schäden an Wohngebäuden mit Hilfe einer Schadensmodellierung für die gesamte Küstenregion Deutschlands zu berechnen.

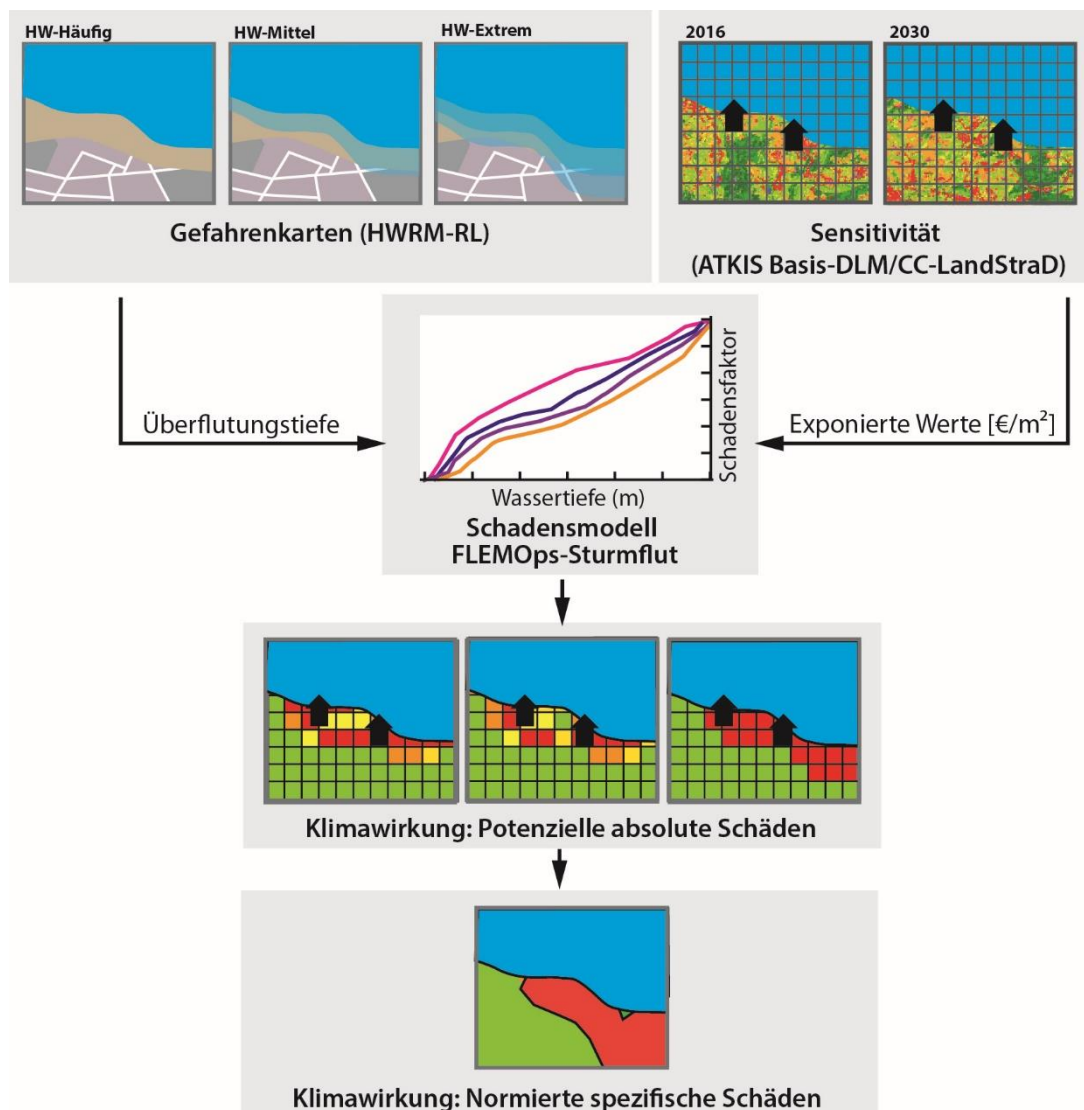
Das verwendete methodische Vorgehen sowie die Ergebnisse der Schadenspotenzialanalyse werden in den folgenden Abschnitten dargestellt und diskutiert. Des Weiteren werden Ansätze für die Berücksichtigung von Klimawandel- und Anpassungsszenarien vorgestellt.

2.1.4.2 Methodische Vorgehensweise

Bislang hat sich die Modellierung von Hochwasserschäden vor allem auf Flusshochwasser fokussiert (Meyer et al. 2014). Methodische Ansätze, die die besonderen Charakteristika von Küstenhochwassern berücksichtigen, sind bislang selten. In vielen Ländern werden einheitliche Schadensfunktionen und Modelle sowohl für Fluss- als auch Küstenhochwasser verwendet (Bubeck und Kreibich 2011), obwohl davon ausgegangen werden kann, dass höhere Fließgeschwindigkeiten, Wellenaktivitäten und das Eindringen von Salzwasser zu deutlich höheren Schäden führen können (Penning-Rowsell 1992; Nadal et al. 2010).

Die methodische Vorgehensweise zur Berechnung potenzieller Schäden an Wohngebäude durch Sturmfluten unter Berücksichtigung ihrer besonderen Charakteristika wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert und ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

Abbildung 17: Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.4.2.1 Klimatische Exposition

Für die Modellierung von monetären Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten wurden wiederum die im Abschnitt 2.1.3.2.1 beschriebenen Hochwassergefahrenkarten der Küstenbundesländer verwendet. Eine Übersicht der Überflutungsflächen in den Küstenbundesländern gemäß dem Extremszenario (ohne Wirkung des Hochwasserschutzes) findet sich in Abbildung 14. Auch für diese Wirkungskette ist zu beachten, dass es sich bei den dargestellten Überflutungen bundeslandübergreifend nicht um realistische Einzelereignisse handelt, sondern alle potenziell überfluteten Flächen dargestellt werden. So ist nicht davon auszugehen, dass der gesamte Hochwasserschutz flächendeckend versagt.

2.1.4.2.2 Sensitivität

Um potenzielle Schäden an Wohngebäuden zu berechnen, werden Informationen zu Vermögenswerten innerhalb der potenziell von Sturmfluten betroffenen Fläche benötigt. Hier wurde das in Abschnitt 2.1.2.2.2 beschriebene Vorgehen analog angewendet, d. h. es wurden flächenspezifische Vermögenswerte für Wohngebäude aus Kleist et al. (2006) aktualisiert und

mit einem binären Verteilungsverfahren auf die gewählten Objektarten der ATKIS-Basis-DLM-Landnutzungsklassen disaggregiert (siehe Abschnitt 2.1.2.2.3).

2.1.4.2.3 Schadensmodell

Die Einwirkung von Sturmfluten auf Wohngebäude wurde mit Hilfe des (aktualisierten) Modells FLEMOps (Flood Loss Estimation Model for the Private Sector) abgeschätzt (Thieken et al. 2008). In diesem Modell wird der direkte monetäre Schaden für Wohngebäude anhand folgender Einwirkungs- und Widerstandsparametern berechnet: der Überflutungstiefe, differenziert in vier Wasserstandsklassen, dem Gebäudetyp, unterteilt nach Einfamilienhaus, Reihen-/Doppelhaus und Mehrfamilienhaus sowie der Gebäudequalität, klassifiziert nach sehr guter bzw. mittel/geringer Qualität (vgl. Abbildung 4). Nähere Informationen zu dem Modell finden sich in Thieken et al. (2008) und im Abschnitt 2.1.2.2.3.

Für das vorliegende Vorhaben wurde das für Schäden an Gebäuden durch Sturmfluten verwendete Modell zunächst neu aus 4468 empirischen Schadensfällen von Haushalten abgeleitet, die zwischen 2002 und 2013 durch Flusshochwasser in Deutschland geschädigt wurden, wobei nur 2154 Fälle alle für das Modell notwendigen Informationen enthielten. Da die Gefahrenkarten keine kontinuierlichen, sondern klassifizierte Wassertiefen enthielten, die nicht mit den Wasserstandsklassen von FLEMO übereinstimmten, wurde die Modellableitung für die in den Gefahrenkarten verwendeten Wasserstandsklassen (0-0,5 m; 0,5-1 m; 1-2 m; 2-4 m; >4 m) durchgeführt.

Schließlich wurde eine stärkere Schädigung durch Sturmfluten im Vergleich zu Flusshochwassern durch einen Skalierungsfaktor berücksichtigt, da im Vergleich mit Flusshochwassern aufgrund der Wellenaktivitäten und dem Salzgehalt des Wassers bei Sturmfluten mit höheren Schäden bei der gleichen Überflutungstiefe zu rechnen ist (Penning-Rowsell 1992; Nadal et al. 2010). So führt Salzwasser zu stärkerer Korrosion, elektrochemischen Prozessen und Verfärbungen. Auch lassen sich insbesondere poröse Materialien nur sehr schwer von (getrocknetem) Salzwasser reinigen (Penning-Rowsell 1992). Penning-Rowsell (1992) gibt für verschiedene Gebäudeelemente und Inventar an, mit welcher Erhöhung des Schadens im Falle von Salzwasser zu rechnen ist. Dabei wird zwischen einer kurzen (weniger als 12 Stunden) und einer langen Überflutungsdauer (mehr als 12 Stunden) sowie verschiedenen Wasserständen unterschieden. Je länger die Überflutungsdauer und je höher die Überflutungstiefe, desto höher ist auch der zusätzlich durch das Salzwasser verursachte Schaden. Einen Überblick über die Erhöhungsfaktoren aufgrund von Salzwasser, die aus Penning-Rowsell (1992) abgeleitet wurden, enthält Tabelle 11. Diese schwanken zwischen 8,6 % bei geringer Einstaudauer und einer Überflutungstiefe von weniger als 50 cm und bis zu 41,7 % bei einer langen Einstaudauer und einer Überflutungstiefe von mehr als 1,5 m.

Tabelle 11: Zusätzlicher Schadensgrad aufgrund von Salzwasser gemäß Penning-Rowsell (1992)

Überflutungstiefe	0-0,5 m	0,51 m – 1 m	1,01 m – 2 m	2,01 m – 4 m	> 4 m
< 12h Dauer	8,6 %	17,3 %	20,8 %	28,1 %	29,8 %
> 12h Dauer	13,1 %	27 %	30 %	38,8 %	41,7 %
Mittelwert FLEMOps	10,8 %	22,1 %	25,4 %	33,4 %	35,8 %

Die Auswirkungen von Wellenaktivitäten auf den Gebäudeschaden untersuchen Nadal et al. (2010). Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Sturmfluten um bis zu 40 % höhere Schäden verursachen als Flusshochwasser.

Die obigen Ausführungen verdeutlichen, dass Nadal et al. (2010) und Penning-Rowse (1992) zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen gelangen, welchen Effekt das Eindringen von Meerwasser auf den Gebäudeschaden hat. Da die Werte nicht anhand empirischer Schadensdaten aus Deutschland validiert werden können, wurden für dieses Vorhaben beide Varianten gerechnet. Da die Gefahrenkarten der Länder keine Informationen über die Überflutungsdauer enthalten und die prozentuale Erhöhung für die verschiedenen Gebäudetypen nahezu identisch ist, wurde für die Modellierung des Einflusses von Salzwasser gemäß Penning-Rowse (1992) ein gewichteter Mittelwert ermittelt und in der Modellierung mit FLEMOps verwendet (siehe Tabelle 11). Die Ergebnisse von Nadal et al. (2010) wurden berücksichtigt, indem die Ergebnisse des Ausgangsmodells um den Faktor 1,4 erhöht wurden.

Zusätzlich zu den absoluten Schäden wurden wiederum flächenspezifische Schäden (bezogen auf die Wohnflächen des Bundeslandes) berechnet, um einen Indikator für die Vulnerabilität der einzelnen Bundesländer zu erhalten. Zudem wurde ein flächenspezifischer Schaden bezogen auf die Wohnflächen in den Risikogebieten berechnet (EUR/m²), der für die Berechnung der zukünftigen Szenarien benötigt wird (siehe Abschnitt 2.1.4.2.4).

2.1.4.2.4 Szenarien

Zukünftig kann sich eine Veränderung des Schadenspotenzials aus einer veränderten Gefährdung (klimatische Exposition) oder einer veränderten Sensitivität (Aus- oder Rückbau von Wohnbauflächen) ergeben.

Wie im Abschnitt 2.1.3.3 näher diskutiert, könnte es aufgrund des Klimawandels zukünftig zu einer steigenden Sturmflutgefährdung an Nord- und Ostsee kommen. Wie auch für den Bereich Schiene kann der Einfluss des Klimawandels lediglich über die sich zukünftig verändernden Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Hierfür werden wiederum die sich verändernden Eintrittswahrscheinlichkeiten des 100-jährlichen Ereignisses an Ost- und Nordsee gemäß Voudoukas et al. (2016) herangezogen (siehe Tabelle 8).

Ein Szenario für mögliche Veränderungen von Wohnbauflächen liegt in Form des CC-LandStraD-Szenarios des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumordnungsforschung (BBSR) für das Jahr 2030 vor. Basierend auf beobachteten demographischen, wirtschaftlichen und siedlungsstrukturellen Trends werden zukünftige Raumansprüche für einzelne Landnutzungen gemäß eines definierten Szenarios ermittelt. Diese Raumansprüche dienen als Eingangsinformation in das Landnutzungsmodell Land Use Scanner. Dabei handelt es sich um ein GIS-basiertes Modell, in dem die Raumansprüche anhand von Standortfaktoren (z. B. Erreichbarkeit, Relief) räumlich explizit simuliert werden.¹³

Dieses Szenario wurde herangezogen, um die Zunahme an Wohngebieten in den Küstenbundesländern abzuleiten. Der Zuwachs an Wohngebietsflächen (in m²) wurde dann mit dem flächenspezifischen Schaden der Risikogebiete (EUR/m²) verrechnet. Szenarien über das Jahr 2030 hinaus, die für eine Abschätzung von Veränderungen der Sensitivität dieser Wirkungskette gegen Ende des Jahrhunderts herangezogen werden könnten, liegen derzeit nicht vor.

¹³

https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/Flaechenpolitik/Projekte/Archiv/CCLandStraD/01_Start.html?nn=413116

Schließlich wurde im Rahmen des Szenarios „Klimawandel mit Anpassung“ analog zu Abschnitt 2.1.3.3 von einer Deichertüchtigung ausgegangen, welche dazu führt, dass das 100-jährliche Schutzniveau bis zum Ende des Jahrhunderts erhalten bleibt. Schließlich wurde ein optimaler Zustand der Eigenvorsorge von Privathaushalten angenommen, d. h. die Durchführung von sehr guter Bauvorsorge (klassifiziert anhand der Anzahl und Art der durchgeführten Maßnahmen), die gleichzeitig verhindert, dass eine Kontamination des Hochwassers/ Oberflächenabflusses durch Öl, Benzin oder Abwasser auftritt (siehe Abschnitt 2.1.2.2.5). Da keine empirischen Daten für Sturmfluten vorliegen, wird hier auf die Skalierungsfaktoren von Büchele et al. (2006) zurückgegriffen. Somit werden für die Berechnung des Einflusses der durchgeführten Eigenvorsorge die mit FLEMO-Sturmflut geschätzten potenziellen Wohngebäudeschäden für dieses Anpassungsszenario pauschal mit einem Skalierungsfaktor von 0,41 multipliziert. Im Vergleich zu Starkregen wird also von einer besseren Wirkung von sehr guter Bauvorsorge ausgegangen.

2.1.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Modellierung mit FLEMOs und die Werte nach der Anpassung gemäß Penning-Rowse (1992) und Nadal et al. (2010) finden sich in Tabelle 12. Für die Gefahrenkarten, die häufige Ereignisse abbilden, liegen die Schäden überwiegend im niedrigen zweistelligen Millionenbereich in den Bundesländern Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein. Für die mittleren Szenarien steigen die Schäden teils deutlich an, so z. B. auf 263 Mio. EUR in Mecklenburg-Vorpommern. Analog zu den Schäden an der Schieneninfrastruktur weist Niedersachsen mit etwas mehr als 10,5 Mrd. EUR (bzw. 14,7 Mrd. nach Anpassung gemäß Nadal et al. (2010)) wiederum den höchsten absoluten Schadenswert für das Extremszenario auf. Allerdings ist hier nochmals darauf hinzuweisen, dass insbesondere die Extremszenarien und somit auch die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Gefahrenkarten zwischen den Ländern nicht verglichen werden können.

Tabelle 12: Absolute Schäden an Wohngebäuden durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			8,8 (11,4/12,3) 4.780 (6.290/6.690)
Hamburg	21,7 (27,7/30,3)*	24,2 (31,0/33,8)	5.380 (7.210/7.530)
Mecklenburg-Vorpommern	13,9 (16,4/19,5)	263 (320/368)	503 (618/704)
Niedersachsen			18,3 (23,6/25,6) 10.500 (13.900/14.700)
Schleswig-Holstein	34,8 (41,8/48,7)	60,3 (72,8/84,4)	72,3 (87,6/101) 717 (893/1.000)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser bzw. Wellenaktivitäten gemäß Penning-Rowse (1992)/Nadal et al. (2010)

Um die Vulnerabilität eines Bundeslandes besser einschätzen zu können, ist es auch bei den Wohngebäuden von Interesse, die absoluten Schäden ins Verhältnis zur Größe der gesamten

Wohngebiete des jeweiligen Bundeslandes zu setzen. Der flächenspezifische Schaden beziffert den durchschnittlichen Schaden pro Quadratkilometer Wohnfläche in dem jeweiligen Bundesland. Tabelle 13 zeigt, dass Hamburg bei den häufigen und mittleren Szenarien mit rund 91.900 EUR bzw. 103.000 EUR pro km² hohe spezifische Schäden im Vergleich zu Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein aufweist. Für das Extremszenario weisen die Stadtstaaten Bremen und Hamburg mit 46,3 bzw. 22,8 Mio. EUR pro km² Wohnfläche vergleichsweise hohe spezifische Schäden auf. Zu beachten sind wiederum die sehr heterogenen und somit nicht vergleichbaren Szenarien der Gefahrenkarten (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Flächenspezifische Schäden an Wohngebäuden (EUR/km² Wohnfläche in den Bundesländern) durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			85.000 (110.000/119.000) 46.300.000 (60.900.000/64.800.000)
Hamburg	91.900 (118.000/129.000)	103.000 (132.000/144.000)	22.800.000 (30.600.000/32.000.000)
Mecklenburg-Vorpommern	20.200 (23.800/28.200)	380.000 (463.000/532.000)	727.000 (894.000/1.020.000)
Niedersachsen			5.570 (7.180/7.800) 3.190.000 (4.240.000/4.470.000)
Schleswig-Holstein	29.800 (35.800/41.700)	51.600 (62.300/72.200)	62.000 (75.000/86.700) 614.000 (755.000/860.000)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser bzw. Wellenaktivitäten gemäß Penning-Rowsell (1992)/Nadal et al. (2010)

Szenario mit Klimawandel ohne Anpassung

Zukünftig kann sich eine Veränderung des Schadenspotenzials aus einer veränderten Gefährdung (klimatische Exposition) oder einer veränderten Sensitivität (Aus- oder Rückbau von Wohnbauflächen) ergeben.

Die Zunahme an Wohngebieten in den Überflutungsflächen der Küstenbundesländer wurde aus den CC-LandDStrAD-Daten abgeleitet. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die Zunahme bis 2030 gleichmäßig über den gesamten Zeitraum verteilt. Gemäß dieses Szenarios nimmt die Fläche an Wohngebieten in den Küstenbundesländern zwischen 2016 und 2030 um 31,6 km² zu. Dies entspricht einem prozentualen Zuwachs von 4,6 %.

Um die Veränderung im Bereich der Sensitivität bis 2030 abzubilden, wurde ein weiterer flächenspezifischer Gebäudeschaden über alle Küstenbundesländer hinweg berechnet. Hierfür wurde der potenzielle absolute Schaden nur auf die Wohngebäudeflächen in den Risikogebieten (und nicht auf das gesamte Bundesland) bezogen. Die so normierten Gebäudeschäden (EUR/m²) für die einzelnen Bundesländer und deren Gefährdungsszenarien sowie der Mittelwert und die Standardabweichung aller Szenarien finden sich in

Tabelle 14. Es zeigt sich, dass – wie zu erwarten – der mittlere normierte Gebäudeschaden (bezogen auf die Risikogebiete) für Sturmfluten deutlich höher liegt als der entsprechend normierte Gebäudeschaden bei Starkregenereignissen (siehe Abschnitt 2.1.2.3.3).

Tabelle 14: Flächenspezifische Gebäudeschäden (EUR/m² Wohnfläche in den Überflutungsgebieten) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			118 (153/165) 130 (172 /183)
Hamburg	76 (98/107)*	80 (102/111)	115 (154/161)
Mecklenburg-Vorpommern	11 (13/15)	21 (26/30)	22 (27/31)
Niedersachsen			21 (27/30) 19 (25/27)
Schleswig-Holstein	16 (19/22)	18 (21/25)	19 (23/26) 12 (14/16)
Mittel wert			48 (63/68)
Standardabweichung			43 (58/61)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser bzw. Wellenaktivitäten gemäß Penning-Rowell (1992)/Nadal et al. (2010)

Um das steigende Schadenspotenzial aufgrund der Zunahme an Wohnbauflächen zu berücksichtigen, wurde der Mittelwert des flächenspezifischen Schadens (Risikogebiete) über alle Szenarien mit dem Zuwachs an Wohnflächen (in Quadratmetern) in den Küstenbundesländern multipliziert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die prozentuale Zunahme über alle Gebiete hinweggleichverteilt ist. Maßnahmen der Raumordnung, wie eine Einschränkung der Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten, werden nicht berücksichtigt. Demnach steigt das Schadenspotenzial aufgrund der steigenden Sensitivität bis zum Jahre 2030 in allen Überflutungsflächen der Küstenbundesländer (Extremszenarien ohne HW-Schutz) um 1,51 Mrd. EUR (1,99 Mrd. EUR nach Anpassung mit Penning-Rowell (1992); 2,14 Mrd. EUR nach Anpassung mit Nadal et al. (2010)).

Welchen Einfluss diese Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit auf das Risiko für Wohngebäudeflächen hat, lässt sich näherungsweise aufzeigen, indem man den Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert mit und ohne Klimawandel betrachtet.¹⁴ Der Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert ergibt sich aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem zu diesem Ereignis gehörenden Schadenswert. Dies lässt sich wiederum nur für Hamburg und Schleswig-Holstein (siehe Tabelle 5) ermitteln, die als einzige Bundesländer Gefahrenkarten für ein 100-jährliches Ereignis bereitstellen. Die Berechnung erfolgt dabei analog zu dem in Abschnitt 2.1.3.3 dargestellten Vorgehen. Die Ergebnisse dieser Berechnung finden sich in Tabelle 15.

Tabelle 15 zeigt, dass der Beitrag des 100-jährlichen Ereignisses zum Schadenserwartungswert von 242.000 EUR auf bis zu 302.000 EUR in Hamburg und von 603.000 EUR auf 1,24 Mio. EUR in Schleswig-Holstein im Jahre 2100 pro Jahr steigen könnte.

¹⁴ Um den Schadenserwartungswert zu berechnen, also den gemittelten jährlich zu erwartenden Schaden, müssten mehrere Szenarien (von häufig bis sehr selten) integriert werden.

Tabelle 15: Veränderung des Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert (Wohngebäude) für Hamburg und Schleswig-Holstein für unterschiedliche Zeitscheiben und Klimaszenarien nach Voudoukas et al. (2016) in EUR pro Jahr (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Szenario	Beitrag des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert (pro Jahr)	
	Hamburg	Schleswig-Holstein
1970-2000	242.000 (310.000/338.000)	603.000
2010-2040 (RCP4.5)	242.000 (310.000/338.000)	603.000
2010-2040 (RCP8.5)	242.000 (310.000/338.000)	1.240.000
2070-2100 (RCP4.5)	302.000 (388.000/423.000)	823.000
2070-2100 (RCP8.5)	298.000 (383.000/418.000)	1.110.000

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Szenario mit Klimawandel mit Anpassung

Ebenso wie die Schieneninfrastruktur (siehe Abschnitt 2.1.3.3) werden auch Wohngebäude durch den technischen Hochwasserschutz, wie Deiche, geschützt. Für das hier betrachtete Szenario mit Klimawandel und Anpassung wird davon ausgegangen, dass das 100-jährliche Schutzniveau der Deiche aufgrund von Deichertüchtigungen trotz des projizierten Anstiegs des Meeresspiegels erhalten bleibt. Die Risikoreduktion ergibt sich somit aus der Differenz des heutigen und zukünftigen Beitrags des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert. Die mögliche Risikoreduktion für Hamburg und Schleswig-Holstein finden sich in Tabelle 16.

Tabelle 16: Risikoreduktion durch eine Ertüchtigung der Deichinfrastruktur zum Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus in EUR pro Jahr (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Szenario	Beitrag des 100-jährlichen Szenarios zum Schadenserwartungswert (pro Jahr)	
	Hamburg	Schleswig-Holstein
2010-2040 (RCP4.5)	0 (0/0)	0
2010-2040 (RCP8.5)	0 (0/0)	635.000
2070-2100 (RCP4.5)	60.400 (77.500/84.600)	220.000
2070-2100 (RCP8.5)	56.700 (72.760/79.400)	504.000

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Tabelle 16 zeigt, dass die Erhaltung des 100-jährlichen Schutzniveaus auf dem heutigen Stand insbesondere in Schleswig-Holstein zu einer deutlichen Risikominderung von jährlich bis zu 635.000 EUR im Bereich der Wohngebäude führen würde. In Hamburg beliefte sich die Risikominderung auf jährlich bis zu 60.400 EUR. Im Umkehrschluss bedeutet dies wiederum, dass zusätzliche Investitionen zur Klimaanpassung in die Küsteninfrastruktur zum Schutz von Wohngebäuden bis zu dieser Höhe ein positives Nutzen-Kostenverhältnis aufwiesen. Ebenso wie oben dargestellt würde sich dieser Betrag nochmals erhöhen, wenn auch die aufgrund des Klimawandels zu erwartende Ausweitung der Überflutungsflächen und -tiefen berücksichtigt sowie weitere Gefährdungsszenarien berücksichtigt würden. Welche Kosten den

Risikominderungseffekten durch die Investitionen in den Erhalt des 100-jährlichen Schutzniveaus entgegenstünden, konnte in dem Vorhaben nicht erhoben werden.

Eine weitere Möglichkeit der Klimaanpassung bietet die Bauvorsorge (siehe Abschnitt 2.1.2.2.5). Da keine Minderungsfaktoren der Bauvorsorge speziell für Sturmfluten vorliegen, wird hier der Faktor von Büchele et al. (2006) angewendet und somit die mit FLEMO-Sturmflutgeschätzten potenziellen Wohngebäudeschäden (siehe Tabelle 12) für dieses Anpassungsszenario pauschal mit einem Skalierungsfaktor von 0,41 multipliziert. Die Ergebnisse finden sich in

Tabelle 17.

Tabelle 17: Absolute Schäden an Wohngebäuden mit optimaler Bauvorsorge durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			3,6 (4,7/5,0) 1.960 (2.580/2.740)
Hamburg	8,9 (11,4/12,4)*	9,9 (12,7/13,9)	2.210 (2.960/3.090)
Mecklenburg-Vorpommern	5,7 (6,7/8,0)	108 (131/151)	206 (253/289)
Niedersachsen			7,5 (9,7/10,5) 4.300 (5.710/6.030)
Schleswig-Holstein	14,3 (17,1/20,0)	24,7 (29,8/34,6)	29,7 (35,9/41,5) 294 (366/411)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser bzw. Wellenaktivitäten gemäß Penning-Rowell (1992)/Nadal et al. (2010)

Unsicherheiten ergeben sich unter anderem aus den Skalierungsfaktoren für den Einfluss von Salzwasser und Wellenaktivitäten auf den Gebäudeschaden. Diesbezüglich liegen nur wenige empirische Daten vor, so dass diese Faktoren nicht aus empirischen Daten vergangener Sturmfluten abgeleitet bzw. validiert werden können.

2.1.4.4 Handlungsempfehlungen

Auch in Bezug auf die Analyse potentieller Gebäudeschäden durch Sturmfluten ist anzumerken, dass derzeit aufgrund der sehr unterschiedlichen Gefährdungsszenarien keine bundeslandübergreifende Analyse erfolgen kann. Vielmehr spiegeln die unterschiedlichen Annahmen der Bundesländer regionale Gegebenheiten und Anforderungen wider.

- Empirische Untersuchungen weisen darauf hin, dass Maßnahmen der privaten Bauvorsorge zu einer deutlichen Schadensreduzierung bei Flusshochwasser führen können, auch wenn derzeit noch Unsicherheiten bestehen, inwieweit diese auch bei Sturmfluten wirksam sind. Einzelne Maßnahmen, wie der Einbau einer Rückstauklappe, können auch bei bestehenden Gebäuden umgesetzt werden. Andere Maßnahmen, wie das Abdichten von Gebäudewänden sind bei einem nachträglichen Einbau hingegen mit hohen Kosten verbunden (Kreibich et al. 2011). Daher sollte insbesondere bei Neubauten in Hochwasserrisikogebieten verstärkt Maßnahme der Bauvorsorge umgesetzt werden.

- ▶ Wie im Abschnitt 2.1.3.3 erläutert, wird derzeit davon ausgegangen, dass der Anstieg des Meeresspiegels bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich höher als bislang angenommen, d. h. bis zu 1,7 m, betragen könnte (BSH 2017). Nach der Veröffentlichung des Sonderberichts des Weltklimarats „Ozeane und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima“, der auch eisphysikalische Prozesse berücksichtigt, sollte eine Neubewertung des Küstenschutzes erfolgen und geprüft werden, wie der Schutz von Siedlungsflächen langfristig gesichert werden kann.
- ▶ Um ein kompletteres Abbild möglicher Schadenslagen zu erhalten, sollten zukünftig zu dem Schäden an Hausrat und PKWs berücksichtigt werden. Auswertungen empirischer Daten sowie Richtlinien zur Schadenskompensation zeigen, dass etwa 70% Schäden im privaten Bereich auf Gebäudeschäden zurückgehen, etwa 30% auf Schäden am Hausrat (Cammerer et al. 2013).
- ▶ Zudem bedarf es weiterer Untersuchungen, inwieweit Schadensmodelle für Flusshochwasser auf Sturmflutereignisse übertragbar sind; dasselbe gilt für die Schadensreduzierung durch Bauvorsorge. Auch hierfür wären empirische Schadensdaten von Sturmflutereignissen, wie das im Januar 2018 durch Sturmtief Friederike verursachte, notwendig.
- ▶ Gerade an der Küste können Erosionsprozesse zu Totalschäden führen, z. B. wenn Bereiche einer Steilküste oder Teile des (natürlichen) Küstenschutzes abgetragen werden. Aus diesem Grund sollte zukünftig bei Sturmfluten die Rolle der Erosion stärker beleuchtet werden.

2.1.5 Wirkungskette: Schäden an Gewerbe/Industrie durch Sturmfluten

2.1.5.1 Einleitung

Neben Wohngebäuden und der Infrastruktur gehörten Industrie und Gewerbe zu den Sektoren mit den höchsten Schadenswerten bei Hochwassern in den letzten Jahren. Laut der sächsischen Staatskanzlei (2003) machten Schäden an Industrie und Gewerbe während des Elbehochwassers im Jahre 2002 knapp 23 % der Gesamtschäden aus. Auch beim Hochwasser 2013 machte das Gewerbe mit knapp 14 % einen bedeutenden Teil der Gesamtschäden aus (Sächsische Staatskanzlei 2013).

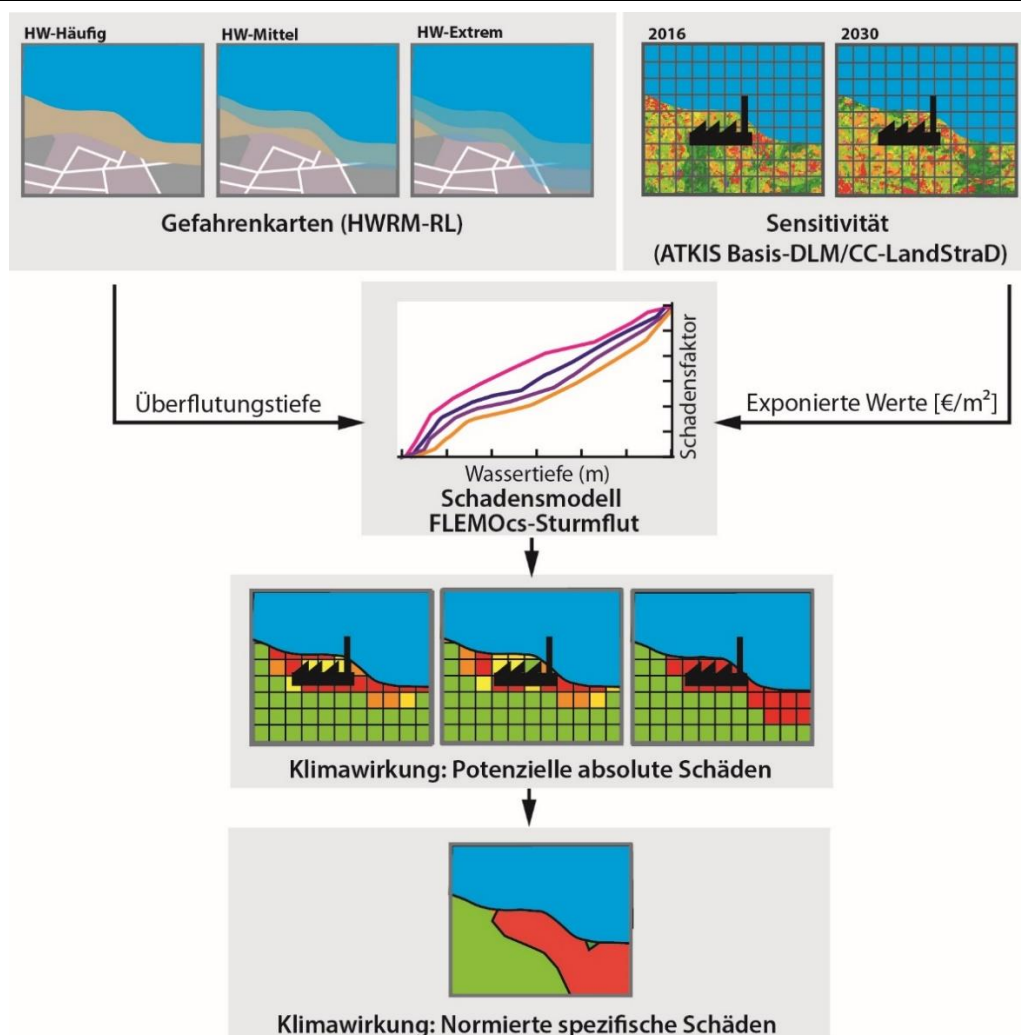
Wichtig ist zu beachten, dass es sich bei diesen Werten nur um direkte Schäden an gewerblicher Infrastruktur handelt. Folgeschäden, die z. B. durch Betriebsunterbrechungen entstehen, sind in diesen Zahlen nicht enthalten. Auch das im Rahmen dieses Vorhabens verwendete Flood Loss Estimation Model for the commercial sector (FLEMOcs) berücksichtigt lediglich direkte Schäden an gewerblichen Gebäuden, an der Betriebseinrichtung sowie an Waren, Produkten und Lagerbeständen. Nicht berücksichtigt werden Schäden durch Betriebsunterbrechung und weitere indirekte Schäden infolge der Unterbrechung von Wertschöpfungsketten, Lieferengpässen etc.

2.1.5.2 Methodische Vorgehensweise

Die Abschätzung von Hochwasserschäden fokussiert sich vor allem auf Flusshochwasser und die Schäden in Privathaushalten bzw. an Wohngebäuden (Meyer et al. 2014). Methodische Ansätze zur Abschätzung von Schäden in Unternehmen sind bislang selten, insbesondere für Küstenhochwasser. Schadensmodelle für Unternehmen zu erstellen ist eine Herausforderung, da

Unternehmen sehr viel diverser als Wohngebäude sind. Man bräuchte also viel mehr Schadensdaten, um robuste Modelle abzuleiten. Leider ist das Gegenteil der Fall: Empirische Daten von geschädigten Unternehmen zu erheben ist aufgrund der geringeren Fallzahlen von Betroffenen und aufgrund der geringeren Bereitschaft, an Befragungen teilzunehmen, deutlich schwieriger als im privaten Bereich (Thielen et al. 2017). Daher kann für diese Wirkungskette nur auf Daten von Unternehmen zurückgegriffen werden, die durch Flusshochwasser geschädigt wurden. Analog zum Vorgehen bei den Wohngebäuden wird ein aus der Literatur abgeleiteter Skalierungsfaktor (1,22) berücksichtigt (Penning-Rowsell et al. 2005), um der höheren Schädigung durch Salzwasser und Wellenschlag Rechnung zu tragen (= FLEMOcs Sturmflut). Die methodische Vorgehensweise zur Berechnung potenzieller Schäden durch Sturmfluten in Unternehmen wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert und ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt.

Abbildung 18: Schematische Darstellung des Modellierungskonzeptes für Schäden in Unternehmen durch Sturmfluten



© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.5.2.1 Klimatische Exposition

Für die Modellierung von monetären Schäden in Unternehmen durch Sturmfluten wurden ebenfalls die im Abschnitt 2.1.3.2.1 beschriebenen Hochwassergefahrenkarten der Küstenbundesländer verwendet (vgl. Tabelle 5). Eine Übersicht der Überflutungsflächen in den

Küstenbundesländern gemäß dem Extremszenario (ohne Wirkung des Hochwasserschutzes) findet sich in Abbildung 14. Auch für diese Wirkungskette ist zu beachten, dass es sich bei den dargestellten Überflutungen nicht um realistische Einzelergebnisse handelt, sondern alle potenziell überfluteten Flächen dargestellt werden. So ist nicht davon auszugehen, dass der Küstenschutz flächendeckend versagt.

2.1.5.2.2 Sensitivität

Um potenzielle Schäden in Unternehmen zu berechnen, werden Informationen zu Vermögenswerten innerhalb der potenziell von Sturmfluten betroffenen Fläche benötigt. Aufgrund der Diversität der Unternehmen und der Schadensarten ist dies eine besondere Herausforderung. Für die vorliegende Studie wurde daher auf die Vermögenswerte von Seifert et al. (2010a) für das Referenzjahr 2003 zurückgegriffen. Seifert et al. (2010a) haben auf Basis der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und verschiedener Statistiken über Unternehmen und Betriebsstätten Vermögenswerte für 60 Branchen und für ganz Deutschland auf Gemeindeebene abgeleitet und regionalisiert. Bei der Regionalisierung wurden die Vermögenswerte allerdings zu fünf übergeordneten Sektoren zusammengefasst: 1) Landwirtschaft, 2) verarbeitendes und produzierendes Gewerbe, 3) Handel, Gastgewerbe und Verkehr, 4) Vermietung, Finanz- und Unternehmensdienstleistungen sowie 5) öffentliche und private Dienstleistungen, wobei der Sektor Landwirtschaft in diesem Vorhaben vernachlässigt wurde. Die Regionalisierung wurde auf Grundlage von CORINE-Landnutzungsdaten und einem auf Deutschland angepassten Disaggregierungsverfahren durchgeführt (vgl. Seifert et al., 2010a; Kreibich et al. 2010) und für dieses Vorhaben übernommen.

Die Vermögenswerte liegen getrennt für Gebäude und Betriebseinrichtungen als Brutto- und Nettovermögen für das Referenzjahr 2003 vor. Für das vorliegende Vorhaben wurden die Bruttowerte verwendet. Die Gebäudewerte wurden mit Hilfe des Preisindizes für die Bauwirtschaft (Büro- und gewerbliche Betriebsgebäude aus DESTATIS 2018) für das Referenzjahr 2016 aktualisiert. Um die Produkt- und Einrichtungswerte zu aktualisieren, wurde der Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte nach dem Güterverzeichnis für Produktstatistiken (gewerbliche Erzeugnisse insgesamt aus DESTATIS 2018) verwendet. Damit werden allerdings nur Preisunterschiede angepasst, keine Änderungen in den Wertmassen der Sektoren. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

Da laut Seifert et al. (2010a) keine Vermögenswerte zu Waren, Produkten und Lagerbeständen vorliegen, werden diese als Anteil des Vermögens an der Betriebseinrichtung abgeschätzt. Die verwendeten Werte pro Sektor und Betriebsgröße sind in Tabelle 18 zusammengestellt. Befragungen von Unternehmen dienten als Datenbasis zur Ableitung dieser Faktoren (vgl. Kreibich et al. 2010; Seifert et al. 2010b). Hohe Werte an Waren, Produkten und Lagerbeständen sind insbesondere im Handel zu finden, gefolgt von landwirtschaftlichen Betrieben, während in Dienstleistungsbetrieben nur wenig Waren, Produkte und Lagerbestände vorliegen (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Vermögenswerte zu Waren, Produkten und Lagerbeständen als Anteil des Vermögens an der Betriebseinrichtung in Abhängigkeit vom ökonomischen Sektor und der Betriebsgröße.

Sektor	Faktor für große Betriebe (>100 Beschäftigte)	Faktor für mittlere Betriebe (11 bis 100 Beschäftigte)	Faktor für kleine Betriebe (1-10 Beschäftigte)
Landwirtschaft	0,66	0,87	2,26
Verarbeitendes und produzierendes Gewerbe	0,23	0,30	0,78
Handel, Gastgewerbe und Verkehr	0,85	1,13	2,92
Vermietung, Unternehmens- & Finanzdienstleistungen	0,31	0,41	1,07
Öffentliche und private Dienstleistungen	0,14	0,19	0,48

© Kreibich et al. (2010), Seifert et al. (2010b)

2.1.5.2.3 Schadensmodell

Für die Schadensabschätzung wurde das Modell FLEMOcs von Kreibich et al. (2010) angewendet, das für diese Studie aktualisiert und auf Sturmfluten adaptiert wurde. FLEMOcs ist ein multifaktorielles Modell, d. h., in der Basisvariante wird der direkte monetäre Unternehmensschaden anhand der Größen Wasserstand (s.u.), ökonomischer Sektor (in fünf Klassen, s. o.) und Anzahl der Beschäftigten als Maß für die Betriebsgröße (in drei Klassen: 1-10 Beschäftigte, 11-100 Beschäftigte und >100 Beschäftigte) ermittelt.

Für dieses Vorhaben wurde das Modell auf Basis von empirischen Hochwasserschadensdaten von Unternehmen, die zwischen 2002 und 2013 durch Flusshochwasser in Deutschland geschädigt wurden, neu abgeleitet. Im Vergleich zu Privathaushalten bzw. Wohngebäuden liegen jedoch deutlich weniger Schadensfälle vor: 1317 Unternehmen im Gegensatz zu 4468 Privathaushalten, wobei nicht für alle Fälle die für das Modell notwendigen Informationen vorliegen, sodass sich die Stichproben weiter verringern.

Da die Gefahrenkarten, die für die Umsetzung der europäischen HWRM-RL erstellt und in dieser Studie verwendet wurden (vgl. Tabelle 5), mit Ausnahme von Schleswig-Holstein keine kontinuierlichen, sondern klassifizierte Wassertiefen enthalten, die nicht mit den Wasserstandsklassen des ursprünglichen Modells übereinstimmen, wurde die Modellableitung für die in den Gefahrenkarten verwendeten Wasserstandsklassen (0-0,5 m; 0,5-1 m; 1-2 m; 2-4 m; >4 m) durchgeführt, wobei aufgrund der geringen Anzahl von Schadensfällen die letzten beiden Klassen zusammengefasst wurden. Ebenfalls aufgrund der geringen Anzahl an Schadensfällen wurde zunächst der Schadensgrad pro Wasserstandsklasse auf Basis aller Unternehmen ermittelt. Dabei werden grundsätzlich Schäden an Gebäuden (409 Schadensfälle) von Schäden an der Betriebseinrichtung (582 Schadensfälle) sowie von Schäden an Waren, Produkten und Lagerbeständen (508 Schadensfälle) unterschieden. Tabelle 19 zeigt die resultierenden Schadensgrade (relative Schäden) für die drei untersuchten Schadensarten. Die Schadensanfälligkeit von Waren, Produkten und Lagerbeständen ist durchgängig höher als die Schadensanfälligkeit von Betriebseinrichtungen, die nochmals höher ist als die Schadensanfälligkeit von Gebäuden. Alle Schadensgrade nehmen mit zunehmendem Wasserstand zu (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Schadensanfälligkeit von Unternehmen gegenüber Hochwasser in Abhängigkeit von der Wassertiefe

Wasserstandsklasse	Nr.	Schadensgrad Gebäude	Schadensgrad Betriebseinrichtungen	Schadensgrad Waren, Produkte und Lagerbestände
0 bis 50 cm	1	0,10	0,33	0,46
>50 bis 100 cm	2	0,19	0,39	0,57
>100 bis 200 cm	3	0,33	0,57	0,64
>200 cm	4	0,33	0,57	0,69

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

In einem weiteren Schritt wurde je Sektor und Betriebsgröße pro Schadensart berechnet, wie sich der Schadensgrad jeder Teilgruppe vom Schadensgrad aller Unternehmen unterscheidet. Diese Unterschiede werden im Modell durch Skalierungsfaktoren pro Sektor und Betriebsgröße und pro Schadensart berücksichtigt. Wenn eine Teilgruppe weniger als sechs Fälle umfasst, wird das Grundmodell beibehalten. Wenn ein Skalierungsfaktor zu Schadensgraden größer 1 führt, wird dieser so angepasst, dass der Schadensgrad maximal 1 ergibt. Dieses Vorgehen entspricht dem ursprünglichen Vorgehen zur Modellableitung von Kreibich et al. (2010). Die verwendeten Skalierungsfaktoren sind Tabelle 20 zu entnehmen. Insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe sowie für große Betriebe in allen Sektoren liegen nur wenige Schadensfälle vor; daher ist der Skalierungsfaktor 1,00. Überdurchschnittlich anfällig (mit Werten >1) sind kleine Betriebe sowie die Unternehmen im Sektor Handel, Gastgewerbe und Verkehr (vgl. Tabelle 20).

Tabelle 20: Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Schadensanfälligkeit von Unternehmen gegenüber Hochwasser in Abhängigkeit vom ökonomischen Sektor und der Betriebsgröße (BG; (wobei 3: >100 Beschäftigte, 2: 11-100 Beschäftigte und 1: 1-10 Beschäftigte))

Sektor	BG	Faktor für Gebäudeschaden	Faktor für Schäden an Betriebseinrichtungen	Faktor für Schäden an Waren, Produkten und Lagerbeständen
Landwirtschaft	3	1,00	1,00	1,00
	2	1,00	1,00	1,00
	1	1,49	0,89	0,78
Verarbeitendes und produzierendes Gewerbe	3	0,89	0,62	0,50
	2	1,07	0,61	0,77
	1	0,92	0,84	1,04
Handel, Gastgewerbe und Verkehr	3	1,00	1,00	1,00
	2	1,05	1,10	1,20
	1	1,19	1,17	1,02
Vermietung, Unternehmens- & Finanzdienstleistungen	3	1,00	1,00	1,00
	2	0,42	0,94	1,00
	1	1,02	1,38	1,00

Sektor	BG	Faktor für Gebäudeschaden	Faktor für Schäden an Betriebseinrichtungen	Faktor für Schäden an Waren, Produkten und Lagerbeständen
Öffentliche und private Dienstleistungen	3	1,00	1,00	1,00
	2	0,70	0,73	1,45
	1	0,82	0,86	1,10

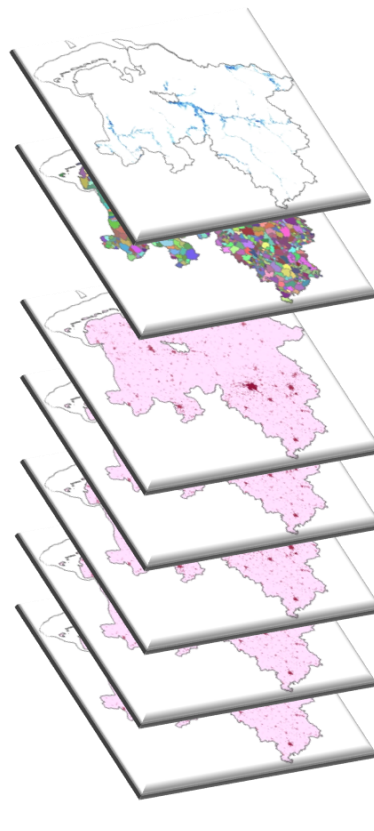
© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Die Schadensabschätzung erfolgt im GIS auf Rasterbasis und ist in Abbildung 19 skizziert. Dazu werden die Wasserstandsklassen aus den Gefahrenkarten auf Basis der Schadensgrade pro Schadensart reklassifiziert. Das reklassifizierte Raster wird dann mit einem ebenfalls rasterbasierten Vermögenswert (aus Seifert et al. 2010a, siehe Abschnitt 2.1.5.2.2) multipliziert. Bei der Multiplikation werden zusätzlich verschiedene Skalierungsfaktoren berücksichtigt:

- 1) die Umrechnung der Vermögenswerte aus Seifert et al. (2010a) auf das Jahr 2016 mithilfe von Preisindizes (vgl. Abschnitt 2.1.5.2.2),
- 2) ein Skalierungsfaktor für den Schadensgrad je nach Schadensart, Sektor und Betriebsgröße (siehe Tabelle 20),
- 3) die Rasterzellengröße in m^2 , da die Vermögenswerte in EUR/m^2 angegeben sind,
- 4) für die Schäden an Waren, Produkten und Lagerbeständen erfolgt eine Anpassung des Vermögenswertes laut Tabelle 18; zusätzlich wird ein Faktor von 0,66 berücksichtigt, da nicht alle Betriebe Waren, Produkte oder Lagerbestände haben (vgl. Seifert et al. 2010b), sowie
- 5) ein Skalierungsfaktor von 1,22 nach Penning-Rowsell et al. (2005), um eine stärkere Schädigung durch Sturmfluten im Vergleich zu Flusshochwassern zu berücksichtigen.

Durch diese Multiplikation kann der finanzielle Unternehmensschaden je Rasterzelle ermittelt werden, der zuletzt für jede Gemeinde pro Schadensart (1) Gebäude, 2) Betriebseinrichtung und 3) Waren, Produkte und Lagerbestände) aufsummiert wird. Die Anwendbarkeit des (ursprünglichen) Modells für Binnenhochwasser wurde bereits von Seifert et al. (2010b) für 19 Gemeinden in Sachsen für das Hochwasserereignis 2002 validiert. Zur Übertragbarkeit auf Sturmfluten liegen keine Informationen vor.

Abbildung 19: Eingangsdaten für die Abschätzung von Schäden in Unternehmen durch Sturmfluten



Variable	Wert	Ebene	Quelle
Wassertiefe	m (klassifiziert bzw. kontinuierlich)	Raster	Gefahren-Karte
Kennziffer	Gemeinde	Gemeinde	Infas Geodaten, 2001 2011
Ökonomischer Sektor	1: Öffentl. und priv. Dienstleistungen 2: verarbeitendes und produzierendes Gewerbe 3: Dienstleistungen 4: Handel, Gastgewerbe, Verkehr 5: Landwirtschaft		
Vermögenswert pro Sektor, Betriebsgröße, Gebäude und Betriebseinrichtung (30 Datensätze)	€/m ² , Stand 2003 1-10, 11-100 und >100 Beschäftigte	CORINE	Seifert et al., 2010a;

© eigene Darstellung, UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

2.1.5.2.4 Szenarien

Die Berücksichtigung der sozioökonomischen Entwicklung soll analog zur Wirkungskette „Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten“ (vgl. Abschnitt 2.1.4.2.4) erfolgen. Eine Betrachtung des Einflusses des Klimawandels für Hamburg und Schleswig-Holstein erfolgt für den Bereich Industrie- und Gewerbe nicht.

Als Anpassungsmaßnahme wird die betriebliche Eigenvorsorge (Bauvorsorge) berücksichtigt. Das Modell FLEMOcs ist in der Lage, in einem zweiten Modellschritt die Effekte von Kontamination (schadensverstärkend) und Vorsorge (schadensreduzierend) zu berücksichtigen. Beide Effekte werden im Modell in Kombination betrachtet, da Vorsorgemaßnahmen, wie z. B. die Hochwassersicherung von Öltanks oder Behältern mit anderen wassergefährdenden Stoffen, gleichzeitig die Kontamination reduzieren (vgl. Kreibich et al. 2010). Die Untersuchungen von Sieg et al. (2017) zeigen (für Flusshochwasser) deutlich, dass nach dem Wasserstand die Kontamination des Wassers sowie Vorsorgemaßnahmen die wichtigsten Variablen für die Schadensabschätzung sind. Insbesondere in den Sektoren „verarbeitendes und produzierendes Gewerbe“ sowie „Handel, Gastgewerbe und Verkehr“ haben Vorsorgemaßnahmen einen deutlichen schadensreduzierenden Effekt (vgl. Sieg et al. 2017).

Da in der Arbeit von Sieg et al. (2017) keine Skalierungsfaktoren explizit angegeben werden, aber die Modellergebnisse ähnlich sind wie Abschätzungen mit FLEMOcs, werden für die vorliegende Studie die Skalierungsfaktoren aus Kreibich et al. (2010) übernommen. Analog zur Wirkungskette Wohngebäude wird von einer optimalen Bauvorsorge ausgegangen, die auch die Kontamination des Wassers unterbindet. In diesem Fall beträgt der mittlere Gebäudeschaden 67

% des geschätzten Schadens aus dem Grundmodell, der mittlere Schaden an Betriebseinrichtungen 72 % und der mittlere Schaden an Waren, Produkten und Lagerbeständen 75 % (vgl. Kreibich et al. 2010).

2.1.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Anwendung des FLEMOcs-Modells zeigt, dass Küstenhochwasser enorme Unternehmensschäden verursachen könnten. Tabelle 21 zeigt die geschätzten Schäden für die in Tabelle 5 aufgelisteten Szenarien. Für die häufigen Szenarien (HW20) liegen die potenziellen Schäden in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Hamburg zwischen 53,1 Mio. EUR und 252 Mio. EUR (nach Anwendung des Anpassungsfaktors für Salzwasser). Diese Werte steigen bei einem mittleren Hochwasserereignis (HW 100 Hamburg; HW200 Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein) auf bis zu 543 Mio. EUR in Mecklenburg-Vorpommern. Für die Extremszenarien steigen die Werte für diese drei Bundesländer auf bis zu 14,8 Mrd. EUR an (Hamburg). Auch in den Bundesländern, für die lediglich Extremszenarien vorliegen, können die Schäden mehrere Milliarden EUR betragen wie zum Beispiel 8,8 Mrd. EUR in Bremen oder 25,1 Mrd. EUR in Niedersachsen (mit Berücksichtigung des Skalierungsfaktors), welches den höchsten absoluten Schadenswert der Küstenbundesländer darstellt. Allerdings sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den Gefahrenkarten nicht um realistische Einzelereignisse handelt (eine Ausnahme können die Stadtstaaten sein). Insofern handelt es sich bei diesen Zahlen nicht um mögliche Schäden für ein mögliches Einzelereignis, sondern um eine Einschätzung, welche Unternehmenswerte insgesamt betroffen und geschädigt werden könnten.

Tabelle 21: Schäden an Unternehmen durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien in Mio. EUR (gerundet auf drei signifikante Stellen)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			18,9 (22,0) 7.210 (8.800)
Hamburg	207 (252)	263 (321)	12.100 (14.800)
Mecklenburg-Vorpommern	43,5 (53,1)	444 (543)	859 (1.050)
Niedersachsen			193 (235) 20.600 (25.100)
Schleswig-Holstein	153 (186)	241 (294)	278 (339) 1.350 (1.640)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung des Anpassungsfaktors für Salzwasser gemäß Penning-Rowsell et al. (2005)

Wie auch bei den Gebäudeschäden ergeben sich Unsicherheiten aus den Skalierungsfaktoren für den Einfluss von Salzwasser auf den Gebäudeschaden. Diesbezüglich liegen nur wenige empirische Daten vor, so dass diese Faktoren nicht aus empirischen Daten vergangener Sturmfluten abgeleitet bzw. validiert werden können. Wie oben erwähnt, stellt zudem die große Heterogenität der Unternehmen eine besondere Herausforderung der Modellierung dar.

Um die tatsächliche Vulnerabilität eines Bundeslandes besser einschätzen zu können, ist es auch im Bereich Industrie und Gewerbe von Interesse, die absoluten Schäden ins Verhältnis zur

Größe der gesamten Industrie- und Gewerbegebiete des jeweiligen Bundeslandes zu setzen. Der flächenspezifische Schaden beziffert den durchschnittlichen Schaden pro Quadratkilometer Industrie und Gewerbeflächen in dem jeweiligen Bundesland. Tabelle 22 zeigt, dass Hamburg bei den häufigen und mittleren Szenarien mit rund 670.000 EUR bzw. 850.000 EUR pro km² Industrie- und Gewerbeflächen hohe spezifische Schäden im Vergleich zu Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein aufweist. Für das Extremszenario weisen die Stadtstaaten Bremen und Hamburg mit rund 47,7 Mio. EUR bzw. 39,4 Mio. EUR pro km² Industrie- und Gewerbeflächen vergleichsweise hohe spezifische Schäden auf. Zu beachten sind wiederum die sehr heterogenen und somit nicht vergleichbaren Szenarien der Gefahrenkarten (siehe Tabelle 5).

Tabelle 22: Flächenspezifische Schäden an Industrie und Gewerbe (EUR/km² Gesamtfläche des jeweiligen Bundeslandes) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern (in EUR)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			120.000 47.700.000
Hamburg	670.000	850.000	39.400.000
Mecklenburg-Vorpommern	50.000	480.000	930.000
Niedersachsen			50.000 5.530.000
Schleswig-Holstein	120.000	190.000	220.000 1.060.000

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

Szenario mit Anpassung

Zukünftig kann sich eine Veränderung des Schadenspotenzials aus einer veränderten Sensitivität (Zu- oder Abnahme von Industrie- und Gewerbe) ergeben. Die mögliche Zunahme an Industrie- und Gewerbe in den Überflutungsflächen der Küstenbundesländer wurde aus den CC-LandStraD-Daten abgeleitet. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die Zunahme bis 2030 gleichmäßig über den gesamten Zeitraum verteilt. Gemäß diesem Szenario nimmt die Fläche an Industrie- und Gewerbeflächen in den Küstenbundesländern zwischen 2016 und 2030 um 4,8 % zu.

Um die Veränderung im Bereich der Sensitivität bis 2030 abzubilden, wurde wiederum ein weiterer flächenspezifischer Schaden über alle Küstenbundesländer hinweg berechnet. Analog zur Vorgehensweise bei den Wohngebäuden wurde hierfür der potenzielle absolute Schaden nur auf die Industrie- und Gewerbeflächen in den Risikogebieten (und nicht auf das gesamte Bundesland) bezogen. Die so normierten Schäden an Industrie und Gewerbe (EUR/m²) für die einzelnen Bundesländer und deren Gefährdungsszenarien sowie der Mittelwert und die Standardabweichung aller Szenarien finden sich in Tabelle 23. Es zeigt sich, dass der so normierte Schaden für Industrie und Gewerbe mit 122 EUR/m² (nach Anwendung des Anpassungsfaktors für Salzwasser) nochmals höher liegt als der entsprechend normierte flächenspezifische Gebäudeschaden bei Wohngebäuden (siehe

Tabelle 14).

Tabelle 23: Flächenspezifische Schäden an Industrie und Gewerbe (EUR/m² Fläche in den Überflutungsgebieten) durch Sturmfluten in den Küstenbundesländern

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			142 (173) 158 (192)
Hamburg	170 (207)*	178 (217)	190 (231)
Mecklenburg-Vorpommern	43 (52)	42 (51)	48 (59)
Niedersachsen			82 (100) 70 (85)
Schleswig-Holstein	72 (87)	74 (90)	74 (90) 60 (73)
Mittelwert			100 (122)
Standardabweichung			54 (66)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser gemäß Penning-Rowsell et al. (2005)

Um das steigende Schadenspotenzial aufgrund der Zunahme an Wohnbauflächen zu berücksichtigen, wurde wiederum der Mittelwert des flächenspezifischen Schadens (bezogen auf die Risikogebiete) über alle Szenarien mit dem Zuwachs an Wohnflächen (in Quadratmetern) in den Küstenbundesländern multipliziert. Demnach steigt das Schadenspotenzial aufgrund der steigenden Sensitivität bis zum Jahr 2030 in allen Überflutungsflächen der Küstenbundesländer (Extremszenarien ohne HW-Schutz) um 1,05 Mrd. EUR (1,29 Mrd. EUR nach Anpassung mit Penning-Rowsell).

Eine Möglichkeit, Schäden an Unternehmen zu reduzieren, sind auch hier Maßnahmen der Bauvorsorge. Analog zur Wirkungskette Wohngebäude wird von einer optimalen Bauvorsorge ausgegangen, die auch die Kontamination des Wassers unterbindet. In diesem Fall beträgt der mittlere Gebäudeschaden 67 % des geschätzten Schadens aus dem Grundmodell, der mittlere Schaden an Betriebseinrichtungen 72 % und der mittlere Schaden an Waren, Produkten und Lagerbeständen 75 % (vgl. Kreibich et al. 2010). Tabelle 24 zeigt die Schäden an Unternehmen (ohne Anpassungsfaktor für Salzwasser) unter der Annahme einer optimalen Bauvorsorge.

Tabelle 24: Schäden an Unternehmen mit optimaler Bauvorsorge durch Küstenhochwasser für unterschiedliche Szenarien (in Mio. EUR)

Bundesland	HW häufig	HW mittel	HW extrem
Bremen			16,8 (20,5) 2.860 (3.490)
Hamburg	147 (179)*	186 (227)	8.580 (10.500)
Mecklenburg-Vorpommern	31,1 (37,9)	316 (385)	609 (743)
Niedersachsen			136 (166) 14.500 (17.700)
Schleswig-Holstein	108 (131)	169 (207)	196 (239) 947 (1.160)

© UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam

* Schäden in Klammern nach Anwendung der Anpassungsfaktoren für Salzwasser gemäß Penning-Rowsell et al. (2005)

2.1.5.4 Handlungsempfehlungen

Die Handlungsempfehlungen entsprechen denen, die bereits in den Abschnitten zur Schiene und den Wohngebäuden aufgeführt wurden. Dies sind insbesondere Maßnahmen, die die sehr heterogenen Gefahrenkarten sowie mangelnde empirische Daten zur Ableitung und Validierung von Modellen und Skalierungsfaktoren adressieren.

Zudem kommt auch bei dieser Wirkungskette der Abschätzung und räumlichen Verteilung von Unternehmenswerten (Vermögenswerten) eine besondere Bedeutung zu. Die geschätzten Schäden zeigen, dass insbesondere der Schutz von Unternehmen sehr hohe (direkte) Schäden durch Sturmfluten vermeiden kann.

2.1.6 Kosten-Nutzen-Betrachtung der privaten Bauvorsorge

Vorrangiges Ziel dieses Vorhabens war es, Schadenspotenziale für ausgewählte Wirkungsketten in den Bereichen Starkregen und Sturmfluten und die Wirksamkeit (= schadensreduzierende Wirkung) ausgesuchter Anpassungsmaßnahmen zu quantifizieren. Darüber hinaus sollte die schadensreduzierende Wirkung ausgewählter Anpassungsmaßnahmen den erwarteten Kosten gegenübergestellt werden, um das Nutzen-Kosten-Verhältnis der Maßnahme zu bewerten. Im Rahmen des Vorhabens wurden die schadensreduzierende Wirkung von Deichertüchtigungen und die Wirkung der privaten Bauvorsorge untersucht. Die oben stehenden Analysen haben gezeigt, dass Maßnahmen der privaten Bauvorsorge zu einer erheblichen Schadensreduzierung führen können (siehe z. B. Abschnitt 2.1.4.3). Aus diesem Grund soll für die Bauvorsorge von Privathaushalten betrachtet werden, welche Kosten mit diesen Maßnahmen verbunden sind und ob der Nutzen derartiger Maßnahmen die Kosten übersteigt.

Um das Nutzen-Kosten-Verhältnis der privaten Bauvorsorge zu ermitteln, sind Informationen zu den Kosten derartiger Investitionen erforderlich. Hierzu können Schätzungen aus der bestehenden Literatur abgeleitet werden (z.B. Kreibich et al. 2011, Kreibich et al. 2012, Kreibich et al. 2015, Aerts 2018). Um den Nutzen einer Maßnahme abschätzen zu können, spielt zudem die Häufigkeit von (potenziell) schädigenden Ereignissen (Hochwasser/Überflutung) eine entscheidende Rolle, da der Risikominderungseffekt eben nur im Falle eines Ereignisses eintritt. Es ist ein großer Unterschied, ob die Investition in eine Gebäudeabdichtung alle fünf Jahre oder

einmal in 100 Jahren zum Tragen kommen. Um diese zeitliche Komponente berücksichtigen zu können, sind Informationen zum Schadenserwartungswert erforderlich. Der Schadenserwartungswert spiegelt den gemittelten jährlich zu erwartenden Schaden wider. Um diesen berechnen zu können, müsste das Schadenspotenzial einer Bandbreite unterschiedlicher Gefährdungsszenarien (von häufig bis sehr selten) berechnet und anschließend integriert werden (Merz 2017).

Diese zeitliche Komponente lag im diesem Vorhaben nicht vor. Im Bereich Starkregen ist dies darauf zurückzuführen, dass es derzeit nicht möglich ist, dem Oberflächenabfluss aufgrund der unterschiedlichen Gebietseigenschaften eine Jährlichkeit zuzuordnen (siehe Abschnitt 0). So kann ein Niederschlagsereignis mit derselben Intensität in verschiedenen Gebieten völlig unterschiedliche Überflutungen zur Folge haben. Für die Schäden durch Sturmfluten liegen nur für Hamburg und Schleswig-Holstein mehrere Gefährdungsszenarien vor, die sich aber wiederum in den zugrundeliegenden Jährlichkeiten unterscheiden. Eine formale Nutzen-Kostenanalyse war auf der Grundlage der vorliegenden Daten somit nicht möglich.

Um eine Einschätzung bezüglich der ökonomischen Effizienz von Maßnahmen der Bauvorsorge treffen zu können (= positives Nutzen-Kosten-Verhältnis), wird deshalb im Folgenden die Literatur ausgewertet. Dabei wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis der Bauvorsorge in Privathaushalten behandelt. Aufgrund der sehr hohen Heterogenität von Unternehmen (z. B. Gebäudetypen, Betriebseinrichtungen, Lagerbestände) ist es sehr schwierig, allgemeine Aussagen zum Nutzen-Kosten-Verhältnis einzelner Maßnahmen anzustellen. Für Deutschland liegen derartige Untersuchungen unseres Wissens nach derzeit nicht vor. Als Orientierung dient lediglich eine Studie für Italien (Botzen et al. 2017). Diese kommt zu dem Ergebnis, dass das Abdichten von Gebäuden nur für bestimmte Gebäudetypen kosteneffizient ist, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses und der potenzielle Schaden entscheidende Unsicherheitsfaktoren darstellen.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis von Maßnahmen der privaten Bauvorsorge in Deutschland haben Kreibich et al. (2011) untersucht. Betrachtet wurden dabei drei Maßnahmen jeweils für Gebäude mit und ohne Keller:

- ▶ Abdichten des Gebäudes;
- ▶ Verwendung von Wassersperren, z. B. Dammbalken zur Abdichtung von Türen und Fenstern;
- ▶ Vermeidung von Wasserverschmutzung durch die Sicherung von Öltanks.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis der drei Maßnahmen wurde dann unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwassern (jährlich, 10-jährlich, 50-jährlich) und unterschiedlichen Abschreibungsraten (3 % und 4 %) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25: Nutzen-Kostenverhältnisse für unterschiedliche Maßnahmen der Bauvorsorge für unterschiedliche Hochwasserszenarien, berechnet mit unterschiedlichen Abschreibungsraten.

zusammengefasst. Tabelle 25: Nutzen-Kostenverhältnisse für unterschiedliche Maßnahmen der Bauvorsorge für unterschiedliche Hochwasserszenarien, berechnet mit unterschiedlichen Abschreibungsraten.

zeigt, dass bei sehr häufigen Hochwassern (jährlich) alle betrachteten Maßnahmen der Bauvorsorge ein positives Nutzen-Kosten Verhältnis aufweisen. Ein besonders hohes Nutzen-Kosten Verhältnis weisen dabei vergleichsweise günstige und einfach umzusetzende

Maßnahmen, wie die Sicherung von Öltanks, auf. Bei sehr häufigen Hochwassern sind auch sehr teure Maßnahmen wie das Abdichten von Gebäuden kosteneffizient. Letzteres ist bei 10-jährlichen Ereignissen nur noch bei Gebäuden mit einem Keller der Fall. Bei Ereignissen, die nur alle 50 Jahre vorkommen, weisen diese teuren Maßnahmen ein negatives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf. Wassersperren sind für alle betrachteten Szenarien kosteneffizient.

Tabelle 25: Nutzen-Kostenverhältnisse für unterschiedliche Maßnahmen der Bauvorsorge für unterschiedliche Hochwasserszenarien, berechnet mit unterschiedlichen Abschreibungsraten.

Cellar only affected						
flood return period	1/50 yr		1/10 yr		1/1 yr	
discount rate	4 %	3 %	4 %	3 %	4 %	3 %
Waterproof skin (bitumen sealing)	0.16	0.20	0.79	0.99	7.93	9.87
waterproof concrete	0.14	0.17	0.70	0.86	6.95	8.65
securing of oil tanks	5.61	6.32	28.04	31.58	280.38	315.76
Cellar and ground floor affected						
flood return period	1/50 yr		1/10 yr		1/1 yr	
discount rate	4 %	3 %	4 %	3 %	4 %	3 %
Waterproof skin (bitumen sealing)	0.55	0.68	2.73	3.39	27.27	33.92
waterproof concrete	0.48	0.59	2.39	2.97	23.89	29.72
securing of oil tanks	9.59	10.80	47.95	54.00	479.45	539.96
Mobile flood walls	1.12	1.22	5.62	6.11	56.19	61.14

© Kreibich et al. (2012)

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine Metaanalyse des Bündnisses deutscher Hilfsorganisationen „Aktion Deutschland Hilft“. Danach weisen insbesondere nicht-bauliche Maßnahmen durchweg ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf, und zwar für verschiedene Naturgefahren (Aktion Deutschland Hilft 2016).

Um das Schadenspotenzial zukünftig in überflutungsgefährdeten Gebieten zu begrenzen, sollten somit kostengünstige und schnell umsetzbare Maßnahmen wie das Sichern von Öltanks forciert werden. Damit würden zusätzlich Umweltschäden vermieden (vgl. Thieken et al. 2016a). Teurere Maßnahmen sollten in Hochrisikogebieten umgesetzt werden.

2.2 Potentielle Klimawirkungen für die Wirkungsketten „Hitzetote“, „Leistungsfähigkeit“ und „Waldbrand“

2.2.1 Klimatische Exposition für die Wirkungsketten „Hitzetote“, „Leistungsfähigkeit“ und „Waldbrand“

Für die Wirkungsketten „Hitzetote“, „Leistungsfähigkeit“ und „Waldbrand“ wurden für die Szenarien „ohne Klimawandel und ohne Anpassungsmaßnahmen“ und „mit Klimawandel und ohne Anpassungsmaßnahmen“ jeweils auf die gleichen Klimaprojektionsdaten zurückgegriffen, so dass die Beschreibung der Daten und der Vorgehensweise zu deren Aufbereitung hier

übergreifend dargestellt wird. Als Klimaprojektionsdaten verwendet wurden die aktuellen Ergebnisse des EURO-CORDEX-Vorhabens¹⁵. Als Antrieb für den Klimawandel werden dort sogenannten „representative concentration pathways“ (RCPs) des IPCC genutzt, wobei für die vorliegende Studie die Varianten RCP4.5 und RCP 8.5 verwendet wurden.

Die Recherche der Klimaprojektionsdaten erfolgte über den ESGF-Knoten am DKRZ¹⁶. Folgende Auswahlkriterien wurden verwendet:

- Project: CORDEX
- Domain: EUR-11
- Experiment: historical, RCP4.5, RCP8.5
- Time Frequency: day
- Variable: huss, pr, ps, rsds, sfcwind, tas, tasmax, tasmin

Eine Beschreibung der Variablenkürzel findet sich in Tabelle 26.

Tabelle 26: Variablen der Klimaprojektionen

Kürzel	Bezeichnung EN	Bezeichnung DE	Einheit
huss	Near-surface specific humidity	Bodennahe spezifische Feuchte	– [0–1]
pr	Precipitation	Niederschlag	mm
ps	Near-surface pressure	Bodennahe Luftdruck	hPa
rsds	Near-surface downwelling shortwave radiation	Bodennahe kurzwellige Einstrahlung	W
sfcwind	Near-surface wind speed	Bodennahe Windgeschwindigkeit	m/s
tas	Near-surface temperature, mean	Bodennahe Lufttemperatur, Mittel	K
tasmax	Near-surface temperature, maximum	Bodennahe Lufttemperatur, Maximum	K
tasmin	Near-surface temperature, minimum	Bodennahe Lufttemperatur, Minimum	K

© IÖR

Anmerkung: Beim Kürzel handelt es sich um den von CORDEX verwendeten Bezeichnungstandard.

Eine Übersicht der mit den oben genannten Auswahlkriterien recherchierten Kombinationen von Globalen Klimamodellen (Global Climate/Circulation Models GCMs), Regionalen Klimamodellen (Regional Climate Models RCMs) und verschiedener Realisierungen und Modellvarianten zeigt Tabelle 27.

¹⁵ <https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf>

¹⁶ <https://esgf-data.dkrz.de/search/esgf-dkrz/>

Tabelle 27: Übersicht über die Klimaprojektionsketten des EuroCORDEX-Ensembles für die EUR11-Domäne mit den Antrieben RCP4.5 und RCP8.5

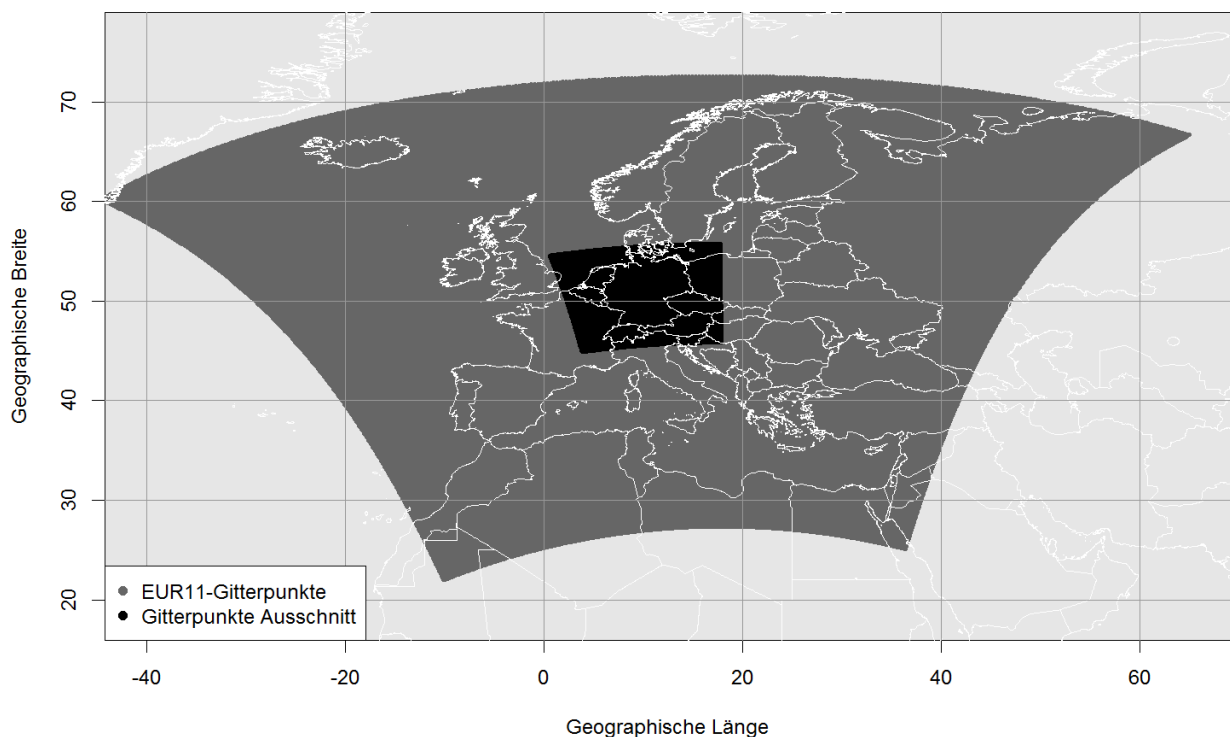
Simulationskette	Beginn „historischer“ Zeitraum	Ende „historischer“ Zeitraum	Beginn Projektions- Zeitraum	Ende Projektions- Zeitraum
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 _r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	01.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 _r1i1p1_CNRM-ALADIN53_v1	01.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 _r1i1p1_SMHI-RCA4_v1	01.01.1970	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
ICHEC-EC-EARTH _r12i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	01.12.1949	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
ICHEC-EC-EARTH _r12i1p1_KNMI-RACMO22E_v1	01.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
ICHEC-EC-EARTH _r12i1p1_SMHI-RCA4_v1	01.01.1970	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
ICHEC-EC-EARTH _r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v1	01.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
ICHEC-EC-EARTH _r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1	01.01.1951	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
IPSL-IPSL-CM5A-MR _r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F_v1	01.01.1951	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
IPSL-IPSL-CM5A-MR _r1i1p1_SMHI-RCA4_v1	01.01.1970	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
MOHC-HadGEM2-ES _r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	01.12.1949	30.12.2005	01.01.2006	30.12.2099
MOHC-HadGEM2-ES _r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2	01.01.1950	30.12.2005	01.01.2006	30.12.2099
MOHC-HadGEM2-ES _r1i1p1_SMHI-RCA4_v1	01.01.1970	30.12.2005	01.01.2006	30.12.2099
MPI-M-MPI-ESM-LR _r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	01.12.1949	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
MPI-M-MPI-ESM-LR _r1i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1	02.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
MPI-M-MPI-ESM-LR _r1i1p1_SMHI-RCA4_v1a	01.01.1970	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
MPI-M-MPI-ESM-LR _r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1	02.01.1950	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100
NCC-NorESM1-M _r1i1p1_DMI-HIRHAM5_v2	01.01.1951	31.12.2005	01.01.2006	31.12.2100

Anmerkung: Bei den MOHC-HadGEM2-ES-Ketten haben alle Monate 30 Tage. Bei den IPSL-IPSL-CM5A-MR-Ketten existieren keine Schaltjahre mit entsprechenden Schalttagen.

Zum Download des mehrere Tausende Dateien und vom Volumen rund 4,3 Gigabyte umfassenden Datenbestandes wurden über die ESGF-Rechercheplattform Download-Skripte für das Unix-Werkzeug *wget* erstellt. Der Datentransfer erfolgte dann skriptgesteuert auf den Hochleistungsrechner-/Speicherkomplex (HRSK) der TU Dresden, wo auch alle weiteren daten- und rechenintensiven Verarbeitungsschritte erfolgten.

Die zeitliche Auflösung der Klimaprojektionsdaten sind Tage mit unterschiedlichen Startdaten für den als „historical“ bezeichneten Zeitraum ohne Antrieb durch RCPs. Einheitlich ist der Beginn des Projektionszeitraums für die eigentlichen Szenarien zum 01.01.2006. Das Ende des Projektionszeitraums unterscheidet sich wieder leicht mit drei Simulationsketten die bereits zum 30.12.2099 enden und den restlichen 15 die zum 31.12.2100 enden (siehe hierzu auch Tabelle 27). Die unterschiedliche Anzahl von Tagen pro Jahr bedingt durch die Vernachlässigung von Schalttagen in zwei Projektionsketten bzw. der Nutzung einer fixen Monatslänge von 30 Tagen in drei Projektionsketten wurde bei den Auswertungen auf Jahresbasis nicht gesondert berücksichtigt. Das für den Auswertzeitraum „ferne Zukunft“ (2071–2100) teilweise fehlende Jahr 2100 wurde ignoriert bzw. der Zeitraum um ein Jahr nach vorne verschoben, also 2070–2099 verwendet. Der Übersichtlichkeit halber wird der Zeitraum im Folgenden ungeachtet der Verschiebungen als 2071–2100 bezeichnet.

Abbildung 20: Ausdehnung der EuroCORDEX-EUR-11-Domäne und Lage des Teilausschnittes

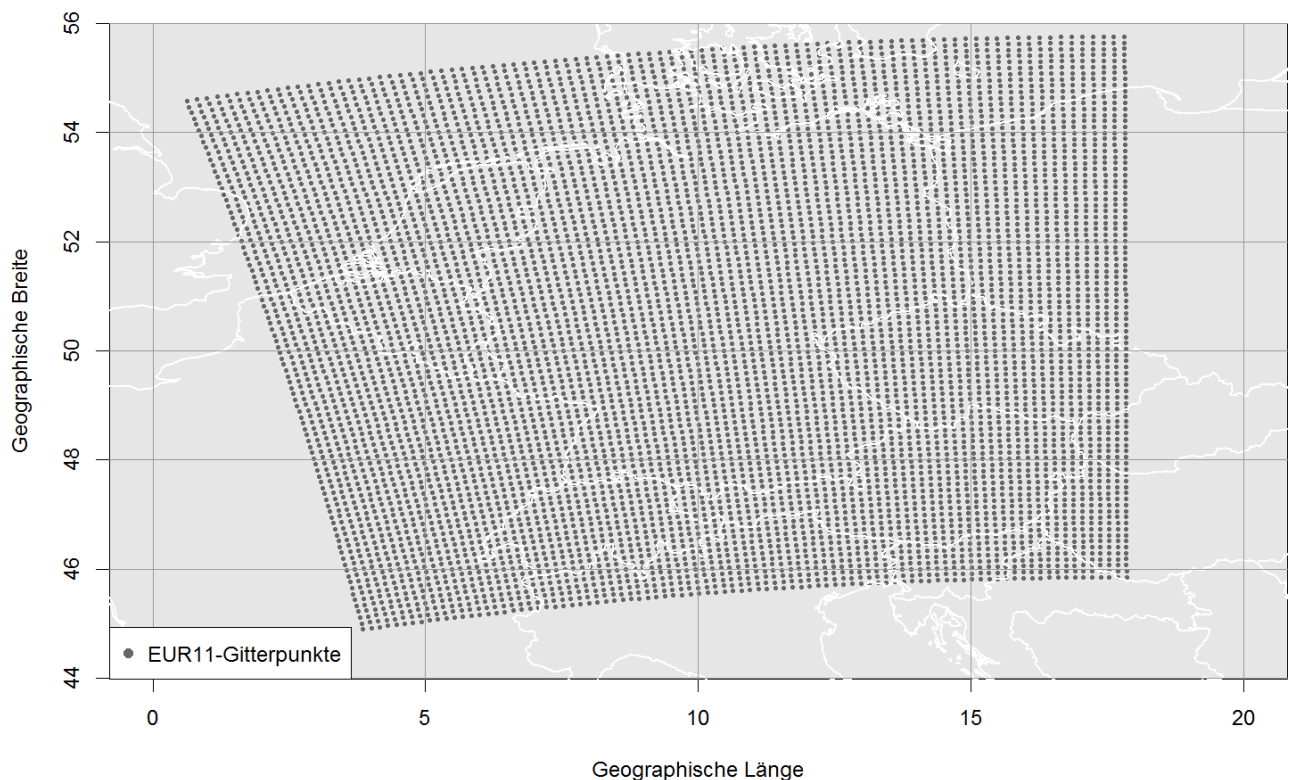


© eigene Darstellung, IÖR. Daten: WCRP-CORDEX, Ländergrenzen GADM

Der Abstand der Gitterpunkte für die EUR-11-Domäne beträgt in der für die Modellierung verwendeten polarstereographischen Projektion gleichmäßig $0,11^\circ$, was rund 10 Kilometern entspricht. Durch die Umprojektion der Gitterpunkte in ein geographisches Koordinatensystem zur Überlagerung und Auswertung mit anderen Geodaten (z. B. Flächen der Bundesländer) ergibt sich eine leichte Verschiebung der Abstände mit einer Spreizung der horizontalen

Gitterweite polwärts (siehe Abbildung 21). Die räumliche Ausdehnung der EUR-11-Domäne (siehe Abbildung 20) beträgt 280 Punkte in Nord-Süd-Richtung und 240 Punkte in West-Ost-Richtung, also rd. 2.800 x 2.400 km. Die Berechnungen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erfolgten mit einem Teilausschnitt von 90 x 90 Punkten. Hierzu wurde aus den Originaldateien im NCDF4-Format jeweils ein entsprechender Ausschnitt extrahiert und in einer separaten Datei (R-Workspace-Format *RData*) abgespeichert. Abbildung 21 zeigt die Lage der EUR-11-Gitterpunkte im Teilausschnitt „Deutschland“.

Abbildung 21: Lage der EUR-11-Gitterpunkte im Teilausschnitt „Deutschland“



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: WCRP-CORDEX, Ländergrenzen GADM

Die für jeweils 10-Jahres-Zeitscheiben vorliegenden NetCDF-Dateien der einzelnen Variablen wurden jeweils für den „historischen“ Zeitraum bis 2005 sowie für die Projektionszeiträume der zwei Antriebe RCP4.5 und RCP8.5 zu einer Gesamtdatei (R-Workspace-Format *RData*) pro Projektionskaskade zusammengefügt. Die interne Struktur der Dateien entspricht dabei im Prinzip einem „Stapel“ von Rastern bzw. Matrizen für jeweils einen Tag, d.h. die zeitliche Dimension entspricht der Anzahl an Tagen. Diese Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Berechnungen, die in der Regel für jeden Tag und jede Gitterzelle durchgeführt wurden. Da nicht alle Projektionskaskaden mit „echten“ kalendarischen Daten arbeiten und beispielsweise Schalttage vernachlässigen bzw. mit „Einheitsmonaten“ von 30 Tagen arbeiten, mussten entsprechende Anpassungen an den Berechnungsfunktionen vorgenommen werden.

Zum Zeitpunkt der Datenbeschaffung standen keine bias-korrigierten Daten zur Verfügung. Eine Bias-Korrektur für die verschiedenen Variablen der einzelnen Projektionskaskaden war im Rahmen der Studie nicht möglich. Die daraus resultierenden Bandbreiten bzw. Abweichungen finden sich dementsprechend auch in den abgeleiteten Ergebnissen wieder, was bei deren Interpretation zu beachten ist. Weiterhin ist zu beachten, dass zwischenzeitlich eine Projektionskette aus dem Euro-CORDEX-Ensemble wegen Fehlern zurückgezogen wurde, aus

Gründen des zeitlichen Ablaufs aber nicht mehr aus den Ergebnisdarstellungen entfernt werden konnte.

Die für die Wirkungskette zur Berechnung von Hitzetoten notwendige Variable „Relative Feuchte“ existiert als solche nicht im EURO-CORDEX-Variablen­set. Sie wurde mit Hilfe der Tagesmitteltemperatur *tas* und des Luftdrucks *ps* aus der spezifischen Feuchte *hus* abgeleitet. Die im gleichen Zusammenhang notwendige komplexe Größe „gefühlte Temperatur“ bzw. „apparent temperature“ nach Steadman (1979) – auch als „heat index“ *hi* bezeichnet – wurde in der Implementierung von Rothfusz (1990, zit. in: Anderson et al. 2013) für das gesamte Ensemble aus den Größen Lufttemperatur und Relative Feuchte berechnet:

```
WENN tasf <= 80 OR hurs <= 40
at = tasf
SONST
at = -42.379 +
      (2.04901523 * tasf) +
      (10.14333127 * hurs) -
      (0.22475541 * tasf * hurs) -
      (0.00683783 * tasf * tasf) -
      (0.05481717 * hurs * hurs) +
      (0.00122874 * tasf * tasf * hurs) +
      (0.00085282 * tasf * hurs * hurs) -
      (0.00000199 * tasf * tasf * hurs * hurs))
```

mit *at* als Apparent Temperature, *tasf* als Lufttemperatur in °Fahrenheit und *hurs* als Relative Feuchte in %.

2.2.2 Konzeptionelle Einführung in die Modellierung von Schäden für die menschliche Gesundheit und Leistungsfähigkeit

Das Modellierungskonzept für die Analyse und Bewertung der Klimawandelfolgen mit dem Rezeptor Mensch und dessen Gesundheit orientiert sich an der Struktur von gesundheitsbezogenen Risikoanalysen mit den entsprechenden Analyseschritten, auch als Quantitative Risikoanalyse (QRA) bzw. international als Human Health Risk Assessment oder kürzer Health Risk Assessment (HRA) bezeichnet. Eine Übersicht zu solchen Verfahren findet sich etwa in Sauer (2014). Werden Tiere und Pflanzen als Rezeptoren betrachtet, so spricht man von Ecological Risk Assessment. In der Risikoforschung bezieht sich der Begriff Rezeptor auf die unterschiedlichen schadennehmenden Subjekte und Objekte, oft auch als „Elemente (elements [at risk])“ bezeichnet. Beispielhaft seien folgende Definitionen genannt: „*Receptor: In general terms, something that could be adversely affected by a contaminant, such as people, an ecological system, property or a water body*“¹⁷ bzw. für den Rezeptor Mensch und dessen Gesundheit: „*Receptor Human health: Any human individual or population that are presently or will potentially be exposed to, and adversely affected by, the release or migration of contaminants.*“¹⁸ oder vom Ministry for the Environment (2011): „*A conceptual site model is a system diagram identifying contaminant sources, routes of exposure (pathways), and what receptors are affected by contaminants moving along those pathways.*“

Die Risikoanalyse untergliedert sich dabei, ähnlich wie Risikoanalysen in anderen Bereichen (z. B. Hochwasserrisikoanalyse nach EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (RL

¹⁷ <http://www.eugris.info/GlossaryDetails.asp?TermID=482&Term=Receptor>

¹⁸ <http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=33&Ca=2&Cy=0&T=Receptor:%20Human%20health>

2007/60/EG, Schuhmann et al. 2011), Risikoanalysen für andere Naturgefahren (UN 2004), allgemeine Risikoanalyse-Frameworks (ISO 2009), Risikoanalysen für „ökologische“ Rezeptoren durch Schadstoffe (EC 1996)), in die Komponenten Gefahrenanalyse, Dosis-Wirkungs-Analyse sowie Expositionsanalyse und insbesondere bei räumlich differenzierten Ansätzen eine der Expositionsanalyse vorangestellte Rezeptoranalyse. Bevor die Exposition für einen bestimmten Rezeptor ermittelt wird oder werden kann, sind die Rezeptoren hinsichtlich ihres räumlichen Vorkommens (im Projekt ist es Ziel, ganz Deutschland flächendifferenziert zu analysieren) und ihrer Charakteristik (z. B. Anteil Altersgruppen der Wohnbevölkerung) räumlich zu identifizieren. Kernfrage ist dabei: Wer oder was kommt wo in welcher Form bzw. Art vor?

2.2.2.1 Gefahrenanalyse

Unter Gefahr wird hier die physikalische oder stoffliche Einwirkung verstanden, die bei einem Rezeptor zu einem Schaden führen kann. Wir gehen hier von der Realisierung des potenziellen Schadens aus. Ohne Definition eines Rezeptors und dessen Exposition und Reaktion kann es zu keinem Schaden kommen, somit lässt sich auch keine spezifische Gefahr ableiten. Daraus folgt, dass sich die Einstufung einer Einwirkung oder eines Prozesses als Gefahr oder gefährlich erst durch deren Vermögen ergibt, einen Schaden bei einem bestimmten Rezeptor hervorzurufen. Im Speziellen dient die Gefahrenanalyse hier der Charakterisierung des räumlichen und zeitlichen Verhaltens der betrachteten Einwirkung als Grundlage für den Analyseschritt der Expositionsanalyse. Beispielsweise geht es bei thermischen Einwirkungen, wie der Gefahr für die menschliche Gesundheit durch hohe Temperaturen, um die Höhe der Temperatur (°C) und deren räumliche und zeitliche Verteilung¹⁹ (Häufigkeit, Andauer, wobei letztere durch Klimaprojektionen nur unzureichend abgebildet werden kann). Die Gefahr durch Stoffe – hier am Beispiel von Ozon als sekundärem²⁰ Luftschadstoff – lässt sich durch deren Konzentration im die Exposition verursachenden Medium, wie etwa der Atemluft im Außenraum, charakterisieren. In diesem Zusammenhang ist auch der Begriff des Expositionsmediums eingeführt. Zum Beispiel kann die Exposition (üblicherweise ausgedrückt als dem Rezeptor über den Betrachtungszeitraum zugeführte Stoffmenge) gegenüber partikulär gebundenem Cadmium aus einer Bodenquelle (kontaminierter Boden) sowohl über die (orale) Aufnahme des Mediums Boden selbst, z. B. als Anhaftung an Pflanzenteilen (Hand-Mund-Kontakte bei Kleinkindern bezogen auf das Expositionsmedium Boden) als auch durch die respiratorische Aufnahme von aufgewirbelten Bodenpartikeln in der Atemluft (Expositionsmedium Luft) erfolgen. Gefahr bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Konzentration im Expositionsmedium (Duffus et al. 2007; ISO 2009; Sauer 2014).

Die Gefahrenanalyse liefert also beispielsweise bezogen auf einen Schadstoff Informationen zu dessen Vorkommen: Wo befindet sich jetzt welche Konzentration Cadmium im Boden (=stoffliche Gefahr)? Wie hoch ist die Ozonkonzentration am Ort XY und wie ist deren Verlauf über die nächsten 50 Jahre? Am Beispiel Hochwasser ist die Gefahr (Wirkungen z.B. Ertrinken, Gebäudeschäden) die räumliche Verteilung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten zur Quantifizierung der Intensität der Einwirkung.

¹⁹ Unter Verteilung verstehen wir hier die räumliche Verteilung/Differenzierung in Abhängigkeit von Höhe, geogr. Länge/Breite, Landnutzung/Oberflächenbedeckung als auch eine zeitliche Verteilung mit Tagesgang, Jahresgang und langfristiger Änderung/zukünftiger Verteilung (z. B. August-Mittel 2050, Tage >30° 2100, ...).

²⁰ Begriffserklärung: Ozon wird selten primär emittiert, sondern bildet sich erst aus (primären) Vorläufer(schad)stoffen wie Stickoxiden und VOCs. Hierzu etwa das UBA: „Ozon: Ozon (O₃) wird in der Luft photochemisch aus Vorläufersubstanzen zum Beispiel aus der Reaktion von Sauerstoff mit Stickoxiden aus dem Straßenverkehr unter Einwirkung von Sonnenlicht als gasförmiger, sekundärer Luftschadstoff gebildet. Sekundäre Schadstoffe sind Stoffe, die nicht direkt aus einer Quelle emittiert werden. Dies bedingt, dass Ozon durchaus nicht nur in Ballungszentren erhöht sein kann, sondern auch in ländlichen Regionen.“

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit> oder z. B. Zellner, R. & GDCh (2011) Chemie über den Wolken... und darunter. Wiley-VCH, Weinheim, Berlin.

Gefahr ist eine Komponente des Risikos, welches sich durch Exposition, Sensitivität bzw. Vulnerabilität des Rezeptors und Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefahr bzw. der Expositionssituation ergibt. Es existieren allerdings auch andere Risikobegriffe und -konzepte (z. B. Vergleich in SRU 1999, WBGU 1999, Duffus et al. 2007), das den Arbeiten im Projekt zugrunde liegende Verständnis ist allerdings in den Ingenieur- und Umweltwissenschaften weit verbreitet und wird so auch mittlerweile vom IPCC (2014: 36) verwendet.

2.2.2.2 Dosis-Wirkungs-Analyse

Im Rahmen von Dosis-Wirkungs-Analysen (engl. Dose-Response-Assessment, Dose-Effect-Assessment) werden die (i.d.R. adversen bzw. negativen) Effekte und Wirkungen einer Exposition gegenüber einer Gefahr im Hinblick auf deren Auswirkungen bezogen auf einen bestimmten Endpunkt untersucht, wobei das finale Ziel die Ableitung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung ist. Dies kann im Rahmen von Tierversuchen, klinischen Studien oder ökologischen bzw. epidemiologischen Studien erfolgen. Für die Wirkung von Ozon gibt es sowohl Tierversuche mit anschließender Untersuchung des Lungengewebes, Studien an freiwilligen Personen unter kontrollierten Ozonkonzentrationen und Umgebungsbedingungen und Studien an Bevölkerungsgruppen und deren Mortalität und Morbidität. In allen Designs wird versucht, einen als Dosis-Wirkungs-Funktion bezeichneten mathematischen Zusammenhang zwischen der Konzentration bzw. der Exposition (=über die Zeit aufgenommene Stoffmenge oder Dauer des Ausgesetztseins) und der Häufigkeit bzw. Intensität der negativen Auswirkung im Sinne des (Gesundheits-)Schadens herzustellen. Dieses Ergebnis muss natürlich nicht zwangsläufig im Rahmen einer einzelnen Studie erzielt werden, sondern kann natürlich auch das Ergebnis einer Auswertung bestehender Studien sein.

2.2.2.3 Rezeptoranalyse

Die Rezeptoranalyse ist häufig Teil der Expositionsanalyse. Sie soll der Klarheit wegen hier aber kurz separat dargestellt werden. Im Zuge der Rezeptoranalyse geht es um die räumliche Identifikation und Charakterisierung der potenziellen Rezeptoren, also etwa das Vorkommen einer bestimmten Bevölkerungsgruppe (z. B. Kinder) in einem bestimmten Gebiet.

2.2.2.4 Expositionsanalyse

Um das Ausgesetztsein gegenüber einer Gefahr bzw. Einwirkung quantifizieren zu können, wird in der Expositionsanalyse die Intensität der Einwirkung ermittelt, welche sowohl vom Verhalten (Atemrate, Innenraumaufenthaltsdauer) und der Charakteristik des Rezeptors (Atemvolumen, Körpergewicht) als auch der Stoffkonzentration bzw. Gefahrenintensität am Einwirkungsort abhängig ist. Die Exposition ergibt sich durch die „Verschneidung“ des Auftretens in Form der Intensität einer Gefahr (hier allgemeiner auch als „Einwirkung“ bezeichnet) mit einem Rezeptor.

Exposition, definiert sich bspw. als „[...] the amount of a chemical to which a population or individuals are exposed via inhalation, oral, and dermal routes.“ (Greim & Snyder 2008:4) oder Duffus (2007: 1220) mit Bezug zu anderen Noxen/gesundheitsschädigenden Einwirkungen „Concentration, amount, or intensity of a particular physical or chemical agent or environmental agent that reaches the target population, organism, organ, tissue, or cell, usually expressed in numerical terms of concentration, duration, and frequency (for chemical agents and microorganisms) or intensity (for physical agents).“

Ein Bezug zu Bewertung der Exposition im Sinne von tolerabel bzw. akzeptabel kann etwa durch Vergleich mit (toxikologischen) Referenz- und Schwellenwerten erfolgen, die auf Basis von Dosis-Wirkungs-Funktionen abgeleitet werden können. Eine (gesellschaftliche) Bewertung ist

im Rahmen unserer Arbeiten allerdings weder vorgesehen noch möglich, da die Aushandlung von Schwellenwerten ein gesamtgesellschaftlicher Prozess ist.

2.2.3 Schäden durch Hitzebelastung: Leistungsfähigkeit

In den folgenden Abschnitten wird das Modellierungskonzept für die Abschätzung von Schäden durch den Einfluss der Hitzebelastung auf die Leistungsfähigkeit des Menschen dargestellt.

2.2.3.1 Hintergrund

Im Rahmen des Monitoringberichtes zur DAS (UBA 2015) findet sich im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe der Indikator „IG-I-1 Hitzebedingte Minderung der Leistungsfähigkeit“, der allerdings keine differenzierte Quantifizierung räumlicher Art und hinsichtlich der Funktion Temperatur-Produktivität besitzt bzw. sehr hohe Unsicherheiten mit Spannbreite von keinem Effekte bis hin zu 10% Produktivitätsverlusten aufweist.

Ein weiterer Indikator aus dem Monitoringbericht zur DAS ist GE-I-1 Hitzebelastung, welcher ausschließlich die klimatische Exposition auf Basis der Lufttemperatur darstellt, also die Gefahr. Hinsichtlich der möglichen gesundheitlichen Schäden, zu denen man als reversible gesundheitliche Beeinträchtigung sehr wohl auch eine verringerte geistige und körperliche Leistungsfähigkeit zählen kann, wird klar festgestellt: *„Die Hitzetage und Tropennächte sowie die Hitzewarnungen weisen auf gesundheitlich belastende Witterungssituationen hin, lassen aber keine Rückschlüsse zu, wie viele Menschen tatsächlich von Hitze gesundheitlich betroffen sind.“* (UBA 2015: 28).

In Buth et al. (2015: 607f) existiert ein Indikator für Wärmebelastung bezogen auf den Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre. Diese Personengruppe macht allerdings nur einen Teil der Beschäftigten und damit der durch Arbeitskraft erzielten volkswirtschaftlichen Produktivität aus. Zur Anpassung der klimatischen Exposition an die kleinräumige Modifikation des Klimas durch Bebauung (städtischer Wärmeinseleffekt) wurde ein modifizierter Urban Heat Island-Index berechnet, welcher gegenwärtige und zukünftige mögliche Ausprägungen der versiegelten Fläche sowie der Bevölkerung auf Kreisebene berücksichtigt. Hierdurch lassen sich die Effekte veränderter Landnutzung und Bebauung sowie Demographie integrieren.

2.2.3.2 Methodische Vorgehensweise

Für die Abschätzung der Folgen von Wärmebelastung auf die Produktivität wurden zwei alternative Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz kann als Vermeidungskostenansatz klassifiziert werden und basiert auf den im Folgenden dargestellten Grundüberlegungen. Ein großer Anteil der Arbeitsplätze kann vom Arbeitsumfeld als Büroarbeitsplatz klassifiziert werden. Um eine verringerte Produktivität zu vermeiden erfolgt eine Kühlung der Arbeitsplätze. Die Vermeidungskosten beinhalten die Anschaffungs- sowie die Energiekosten zum Betrieb einer Raumklimatisierung. Vereinfachend wird von der Ausstattung eines Arbeitsplatzes mit einem Einzelplatzgerät ausgegangen. Abschätzungen zu den Kosten von zentralen Klimatisierungslösungen sowie ergänzenden gebäudetechnischen Maßnahmen würden eine Vielzahl von Annahmen erfordern (Gebäudebestand mit Gebäudeeigenschaften, Klimatisierungstechnologien und Anlageneigenschaften), die spezialisierten Studien vorbehalten bleiben müssen. Zur Abschätzung des Energieaufwandes für die Beibehaltung einer Raumtemperatur im Optimumbereich (21°C) wird die tägliche Differenz der Lufttemperatur oberhalb dieses Wertes ermittelt und zu einer Jahressumme aggregiert. Ähnlich wie bei den bekannteren Heizgradtagen gibt es eine direkte Korrelation zum Energieaufwand für die Verringerung der Raumtemperatur. Der energetische Aufwand zur Vermeidung einer verringerten Leistungsfähigkeit ist also weitgehend direkt proportional zu den Kühlgradtagen.

Grundsätzlich ist analog zur Berechnung des Heizenergiebedarfs für Gebäude unter Berücksichtigung der für jedes Gebäude spezifischen Heiz- bzw. Kühllast und der Nutzfläche eine Berechnung des Kühlenergiebedarfs möglich, für das gesamte Bundesgebiet scheitert dies aber an dem Fehlen entsprechender Informationen für den Gebäudebestand bzw. speziell die zu Büro Zwecken genutzten Nichtwohngebäude unterschiedlichster Baualtersklassen und gebäudetechnischer Ausstattungen bzw. grundsätzlich der bauphysikalischen Beschaffenheit.

2.2.3.3 Sensitivität

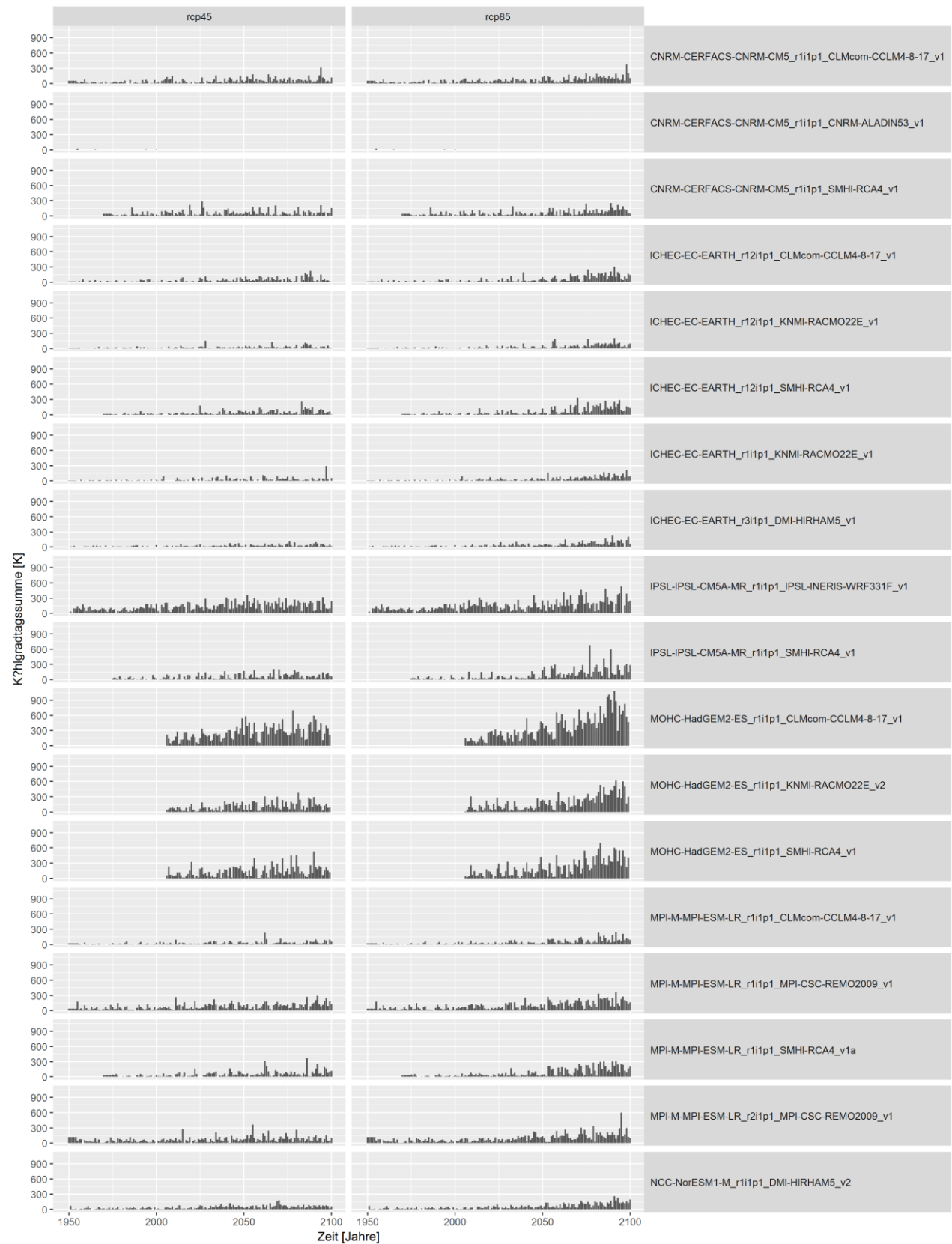
Rezeptor für die Hitzebelastung ist der Mensch bzw. die Bevölkerung. Mit Bezug zur ökonomischen Produktivität ist primär der Anteil bzw. die absolute Anzahl der Personen im erwerbsfähigen Alter einer Gebietseinheit (z. B. Landkreis) als Sensitivitätsmaß heranzuziehen bzw. unter Umständen sogar noch direkter am Endpunkt der Wirkung die Zahl der Beschäftigten und ggf. deren Arbeitsumfeld (z. B. Anteil Büroarbeitsplätze). Alternativ kann das BIP als Indikator für die Produktivität eines Gebietes herangezogen werden.

2.2.3.4 Ergebnisse

Abbildung 22 zeigt für einen ausgewählten Gitterpunkt und alle 18 Projektionsketten mit den Antrieben RCP4.5 und RCP8.5 des EURO-CORDEX-Ensembles den Verlauf der jährlichen Kühlgradtage, die für eine Klimatisierung der Raumtemperatur auf ein Niveau ohne negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit nötig sind. Alle Projektionen zeigen übereinstimmend eine deutliche Zunahme der Kühlgradtage, die Richtung der möglichen Klimaänderung ist daher als robust anzusehen. Im Ensemblemittel steigen die Kühlgradtage im Szenario RCP8.5 von 22 über 68 zu 184 K d/a, was einer Zunahme um den Faktor 3 für die nahe Zukunft und für die ferne Zukunft um einen Faktor >8 entspricht. Der Anstieg zwischen Periode 2 und 3 liegt bei einem Faktor von 2,7. Im Szenario RCP4.5 liegt der Wert für die nahe Zukunft bei 66 K d/a und unterscheidet sich damit kaum vom RCP8.5. Der Wert für die ferne Zukunft liegt mit 93 K d/a um rund den Faktor 4 höher als im Referenzzeitraum. Der Anstieg zwischen Periode 2 und 3 liegt bei einem Faktor von 1,4.

Vom zeitlichen Verlauf zeigt die Mehrheit der Projektionen nur einen geringen Anstieg in der nahen Zukunft. Im Szenario RCP8.5 findet sich in nahezu allen Projektionen eine Zunahme im Bereich eines Faktors von bis zu 8 auf ein Niveau von teilweise über 900 K d/a. Die Zunahme im Szenario RCP4.5 fällt deutlich geringer aus und liegt etwa auf der Hälfte des Niveaus der RCP8.5-Projektionen. Insgesamt ist eine nennenswerte Bandbreite der Veränderungsdynamik zu erkennen, wobei insbesondere die Projektionen der Modellgruppen IPSL und MOHC die größten Zunahmen verzeichnen. Abbildung 23 zeigt in Form von Boxplots auf die drei Klimazeiträume aggregierte Werte gegliedert nach den einzelnen Projektionsketten des Ensembles. Hier ist ebenfalls deutlich die überwiegend stärkste Zunahme in der fernen Zukunft erkennbar, was noch deutlicher in der das Ensemblemittel darstellenden Abbildung 24 zu erkennen ist.

Abbildung 22: Energieaufwand in jährlichen Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit für einen ausgewählten Gitterpunkt



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

**Abbildung 23: Energieaufwand in Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit
zusammengefasst nach Klimaperioden für einen ausgewählten Gitterpunkt**

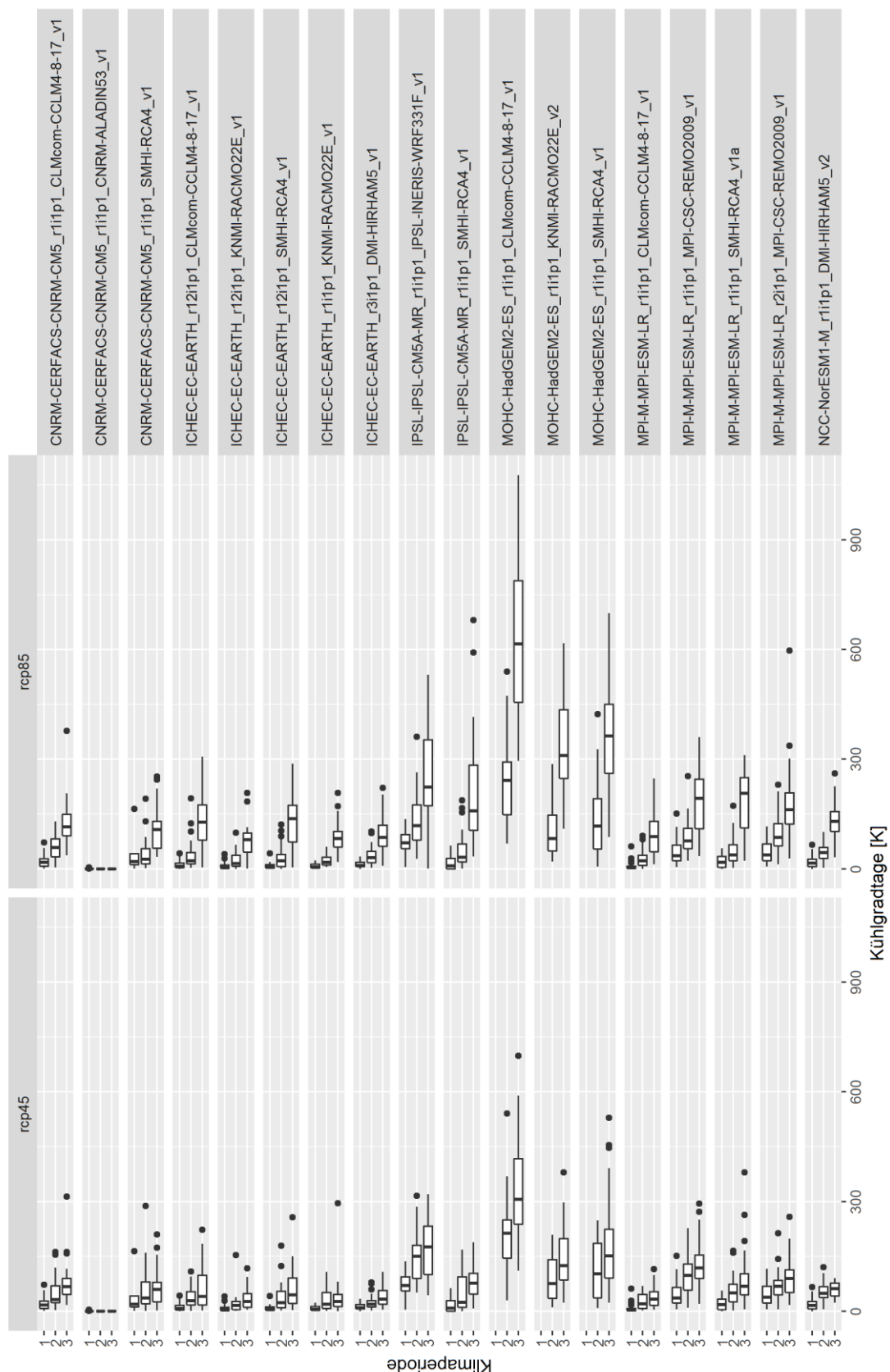
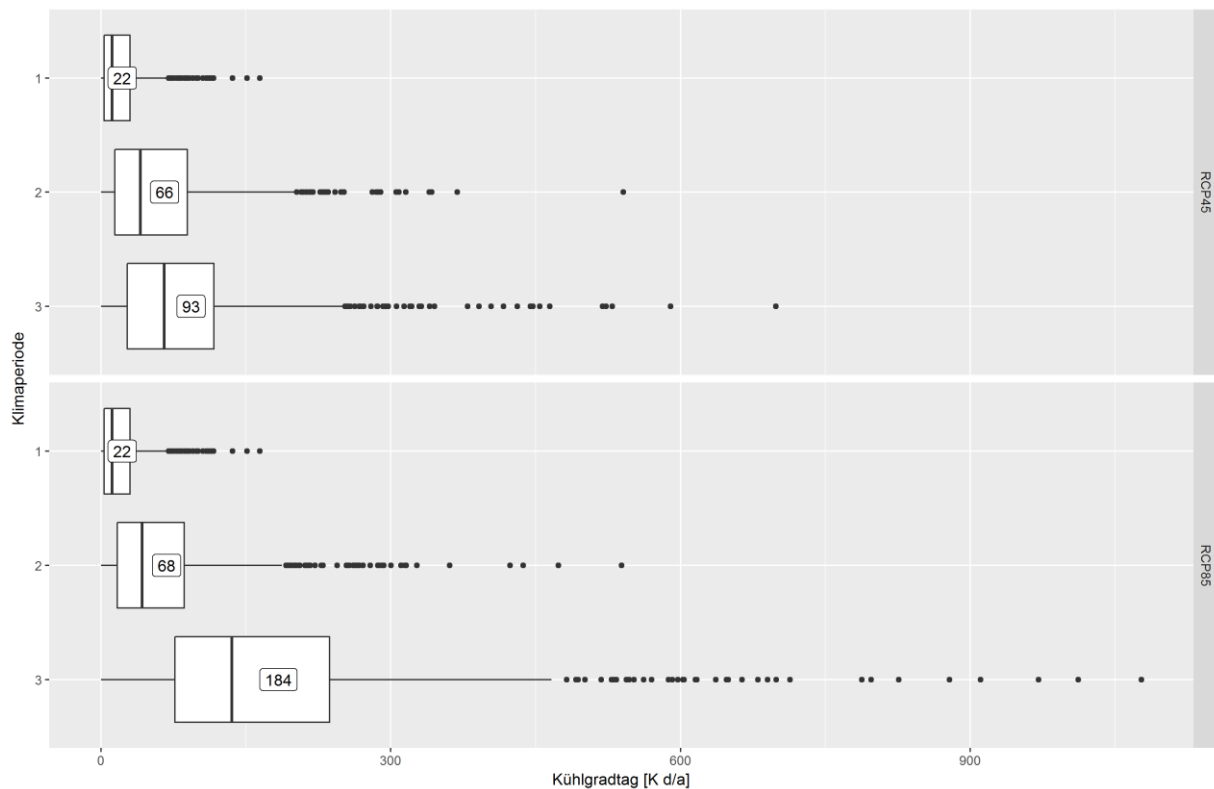


Abbildung 24: Energieaufwand in Kühlgradtagen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit zusammengefasst nach Klimaperioden und Ensemble für einen ausgewählten Gitterpunkt



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Fazit

Der Energieaufwand für Kühlung und damit die Kosten für den Erhalt der Leistungsfähigkeit am klimatisierbaren Arbeitsplatz zeigen für den gewählten Punkt einen robusten Anstieg über alle Projektionen und den beiden Antrieben RCP4.5 und RCP8.5. Für die nahe Zukunft ist eine mittlere Steigerung im Szenario RCP8.5 um das Dreifache möglich, für die ferne Zukunft um mehr als das Achtfache. Die Bandbreite der mittleren Kühlgradtage der nahen Zukunft liegt zwischen rund 20 und mehr als 200, die der fernen Zukunft liegt zwischen weniger als 100 und mehr als 600 K t/a. Es besteht eine große Bandbreite hinsichtlich der absoluten Werteänderung.

Insgesamt ist mit einer deutlichen Zunahme der Kosten für die Kompensation der hitzebedingten Verringerung der Leistungsfähigkeit an klimatisierbaren Arbeitsplätzen zu rechnen. Für die nahe Zukunft ist unabhängig vom Szenario im Mittel eine Verdreifachung möglich. Für die ferne Zukunft ist der weitere Anstieg im Szenario RCP8.5 rund doppelt so stark wie im Szenario RCP4.5.

2.2.4 Schäden durch Hitzebelastung: Hitzetote

In den folgenden Abschnitten wird das Modellierungskonzept für die Abschätzung von Schäden durch Einfluss der Hitzebelastung auf die Anzahl von Hitzetoten dargestellt.

2.2.4.1 Hintergrund

Als DAS-Monitoringindikator aus dem Handlungsfeld Menschliche Gesundheit mit direktem Bezug zur Mortalität existiert „GE-I-2 Hitzetote“, wobei dieser nur für das Bundesland Hessen

und den Zeitraum 2002–2013 vorliegt. Der Indikator stellt die sogenannte „Übersterblichkeit“ dar, nach UBA (2015, S.29) *„die Anzahl von Todesfällen, die über den saisonal üblichen und damit zu erwartenden Werten liegen“*. Die Annahme hierbei ist, dass Sterbefälle über dem mittleren Erwartungswert bei gleichzeitiger hoher Hitzebelastung und Fehlen anderer besonderer Umstände (z.B. Luftbelastung, Krankheitswelle) sich als hitzebedingt attributieren lassen. In vier der 12 Jahre wurden Hitzetote ermittelt, wobei ausgenommen das Jahr 2003 mit fast 800 zusätzlichen Sterbefällen die Zahlen zwischen rd. 30–120 liegen.

Ein weiterer Indikator aus dem Monitoringbericht zur DAS ist GE-I-1 Hitzebelastung, welcher ausschließlich die klimatische Exposition auf Basis der Lufttemperatur darstellt, also die Gefahr. Hinsichtlich der möglichen gesundheitlichen Schäden wird klar festgestellt: *„Die Hitzetage und Tropennächte sowie die Hitzewarnungen weisen auf gesundheitlich belastende Witterungssituationen hin, lassen aber keine Rückschlüsse zu, wie viele Menschen tatsächlich von Hitze gesundheitlich betroffen sind.“* (UBA 2015, S.28).

Im gleichen Handlungsfeld stehen noch die Response-Indikatoren „GE-R-1 Hitzewarndienst“ und „GE-R-2 Erfolge des Hitzewarnsystems“ zur Verfügung. Bezug zu Hitzebelastung im Handlungsfeld Bauwesen haben die Indikatoren „BAU-I-1 Wärmebelastung in Städten“ mit der Anzahl an Hitzetagen und Tropennächten als „innenstadtnah“ attribuierten DWD-Wetterstationen sowie „BAU-I-2 Sommerlicher Wärmeinseleffekt“ mit der Temperaturdifferenz Berlin-Schönefeld vs. Berlin-Alexanderplatz als Indikatorwert. Im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe findet sich der Indikator „IG-I-1 Hitzebedingte Minderung der Leistungsfähigkeit“, der allerdings keine differenzierte Quantifizierung ermöglicht bzw. mit einer sehr hohen Unsicherheit verbunden ist, welche sich in Spannbreiten der Ausprägung von keinen Effekten bis hin zu 10% Produktivitätsverlusten zeigt.

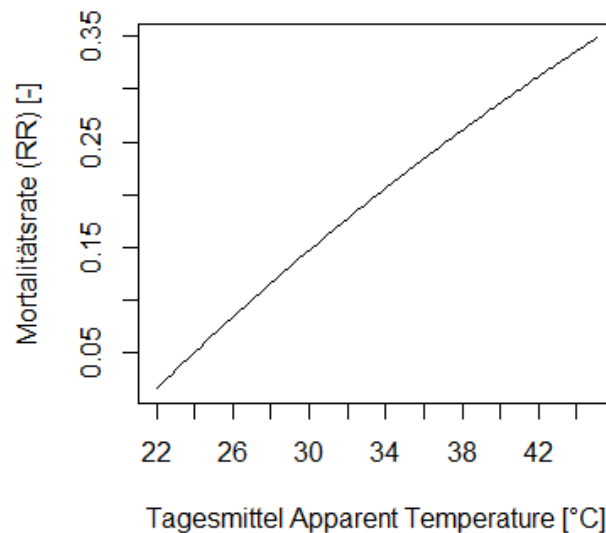
2.2.4.2 Methodische Vorgehensweise

Die Modellierung der Hitzetoten im Sinne einer Übersterblichkeit zusätzlich zur Basismortalität erfolgt auf Basis eines Ansatzes von Kendrovski et al. (2017). Diese haben im Zuge einer Meta-Analyse Hitze-Mortalitätsfunktionen aus Studien in verschiedenen europäischen Großstädten generalisiert und für drei regionale Bereiche (Mittelmeerregion, nördliche kontinentale Länder und osteuropäische Länder) jeweils separate Funktionen publiziert. Primär unterscheiden sich die Funktionen im Achsenabschnitt, der als Sensitivitätsparameter verstanden werden kann und den Beginn des Effektes der Temperatur auf die Mortalität markiert. Der im Rahmen der Modellierung verwendete Wert für die nördlichen kontinentalen Länder beträgt 23,8°C Apparent Temperature nach Steadman (1979). Für die Mittelmeerregion liegt dieser Wert um rund 6° höher, was auf eine größere Anpassung schließen lässt. Bei der Steigung der Funktion wurden keine regionalen Unterschiede festgestellt.

Für alle Projektionen wurde als klimatische Variable für Hitzetote die Apparent Temperature berechnet. Auf diese wurde dann für jeden Tag und Gitterpunkt die Hitze-Mortalitätsfunktion für den als „Warm season“ bezeichneten Zeitraum des Jahres von März bis Oktober angewendet. Anschließend erfolgte eine jahresweise Aggregation zu einem Jahresmittel des Anteils der Hitzetoten an der Gesamtmortalität.

Zur orientierenden Quantifizierung der Dimension der Veränderung in absoluten Zahlen der Hitzetoten wurde folgendermaßen vorgegangen: Es wurden Mittelwerte der Mortalität für das Ensemble, das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und die drei Zeiträume gebildet. Unter Verwendung von Daten zur mittleren rohen Sterblichkeit und zur mittleren Gesamtbevölkerung für die Bundesrepublik Deutschland aus der **mittleren Variante der UN-Bevölkerungsvorausberechnung World Population Prospects 2017 (UN 2017)** - jeweils für die oben genannten Zeiträume gemittelt - wurden absolute Sterbefälle abgeschätzt.

Abbildung 25: Hitze-Mortalitätsfunktion für nördliche kontinentale Länder nach Kendrovski et al. (2017)



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: Kendrovski et al. (2017)

2.2.4.3 Sensitivität

Die Sensitivität der Bevölkerung gegenüber thermischer Belastung ist integraler Bestandteil der Hitze-Mortalitätsfunktion (siehe Abbildung 25). Dieser Typ von Dosis-Wirkungsfunktion oder noch allgemeiner Einwirkungs-Auswirkungsfunktion kann daher direkt als Maß der Sensitivität verstanden werden. Das Analog aus dem Bereich Hochwasser ist die Wasserstand-Schadenfunktion für einen bestimmten Gebäudetyp bzw. eine bestimmte Flächennutzung.

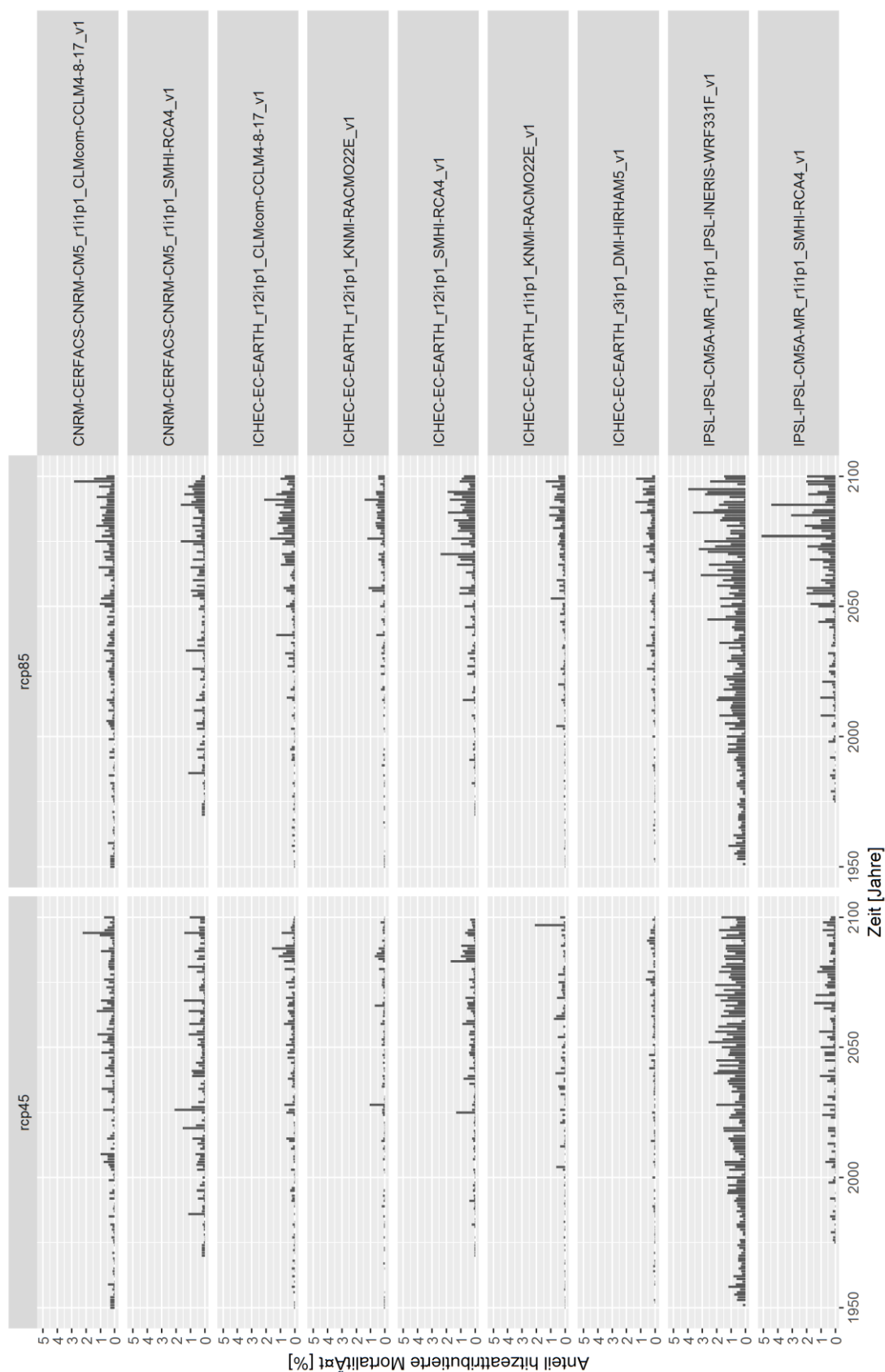
2.2.4.4 Ergebnisse

Exemplarisch für einen repräsentativen Gitterpunkt zeigen Abbildung 26 und Abbildung 27 den zeitlichen Verlauf der Hitzetoten für die Projektionen des EURO-CORDEX-Ensembles als Darstellung von Jahreswerten. Stärker aggregiert für die drei Betrachtungszeiträume zeigt den Verlauf Abbildung 28 gegliedert nach den einzelnen Projektionsketten und Abbildung 29 über das gesamte Ensemble aggregiert. Über alle Projektionen ist ein ansteigender Trend zu beobachten. Die Veränderung für die nahe Zukunft fällt für die überwiegende Mehrheit der Projektionen eher gering aus und unterscheidet sich zwischen den beiden RCPs nur wenig. In der fernen Zukunft zeigt sich eine starke Zunahme der Hitzetoten von deutlich weniger als 1% im Referenzzeitraum bis hin zu Werten von 8% für die MOHC-Projektionen. Die Mehrzahl der Projektionen zeigt einen Anstieg auf ein Niveau von etwa 2% an, was dem in Kendrovski et al. (2017) angegebenen gegenwärtigen mittleren Wert für Bulgarien oder Zypern entspricht.

Eine gesamtträumliche Darstellung der Veränderung geben die Abbildung 30 für das Szenario RCP4.5 sowie Abbildung 31 für das Szenario RCP8.5. Regional finden sich für Deutschland die höchsten Werte im Bereich des Oberrheingraben und der Hessischen Senke sowie in den Tieflandsbereichen im westlichen Deutschland nördlich der Mittelgebirgsschwelle sowie im östlichen Deutschland nordöstlich von Thüringer Wald und Erzgebirge. Grundsätzlich zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Höhenlage mit erwartungsgemäß niedrigeren Werten in den höheren Lagen. Der Höheneinfluss ist vor allem deutlich in der nahen Zukunft im Vergleich mit dem Referenzzeitraum, in dem große Flächen noch mit Werten nahe 0 und einer geringen Differenzierung zu erkennen sind.

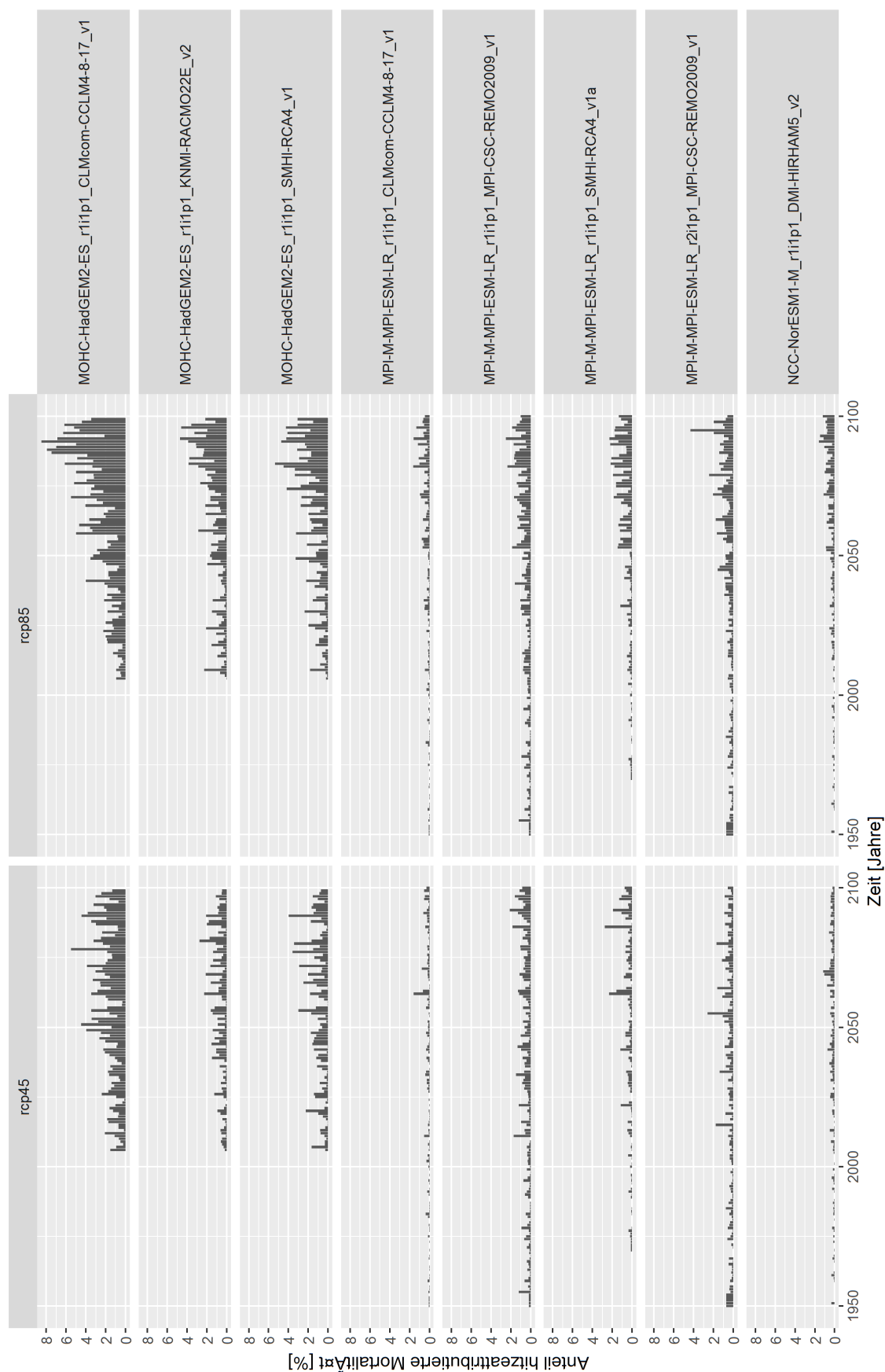
Bei der Veränderung der absoluten Zahlen (gerundet) der mittleren jährlichen Hitzetoten für das Ensemble- und Gebietsmittel zeigt sich folgendes Bild: Für das RCP4.5 steigt in der nahen Zukunft die Zahl der Sterbefälle von 470 auf 1400 (Faktor 3) und in der fernen Zukunft auf 2030 (Faktor 4,4). Unter Annahme des RCP8.5 liegt der Wert für die nahe Zukunft bei 1310 (Faktor 2,8) und für die ferne Zukunft bei 3970 (Faktor 8,5). Ohne Berücksichtigung einer veränderten hitzeattributierbaren Mortalität (Annahme der hitzeattributierbaren Mortalität des Referenzzeitraumes) ändert sich bedingt durch die zeitliche Dynamik der Mortalitätsrate sowie der Gesamtbevölkerung die Zahl der Sterbefälle auf 500 (Faktor 1,06) in der nahen Zukunft und 450 (Faktor 0,96) in der fernen Zukunft, d.h. die rein bevölkerungsdynamischen Effekte sind relativ klein. Die Werte der Studie von Kendrovski et al. (2017) liegen in ähnlichen Größenordnungen, eine direkte Vergleichbarkeit ist allerdings nicht gegeben, da diese abweichende Zeitscheiben, nur zwei Projektionsketten und eine ältere Version (2012) der Bevölkerungsprojektion verwendeten.

Abbildung 26: Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität (Projektionen 1–9)



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Abbildung 27: Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität (Projektionen 10–17)



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Abbildung 28: Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität zusammengefasst nach Klimaperioden für einen ausgewählten Gitterpunkt

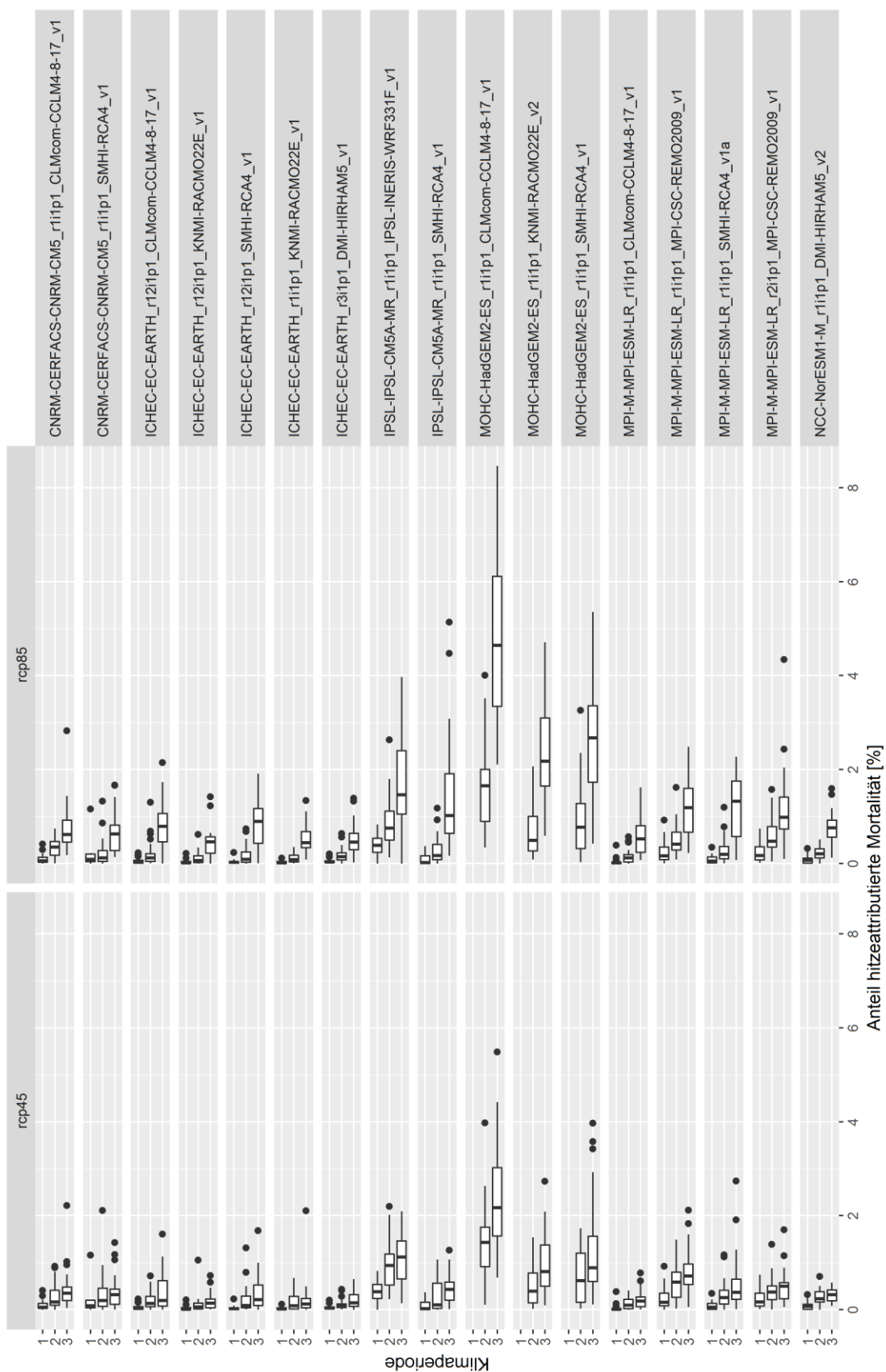
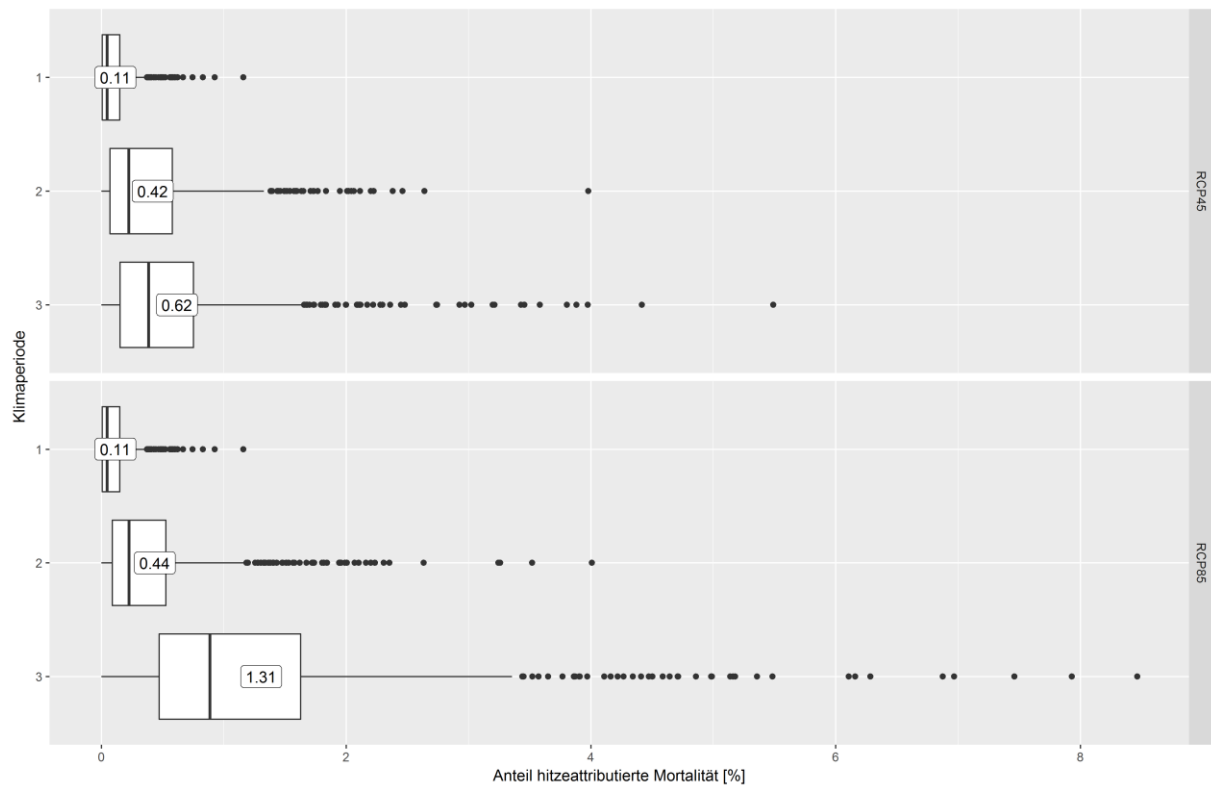
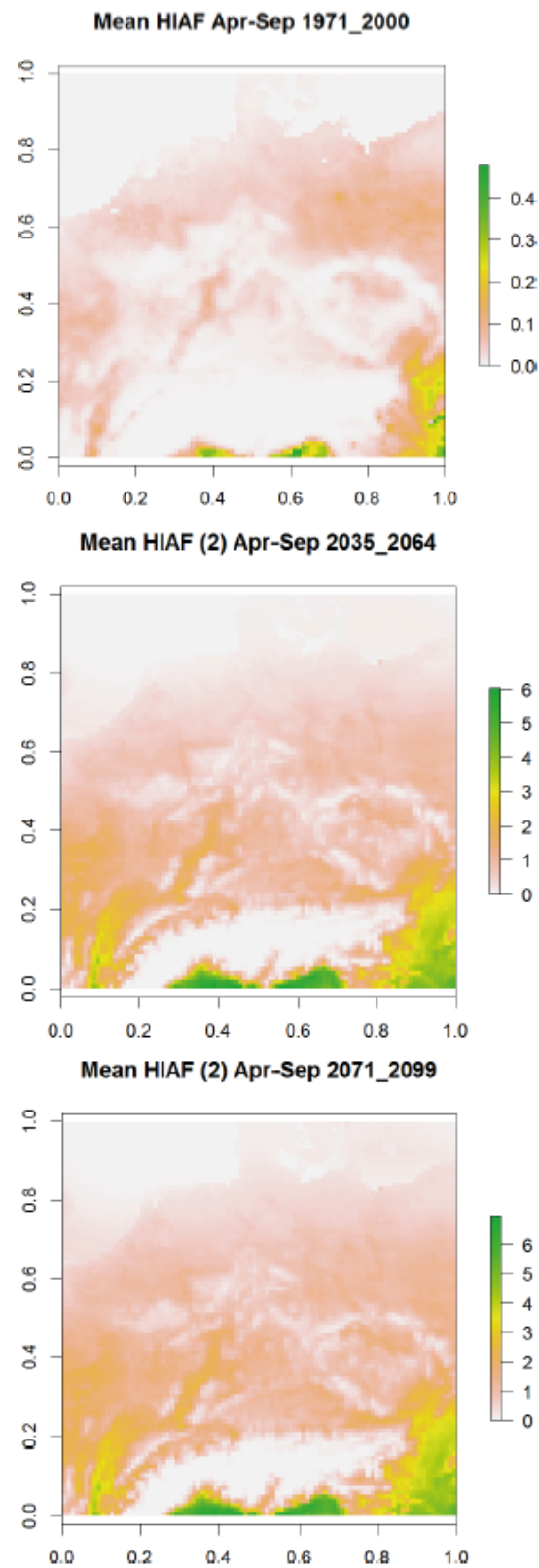


Abbildung 29: Anteil hitzebedingter Mortalität in % an der Basismortalität zusammengefasst nach Klimaperioden und Ensemble für einen ausgewählten Gitterpunkt



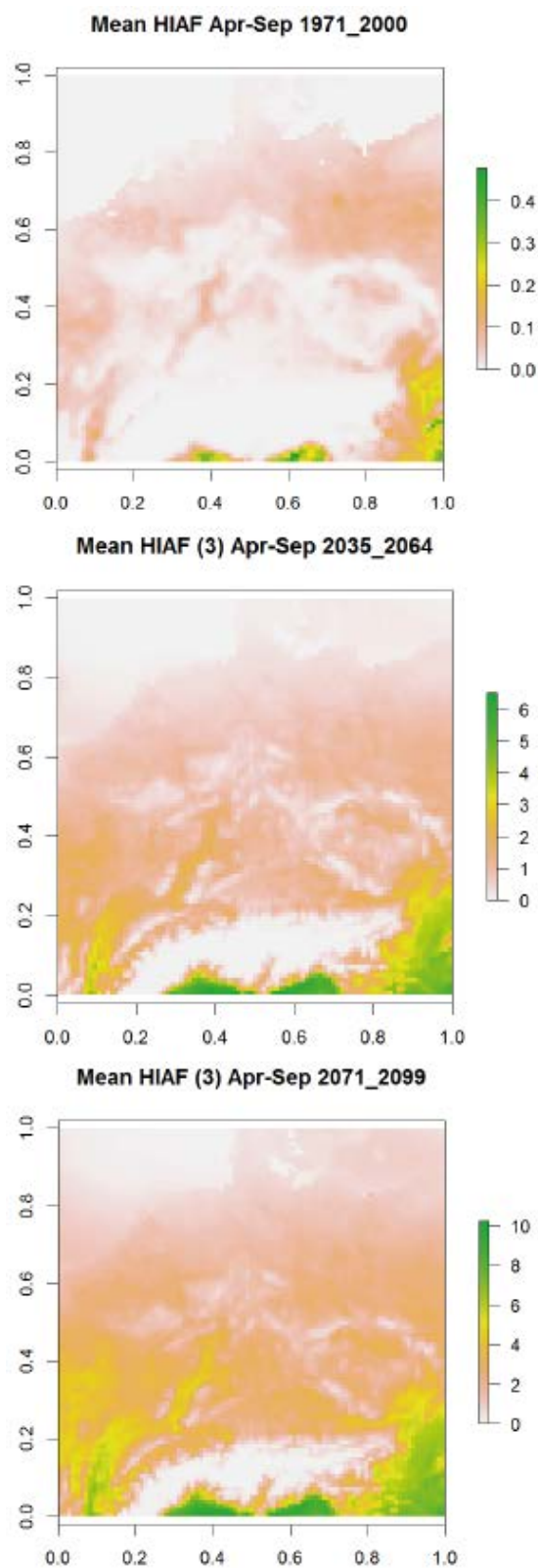
© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Abbildung 30: Anteil hitzebedingter Mortalität in % der Basismortalität für die Projektionskaskade MOHC-HadGEM2-ES_RCP4.5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day mit dem Antrieb RCP4.5



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Abbildung 31: Anteil hitzebedingter Mortalität in % der Basismortalität für die Projektionskaskade MOHC-HadGEM2-ES_RCP4.5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day mit dem Antrieb RCP8.5



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX; Berechnung: IÖR

Fazit

Der Anteil der hitzeattributierbaren Mortalität an der Gesamtmortalität zeigt für den gewählten Punkt einen robusten Anstieg über alle Projektionen und die beiden Antriebe RCP4.5 und RCP8.5. Für die nahe Zukunft ist eine mittlere Steigerung des Ensemblemittels über 30 Jahre im Szenario RCP8.5 (und RCP4.5) um das Vierfache auf rund 0,4% möglich, für die ferne Zukunft um das Sechsfache im Szenario RCP4.5 und im Szenario RCP8.5 um das Zwölfwache. Die jährliche Bandbreite der hitzeattributierbaren Mortalität an der Gesamtmortalität der nahen Zukunft liegt zwischen nahe 0 und mehr als 2%, die der fernen Zukunft liegt zwischen 0 und mehr als 6%. Es besteht eine große Bandbreite hinsichtlich der absoluten Werteänderung.

Insgesamt ist mit einer deutlichen Zunahme der hitzeattributierbaren Mortalität an der Gesamtmortalität zu rechnen. Für die nahe Zukunft ist unabhängig vom Szenario im Mittel eine Vervierfachung möglich. Für die ferne Zukunft ist der weitere Anstieg im Szenario RCP8.5 rund doppelt so stark wie im Szenario RCP4.5.

Das räumliche Muster der Werteausprägung ist stark durch die Höhenlage gesteuert und erlaubt eine relative Übertragung der gegenwärtigen Wärmebelastung und deren Auswirkungen auf die hitzeattributierbare Mortalität an der Gesamtmortalität für die Zukunft.

Bei der Veränderung der absoluten Zahlen (gerundet) der mittleren jährlichen hitzeattributierbaren Mortalität für das Ensemble- und Gebietsmittel zeigt sich folgendes Bild: Für das RCP4.5 steigt in der nahen Zukunft die Zahl der Sterbefälle von 470 auf 1400 (Faktor 3) und in der fernen Zukunft auf 2030 (Faktor 4,4). Unter Annahme des RCP8.5 liegt der Wert für die nahe Zukunft bei 1310 (Faktor 2,8) und für die ferne Zukunft bei 3970 (Faktor 8,5).

2.2.5 Schäden durch Wassererosion

2.2.5.1 Hintergrund

Gegenwärtig gibt es keinen DAS-Monitoringindikator aus dem Handlungsfeld Boden mit Bezug zur Wassererosion. Im Bericht zur Evaluierung der DAS-Berichterstattung und der Schließung von Indikatorenlücken (Schönthaler & von Andrian-Werburg 2015) werden zwei Monitoring-Indikatoren genannt, welche verworfen wurden bzw. nicht umgesetzt werden konnten. Es handelt sich dabei um den „Anstieg der Bodenerosion durch Starkregenereignisse“ sowie den „Maisanbau auf erosionsgefährdeten Standorten“. Für den erstgenannten Indikator fehlt gegenwärtig noch die empirische Basis: *„Ein flächendeckendes repräsentatives Erosions-Monitoring gibt es in Deutschland bislang nicht.“* Aus diesem Grund ist eine Ermittlung von Schäden durch Bodenerosion in Deutschland bisher nur auf Basis von einzelnen Fallstudien möglich bzw. grundsätzlich mit größeren Schwierigkeiten verbunden, siehe hierzu auch die ausführliche Darstellung der Problematik in Schönthaler et al. (2011, S.104). Für den Ist-Zustand der Bodenbearbeitung (konventionell vs. konservierend) sind die Informationen ebenfalls lückenhaft, hierzu Schönthaler & von Andrian-Werburg (2015, S.89): *„Anpassungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung (z. B. mit dem Ziel des Erosionsschutzes oder zur wassersparenden Bewirtschaftung) lassen sich mit den aktuellen agrarstatistischen Daten nicht bundesweit abbilden.“*

Im Rahmen der Vulnerabilitätsstudie des Bundes existiert der Indikator „Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser“ (BO-02a), welcher auf Basis des empirischen Modells der „Allgemeinen Bodenabtragsgleichung“ (ABAG) berechnet wurde. Durch die Verwendung von monatlichen Mittelwerten des die Erosivität des Niederschlags beschreibenden R-Faktors der ABAG mit einer unzureichenden Abbildung von erosiven

Starkregenereignissen ist eine Projektion der zukünftigen klimawandelbeeinflussten Erosionssituation nur begrenzt möglich. Zu den entsprechenden Limitierungen siehe Buth et al. (2015, S.182f).

Eine sehr grobe Einschätzung der Wirkungen und von Kosten und Nutzen der Maßnahme „Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“ mit primärem Bezug zu Sachsen und Übertragung auf das Bundesgebiet findet sich bei Tröltzsch et al. (2012, S.127–130).

Übersichten zu in der Regel aggregierten bzw. fallstudienbezogenen Kosten von Bodenerosion und deren Folgen bzw. Schäden geben Kwaad (2016), Schwegler (2014), Dominati & Mackay (2013), Santos-Telles et al. (2011) sowie Pimentel et al. (1995).

2.2.5.2 Methodische Vorgehensweise

2.2.5.2.1 Klimatische Exposition: Erosivität des Niederschlags

Die klimatische Exposition wird bestimmt durch die Erosivität der Niederschläge, ausgedrückt als Wert des R-Faktors der Universal Soil Loss Equation (USLE) bzw. ABAG. Die Berechnung des R-Faktors erfolgt in der Regel aus zeitlich hochauflösenden Niederschlagsmessungen (1 min, 5 min, 15 min-Intervalle bis zu 60 min). Vereinfachte Verfahren leiten den R-Faktor über Regressionsbeziehungen aus mittleren Jahres-Niederschlagssummen bzw. der Summe der Niederschläge der Sommermonate ab. Diese Beziehungen sind strenggenommen nur für stationäre Niederschlagsverhältnisse gültig, d. h. für die Niederschlagsregime, aus denen die Regressionen abgeleitet wurden. Tatsächlich lassen sich in langjährigen Reihen aber deutliche Änderungen der Erosivität der Niederschläge beobachten (z. B. Neuhaus et al. 2010), was auch für die Zukunft zu erwarten ist. Da es sich bei erosiven Niederschlagsereignissen in der Regel auch um Oberflächenabfluss und lokale Überflutungen verursachende Starkregenereignisse handelt, gelten die im entsprechenden Abschnitt (Wirkungskette: Schäden an Gebäuden durch Starkregen) gemachten Aussagen zur Projizierbarkeit solcher Ereignisse hier analog. Prinzipiell lassen sich diese Ableitungen auf die in der Regel als Tageswerte vorliegenden Niederschlagsdaten von Klimaprojektionen anwenden, Veränderungen in der Niederschlagscharakteristik (z. B. höhere Intensitäten bzw. größere Häufigkeit von konvektiven Starkregen) werden hierbei allerdings nur unzureichend abgebildet, so dass einer derartigen Vorgehensweise nicht gefolgt wurde. Der in der Modellierung verwendete R-Faktor basiert auf Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und bezieht sich auf den Zeitraum 1960–1990. Die relativ grobe räumliche Auflösung ist der geringen zugrundeliegenden Dichte von Niederschlagsstationen geschuldet. Gegenwärtig liegen bedingt durch den aus klimatologischer Sicht kurzen Beobachtungszeitraum von rd. 15 Jahren noch keine auf Niederschlagsradarmessungen basierenden R-Faktoren vor bzw. ist die Auswertung solcher Daten Gegenstand aktueller Forschung (z. B. Projekt Radarklimatologie).

2.2.5.2.2 Sensitivität: Erodibilität des Bodens

Die Sensitivität des Bodens gegenüber der Ablösung und dem Transport durch Tropfenschlag und Oberflächenabfluss wird auch als Erodibilität bezeichnet. Die Erodibilität wird von verschiedenen Bodeneigenschaften beeinflusst, wobei von besonderer Bedeutung die Bodentextur inkl. des Grobbodens bzw. Skelettanteils sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff sind. In die USLE bzw. ABAG fließt die Erodibilität als K-Faktor ein. In der Modellierung wurde der aus den Daten der Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 abgeleitete K-Faktor-Datensatz der BGR verwendet. Der Datensatz stellt die Information ausschließlich für ackerbaulich genutzte Standorte zur Verfügung. Die räumliche Auflösung beträgt 250 m und ist damit deutlich gröber als die nachfolgend beschriebenen Reliefdaten.

2.2.5.2.3 Relief: Hangneigung und Hanglänge

Das Relief ist neben dem Boden und der Vegetation die Hauptsteuergröße der Bodenerosion und gleichzeitig auch der Faktor mit der größten räumlichen Varianz (Neigungswechsel, Rinnen, Täler, Gräben, Geländestufen, ...). Um diese Steuergröße adäquat berücksichtigen zu können, wurde das deutschlandweit verfügbare digitale Höhenmodell mit einer vertikalen Auflösung von 10 Metern verwendet. Der kachelweise vorliegende Datenbestand wurde zu einem Gesamtdatensatz zusammengefügt mit dem Ziel einer Gesamtberechnung insbesondere der die Fließvorgänge an der Oberfläche beschreibenden Abflussakkumulation, die ansonsten an Kachelgrenzen unnatürlich unterbrochen werden würde. Aufgrund von Limitierungen der den Bearbeitern zur Verfügung stehenden IT-Infrastruktur musste eine Aufteilung der Rechengebiete nach Bundesländern erfolgen. Hierdurch kann es an den Grenzen der Rechengebiete zu leichten Wertesprüngen bzw. Randeffekten kommen, welche aber auf das Gesamtbild nur einen geringen Einfluss haben. Die Berechnung der Reliefparameter erfolgte mit einem speziell maskierten Raster-Datensatz, der nur an bestimmten Stellen Höheninformationen enthält. In diesem Datensatz sind Daten nur für die Landwirtschaftsflächen des Basis-Digitales Landschaftsmodells (Basis-DLM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) mit einer Selektion der Objektarten Ackerfläche, Gartenland und Weinbauflächen enthalten und zusätzlich linienhafte Trennungen in Form von Straßen und Wegen (die in der Regel auch den Abfluss/die Hanglänge begrenzen) als Polygon-Flächen eingearbeitet. Aufgrund der Konvertierung dieses Datensatzes von Vektor zu Raster werden die teilweise unter der Rasterweite des Höhenmodells liegenden Wegeflächen nicht immer durchgängig wiedergegeben. Ungeachtet dessen stellt die beschriebene Vorgehensweise die Abflussverhältnisse an der Bodenoberfläche deutlich realistischer dar, als etwa die mit einem 50-Meter-Raster erfolgte Berechnung durch die BGR, insbesondere auch hinsichtlich der Unterbrechung von Abflussbahnen durch das Straßen- und Wegenetz.

2.2.5.2.4 Bodenbedeckung: Vegetation bzw. Fruchtfolgen

Für die Modellierung der potenziellen Erosion wird dauerhafte Schwarzbrache als Nutzung bzw. Bodenbedeckung angenommen. Der Wert für den die Nutzung bzw. Bodenbedeckung berücksichtigenden C-Faktor hat hierbei den Wert 1. In der Realität erfolgt eine Reduktion der Erosion über den C-Faktor, der sowohl für einzelne Pflanzen als auch für Fruchtfolgen zur Verfügung steht. Problematisch bei einer deutschlandweiten Berücksichtigung möglicher Nutzungs-/Anbauszenarien ist die konkrete Verortung der C-Faktorwerte für konkrete Rasterzellen bzw. Feldblöcke/Parzellen (welche den Bearbeitern nicht zur Verfügung standen bzw. im Rahmen des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKos) nur einzeln bei den Agrarverwaltungs- bzw. Prämiengestellern der Länder und nicht öffentlich zur Verfügung stehen). Aufgrund der dominanten Steuerwirkung des Reliefs auf die Abtragswerte kommt der tatsächlichen Verortung von potenziellen Nutzungen bzw. C-Faktoren eine hohe Sensitivität zu. Grundsätzlich kann über die Bandbreite bekannter C-Faktoren und deren Anwendung auf die aggregierten Bodenabtragswerte das Potenzial für Erosionsschutzmaßnahmen abgeschätzt werden. Je nach Fruchtfolge und Bodenbearbeitung kann die potenzielle Erosion so bis zum Faktor 50 reduziert werden.

2.2.5.2.5 Schadenmodelle

Bei den Kosten bzw. Schäden durch Bodenerosion kann grundsätzlich zwischen den Folgen auf der Erosionsfläche (on-site-Schäden) und auf Flächen außerhalb der Erosionsfläche (off-site-Schäden) unterschieden werden. Hierzu gibt es eine größere Anzahl an Untersuchungen, wie etwa Kwaad (2016), Schwegler (2014), Dominati & Mackay (2013), Santos-Telles et al. (2011) sowie Pimentel et al. (1995). Diese Untersuchungen taugen allerdings nur bedingt zur Ableitung eines Kostensatzes für eine aus einer bestimmten Stelle ausgetragenen Bodenmenge, da sie für

größere Gebiete Gesamtkosten ermitteln, diese aber nicht direkt mit der Erosionsmenge in Beziehung setzen. Als mögliche Ansätze zur Bestimmung von Schadenskosten werden im Folgenden drei alternative Ansätze vorgestellt.

Der erste Ansatz basiert auf der Ermittlung von Schadenskosten durch den Verlust und den Aufwand für den Ersatz der im erodierten Boden enthaltenen Nährstoffe. Aus Untersuchungen von ausgetragenen Boden bestimmte Frielinghaus (1998, S.210f.) Nährstoffgehalte von ca. 0,3 kg Stickstoff (N) und 0,3 kg Phosphor pro Tonne Boden. Auf Basis aktueller Marktpreise²¹ von entsprechenden Düngemitteln und Vernachlässigung des Aufwandes für Transport/Ausbringung lassen sich folgende Kosten pro Tonne erodiertem Boden ermitteln:

- ▶ N (27%): $0,3 \text{ kg} * 0,722 \text{ EUR} = 0,22 \text{ EUR/Tonne erodierter Boden}$
- ▶ N (46%): $0,3 \text{ kg} * 0,563 \text{ EUR} = 0,17 \text{ EUR/Tonne erodierter Boden}$
- ▶ P (46%): $0,3 \text{ kg} * 0,741 \text{ EUR} = 0,22 \text{ EUR/Tonne erodierter Boden}$

Die Preise sind Schwankungen unterworfen und variierten am Beispiel der beiden Stickstoffdünger in den letzten 24 Monaten zwischen 180 und 230 bzw. 240 und 330 EUR pro Tonne bei einem Stickstoffgehalt von 27% resp. 46%²².

Der zweite Ansatz bezieht sich ebenfalls auf Kosten für die Erosionsfläche und ermittelt diese über den Marktwert bzw. die Preise für Mutterboden, d.h. die Kosten die unter Vernachlässigung von Transport und Einbau für den Ersatz des verlorenen Bodenmaterials entstehen würden. In ihrer Studie „On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Delivery“ haben Robinson et al. (2014, S.694) in den USA und dem Vereinigten Königreich (UK) eine umfangreiche Recherche zu den Preisen für Bodenmaterial durchgeführt und für UK einen medianen Preis in 2013 von 30 GBP pro Tonne ermittelt, was unter Verwendung des damaligen Wechselkurses rd. 25 EUR entspricht. Eine kurze eigene Recherche für Deutschland²³ ergab Preise zwischen 10 und 40 EUR, ein mittlerer Preis von 25 EUR erscheint also durchaus vergleichbar.

Einen Ansatz der primär die externen off-site-Kosten der Bodenerosion adressiert, wurde von Doleschel & Heißenhuber (1991) vorgestellt und auch aktuell noch präsentiert (Heißenhuber 2017²⁴). Hierbei wurden am Beispiel von Bayern die Schadenskosten zur Sedimentbeseitigung, also der Entfernung des abgetragenen Bodenmaterials aus angrenzenden Flächen und Gewässern, ermittelt. Dabei gehen sie von einem Sedimentaustragsverhältnis von 0.68 der Gesamterosionsmenge aus. Im Weiteren wird nach drei Eintragskompartimenten unterschieden mit unterschiedlichen Anteilen an Einträgen sowie unterschiedlichen Beseitigungsanteilen und Kosten. Aus den Originalangaben wurde das Verhältnis der Einträge abgeleitet (Prozentangabe in Klammern) sowie die Preise 1991 mittels Verbraucherpreisindex inflationskorrigiert.

- ▶ Feldraine, Aue, Wege, Gräben etc. 8 Mio. t (72%)
pro Tonne 6,00 DM 1991 (4,72 EUR 2018) Beseitigungsanteil 33% der Menge

²¹ <https://markt.agrarheute.com/duengemittel/>

²² <https://www.lwk-rlp.de/de/markt-statistik/marktbericht/marktbericht/news/detail/News/duengemittel/>

²³ <https://www.baustoffe-liefern.de/Erde-Boden/Preisliste-Erde.html>

²⁴ Heißenhuber, A. (2017) Ressourcenschutz – Grundlage einer nachhaltigen Landwirtschaft. Heißenhuber.Freising.Domberg.Wasserschutz.2017.pdf

- ▶ Bäche etc. (Gewässer 4. - 6. Ordnung) 1,2 Mio. t (11%)
pro Tonne 10 DM 1991 (7,86 EUR 2018) Beseitigungsanteil 33% der Menge
- ▶ Gewässer höherer Ordnung 2,2 Mio. t (20%)
pro Tonne 20 DM 1991 (15,72 EUR 2018) Beseitigungsanteil 20% der Menge

2.2.5.3 Ergebnisse

Auf Basis der dargestellten Methodik wurde flächenhaft für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland die potenzielle Erosionsgefährdung ($R \cdot K \cdot L \cdot S$) durch Wasser in einer hohen räumlichen Auflösung berechnet (siehe Abbildung 32). Mit Zwischenergebnissen summiert sich das Datenvolumen auf rund 370 GB, wobei das eigentliche Ergebnistraster rund 22 GB umfasst. Die Aggregation auf Kreisebene (Abbildung 34) zeigt ein deutliches Muster der besonders gefährdeten Gebiete die sich im Bereich der Mittelgebirge und lößgeprägten Mittelgebirgsvorländer befinden und damit vor allem die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, das südliche Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und das südliche Niedersachsen umfassen. Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein weisen reliefbedingt nur eine geringe Erosionsgefährdung auf, wobei es in den stärker reliefierten Endmoränengebieten durchaus zu nennenswerten Abtragsraten kommen kann. Ein differenziertes Bild zeigt die Aggregation auf Gemeindeebene (Abbildung 33), da hier die Größe der räumlichen Bezugseinheit deutlich kleiner ist. Diese Darstellung gibt ein deutlich realistischeres Bild der Verteilung der Problematik im Vergleich zur kreisbezogenen Darstellung.

Die Schadensmodelle können nur bedingt auf die Ergebnisse der Modellierung angewendet werden, da diese als Ergebnis die Bruttoerosion liefert, im Saldo für die einzelne Rasterzelle aber sowohl eine ausgeglichene Massenbilanz bis hin zu Akkumulation herrschen kann. Findet also nur eine Umverteilung auf einer Landwirtschaftsfläche statt, so sind die einen dauerhaften Verlust von Bodenmaterial voraussetzenden Ansätze problematisch.

Fazit

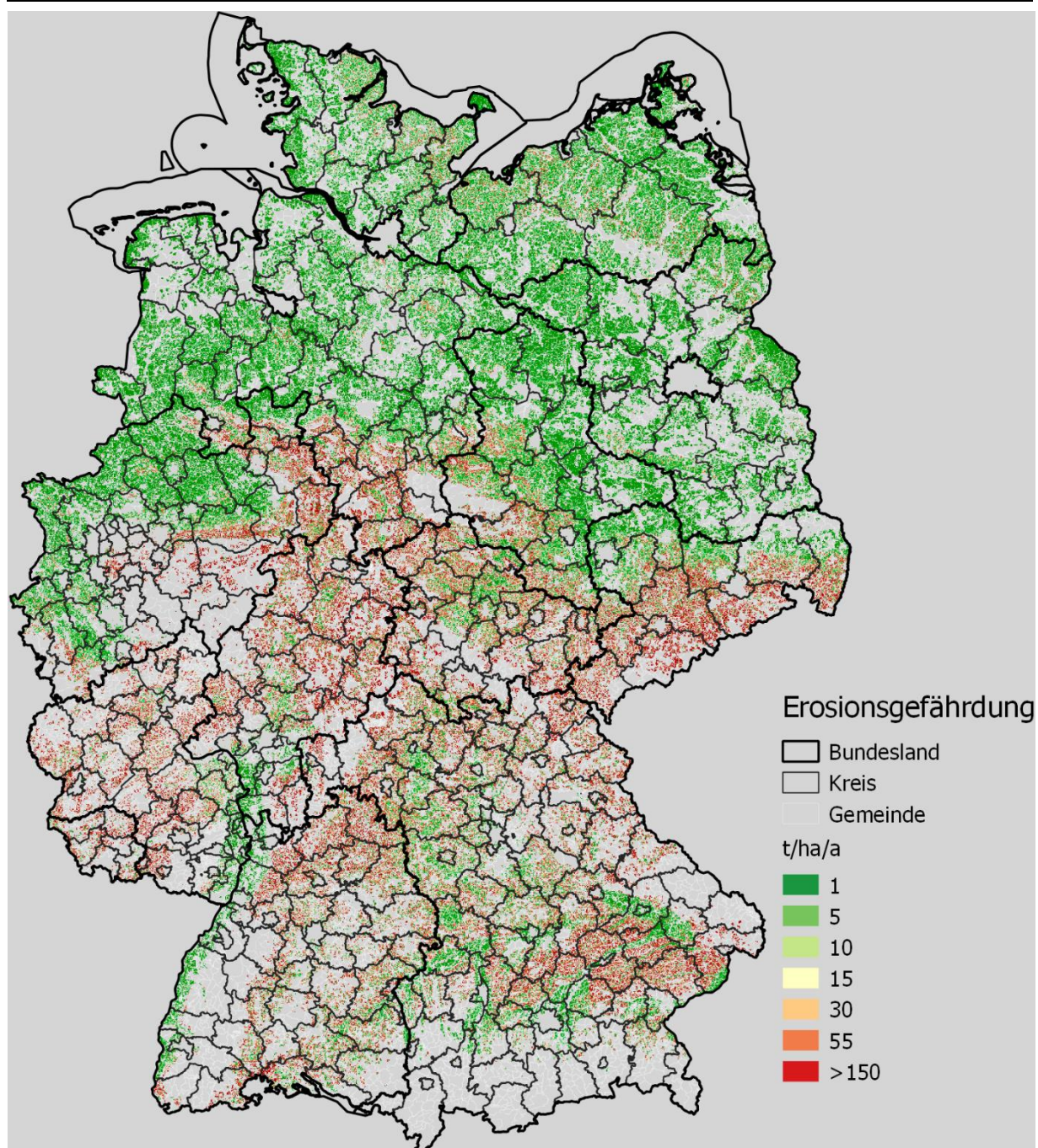
Die räumlich hochauflösende Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung unter Verwendung eines realistischen Fließwegealgorithmus und der Berücksichtigung von Gebietsgrenzen und Fließhindernissen lässt eine sehr gute Identifikation potenziell betroffener Flächen zu.

Eine Abbildung der klimawandelbedingten Änderung der Erosivität der Niederschläge ist gegenwärtig aus methodischen Gründen deutschlandweit (noch) nicht möglich. Die Verwendung der R-Faktor-Ableitungsregel auf Basis der Summe der Jahres- bzw. Sommerniederschläge ist abzulehnen, da deren Regressionen auf dem als stationär angenommenen Niederschlagsklima der Vergangenheit basieren und Änderungen der Niederschlagscharakteristik hinsichtlich Intensität, Dauer und Anzahl durch den Klimawandel nicht berücksichtigt werden.

Absolute Abtragsmengen auf konkreten Flächen lassen sich mangels Kenntnis sowohl der aktuellen als auch der zukünftigen Nutzungen bzw. Fruchtfolgen nicht belastbar ermitteln.

Die Methode kann alternativ in abgewandelter Form auch zur Abschätzung der reliefbedingten Gefahr (z. B. Fließwege; Abflusskonzentration, „Schlammkomponente“) durch Oberflächenabfluss im Zuge von Starkniederschlagsereignissen verwendet werden.

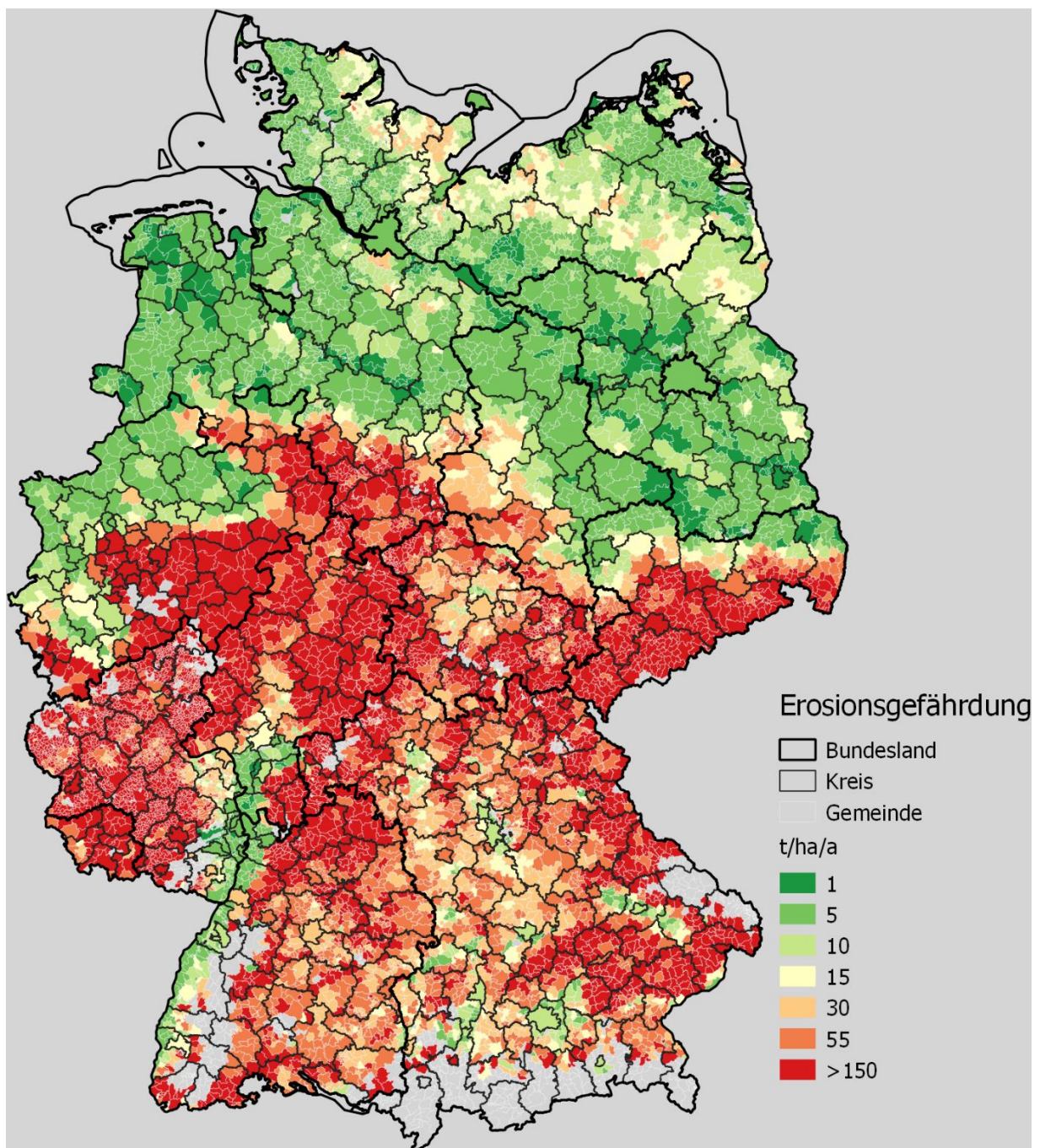
Abbildung 32: Potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) im 10-Meter-Raster



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG

Anmerkung: In den grauen Flächen kommen keine Rasterzellen mit Bodenabtrag vor.

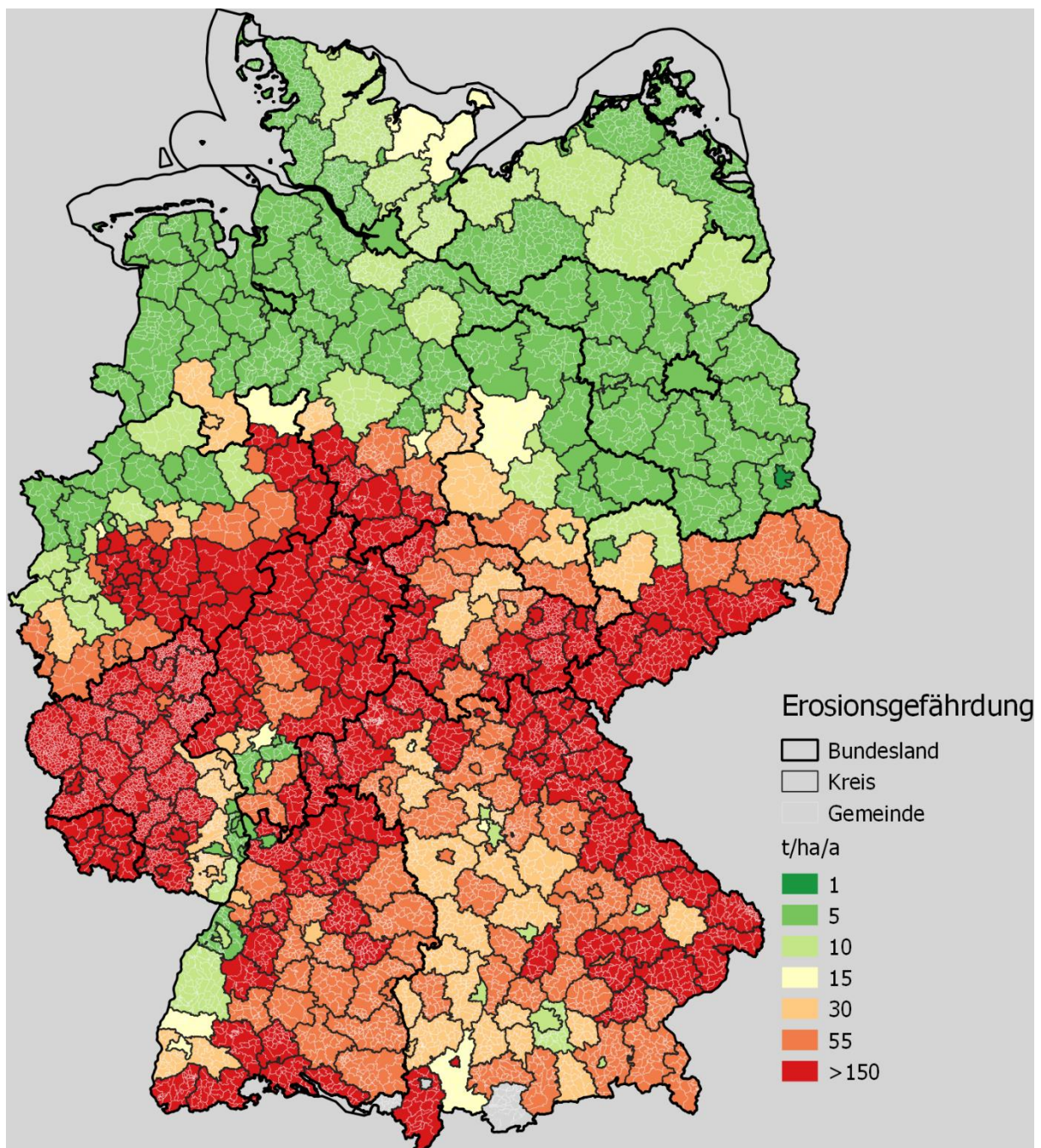
Abbildung 33: Mittlere potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) auf Gemeindeebene



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG

Anmerkung: In den grauen Flächen kommen keine Rasterzellen mit Bodenabtrag vor.

Abbildung 34: Mittlere potenzielle Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsfläche (ATKIS-Objektarten Ackerland, Gartenland, Weinbau) auf Kreisebene



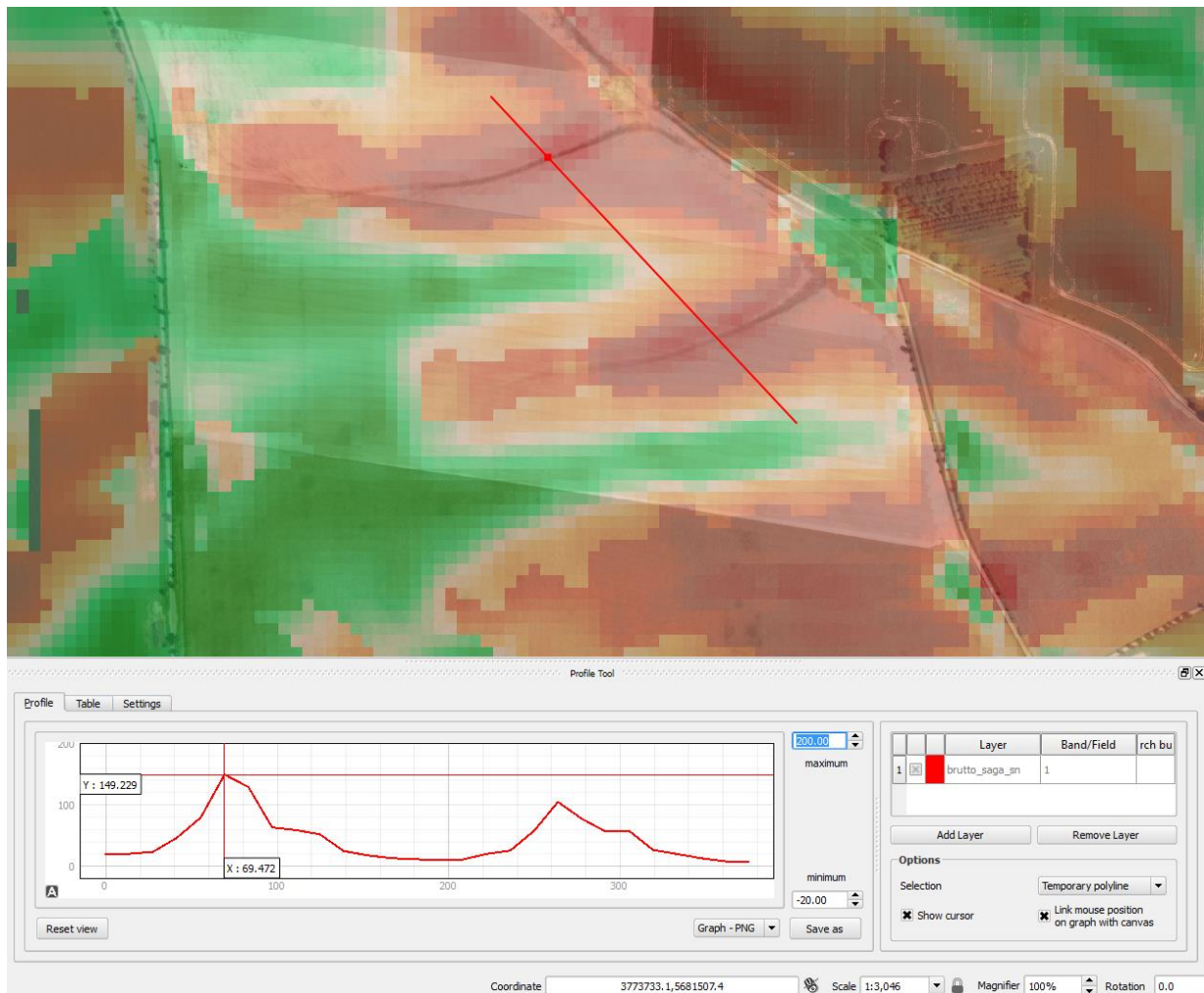
© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG

Anmerkung: In den grauen Flächen kommen keine Rasterzellen mit Bodenabtrag vor.

2.2.5.4 Validierung/Plausibilisierung

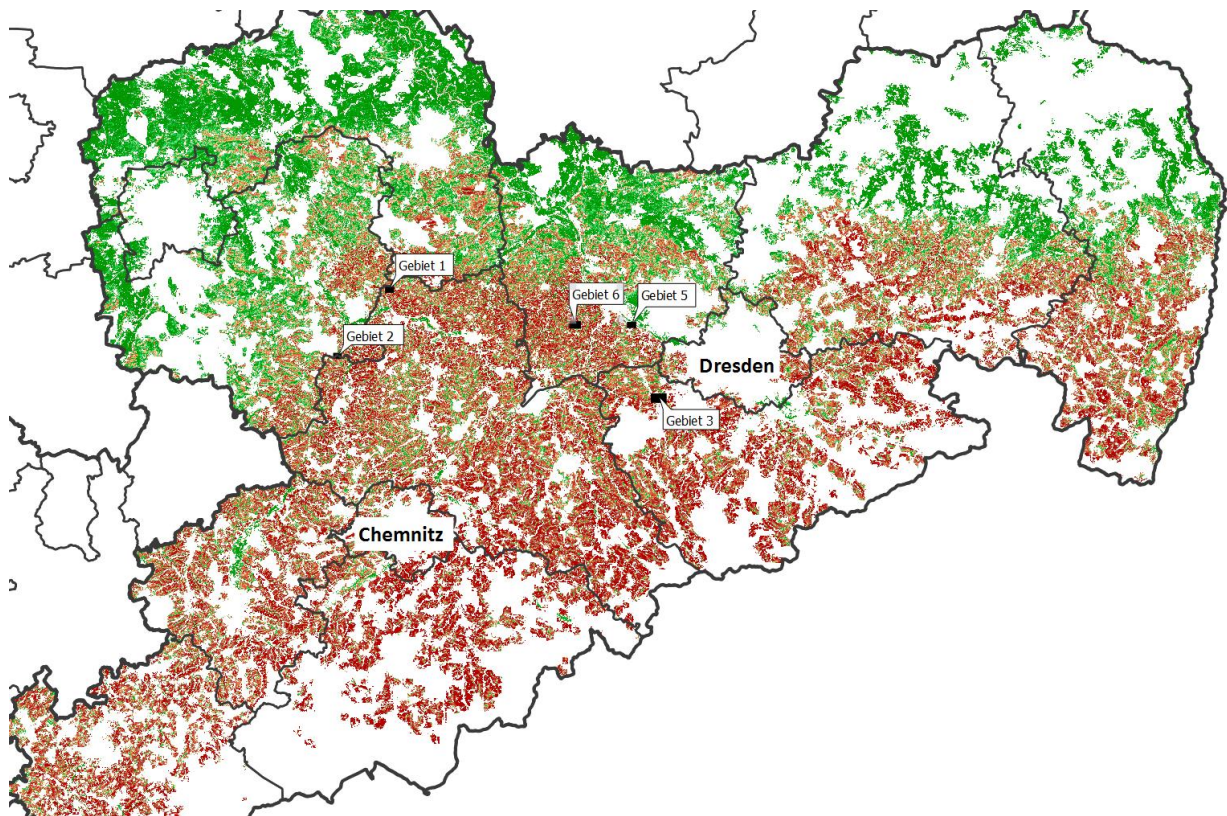
Zur räumlichen Plausibilisierung der Modellierungsergebnisse erfolgte ein visueller Vergleich auf Basis von Orthophotos und dort erkennbaren Erosionsspuren. Abbildung 35 zeigt die sehr gute räumliche Übereinstimmung (siehe hierzu auch das Querprofil des potenziellen Abtrags) an einem Beispielgebiet in Sachsen. Weitere Beispiele inklusiver einer kurzen Erläuterung und Interpretation der Befunde finden sich im Folgenden (siehe Abbildung 37, Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42).

Abbildung 35: Räumliche Plausibilisierung der Erosionsgefährdung mit in Orthophotos sichtbaren Erosionsspuren



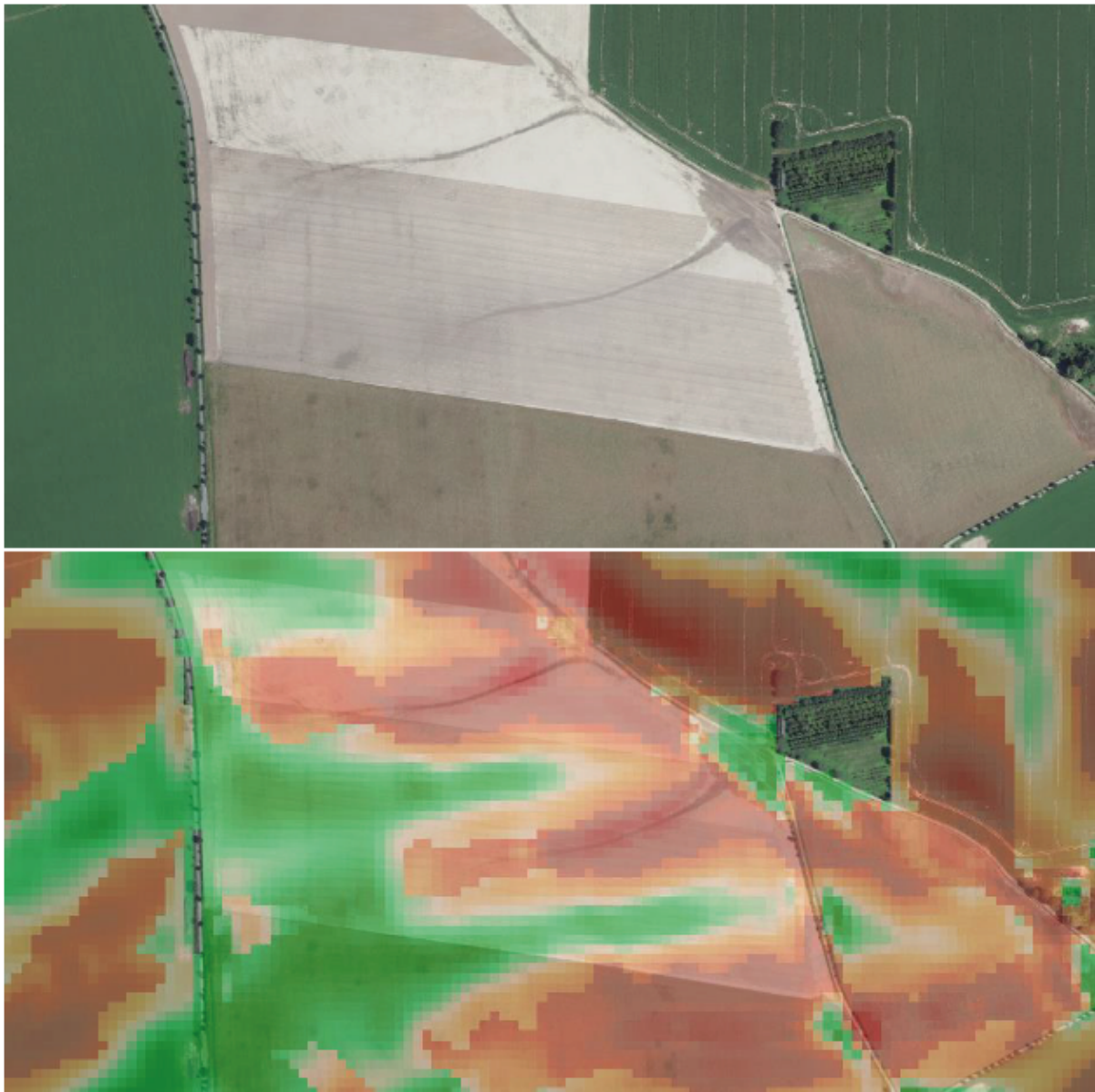
© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR, DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG

Abbildung 36: Lage der Gebiete für die räumliche Validierung der Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR, DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG

Abbildung 37: Validierungsgebiet 1 für die Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

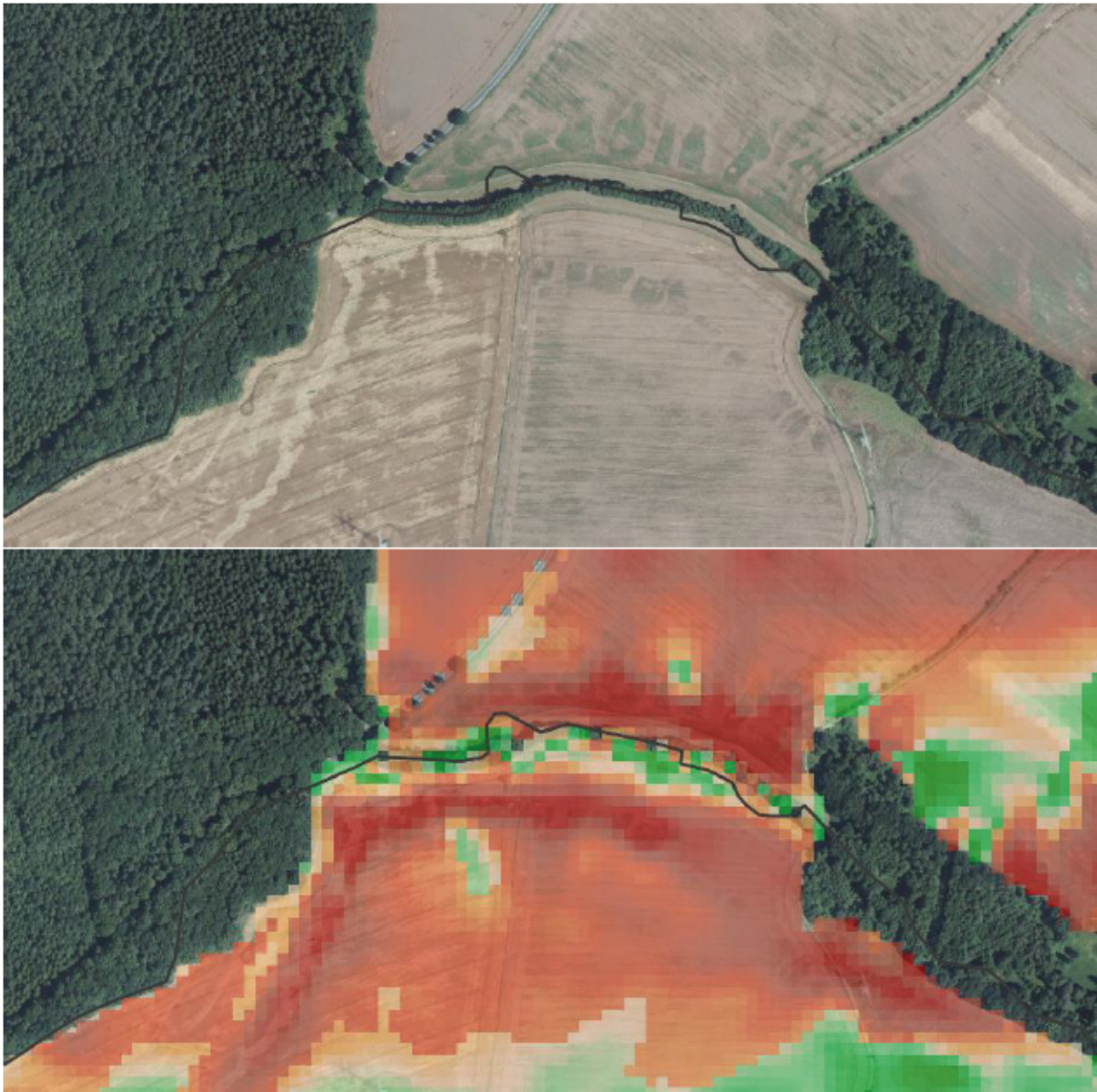
Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: Auf dem nördlichen und dem mittleren Feld zeigen sich mit dunklerer Färbung zwei deutlich ausgeprägte Erosionsrinnen. Am östlichen Ausgang der mittleren Rinne ist eine größere dunkle Fläche zu erkennen, die eine maschinelle Verteilung des dort abgelagerten humusreicheren oder feuchteren Bodenmaterials vermuten lässt.

Unteres Bild: Die Lage der Erosionsrinnen stimmt sehr gut mit den Bereichen höchster Abtragswerte überein. Der vermutliche Ablagerungsbereich am Hangfuß östlich der unteren Rinne korreliert mit sehr geringen Abtragswerten.

Abbildung 38: Validierungsgebiet 2 für die Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

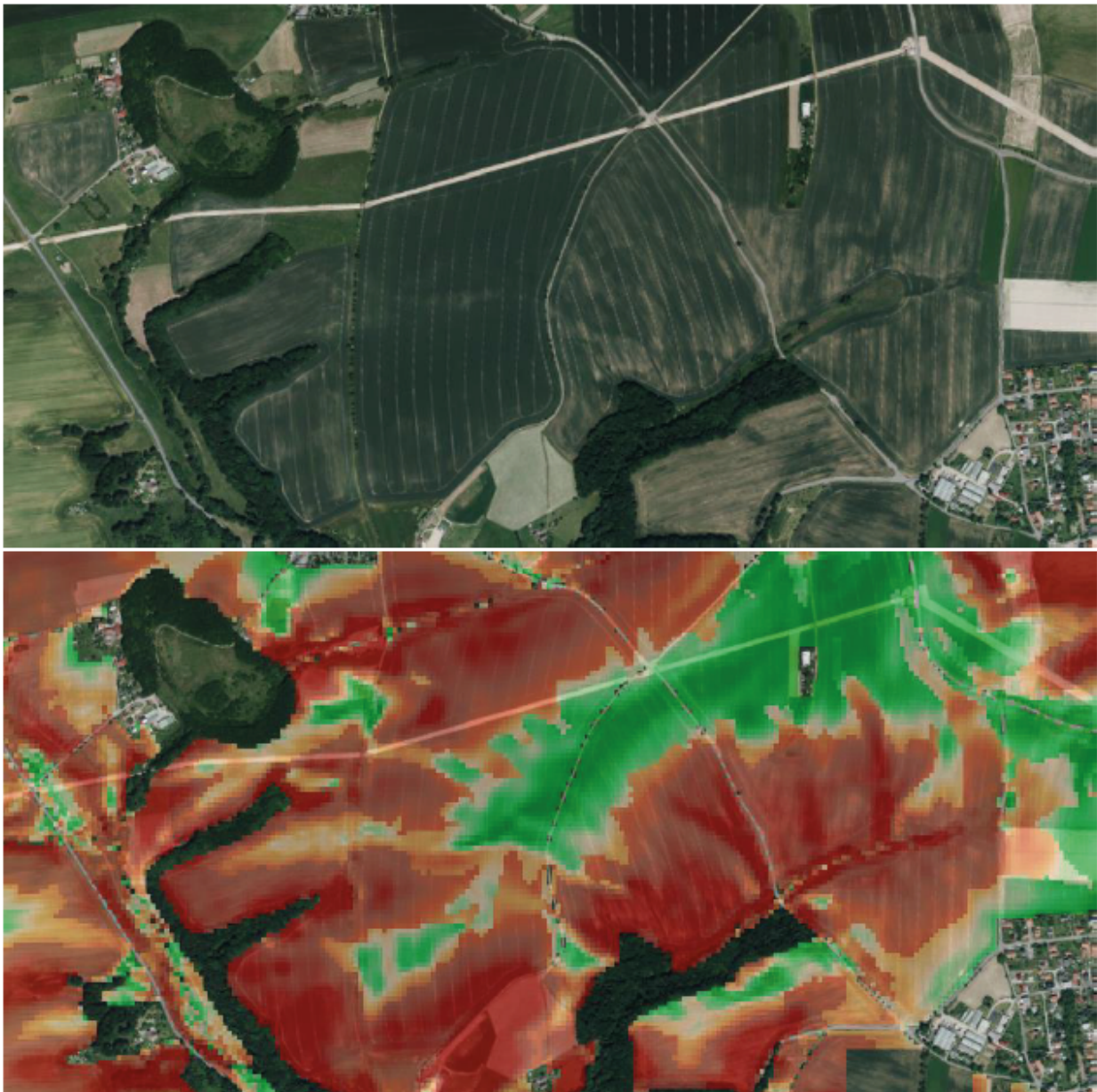
Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: Nördlich und südlich des Gehölzstreifens in der Bildmitte finden sich in Unterhanglage fleckenartige Verfärbungen mit stärkeren Grüntönen. Im westlichen Feld unterhalb des Gehölzstreifens findet sich eine hellere, in nordöstliche Richtung verlaufende Struktur.

Unteres Bild: Die Gebiete mit den fleckenartigen Verfärbungen deuten auf höhere Wasserverfügbarkeit oder mehr Nährstoffe durch erodiertes Feinmaterial hin. Da das Modell nur die Bruttoerosion berechnet, kann es auch in Bereichen mit hohen Abtragswerten netto zu einer Akkumulation bzw. Zwischenablagerung kommen. Die nordöstlich verlaufende Struktur ist vermutlich eine flache Erosionsrinne und korreliert mit sehr hohen Abtragswerten.

Abbildung 39: Validierungsgebiet 3 für die Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

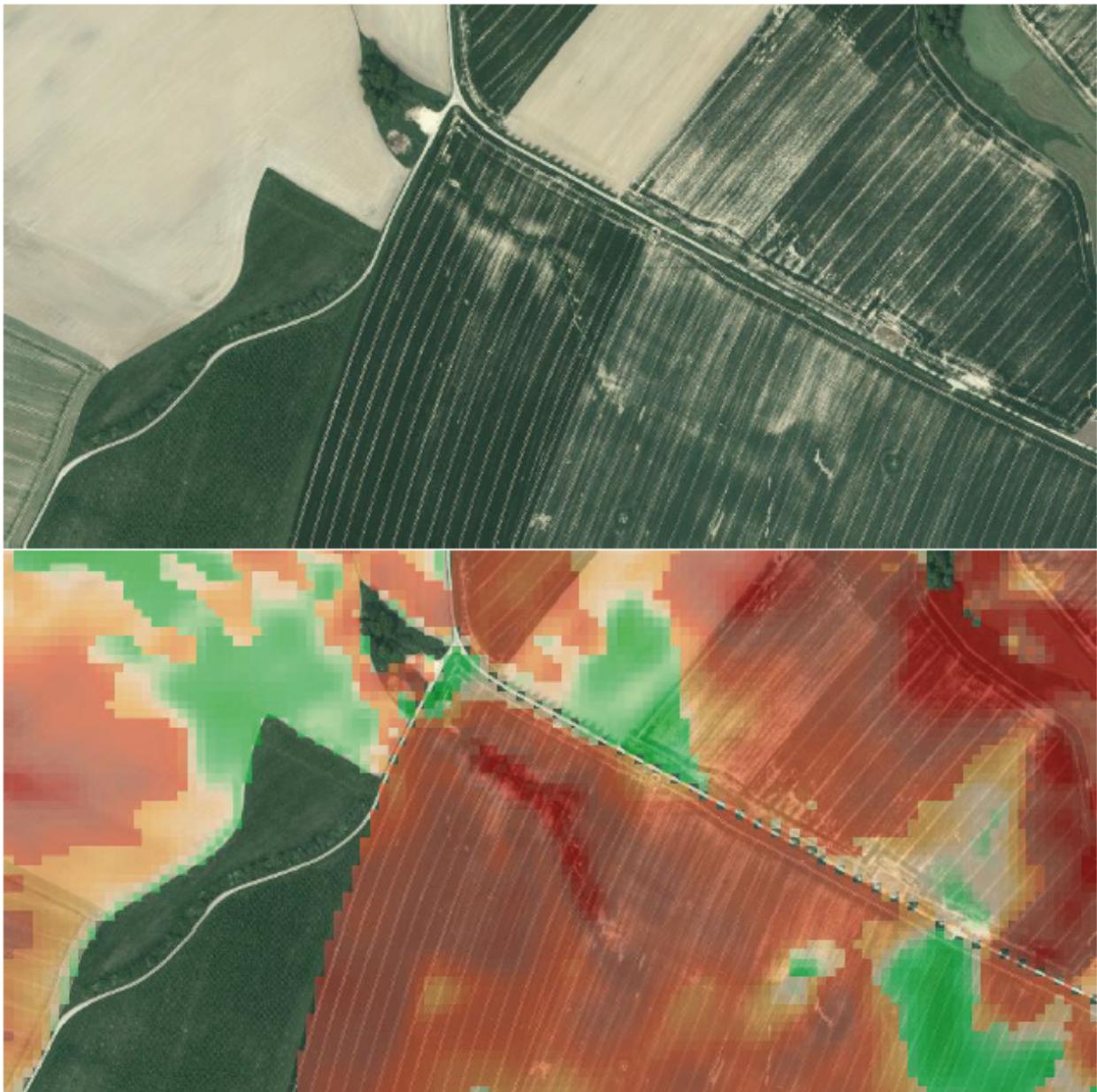
Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: An verschiedenen Stellen zeigen sich auf den Feldern diffuse Aufhellungen als Spuren von Sedimentation oder Unterbodenfreilegung. Insbesondere die Schläge rund um das Waldstück am südlichen Bildrand zeigen solche Spuren, die teilweise eine Orientierung zum Waldstück bzw. der östlich anschließenden Grünlandfläche zeigen.

Unteres Bild: Die auffälligen Bereiche rund um das Waldstück und den anschließenden begrünten Tiefenbereich zeigen hohe bis höchste Abtragswerte und lassen ein auf die Tiefenlinie gerichtetes Mulden- bzw. Rinnensystem erkennen.

Abbildung 40: Validierungsgebiet 4 für die Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

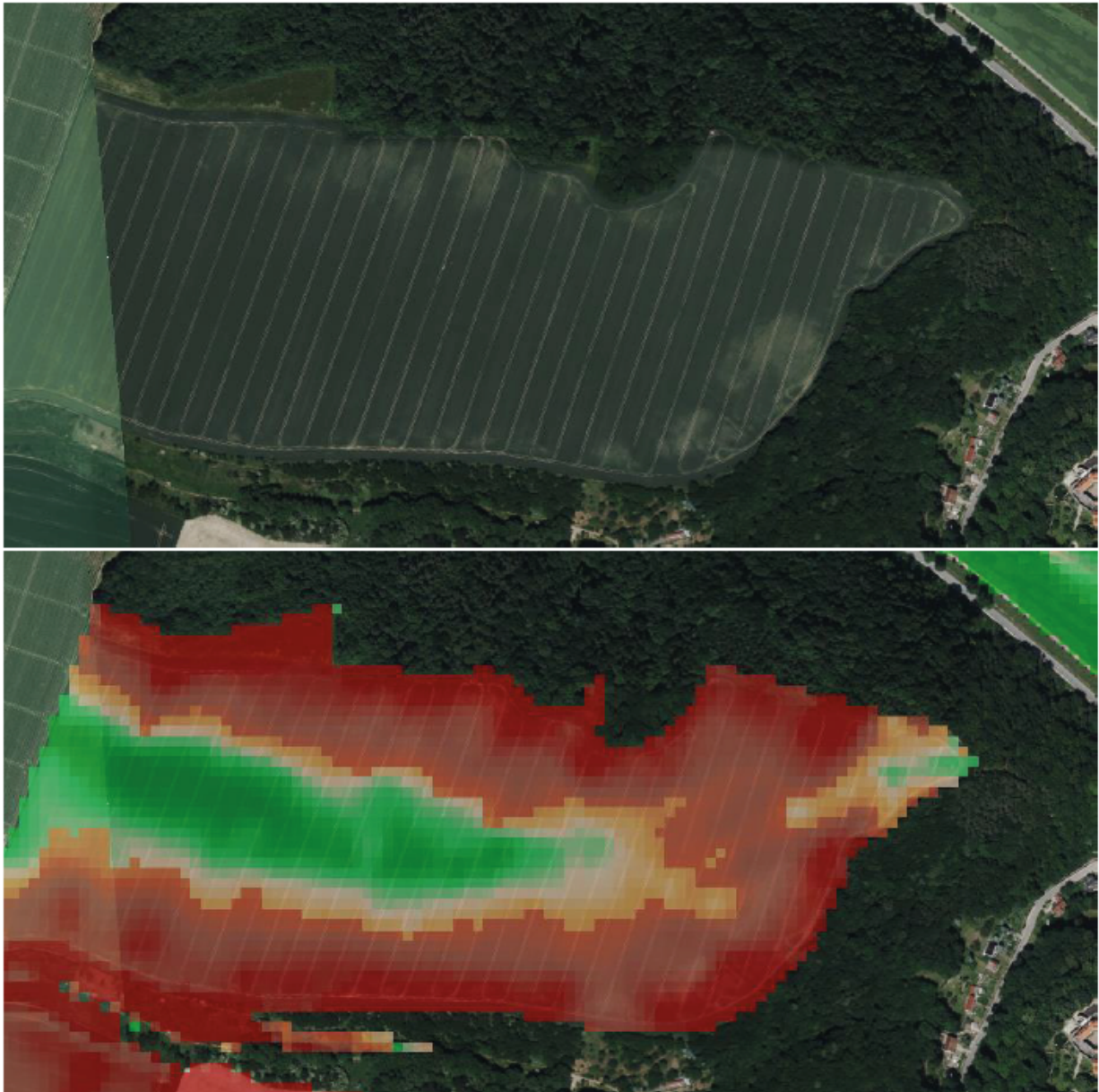
Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: An verschiedenen Stellen zeigen sich auf den Feldern in der Mitte und im Ostteil des Bildes zwischen der aufgelaufenen Feldfrucht diffuse Aufhellungen als Spuren von Sedimentation oder Unterbodenfreilegung. In der Bildmitte findet sich eine nordwestlich verlaufende schmale lineare Aufhellung die quer zur Bearbeitungsrichtung schwenkt und von Aufhellungen umgeben ist.

Unteres Bild: Die aufgehellten Stellen liegen überwiegend in Bereichen mit hohen bis höchsten Abtragswerten. Bei der linearen Struktur in der Bildmitte handelt es sich vermutlich um eine Erosionsrinne die von Abtragsbereichen flankiert wird und sehr gut mit höchsten Abtragswerten korreliert.

Abbildung 41: Validierungsgebiet 5 für die Bodenerosionsgefährdung



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

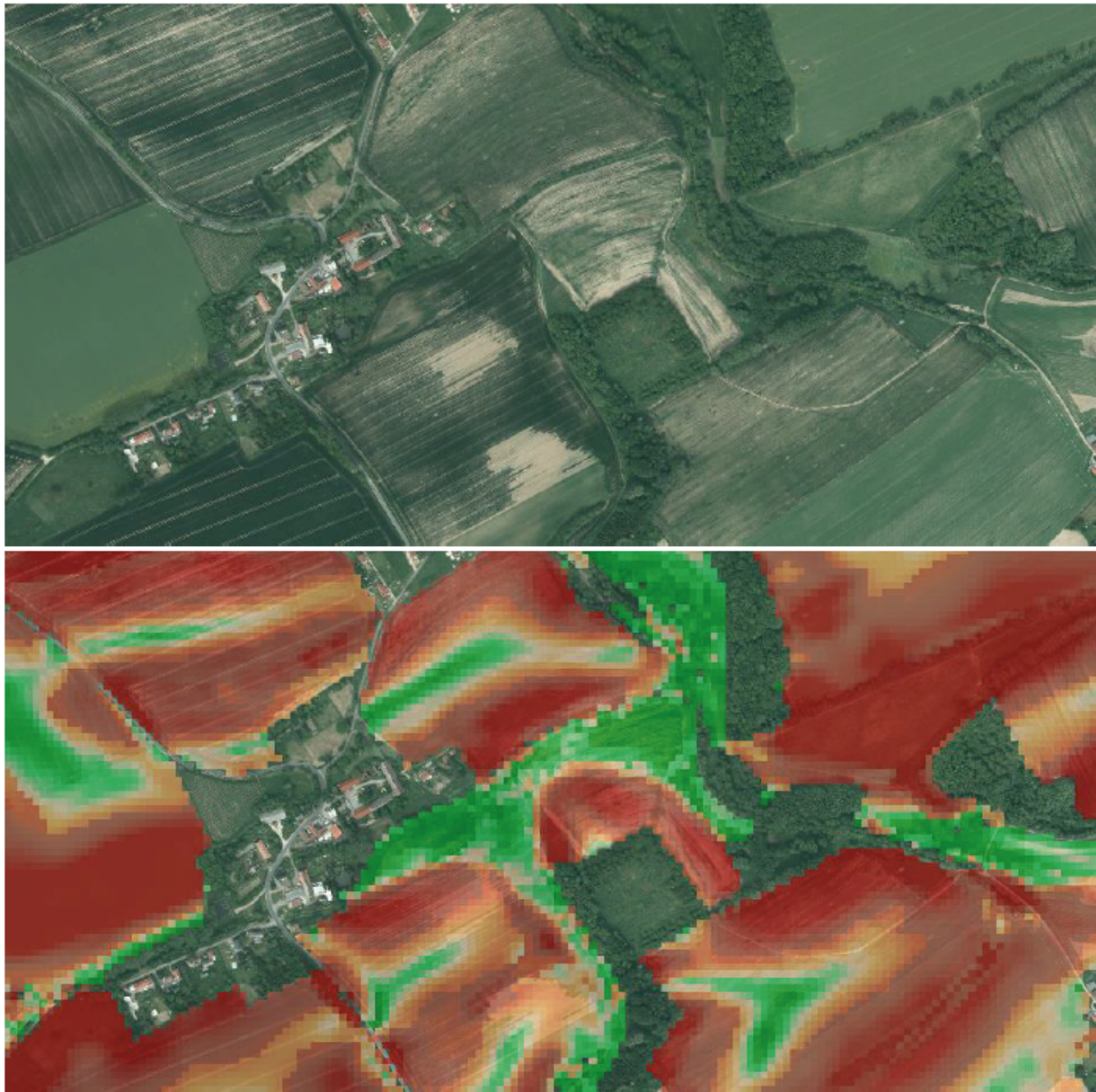
Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: An den nördlichen und südlichen Rändern des Feldes zeigen sich deutlich helle Stellen. Hierbei handelt es sich entweder um abgelagertes Bodenmaterial oder humusärmeren, durch Erosion freigelegten Unterboden (hier Löss bzw. Lösslehm).

Unteres Bild: Das räumliche Muster dieser erosionsbeeinflussten Stellen stimmt gut mit der Lage der Rasterzellen mit sehr hohen potenziellen Erosionswerten überein.

Abbildung 42: Validierungsgebiet 6 für die Bodenerosionsgefährdung



Zur Lage und Ausdehnung des Gebietes siehe Abbildung 36.

© eigene Darstellung, IÖR. Daten: R-Faktor/K-Faktor BGR; DGM10, Kreisgrenzen, ATKIS BKG; Orthophoto GeoSN

Vergleich Bildbefund und Modellierungsergebnis

Oberes Bild: An verschiedenen Stellen zeigen sich auf den Feldern diffuse Aufhellungen als Spuren von Sedimentation oder Unterbodenfreilegung. Die diskreten Aufhellungen auf dem Feld mit bereits aufgelaufener Feldfrucht westlich des Waldstreifens in der Bildmitte gehen vermutlich auf die Beseitigung von Erosionsspuren (Rillen, Rinnen, Bodenmaterial) durch Bodenbearbeitung zurück.

Unteres Bild: Die betroffenen Bereiche zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Rasterzellen mit hohen Abtragswerten, z.B. nördlich und östlich des in der Bildmitte gelegenen Waldstückes, westlich des sich nach Süden ziehenden Waldstreifens sowie auf den Schlägen im Nordwesten.

2.2.6 Schäden durch Waldbrand

2.2.6.1 Hintergrund

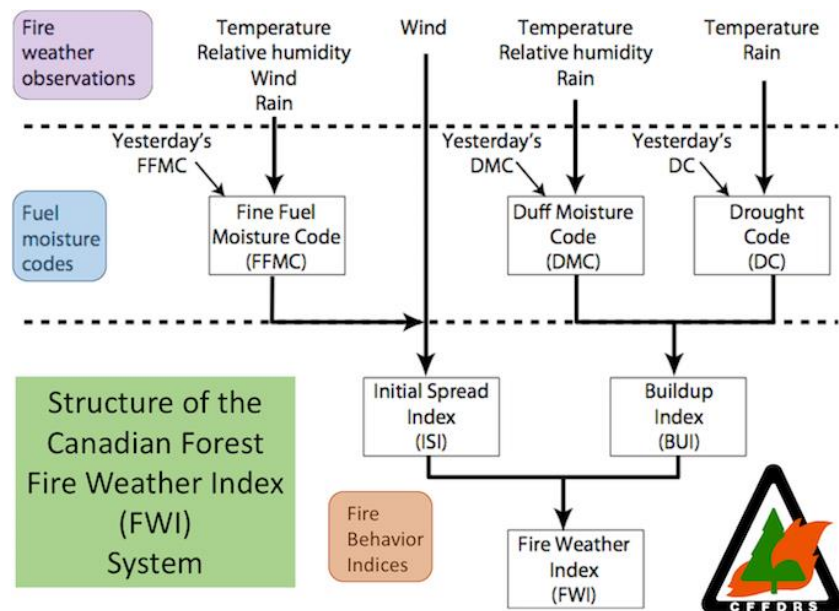
Tröltzsch et al. (2011, S.52ff) stellen mit Bezug auf die Wald- und Forstwirtschaft zu den von ihnen ausgewerteten Studien fest: „*Keine der vorliegenden Studien nimmt eine Bestimmung von Schadenskosten vor.*“ Bezogen auf die Kosten von Anpassungsmaßnahmen fänden sich kaum Angaben. Auf Basis einer Literaturschau hat die Vulnerabilitätsstudie des Bundes für Mecklenburg-Vorpommern als „stark negative Klimawirkung“ eine Aussage zur Veränderung der Waldbrandsituation in Nadelwäldern aufgenommen (Buth et al. 2015, S.166). Das „Waldbrandrisiko“ wurde mit einem Wirkmodell abgeschätzt (ebd.: S.250). Hierbei handelt es sich um den rein von meteorologischen Größen abgeleiteten Waldbrandindex aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes (ebd.: S.253) und der Auswertung über die Zahl der Tage pro Jahr mit einer Warnstufe von >4. Recherchen zum Waldbrandgeschehen der Vergangenheit zeigen einen Rückgang der Anzahl der Brände sowie der von den Bränden betroffenen Fläche (ebd.: S.252). Zu Schäden und damit verbundenen Kosten finden sich keine Angaben, ebenso zu darauf bezogenen Anpassungsmaßnahmen. Als Sensitivitätsmaß wird der Anteil der Waldfläche an der Kreisfläche verwendet, eine weitere Differenzierung, etwa in Nadel-, Laub- und Mischwald, fand nicht statt. Bei schwachem Wandel des Klimas wird die Bedeutung als „gering“ eingestuft, bei starkem Wandel als „mittel“. Für die ferne Zukunft wird auf die Möglichkeit einer erheblichen Zunahme der Waldbrandgefahr hingewiesen (ebd.: S.272). Der Monitoringbericht zur DAS führt für das Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft den Indikator FW-I-6 „Waldbrandgefährdung und Waldbrand“ (Schönthaler et al. 2011, S.177f, UBA 2015, S.134 f.). Hierbei handelt es sich um die gleichen Daten, wie sie auch der Waldbrandstatistik des Bundes auf Basis der Meldungen aus den Bundesländern zugrunde liegen (z. B. aktuell für das Jahr 2014: BLE 2015. Für 2015 stehen Berichte einzelner Bundesländer zur Verfügung). Grundsätzlich zeigt sich für den dargestellten Zeitraum 1991 – 2014 mit gesamtdeutschen Daten ein Rückgang sowohl in der Anzahl der Brände als auch in der Brandfläche in der ersten Dekade und eine Stagnation in der zweiten Dekade mit mittleren Schäden von rd. 0,7 Mio. EUR für 2004–2014.

2.2.6.2 Methodische Vorgehensweise

Für die Berechnung der Waldbrandgefährdung wird der kanadische Fire Weather Index (FWI) verwendet (siehe Abbildung 43), der mittlerweile in einer abgewandelten Form für Deutschland den verbreiteten Waldbrandindex M-68 nach KÄSE (1969) bzw. erweitert nach FLEMMING (1994) abgelöst hat. Zur Anwendung auf Stationszeitreihen bzw. alternativ Raster der notwendigen meteorologischen Eingangsdaten aus dem EURO-CORDEX-Ensemble wird das R-Paket „*cffdrs*“ verwendet. Beispielhaft für einen Teilausschnitt zeigt Abbildung 44 die räumliche Verteilung der Eingangsparameter Temperatur (TEMP in °C), Relative Feuchte (RH in %), Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (WS in km/h) und Niederschlag (PREC in mm) sowie die daraus berechneten dimensionslosen Komponenten des Index Fine Fuel Moisture Content (FFMC), Duff Moisture Code (DMC), Drought Code (DC), Initial Spread Index (ISI), Buildup Index (BUI), Fire Weather Index (FWI) und Daily Severity Rating (DSR). Der FFMC ist ein Maß für die Feuchte der obersten Streuschicht mit Blättern, Nadeln und kleinen Ästen als Brandmaterial. Er gibt Hinweise auf die Zündanfälligkeit und die Brennbarkeit dieser Materialien. Der DMC kennzeichnet die Feuchte der tieferen, schwach verdichteten Streuschichten und gibt Hinweise auf die Brennbarkeit solcher Streulagen und von mittelgroßen Ästen. Beim DC handelt es sich um eine Maßzahl für den Feuchtegehalt von tiefen und verdichteten Auflagehorizonten. Er gibt Hinweise auf längerfristige Austrocknungsvorgänge von Brandmaterial im Wald sowie auf die Neigung zu Schwelbränden unter der Bodenoberfläche (vergleichbar etwa zu Torfbränden). Der

IS gibt eine Einstufung des Brandverlaufs unter Einbeziehung von FFMCI und Windgeschwindigkeit aber ohne Berücksichtigung spezifischer Brennstoffeigenschaften (z. B. Bestandsstruktur). Der BI ist eine Kombination aus DMC und DC und aggregiert damit die Gesamtbrennbarkeit. Der FWI ist die höchste Aggregationsebene des Systems und beschreibt die mögliche Feuerintensität. Er dient häufig als allgemeiner Index für die Waldbrandgefahr im Ganzen. Eine Übersicht zu den einzelnen Komponenten, deren Zusammenhängen sowie den Eingangsgrößen des Forest Fire Weather Index-Systems zeigt Abbildung 43.

Abbildung 43: Komponenten und Variablen des Canadian Forest Fire Weather Index-Systems



© National Wildfire Coordinating Group (NWCG)²⁵.

Tabelle 28: Einstufung der Wertausprägungen für die Komponenten des Canadian Forest Fire Weather Index-Systems²⁶

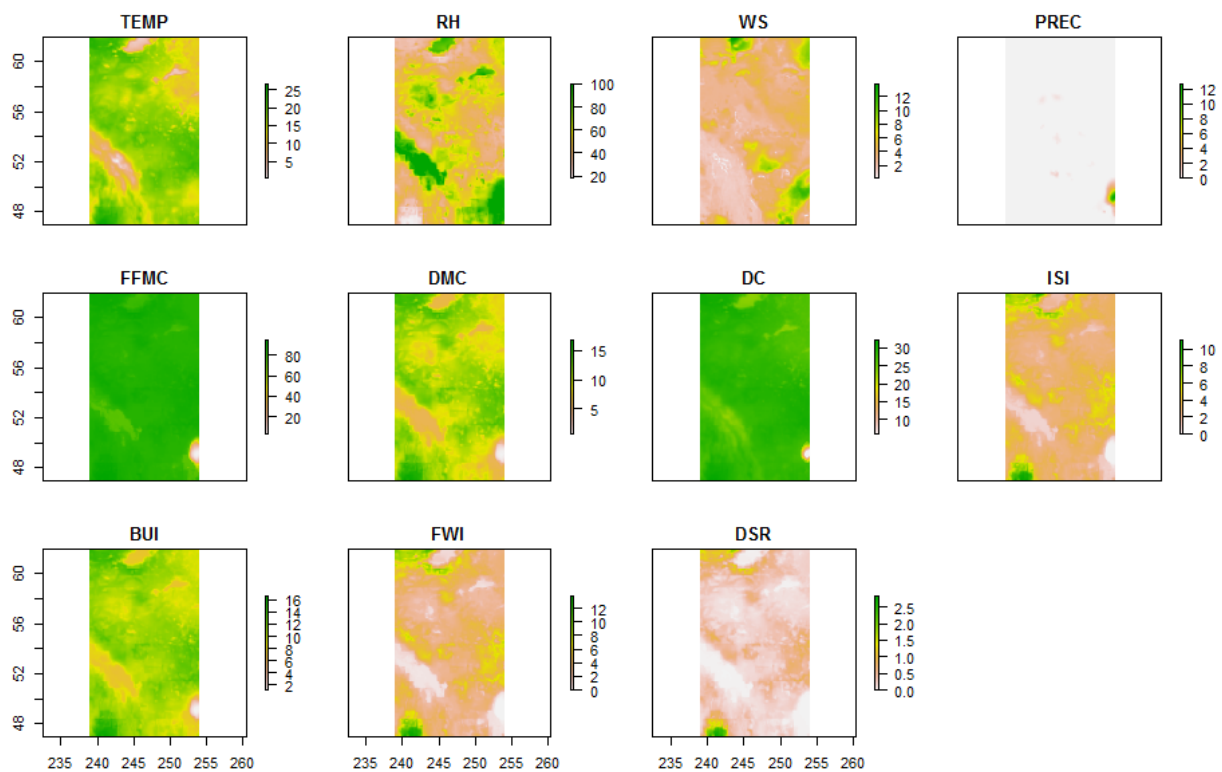
Klasse	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI
1: niedrig (low)	0–63	0–21	0–80	0–2	0–24	0–5
2: moderat (moderate)	63–84	21–27	80–190	2–5	24–40	5–10
3: hoch (high)	84–88	27–40	190–300	5–10	40–60	10–20
4: sehr hoch (very high)	88–91	40–60	300–425	10–15	60–90	20–30
5: extreme (extreme)	>91	>60	>425	>15	>90	>3

© IÖR zusammengestellt aus <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/maps/fw> (National Wildfire Coordinating Group).

²⁵ <http://www.fbfrg.org/cffdrs/fire-weather-index-fwi-system/FWIFlowChart.png>

²⁶ <https://www.frames.gov/files/6014/1576/1411/FWI-history.pdf>

Abbildung 44: Rasterbasierte Berechnung des FWI für einen Gebietsausschnitt mit Eingangsdaten (TEMP, RH, WS, PREC) und Ergebnissen (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI, DSR)



© eigene Darstellung, IÖR.

2.2.6.3 Schadensmodell

Eine Analyse der Korrelation von Ausprägungen des Fire Weather Index mit der Anzahl von Waldbränden in einem Bundesland bzw. mit der Brandfläche ergab keine signifikanten Zusammenhänge. Dies hat verschiedene Gründe. Die Zündung eines Waldbrandes ist unabhängig von der meteorologischen Brandanfälligkeit und ist primär durch menschliche Aktivitäten gesteuert (offenes Feuer, Rauchen, Parken von Fahrzeugen mit heißer Abgasanlage), was auch deutlich aus der Klassifizierung der Brandursache in der Waldbrandstatistik hervorgeht. Die Brandfläche als Maß für den Schaden (Holzverlust, Wiederaufforstungskosten) ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die ebenfalls zu einem großen Teil unabhängig von der meteorologischen Situation sind. Zu nennen seien hier etwa der Zeitpunkt der Entdeckung des Brandes und der Beginn der Brandbekämpfung, die Möglichkeiten der Brandbekämpfung (Ausstattung der Feuerwehren, Löschtechnik wie Hubschrauber und Flugzeuge, eingeschränkte Zugänglichkeit des Brandgebietes durch Reliefverhältnisse oder Munitionsbelastung Alter und Struktur des Baumbestandes inkl. Bodenvegetation). Ungeachtet dieser Einschränkungen auf Basis von Beobachtungen der Vergangenheit kann grundsätzlich bei einem Anstieg der auch als Waldbrandgefahr bezeichneten Brandanfälligkeit ausgedrückt über den FWI bzw. dessen Komponenten wie FFMC, DMC und DC von einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Feld- und Waldbrände ausgegangen werden. In der Vergangenheit traten beispielsweise in Brandenburg mehr als 50% der Waldbrände unter den Bedingungen hoher Indexwerte des M-68 auf (z. B. MILB 2011, S.80, mit 60% der Brände und 90% der Brandfläche).

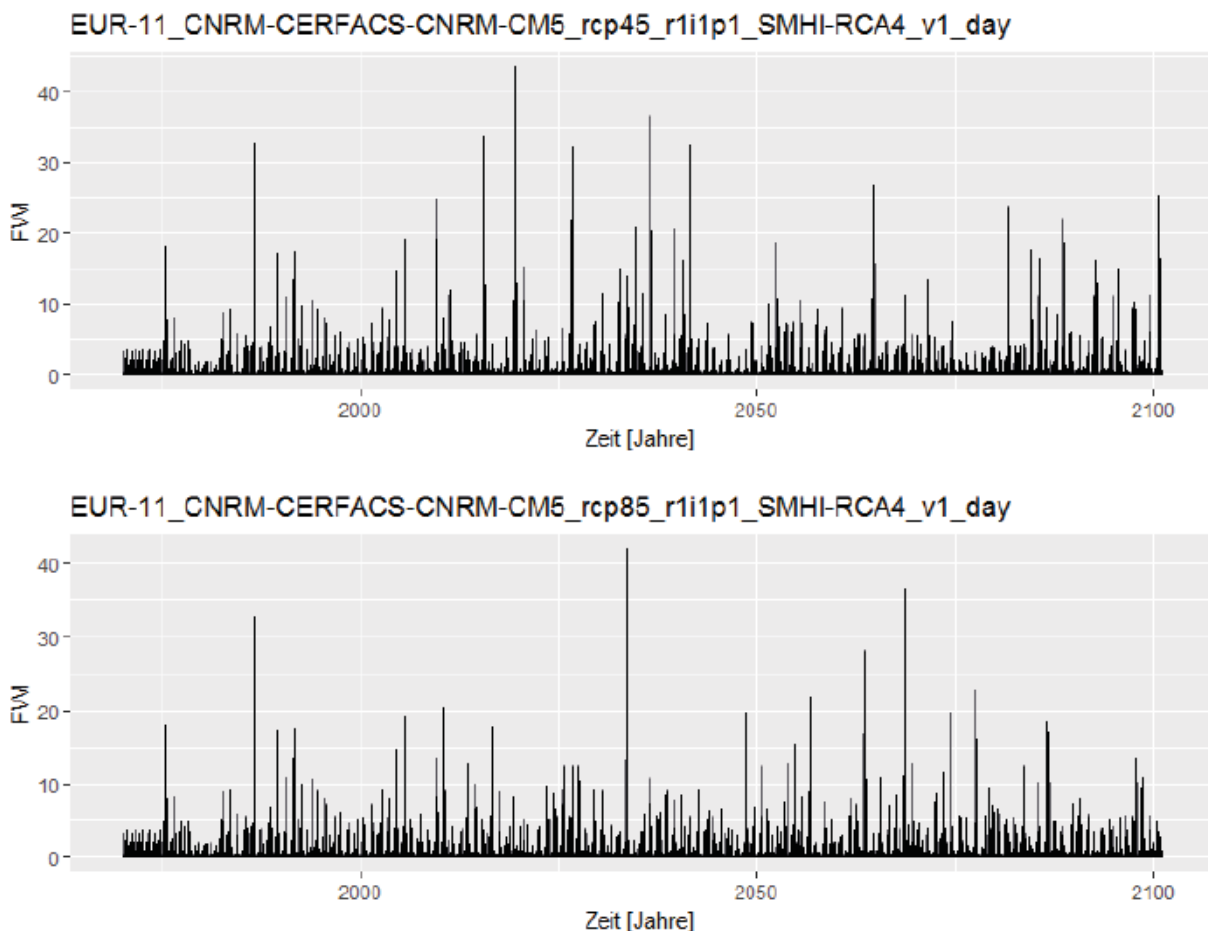
Eine Projektion von Schadenskosten ist aus den im vorhergehenden Absatz genannten Gründen nicht möglich. Aus den Daten der Waldbrandstatistik des Bundes lassen sich grundsätzlich mittlere flächenbezogene Schadenskosten ableiten, aufgrund der Unkenntnis von

Entstehungsort- und -zeitpunkt sowie Brandverlauffassen sich diese aber nicht auf mögliche zukünftige Brandereignisse beziehen.

2.2.6.4 Ergebnisse

Die Modellierungsergebnisse für die Schäden durch Waldbrand bilden aus den oben genannten Gründen nicht die gesamte Wirkungskette von der klimatischen Einwirkung bis zur Auswirkung in Form von Schäden dar. Ergebnisse liegen bis zum Punkt der Verknüpfung von einzelnen meteorologischen Variablen zu dem komplexen Waldbrandgefahrenindexsystem CFFDRS vor. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes konnte nicht für jeden einzelnen der 9.100 Gitterpunkte und alle Ensemblekandidaten eine Berechnung erfolgen. Beispielhaft zeigt für einen Gitterpunkt in Brandenburg (bei Brandenburg a.d.H.) Abbildung 45 den täglichen Verlauf des FWI für den RCP4.5- und RCP8.5-Antrieb mit der Projektionskaskade CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1. Bei der Beschreibung wird die Einstufung der Werte nach Tabelle 28 verwendet.

Abbildung 45: Tageswerte des FWI für einen ausgewählten Gitterpunkt (Reihe 31, Zeile 61; Brandenburg a. d. H.) einer Projektionskaskade (CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1) mit RCP4.5-(oben) und RCP8.5-Antrieb (unten)



© eigene Darstellung, IÖR. Daten: EURO-CORDEX, Berechnung: IÖR

Der zeitliche Verlauf des FWI am Punkt zeigt keinen klaren Trend. Sehr hohe Werte (siehe Tabelle 28 zur Einstufung der Wertebereiche) erscheinen im RCP4.5-Szenario bereits in der nahen Zukunft, in der fernen Zukunft dominieren gehäuft höhere Werte. Im RCP8.5-Szenario erfolgt ausgenommen einer singulären Spitze der Anstieg bzw. die Häufung sehr hoher Werte

um 2050 herum. Betrachtet man den als Zündanfälligkeitsmaß interpretierbaren FFMCI und dabei die Anzahl an Tagen im sehr hohen Wertebereich mit >88 so zeigt sich im Szenario RCP4.5 für den Zeitraum 1961–1990 ein Wert von 80 Tagen, zwischen 2021–2050 von 121 Tagen und zwischen 2071–2100 von 112 Tagen. Im Szenario RCP8.5 ist der Wert für den Referenzzeitraum identisch, für 2021–2050 beträgt er 181 Tage und für 2071–2100 159 Tage, was mehr als eine Verdopplung der Brandanfälligkeit für die Zukunft bedeuten könnte.

2.2.6.5 Handlungsempfehlungen

Einzelne Projektionen zeigen einen nennenswerten Anstieg der klimatisch bedingten Brandanfälligkeit (Waldbrandgefahr). Aufgrund der hier nicht erfolgten, häufig aber notwendigen Biaskorrekturen für den Niederschlag sowie weitere Variablen bestehen Unsicherheiten in Bezug auf diese Eingangsgröße der Indices. Die weitere Bereitstellung biaskorrigierter Daten hat hohe Bedeutung für Klimafolgenabschätzungen und sollte durch den Bund über den DWD bzw. das Climate Service Center Germany (GERICS) fortgesetzt bzw. vertieft werden.

Die Verringerung der bestandsbedingten Brandanfälligkeit durch Maßnahmen des Waldumbaus hat weiterhin hohe Bedeutung.

Die spezifische Problemlage munitionsbelasteter Flächen erfordert das Bereithalten geeigneter Löschtechnik (gepanzerte Fahrzeuge, Löschhubschrauber und -flugzeuge).

Die Schadenskosten der Vergangenheit auf Basis der Waldbrandstatistiken der Länder sind im Vergleich mit anderen Klimawirkungen als eher gering einzustufen. Die Gefahren von Bränden für die öffentliche Sicherheit (Leib und Leben, Eigentum) erfordert grundsätzlich eine Brandbekämpfung, so dass die Inkaufnahme der Schäden am Holzvorrat keine Option darstellen. Im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen zur Brandvermeidung und Brandbekämpfung muss daher immer mehr als der reine Holzwert und die Aufforstungskosten angesetzt werden.

Fazit

Für die Zukunft ist auf Basis der Projektionskette CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1 für den betrachteten Punkt mit einer Zunahme der Brandanfälligkeit zu rechnen, die im Szenario RCP8.5 für die nahe Zukunft mehr als das Doppelte im Vergleich zum Referenzzeitraum beträgt.

Der Einsatz des deutlich differenzierten Forest Fire Weather Index mit seinen Sub-Indices bringt im Vergleich zu den singulären Indices wie dem M-68 einen Mehrwert an Information. Die Anwendung des Index-Systems auf ein Ensemble von Klimaprojektionen erlaubt eine Einschätzung der Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen. Durch seine internationale Verbreitung ist ein Vergleich mit anderen Regionen möglich.

Eine Projektion von Schadenskosten ist aus den folgenden Gründen nicht möglich gewesen: Es konnte keine signifikante Korrelation zwischen Gefahrenindex und Waldbrandfläche in der Vergangenheit hergestellt werden, da i) die tatsächliche Zündung eines Waldbrandes unabhängig von der meteorologischen Brandanfälligkeit ist und primär durch menschliche Aktivitäten gesteuert wird (offenes Feuer, Rauchen, Parken von Fahrzeugen mit heißer Abgasanlage) und ii) die Brandfläche als Maß für den Schaden (Holzverlust, Wiederaufforstungskosten) von verschiedenen klimaunabhängigen Faktoren bedingt wird wie etwa der Zeitpunkt der Entdeckung des Brandes und der Beginn der Brandbekämpfung sowie die Möglichkeiten bzw. der Verlauf der Brandbekämpfung (Ausstattung der Feuerwehren, Löschtechnik wie Hubschrauber und Flugzeuge,

eingeschränkte Zugänglichkeit des Brandgebietes durch Reliefverhältnisse oder Munitionsbelastung, Alter und Struktur des Baumbestandes inkl. Bodenvegetation).

3 Beispielhafte Maßnahmen- und Instrumentenanalysen und deren Kosten

In der Analyse von exemplarischen Maßnahmen und Instrumenten und deren Kosten steht das volkswirtschaftliche Schadenspotential des Klimawandels im Zentrum, um letztendlich eine Basis für eine mögliche effiziente Klimaanpassung zu bilden.

Neben der Begrenzung der Erderwärmung durch die Reduzierung von Klimagasemissionen sind Anpassungsmaßnahmen an einen unvermeidbaren Klimawandel eine wichtige Säule der Klimapolitik. Für Deutschland sind die Grundlagen dazu in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Bundesregierung 2008) festgelegt worden. Sie soll die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber den Folgen des Klimawandels verringern. Um ein Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel zu erstellen, arbeiten viele für das Thema relevante Fachbehörden und Institutionen des Bundes im Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung zusammen. Inzwischen liegen gute Erkenntnisse zu den Folgen des Klimawandels und zur Vulnerabilität von Sektoren und Regionen in Deutschland vor. Um auf dieser Grundlage die Möglichkeiten einer effizienten Klimaanpassung und prioritäre Maßnahmen zu identifizieren, ist – vor der Festlegung von Maßnahmen und der Auswahl von Politikinstrumenten – zunächst eine genauere Bestimmung und dabei insbesondere eine ökonomische Bewertung der Schadenspotenziale von Klimarisiken hilfreich. So können verschiedene Klimawirkungen miteinander verglichen und unterschiedliche Anpassungsoptionen hinsichtlich ihrer Kosten und Nutzen bewertet werden. Informationen über Schadens- und Anpassungskosten erleichtern zudem die Kommunikation über die Dringlichkeit und ökonomische Vorteilhaftigkeit von Anpassungsmaßnahmen. Oft beschränkt sich die Bewertung von Klimawirkungen auf die unmittelbaren ökonomischen Effekte. So werden die Schadenspotenziale von Flussüberschwemmungen unter anderem durch den Wert der beschädigten Gebäude gemessen. Die unmittelbaren ökonomischen Effekte wirken aber als Impulse im ökonomischen System und entfalten über vielfältige Interdependenzen Folgewirkungen. Diese Folgewirkungen können die direkten Auswirkungen der ursprünglichen Impulse auf ökonomische Zielgrößen verstärken oder dämpfen. So geben Urban und Steininger (2015, S.301) als ein Ergebnis der COIN-Studie an, dass die direkten Klimawirkungen in Industrie und Handel durch makroökonomische Rückwirkungen vierfach verstärkt werden. Hübler und Klepper (2007, S.46) erwarten, dass die Schadenskosten durch hitzebedingte Produktivitätseinbußen aufgrund endogener Anpassungsmaßnahmen der Wirtschaftssubjekte reduziert werden.

Vor diesem Hintergrund zielt die Analyse der volkswirtschaftlichen Schadenpotentiale auf eine Bewertung von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung von Folgewirkungen ab. Sie geht damit über eine Addition von Einzelergebnissen hinaus. Im Rahmen der gegenwärtigen Studie kann allerdings keine umfassende und detaillierte quantitative Einschätzung der direkten und indirekten Wirkungen von Klimawandel und -anpassung geliefert werden. Vornehmlich soll hier die Bedeutung von Folgewirkungen verdeutlicht werden. Dabei werden zum einen makroökonomische Interdependenzen und zum anderen die Verflechtung der Wirtschaftssektoren über Vorleistungsketten berücksichtigt. Die vorgelegten Befunde beziehen sich auf den Gesamttraum Deutschlands und sind nicht regional differenziert.

Der vorliegende Berichtsteil wird wie folgt aufgegliedert: Zunächst wird im anschließenden Abschnitt 3.1.2 ein konzeptioneller Analyserahmen präsentiert, der – ausgehend von einer Zuordnung von ökonomischen Impulsen durch Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen zu Elementen volkswirtschaftlicher Rechensysteme und Analysemodelle – eine systematische Erfassung der damit verbundenen Folgewirkungen erlaubt. Dabei werden ökonomische

Interdependenzen sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite berücksichtigt. Zudem wird diskutiert, wie die ökonomischen Wirkungen von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen auf Produktion, Einkommen und Beschäftigung unter dem Aspekt der Wohlfahrt zu beurteilen sind. Schließlich werden einige Einschränkungen verdeutlicht, die in den folgenden Abschnitten zu berücksichtigen sind.

Im Abschnitt 3.1.3 werden zunächst für drei ausgewählte Klimawirkungsbereiche – Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, Gesundheitsschäden sowie Beeinträchtigungen von Böden – die in der Literatur diskutierten ökonomischen Impulse identifiziert, und es wird jeweils gezeigt, wie sie Elementen volkswirtschaftlicher Modelle zugeordnet werden können. Folgewirkungen, die in Bezug auf die einzelnen Klimawirkungsbereiche spezifisch sind, werden aufgeführt; sie finden sich jedoch nur selten, meist sind die Folgewirkungen, die mit Impulsen auf bestimmte Modellelemente verbunden sind, unabhängig vom untersuchten Klimawirkungsbereich dieselben. Anschließend werden die Ergebnisse vorliegender Studien dargestellt, die die ökonomischen Wirkungen eines breiteren Spektrums verschiedener Klimawirkungen untersuchen. Die Analysen im Abschnitt 3.1.3 sind qualitativ-beschreibend; soweit in der Literatur ausgewiesen, werden quantitative Abschätzungen wiedergegeben.

Der Abschnitt 3.1.4 präsentiert quantitative Abschätzungen der Größenordnung von Folgewirkungen, die sich aufgrund von standardisierten Investitions- und anderen Impulsen im Kontext eines makroökonomischen Modells ergeben. Diese Analysen sind nicht spezifisch auf Impulse durch Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen ausgerichtet, erlauben aber eine Einschätzung von auch in diesem Kontext relevanten ökonomischen Wirkungsketten. Im Abschnitt 3.1.5 wird für ausgewählte Klimawirkungsbereiche – Schäden an der Schieneninfrastruktur, Schäden an Wohngebäuden, Schäden an gewerblicher Infrastruktur und Wassererosion - gezeigt, wie Impulse, die zunächst auf wenige Wirtschaftssektoren konzentriert sind, sich über die intersektorale Vorleistungsverflechtung auf weitere Wirtschaftsbereiche auswirken. Zur quantitativen Analyse wird ein statisches Input-Output-Modell für einen standardisierten Impuls von jeweils einer Milliarde Euro angewandt; die sektorale Lieferstruktur ist jeweils spezifisch für die untersuchten Klimawirkungsbereiche aus der Literatur abgeleitet. Der Abschnitt 3.1.6 fasst zusammen und zieht einige Schlussfolgerungen.

3.1 Volkswirtschaftliche Bewertung von Schäden verursacht durch den Klimawandel

3.1.1 Hintergrund, Ziel, Vorgehensweise

Neben der Begrenzung der Erderwärmung durch die Reduzierung von Klimagasemissionen sind Anpassungsmaßnahmen an einen unvermeidbaren Klimawandel eine wichtige Säule der Klimapolitik. Für Deutschland sind die Grundlagen dazu in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Bundesregierung 2008) festgelegt worden. Sie soll die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber den Folgen des Klimawandels verringern. Um ein Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel zu erstellen, arbeiten viele für das Thema relevante Fachbehörden und Institutionen des Bundes im Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung zusammen. Inzwischen liegen umfangreiche und detaillierte Erkenntnisse zu den Folgen des Klimawandels und zur Vulnerabilität von Sektoren und Regionen in Deutschland vor. Um auf dieser Grundlage die Möglichkeiten einer effizienten Klimaanpassung und prioritäre Maßnahmen zu identifizieren, ist – vor der Festlegung von Maßnahmen und der Auswahl von Politikinstrumenten - zunächst eine genauere Bestimmung und dabei insbesondere eine ökonomische Bewertung der Schadenspotenziale von Klimarisiken hilfreich. So können verschiedene Klimawirkungen miteinander verglichen und unterschiedliche

Anpassungsoptionen hinsichtlich ihrer Kosten und Nutzen bewertet werden. Informationen über Schadens- und Anpassungskosten erleichtern zudem die Kommunikation über die Dringlichkeit und ökonomische Vorteilhaftigkeit von Anpassungsmaßnahmen.

Oft beschränkt sich die Bewertung von Klimawirkungen auf die unmittelbaren ökonomischen Effekte. So werden die Schadenspotenziale von Flussüberschwemmungen unter anderem durch den Wert der beschädigten Gebäude gemessen. Die unmittelbaren ökonomischen Effekte wirken aber als Impulse im ökonomischen System und entfalten über vielfältige Interdependenzen Folgewirkungen. Diese Folgewirkungen können die direkten Auswirkungen der ursprünglichen Impulse auf ökonomischer Zielgrößen verstärken oder dämpfen. So geben Urban und Steininger (2015, S.301) als ein Ergebnis der COIN-Studie²⁷ an, dass die direkten Klimawirkungen in Industrie und Handel durch makroökonomische Rückwirkungen vierfach verstärkt werden. Hübler und Klepper (2007, S.46) erwarten, dass die Schadenskosten durch hitzebedingte Produktivitätseinbußen aufgrund endogener Anpassungsmaßnahmen der Wirtschaftssubjekte reduziert werden.

Vor diesem Hintergrund zielt die vorliegende Untersuchung auf eine Bewertung von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung von Folgewirkungen. Sie geht damit über eine Addition von Einzelergebnissen hinaus. Im Rahmen der gegenwärtigen Studie kann allerdings keine umfassende und detaillierte quantitative Einschätzung der direkten und indirekten Wirkungen von Klimawandel und -anpassung geliefert werden. Vornehmlich soll hier die Bedeutung von Folgewirkungen verdeutlicht werden. Dabei werden zum einen makroökonomische Interdependenzen und zum anderen die Verflechtung der Wirtschaftssektoren über Vorleistungsketten berücksichtigt. Die vorgelegten Befunde beziehen sich auf den Gesamttraum Deutschlands und sind nicht regional differenziert.

Die Vorgehensweise ist folgende: Zunächst wird im anschließenden Abschnitt 3.1.2 ein konzeptioneller Analyserahmen präsentiert, der - ausgehend von einer Zuordnung von ökonomischen Impulsen durch Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen zu Elementen volkswirtschaftlicher Rechensysteme und Analysemodelle - eine systematische Erfassung der damit verbundenen Folgewirkungen erlaubt. Dabei werden ökonomische Interdependenzen sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite berücksichtigt. Zudem wird diskutiert, wie die ökonomischen Wirkungen von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen auf Produktion, Einkommen und Beschäftigung unter dem Aspekt der Wohlfahrt zu beurteilen sind. Schließlich werden einige Einschränkungen verdeutlicht, die in den folgenden Abschnitten zu berücksichtigen sind. Im Abschnitt 3.1.3 werden zunächst für drei ausgewählte Klimawirkungsbereiche – Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, Gesundheitsschäden sowie Beeinträchtigungen von Böden – die in der Literatur diskutierten ökonomischen Impulse identifiziert, und es wird jeweils gezeigt, wie sie Elementen volkswirtschaftlicher Modelle zugeordnet werden können. Folgewirkungen, die in Bezug auf die einzelnen Klimawirkungsbereiche spezifisch sind, werden aufgeführt; sie finden sich jedoch nur selten, meist sind die Folgewirkungen, die mit Impulsen auf bestimmte Modellelemente verbunden sind, unabhängig vom untersuchten Klimawirkungsbereich dieselben. Anschließend werden die Ergebnisse vorliegender Studien dargestellt, die die ökonomischen Wirkungen eines breiteren Spektrums verschiedener Klimawirkungen untersuchen. Die Analysen im Abschnitt 3.1.3 sind qualitativ-beschreibend; soweit in der Literatur ausgewiesen, werden quantitative Abschätzungen widergegeben.

Der Abschnitt 3.1.4 präsentiert quantitative Abschätzungen der Größenordnung von Folgewirkungen, die sich aufgrund von standardisierten Investitions- und anderen Impulsen im

²⁷ Die COIN- (Cost of Inaction-) Studie ist eine umfangreiche Untersuchung der Kosten des Klimawandels in Österreich.

Kontext eines makroökonomischen Modells ergeben. Diese Analysen sind nicht spezifisch auf Impulse durch Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen ausgerichtet, erlauben aber eine Einschätzung von auch in diesem Kontext relevanten ökonomischen Wirkungsketten. Im Abschnitt 3.1.5 wird für ausgewählte Klimawirkungsbereiche – Schäden an der Schieneninfrastruktur, Schäden an Wohngebäuden, Schäden an gewerblicher Infrastruktur und Wassererosion - gezeigt, wie Impulse, die zunächst auf wenige Wirtschaftssektoren konzentriert sind, sich über die intersektorale Vorleistungsverflechtung auf weitere Wirtschaftsbereiche auswirken. Zur quantitativen Analyse wird ein statisches Input-Output-Modell für einen standardisierten Impuls von jeweils einer Milliarde Euro angewandt; die sektorale Lieferstruktur ist jeweils spezifisch für die untersuchten Klimawirkungsbereiche aus der Literatur abgeleitet. Der Abschnitt 3.1.6 fasst zusammen und zieht einige Schlussfolgerungen.

3.1.2 Konzeptioneller Rahmen

3.1.2.1 Impulse und Folgewirkungen von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen

Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel haben unmittelbare ökonomische Auswirkungen, diese stellen als monetarisierte Klimawirkungen die direkten Kosten des Klimawandels dar. Diese direkten Kosten wirken als Impulse im ökonomischen System, die dort weitere Wirkungen auslösen.

Bei den direkten Kosten kann zwischen tangiblen und intangiblen Kosten unterschieden werden: erstere betreffen Güter, die auf Märkten gehandelt werden und für die also Marktpreise existieren (Bachner u.a. 2015). Intangible Kosten beziehen sich auf Komponenten der Wohlfahrt wie etwa Gesundheit und Lebensqualität, für die keine Marktpreise existieren und für die nur indirekt – z.B. über die Abschätzung von Schadensbeseitigungskosten – ein Geldwert ermittelt werden kann. Folgewirkungen intangibler Kosten sind in der Regel nicht zu berechnen, da die betreffenden Wohlfahrtskomponenten in quantitativen ökonomischen Rechen- und Analysesystemen nicht repräsentiert sind.

Die direkten Kosten des Klimawandels wirken als **Impulse**, die über vielfältige **Interdependenzen** im ökonomischen System auch weit verzweigte **Folgewirkungen** für wirtschaftliche Zielgrößen entfalten.²⁸

Für die Bestimmung von Folgewirkungen stellt sich die Frage, an welchen Stellen im ökonomischen System die Impulse ansetzen. Bachner u.a. (2015, S.112) klassifizieren die Impulse in Abhängigkeit davon, wie sie in ökonomische Modelle eingespeist werden, nach Änderungen

- ▶ der Produktionskostenstruktur,
- ▶ der Produktivität,
- ▶ der Struktur und Höhe der privaten und öffentlichen Konsumnachfrage,
- ▶ der Struktur und Höhe der Investitionen²⁹ und
- ▶ von Transferzahlungen und Steuern.³⁰

²⁸ Diese Folgewirkungen werden auch als indirekte Effekte bezeichnet. Siehe Bachner u.a. 2015.

²⁹ Dabei wird in dem verwendeten CGE-Modell allerdings eine feste Sparquote angenommen, die die Höhe der Investitionen bestimmt.

³⁰ Bei den Szenariorechnungen wird standardmäßig ein unveränderter Budgetsaldo des Staates angenommen.

In Bezug auf die Unterscheidung von Impulsen und Folgewirkungen sind ökologische Wirkungen über Handlungsfelder hinaus von ökonomischen Folgewirkungen zu unterscheiden.

- ▶ Über naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten sind die ökologischen Wirkungen in primären Handlungsfeldern mit ökologischen Wirkungen in weiteren Handlungsfeldern verknüpft. So haben Klimawirkungen im Handlungsfeld Boden weitere Auswirkungen in Handlungsfeldern wie Landwirtschaft und Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft. Bei der ökonomischen Analyse sind auch die ökologischen Wirkungen zweiter und höherer Ordnung als Impulse darzustellen.
- ▶ Ökonomische Folgewirkungen sind über ökonomische Zusammenhänge vermittelt. So führen Investitionen zur Umstellung der Bodenbearbeitung im Ackerbau zu einer höheren Beschäftigung im Maschinenbau.

Teils sind die Folgewirkungen von schwer vorhersehbaren Entscheidungen von Wirtschaftssubjekten abhängig und es müssen Annahmen darüber getroffen werden, wie die Akteure entscheiden.³¹

- ▶ So können Ausrüstungen wie Landmaschinen zur konservierenden Bewirtschaftung von Ackerböden etwa von inländischen oder von ausländischen Anbietern bezogen werden; bei Auslandsbezug sind die Folgewirkungen im Inland geringer;
- ▶ zusätzliche öffentliche Ausgaben können über Budgetdefizite oder über Steuererhöhungen finanziert werden; eine Defizitfinanzierung führt kurzfristig zu höheren Effekten;
- ▶ die Geldpolitik kann akkommodierend oder restriktiv gestaltet werden; bei restriktiver Geldpolitik werden die Effekte wirtschaftlicher Impulse gedämpft;
- ▶ die Haushalte und Unternehmen können ihre Erwartungen vergangenheits- oder zukunftsorientiert ausrichten; vorwärts gerichtete Erwartungen dämpfen die Effekte.

Die ökonomischen Folgewirkungen umfassen auch spontane Anpassungsreaktionen³² der von den Impulsen betroffenen Wirtschaftssubjekte wie etwa die Substitution von relativ teurer durch relativ billiger gewordene Produktionsfaktoren. Insofern berücksichtigen die Folgewirkungen auch bereits markt-getriebene, endogene Anpassungsmaßnahmen.

Bei den Impulsen sind solche, die auf der Angebots- und solche, die auf der Nachfrageseite (des Gütermarktes) ansetzen, zu unterscheiden.³³ Die ökonomischen Wirkungen **angebotsseitiger** Mechanismen von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen lassen sich mit der **Produktionsfunktion** erfassen.³⁴ Sie stellt dar, wie das Produktionsergebnis sich aus der Kombination volkswirtschaftlicher Produktionsfaktoren ergibt. Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene werden als Produktionsfaktoren meist Sachkapital (Ausrüstungen und Bauten), Humankapital (Arbeitseinsatz), Naturkapital (natürliche Ressourcen) und Wissenskapital

³¹ Um die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen zu verdeutlichen, können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.

³² Zu einer Klassifikation von Anpassungsmaßnahmen siehe INFRAS 2007 auf der Basis von Smit u.a. 1999.

³³ Klimawirkungen (climate change impacts), die auf der Angebotsseite ansetzen, sind etwa Verluste von Land und Infrastrukturen durch Hochwasser, Ertragseinbußen in der Landwirtschaft und die Verringerung der (Arbeits-) Produktivität durch Gesundheitsbeeinträchtigungen; auf der Nachfrageseite setzen Gesundheitsausgaben und Energiekosten an (OECD 2015). Siehe auch Bosello et al. 2012, S.10.

³⁴ Siehe Sue Wing and Fisher-Vanden 2013 und Sue Wing and Lanzi 2014.

(Know How) unterschieden. Bei sektoral disaggregierter Betrachtung werden auch die von anderen Sektoren im In- oder Ausland bezogenen Produktionsfaktoren (Vorleistungen) berücksichtigt. Oft ist mit der Menge und Qualität der eingesetzten Produktionsfaktoren das Produktionsergebnis nicht vollständig zu erklären, der unerklärte Rest wird der Totalen Faktorproduktivität zugeschrieben, die ein Maß dafür darstellt, wie „geschickt“ die Produktionsfaktoren mit einander kombiniert werden.

Auf unvollkommenen Märkten kann die Preisbildung durch die Stückkosten und einen Aufschlag darauf erklärt werden (mark-up pricing). Die Stückkosten ergeben sich aus den pro produzierter Einheit eingesetzten Produktionsfaktoren wie durch die Produktionsfunktion beschrieben und die Faktorpreise.

Häufig wird der Produktionsprozess als mehrstufige Entscheidung durch geschachtelte (nested) Produktionsfunktionen beschrieben. So wird z.B. zuerst über das Verhältnis von Vorleistungen und anderen (primären) Inputs entschieden („make or buy“). Auf einer zweiten Stufe wird z.B. auf der Vorleistungsseite über das Verhältnis von inländischen und ausländischen Vorleistungen und auf der Seite der primären Inputs über das Kapital- /Arbeitsverhältnis (die Kapitalintensität) entschieden. Dabei werden auf den unterschiedlichen Stufen verschiedene Substitutionselastizitäten³⁵ berücksichtigt.³⁶

Klimaschäden können die verfügbare Menge und die Qualität der Produktionsfaktoren beeinträchtigen. Maßnahmen zur Beseitigung von Klimaschäden ebenso wie Anpassungsmaßnahmen verlangen den Einsatz von Produktionsfaktoren, die dann für andere Zwecke nicht zur Verfügung stehen. Dabei spielt es eine wichtige Rolle, wie leicht Produktionsfaktoren untereinander substituiert werden können. Insbesondere für Vorleistungen stellt sich auch die Frage, ob inländische Lieferungen durch Bezüge aus dem Ausland ersetzt werden können. Der Klimawandel kann auch die Rate, mit der die Totale Faktorproduktivität zunimmt, verringern, weil etablierte Technologien nicht für zukünftig veränderte Klimabedingungen geeignet sind (Dietz und Stern 2015, zitiert in OECD 2015, S. 81). Klimaschäden, Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen verringern somit die (sonstigen) Produktionsmöglichkeiten. Es kann zu Kapazitätsengpässen und zu Preissteigerungen kommen, die Wettbewerbsfähigkeit der Volkswirtschaft oder einzelner Sektoren wird beeinträchtigt.³⁷ Schließlich können negative Auswirkungen bei gesamtwirtschaftlichen Zielgrößen wie Einkommen und Beschäftigung auftreten.

Auf der **Nachfrageseite** können Impulse z.B. durch höhere Tourismusausgaben infolge von Klimaänderungen oder durch zusätzliche Investitionen sowie private und öffentliche Konsumausgaben im Zuge von Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen zu einer Verdrängung anderer Nachfrage führen, entweder durch Kapazitätsengpässe oder über finanzielle (Preis-, Lohn- und Zins-) Mechanismen (reales und finanzielles Crowding Out). Möglicherweise werden auch die Haushalte ihre anderen Ausgaben oder ihre Ersparnis einschränken, wenn sie höhere Aufwendungen zur Beseitigung von Klimaschäden oder für die Anpassung an den Klimawandel haben. Ebenso ist vorstellbar, dass sie die Ersparnis erhöhen, wenn sie in Zukunft Mehrausgaben oder mit Abgabenerhöhungen zur Finanzierung staatlicher Maßnahmen rechnen.³⁸

³⁵ Die Substitutionselastizität gibt die prozentuale Änderung einer abhängigen Größe (z.B. der Kapitalintensität) im Verhältnis zur prozentualen Änderung einer Einflussgröße (z.B. des relativen Preises von Kapital und Arbeit) an.

³⁶ Siehe etwa Ecoplan 2007, S.80 für schneeabhängigen Wintertourismus.

³⁷ Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den internationalen Handel siehe Dellink et al. (2017). Zu den Auswirkungen internationalen Klimawandels auf die Schweizer Volkswirtschaft siehe INFRAS u.a. (2007).

³⁸ Mit ökonometrischen Methoden kann aus Daten abgeleitet werden, wie sich Wirtschaftsakteure in der Vergangenheit verhalten haben.

Nachfrageentscheidungen können – ähnlich wie Produktionsentscheidungen – durch geschachtelte Nutzenfunktionen beschrieben werden; dabei kann durch verschiedene Substitutionselastizitäten berücksichtigt werden, dass die Nachfrager auf den verschiedenen Stufen unterschiedlich gute Möglichkeiten haben, auf andere Produkte auszuweichen.³⁹

Zwischen Nachfrage und Angebotsseite bestehen Zusammenhänge. So führt ein geringerer Kapitalstock zu einer höheren Rentabilität (Grenzproduktivität) des Kapitals und so zu einem Anreiz für zusätzliche Ersparnis und Kapitalbildung. Die mit zusätzlichen Investitionen verbundene Ausweitung des Kapitalstocks führt zu einer Verjüngung (sinkendes Durchschnittsalter) des Kapitalstocks. Dies hat auf der Angebotsseite bei inkorporiertem technischen Fortschritt Produktivitätssteigerungen zur Folge.

Bei der Durchführung von Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen können auf der Nachfrageseite Verstärkungseffekte durch die Verausgabung neu entstandener Einkommen (Multiplikatoreffekte) oder den Aufbau zusätzlicher Produktionskapazitäten (Akzeleratoreffekte) auftreten, die zu höheren Einkommen und zusätzlicher Beschäftigung führen.

Bei einer Betrachtung auf der Ebene von Wirtschaftssektoren zeigt sich, dass Klimaschäden, die zunächst nur einzelne Wirtschaftssektoren betreffen, über die **Vorleistungsverflechtung** zwischen den Sektoren Auswirkungen auf Preise, Produktion und Beschäftigung in weiteren Sektoren, die von diesen Vorleistungen abhängen, haben können. Bei Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen kommt es zur Inanspruchnahme von Produktionskapazitäten in Zulieferbranchen, möglicherweise verbunden mit der Einschränkung der Produktionsmöglichkeiten für andere Güter.

Je nach Art der Finanzierung von Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen – etwa über eine Kreditaufnahme, Versicherungsleistungen oder staatliche Hilfen – können unterschiedliche Folgewirkungen auftreten. Im Fall einer öffentlichen Finanzierung zusätzlicher Ausgaben sind Annahmen darüber erforderlich, ob der Staat sein Budgetdefizit ausweitet oder ob er höhere Ausgaben durch eine Erhöhung von Steuern oder eine Senkung anderer Ausgaben finanziert.

3.1.2.2 Einkommens- versus Wohlfahrtswirkungen

Die ökonomischen Wirkungen von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen können durch Veränderungen des realen BIP oder durch die Auswirkungen auf die Wohlfahrt beschrieben werden. Veränderungen des realen BIP beschreiben die Zu- oder Abnahme der Produktion, bereinigt um Doppelzählungen von Vorleistungen, und die Veränderung der Realeinkommen, die durch Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen direkt (als Impulse) und indirekt (als Folgewirkungen) hervorgerufen werden. Die Beseitigung von Klimaschäden ebenso wie Anpassungsmaßnahmen führen – vorausgesetzt es können bisher ungenutzte Produktionsfaktoren und Produktivitätsreserven mobilisiert werden – zu höherer wirtschaftlicher Aktivität und damit zu einem höheren BIP im Vergleich zu einer Situation, in der ein Klimawandel eintritt, in der aber keine Beseitigungs- oder Anpassungsmaßnahmen vorgenommen werden. Sind die Produktionsfaktoren voll ausgelastet und bestehen keine Produktivitätsreserven, wird durch die Inanspruchnahme volkswirtschaftlicher Ressourcen für Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen ein anderer, wohlfahrtsteigernder Einsatz dieser Ressourcen verdrängt.⁴⁰ Im Vergleich zu einer Situation ohne Klimawandel verbessert sich die Wohlfahrt durch die Beseitigung von Klimaschäden aber nicht – abgesehen von Fällen, in denen

³⁹ Siehe etwa Ecoplan 2007, S.81 für schneeabhängigen Wintertourismus.

⁴⁰ Haas u.a. 2015 unterscheiden resource costs, i.e. medical treatment costs, opportunity costs, in terms of lost productivity, and (non-market) dis-utility, i.e. pain or suffering, concern or inconvenience to family and others.

Beseitigungs- oder Anpassungsmaßnahmen sekundäre Nutzen aufweisen wie es etwa bei Investitionen mit inkorporiertem Technischem Fortschritt der Fall sein kann. Die Beurteilung der Folgewirkungen kann fallweise negativ als Ressourcenverzehr oder positiv als zusätzliche Konsummöglichkeit infolge der Mobilisierung ungenutzter Produktionsfaktoren ausfallen.

Die Wohlfahrtswirkungen des Klimawandels lassen sich durch seine Wirkungen auf den privaten Verbrauch beschreiben^{41,42}; für Zeitvergleiche müssen auch hierbei Preissteigerungen ausgeschaltet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Erhaltung der Wohlfahrt wie in einer Situation ohne Klimawandel dient (forced consumption) (siehe Ciscar 2015, S.131), dazu gehören Konsumausgaben zur Minderung von Klimaschäden etwa für Medikamente. In Modellen mit expliziten Nutzenfunktionen können Wohlfahrtswirkungen durch die äquivalente (Einkommens-)Variation beschrieben werden. Das ist der (Mehr- oder Minder-) Einkommensbetrag, der dafür sorgen würde, dass das Nutzenniveau der Haushalte genauso hoch ist wie in der Referenzsituation.

Die BIP- und die Wohlfahrtswirkungen des Klimawandels können in beide Richtungen voneinander abweichen: beispielsweise erhöhen zusätzliche Ausgaben für Medikamente zur Linderung von hitzebedingten Krankheiten das BIP, senken aber die Wohlfahrt. Umgekehrt können etwa Lohnsteigerungen aufgrund von Engpässen bei Schlüsselqualifikationen, die infolge von Schadensbeseitigungsmaßnahmen auftreten, zu einer Beeinträchtigung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und zu einem Rückgang von Exporten und BIP führen, während die durch den Konsum gemessene Wohlfahrt steigt.

Klimaschäden fallen weit in der Zukunft an, während Anpassungsmaßnahmen bereits heute oder in der nahen Zukunft Kosten verursachen. Kosten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, sind aber nicht ohne weiteres vergleichbar, dem kann durch eine Abzinsung zukünftiger Nutzen und Kosten Rechnung getragen werden.⁴³ Aber auch unabhängig von einem Nutzen-Kosten-Vergleich erscheint es sinnvoll, zukünftige Schadens- und Vermeidungskosten in Relation zum dann herrschenden Wohlstand zu beurteilen.

Ein Maß für den herrschenden Wohlstand ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP), das die im Inland entstandenen Einkommen repräsentiert. Die Europäische Kommission präsentiert Szenarien des Wirtschaftswachstums in den Mitgliedsländern bis zum Jahr 2060 (EC 2012). Für Deutschland wird angenommen, dass das BIP zu konstanten Preisen von 2015 bis zum Jahr 2060 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 0,8% zunimmt. Es steigt dann in diesem Zeitraum von rund 2,7 auf 3,9 Billionen Euro zu Preisen von 2010 – also um gut 44% - an.⁴⁴ Steigen gleichzeitig die Preise um 2% pro Jahr, ergibt sich für das Jahr 2060 ein BIP zu laufenden Preisen von rund 7,3 Billionen Euro.

Eine Möglichkeit, Klimaschadenskosten in Relation zum Wohlstand anschaulich zu machen, besteht darin, sie als Anteil am BIP anzugeben. Dieser Anteil ist in der Gegenwart und Zukunft unabhängig von der Wachstums- und Preissteigerungsrate vergleichbar. Nimmt man

⁴¹ Intangible Wirkungen werden damit nicht erfasst.

⁴² Lehr et al. 2015 (S.4) nutzen 4 Indikatoren, um die ökonomischen Wirkungen des Klimawandels zu beschreiben:

- Das Bruttoinlandsprodukt als Messgröße für die wirtschaftliche Aktivität und das Wirtschaftswachstum,
- die Beschäftigung zur Kennzeichnung sozialer Aspekte der zukünftigen Entwicklung,
- den privaten Verbrauch als Wohlfahrtsmaß und
- die (sektorale) Bruttoproduktion, um sektorale Strukturwirkungen zu beschreiben.

⁴³ Siehe z.B. IPCC 1995 und Anthoff u.a. 2009.

⁴⁴ Da gleichzeitig ein Rückgang der Bevölkerung von rund 81 auf 66 Mio. Personen angenommen wird, ergibt sich eine jährliche Zunahme des realen BIP pro Kopf der Bevölkerung um 1,2%, zu Preisen von 2010 von 33,8 Tsd. Euro im Jahr 2015 auf 58,2 Tsd. Euro im Jahr 2060.

beispielsweise an, dass hitzebedingt 10 Mio. Arbeitsstunden ausfallen, entspricht das bei einem heutigen (2017) BIP von 54,40 Euro pro Arbeitsstunde (DIW 2018) Schadenskosten von rund 540 Mio. Euro und einem Anteil von rund 0,02 % des BIP. Bei einer realen Wachstumsrate des BIP pro Arbeitsstunde von 1 % pro Jahr entspricht der Ausfall von 10 Mio. Arbeitsstunden im Jahr 2050 realen Schadenskosten (Schadenskosten im Jahr 2050 zu Preisen von 2017) von 756 Mio. Euro; der Anteil der Schadenskosten am BIP bleibt unverändert.⁴⁵ Steigen außerdem die Preise (BIP-Deflator) um 1 % pro Jahr, ergeben sich 2050 nominale Schadenskosten von 1,05 Mrd. Euro; der Anteil der nominalen Schadenskosten am BIP zu laufenden Preisen bleibt wieder unverändert.^{46,47}

Eine andere Möglichkeit, die Dimension von Schadenskosten für heutige Akteure einschätzbar zu machen, besteht darin, Schadenskosten zu heutigen Zeitpunkt anzugeben, also anzunehmen, dass der für die Zukunft erwartete Klimawandel bereits heute eintritt (Hübler 2007, S.41). Bei diesem Verfahren müssen keine Annahmen über Wachstum und Inflation oder die Diskontierungsrate getroffen werden.

3.1.2.3 Grenzen ökonomischer Analysen

Die bisher vorliegenden und hier vorgelegten Bewertungen von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen aus gesamtwirtschaftlicher und sektoraler Perspektive sind mit Vorsicht unter Berücksichtigung der jeweiligen Einschränkungen, die sich aus den zu Grunde liegenden ökonomischen Rechen- und Analysesystemen ergeben, zu interpretieren. Dazu gehören insbesondere:

- ▶ In gängigen ökonomischen Rechen- und Analysesystemen wie Allgemeinen Gleichgewichts- oder ökonometrischen Modellen, die auf der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung beruhen, sind in der Regel lediglich die tangiblen Kosten des Klimawandels abgebildet. Intangible Kosten wie der Verlust an Lebensqualität durch Krankheit sind nicht repräsentiert.
- ▶ Gängige ökonomische Rechen- und Analysesysteme sind meist annähernd linear in der Größenordnung der Impulse. Sie sind deshalb wenig geeignet, die Folgewirkungen extremer Ereignisse abzubilden. Ebenso sind sie wenig geeignet, die Konsequenzen von Engpässen bei Schlüsselressourcen darzustellen. Zudem sind ökonomischen Modelle meist durch die Vorstellung geprägt, dass die Wirtschaft nach Störungen zum Gleichgewicht zurückkehrt.
- ▶ Häufig werden bei der volkswirtschaftlichen Bewertung von Klimaschäden in einem Land nur die Auswirkungen des Klimawandels im jeweiligen Land untersucht, während ausgeblendet bleibt, dass der Klimawandel gleichzeitig weltweit zu Schäden führt, die sich über internationale Wirtschaftsverflechtungen auch im betrachteten Land auswirken.⁴⁸ Eine Studie (INFRAS u.a. 2007) analysiert die Auswirkungen weltweiten Klimawandels auf die Warenexporte der Schweiz mit einem Welthandelsmodell. Bei den Exportszenarien wird ein Rückgang der Kaufkraft in den vom Klimawandel betroffenen Empfängerländern

⁴⁵ Vorausgesetzt, dass die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden unverändert bleibt, dass also das gesamte BIP mit derselben Rate wächst wie das BIP pro Beschäftigtem.

⁴⁶ Wieder unter der Annahme, dass das Arbeitsvolumen sich nicht verändert.

⁴⁷ Bei anderen Arten von Schadenskosten - z.B. Behandlungskosten, Energieverbrauch - können sich Preisentwicklungen für die Schadenskosten und für die Bezugsbasis, das BIP, unterscheiden; man sagt dann, dass sich die realen Preise verändern.

⁴⁸ So z.B. im COIN-Projekt. Siehe Steininger u.a. eds. 2015. Im Hinblick auf die Gestaltung von Anpassungsmaßnahmen erscheint diese Vorgehensweise gerechtfertigt.

angenommen,⁴⁹ dabei werden mögliche zukünftige regionale und sektorale Strukturänderungen der weltwirtschaftlichen Verflechtung berücksichtigt. Die ökonomischen Konsequenzen weltweiten Klimawandels auf die Schweizer Exporte allein werden etwa gleichbedeutend mit den gesamten wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels in der Schweiz eingeschätzt. Auf der Importseite werden die Landwirtschaft, die Mineralölverarbeitung und die Metallindustrie als Sektoren identifiziert, die besonders stark von direkten oder indirekten⁵⁰ Warenlieferungen aus Ländern abhängen, die vom Klimawandel besonders betroffen sind. Daneben werden die Auswirkungen weltweiten Klimawandels auf die Nachfrage nach internationalen Dienstleistungen des Schweizer Finanz- und Versicherungssektors sowie auf Kapitalströme – vom Klimawandel weniger betroffene Länder werden attraktiver und ihre Währungen könnten aufwerten – und auf Wanderungen diskutiert.

- Die Einschätzung der Kosten des Klimawandels hängt wesentlich davon ab, in welchem Umfang in den verwendeten Analysemodellen endogene Anpassungen – also im Analysemodell berücksichtigte Verhaltensänderungen aufgrund von Preisänderungen oder anderen Signalen – der Wirtschaftsakteure berücksichtigt sind.

3.1.3 Qualitative Bewertung gesamtwirtschaftlicher Impulse und Folgewirkungen

Im Folgenden werden für drei ausgewählte Klimawirkungsbereiche – Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, Gesundheitsschäden sowie Beeinträchtigungen von Böden – ökonomische Impulse, Interdependenzen und Wirkungen dargestellt. Die ökonomischen Impulse sind spezifisch für den jeweiligen Klimawirkungsbereich, sie unterscheiden sich auch für Schadenswirkungen und Anpassungsmaßnahmen. Für die Folgewirkungen aufgrund wirtschaftlicher Interdependenzen gilt das meist nicht; so kann eine Verdrängung anderer Investitionen durch zusätzlichen Kapitalbedarf unabhängig davon stattfinden, ob es sich um einen Kapitalbedarf im Zusammenhang mit der Beseitigung von Schäden an Gebäuden oder mit der Anpassung an höhere Temperaturen durch Dachbegrünungen handelt.

3.1.3.1 Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Veränderungen in der Umwelt erhöhen die Wahrscheinlichkeit von (Natur-) Ereignissen, die Schäden und Beeinträchtigungen an bestehenden Gebäuden und an der vorgehaltenen Infrastruktur in Deutschland hervorrufen können.

Der Gebäudebestand einer Volkswirtschaft umfasst Wohngebäude und Nichtwohngebäude. Wohngebäude werden zu Wohnzwecken genutzt und befinden sich entweder im Besitz von privaten Haushalten, die diese Gebäude selbst nutzen oder sie befinden sich in gewerblichem Besitz (Wohnungswirtschaft⁵¹) und werden vermietet. Nichtwohngebäude werden zum einen von privaten Unternehmen entweder für die Produktion von Gütern oder für die Erbringung von Dienstleistungen kommerziell genutzt. Zum anderen nutzt der Staat auf unterschiedlichen

⁴⁹ Unberücksichtigt bleibt in dieser Studie, dass die stärkere Betroffenheit vom Klimawandel in vielen Ländern zu Kostensteigerungen und damit zu einer Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Länder gegenüber der Schweiz führen kann, sodass Schweizer Produkte in den Empfängerländern und auf Drittmärkten begünstigt werden.

⁵⁰ Über Lieferungen in Länder, die ihrerseits in die Schweiz liefern.

⁵¹ Die Selbstnutzung von Wohneigentum wird in der amtlichen Statistik fiktiv der Wohnungswirtschaft zugerechnet.

Ebenen (Bund, Länder, Kommunen) Nichtwohngebäude, um seine öffentlichen Aufgaben zu erfüllen. Beispiele sind Schulen, Polizeidienststellen, Finanzämter oder Kasernen.

In ökonomischer Perspektive sind Gebäude Investitionsgüter⁵², die durch eine im Vergleich zu anderen Investitionsgütern wie Maschinen und Anlagen (Ausrüstungen) durch eine besonders lange wirtschaftliche Lebensdauer gekennzeichnet sind. Wie andere Investitionsgüter werden Gebäude in volkswirtschaftlicher Sichtweise über ihre gesamte Lebensdauer in einem Kapitalstock zusammengefasst, der den Wert der Gebäude in Geldeinheiten misst.⁵³

Als (technische) Infrastruktur werden in der Regel jene langlebigen materiellen Einrichtungen bezeichnet, die für das Funktionieren einer Volkswirtschaft von großer Bedeutung sind. Neben der Verkehrsinfrastruktur (Straßen, Schienen, Wasserstraßen, Flughäfen) umfassen andere Infrastrukturbereiche Einrichtungen zur Energieversorgung, zur Versorgung und Entsorgung (zum Beispiel Wasser und Abwasser) sowie Kommunikationsnetze und digitale Netze zur Verbreitung digitaler Inhalte.

Wesentliche Teile der Infrastruktur befinden sich in der Regel in öffentlichem Besitz. Überwiegend ist die Nutzung öffentlicher Infrastruktur für den Nutzer unentgeltlich. In ökonomischer Perspektive sind Infrastrukturgüter (ähnlich wie Gebäude) durch eine lange Lebensdauer gekennzeichnet. Ihr Bestand wird in der Regel ebenfalls in einem Kapitalstock in ökonomischen Größen gemessen.

Obwohl auch andere Infrastrukturbereiche durch den Klimawandel beeinflusst werden,⁵⁴ wird hier auf Auswirkungen des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastruktur abgestellt.

In der Vulnerabilitätsstudie (Buth 2015a, S. 374 ff.) werden als eine wesentliche Einflussgröße des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastruktur (Straßen, Schienen, Wasserstraßen, Flughäfen) klimawandelbedingte Temperaturänderungen identifiziert. Neben steigenden Durchschnittstemperaturen spielen vor allem auch zunehmende Temperaturextreme (Hitze, Frost⁵⁵) eine wichtige Rolle. Auch die mit Starkregen verbundenen Risiken wie Flusshochwasser und Sturzfluten stellen bedeutende Gefährdungen der Verkehrsinfrastruktur dar. Ein anderer Aspekt ist, dass der zu erwartende Anstieg des Meeresspiegels in Küstennähe Schäden an der Verkehrsinfrastruktur verursachen und besondere Anpassungsmaßnahmen zum Beispiel beim Deichbau und bei Hafenanlagen erfordern kann.

Bednar et. al. 2015, S. 282 ff nennen als Einflussgrößen für die Wirkungen des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastruktur Temperaturanstieg und die Zunahme von Hitzewellen, eine zunehmende Anzahl von sich abwechselnden Trockenperioden mit Perioden von starken Niederschlägen, häufigere und intensivere Starkwindereignisse mit Straßenblockaden durch umgestürzte Bäume sowie Einflüsse des Anstiegs des Meeresspiegels auf die Verkehrsinfrastruktur in Küstenregionen. Im Kontext der Studie für Österreich (Steininger et al.

⁵² Im Gegensatz zu Verbrauchs- oder Konsumgütern sind Investitionsgüter dadurch gekennzeichnet, dass über ihre mehrjährige Nutzungsdauer ihren Nutzen abgeben; steuerlich wird dieser Eigenschaft mit dem Konzept einer mehrjährigen Abschreibung Rechnung getragen.

⁵³ Bei der Bewertung eines Kapitalstocks sind unterschiedliche Bewertungskonzepte möglich; wichtige Konzepte sind Bewertung zu konstanten Preisen (Preise eines bestimmten Jahres) und zu Wiederbeschaffungspreisen. Werden die Abgänge von Gebäuden berücksichtigt, spricht man von einem Netto-Kapitalstock.

⁵⁴ So werden zum Beispiel in der Vulnerabilitätsstudie (Buth 2015a) im Handlungsfeld Energiewirtschaft auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energieversorgung, zum Beispiel Betrieb konventioneller Kraftwerke oder Leitungsnetz der Elektrizitätsversorgung thematisiert.

⁵⁵ Neben, Hitze und Frost beeinflussen zusätzlich zu den verursachten Schäden an der Verkehrsinfrastruktur zum Beispiel auch die Unfallgefahr für Teilnehmer am Verkehr (Buth 2015a, S. 374). Dieser Aspekt wird hier nicht weiter beleuchtet.

2015) wird im Hinblick auf Gebäude nicht auf mögliche Schäden, sondern auf den veränderten Energiebedarf für Heizen und Kühlen abgestellt (Kranzl et.al. 2015).⁵⁶

3.1.3.1.1 Schäden, Beseitigungsmaßnahmen

Klimabedingte Veränderungen beeinflussen den Gebäudebestand und die Verkehrsinfrastruktur über vielfältige Wirkungskanäle. Während die ansteigenden Durchschnittstemperaturen eher langfristige Anpassungsmaßnahmen im Gebäudebestand und bei der Infrastruktur erfordern (vgl. Abschnitt 3.1.3.1.2), verursachen zunehmende Temperaturextreme und extreme Wetterereignisse in stärkerem Umfang Schäden an bestehenden Gebäuden und der existierenden Verkehrsinfrastruktur.

Eine Ursache von klimabedingten Schäden an Gebäuden können Starkregenereignisse und Sturzfluten sein. Sie können Schäden an Gebäuden in exponierter Lage verursachen. Die Ermittlung von potentiellen Schäden muss deshalb in der Regel in einem regionalen Kontext unter Beachtung der Gefährdung von Hochwasser und Sturzfluten erfolgen.

Hochwasser und Sturzfluten stellen auch eine Gefährdung der baulichen Anlagen der Verkehrsinfrastruktur da. Dies betrifft sowohl Straßen und Schienenwege einschließlich der zugehörigen ingenieurtechnischen Bauwerke (zum Beispiel Brücken und Tunnel). Starkregenereignisse und erhöhte Niederschläge können zu Überschwemmungen führen, die Schäden durch Überflutungen und Unterspülungen von Verkehrsinfrastruktur auslösen können. Auch in diesem Bereich sind wieder die Gefährdung und potentielle Schäden in einem regionalen Kontext zu ermitteln, so dass Aussagen für die nationale Ebene bisher nicht vorliegen.

In Küstennähe steigt klimabedingt die Gefährdung durch Sturmfluten, insbesondere in besonders gefährdeten Gebieten (vgl. Gefahrenkarten der Bundesländer gemäß der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie HWRM-RL, 2007/60/EC). Erhöhte Schäden können an der Schieneninfrastruktur, an Wohngebäuden und an der gewerblichen Infrastruktur auftreten.⁵⁷ Auch hier liegen in der Regel regional begrenzte Schadensabschätzungen vor. Zukünftige Schäden können entweder unter der Annahme der Durchführung schadensreduzierender Anpassungsmaßnahmen oder unter der Annahme der Nichtdurchführung dieser Maßnahmen geschätzt werden.

Falls man Akteure mit vorwärtsschauenden Erwartungen unterstellt, erkennen diese den zukünftigen möglicherweise negativen Einfluss des Klimawandels auf die wirtschaftliche Entwicklung. Denkbare Folgen könnten sein, dass die Akteure mehr sparen, um zukünftige Rückgänge des Outputs zu kompensieren, oder dass sie weniger sparen, da die erwartete Kapitalrendite geringer ausfällt. Welche der sich widersprechenden Reaktionsmöglichkeiten bedeutender ist, ist empirisch nicht belegt.⁵⁸

Durch den Klimawandel verursachte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur wirken unmittelbar auf den Kapitalstock der Volkswirtschaft, der den ökonomischen Wert des Bestandes an Investitionsgütern repräsentiert. Klimabedingte Schäden stellen zunächst eine Vernichtung bestehenden Sachvermögens dar und verringern somit den Wert des Kapitalstocks. Da die durch den Klimawandel vernichteten Teile des Kapitalstocks noch nicht vollkommen abgeschrieben sind, verlieren die Eigentümer einen Teil ihrer erwarteten Rendite ihrer

⁵⁶ Kranzl et.al. 2015 betonen, dass es klimabedingt hier kompensierende Effekte zwischen einem Mehrbedarf für Kühlen und einem Minderbedarf für Heizen gibt.

⁵⁷ Die Universität Potsdam Transfer GmbH (UP Transfer) erarbeitet im Rahmen dieses Projektes Bewertungen von Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen/Sturzfluten und Meeresspiegelanstieg/Sturmfluten.

⁵⁸ In modellbasierten Szenarien könnte diese Unsicherheit durch Sensitivitätsrechnungen eingegrenzt werden.

ursprünglichen Investition (INFRAS 2007, S.80).⁵⁹ Falls die Investoren auch in Zukunft Klimaschäden oder gar zunehmende Klimaschäden erwarten, könnten sie in Zukunft Risikozuschläge in ihr Investitionskalkül aufnehmen, was in der Tendenz zu höherem erwarteten Renditen führen kann.⁶⁰

Nach Eintritt eines klimabedingten Schadens bestehen prinzipiell zwei Optionen:

1. Die Verringerung des Kapitalstocks wird hingenommen und die Schäden nicht ausgeglichen.
2. Die Verringerung des Kapitalstocks wird durch (Ersatz-)Investitionen ausgeglichen.

Die beiden Optionen werden im Folgenden etwas ausführlicher beschrieben.

Die Verringerung des Kapitalstocks bleibt bestehen, die entstandenen Schäden werden nicht behoben (Option 1). Falls das vernichtete Kapital nicht überflüssigwar, sind mit dem verringerten Kapitalstock geringere Produktionsmöglichkeiten (Verringerung des Produktionspotentials) verbunden, so dass ein dämpfender Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung zu erwarten ist. Es kommt also zu einer Reduzierung des BIP-Wachstums im Vergleich zu einer Situation ohne Schädigung des Kapitalstocks. Denkbar ist, dass dieser dämpfende Einfluss mittel- und langfristigh durch den verstärkten Einsatz⁶¹ anderer Produktionsfaktoren (z. B. Substitution von Kapital durch Arbeit) verringert werden kann. Allerdings sind bei den hier betrachteten Schäden an Gebäuden und Einrichtungen der Verkehrsinfrastruktur die Substitutionsmöglichkeiten wahrscheinlich gering.

In der Option 2 wird die klimabedingte Verringerung des Kapitalstocks ausgeglichen, indem die entstandenen klimabedingten Schäden durch (Instandsetzungs-/Wiederherstellungs-) Investitionen ausgeglichen werden. Durch die Beseitigung der Schäden am Kapitalstock werden eine Reihe von Wirkungen ausgelöst.

Die Investitionsgüter zur Wiederherstellung des Kapitalstocks müssen produziert werden. Es wird also zum Beispiel ein durch Hochwasserbeschädigtes Gebäudes instandgesetzt oder im Falle eines Totalverlustes neu gebaut oder es werden Instandsetzungsarbeiten an einer unterspülten Straße durchgeführt. Mit diesen Arbeiten sind unmittelbar positive Wachstumsimpulse verbunden, so dass ceteris paribus⁶² (zumindest kurzfristig) mit einem höheren BIP-Wachstum zu rechnen ist.

Zu beachten ist allerdings, dass die Schäden am Kapitalstock bis zu ihrer Wiederherstellung Produktionsausfälle verursachen können, weil zum Beispiel notwendige Verkehrsleistungen nicht erbracht oder geplante Produktion durch Schäden an Industriegebäuden ausfällt. Für die Beurteilung der längerfristigen Wachstumswirkungen ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung, ob die Produktionsausfälle zu einem späteren Zeitpunkt wieder nachgeholt werden können. Falls dies der Fall ist, könnte es unter Umständen nur zu einer zeitlichen Verschiebung der wirtschaftlichen Aktivitäten kommen, ohne dass ein volkswirtschaftlicher Verlust an Produktion eintritt.

⁵⁹ Dies könnte dazu führen, dass Investoren in Zukunft angesichts der zunehmenden Risiken von Klimaschäden eine höhere Rendite für ihre Investitionen erwarten, es also zu einem klimabedingten Risikozuschlag auf die erwartete Verzinsung von bestimmten, durch Klimaschäden gefährdete Investitionen kommt.

⁶⁰ In die gleiche Richtung würden Versicherungslösungen (gegen zunehmende Klimaschäden) führen; die Versicherungsprämien würden zu höheren Kosten und damit in der Tendenz höheren Renditeerwartungen führen.

⁶¹ Im Hinblick auf den Produktionsfaktor Arbeit setzt dies voraus, dass dort ungenutzte Potentiale bestehen, es also für diese Anforderungen geeignete arbeitslose Arbeitskräfte gibt.

⁶² Dies gilt für den Fall nicht vollausgelasteter Produktionskapazitäten, bei Vollausslastung würde es hingegen zu Verdrängungseffekten kommen.

Eine solche Entwicklung ist jedoch an weitere Voraussetzungen geknüpft, deren Erfüllung eher unwahrscheinlich ist. Zum einen wird vorausgesetzt, dass die Nachfrage nach Gütern, deren Produktion durch klimabedingte Schäden zeitlich verschoben werden muss, davon unabhängig weiterbesteht und nicht nur zeitlich befristet wirksam ist. Dies dürfte für bestimmte Waren und besonders für bestimmte Dienstleistungen jedoch nicht der Fall sein. Zum anderen wird vorausgesetzt, dass die Nachfrage nicht zwischenzeitlich durch Importe befriedigt wurde, was für international handelbare (Standard-) Güter im Konsumbereich durchaus wahrscheinlich sein dürfte. In der Summe dürfte zwar ein Teil der durch klimabedingte Schäden verursachte Produktionsausfall durch nachgeholte Produktion ausgeglichen werden, ein vollständiger Ausgleich ist jedoch nicht zu erwarten, so dass in der Regel Schäden an der Infrastruktur und an gewerblich genutzten Gebäuden⁶³ auch zu dauerhaften Produktionsausfällen führen dürften und sich über diese Wirkungskette dämpfend auf die wirtschaftliche Entwicklung auswirken dürften.

Werden Schäden am Kapitalstock durch Investitionen ersetzt, ändert sich die Altersstruktur des Kapitalstocks, weil jüngere Investitionsjahrgänge ältere (beschädigte) Kapitalgüter ersetzen. Der erhöhte Modernitätsgrad des Kapitalstocks könnte sich positiv auf die Kapitalproduktivität auswirken.

Fankhauser, Tol 2004 erwarten im Rahmen theoretischer Überlegungen negative Effekte von Klimaschäden auf das Wachstum und den Kapitalstock, weil in ihren Überlegungen die Sparquote sinkt. Auch die OECD (OECD 2015) erwartet, dass über den Einkommenseffekt und die sinkende Ersparnis Klimaschäden negative Effekte auf die Kapitalbildung und damit auf das Wirtschaftswachstum haben. Simulationsstudien bestätigen den negativen Einfluss von Klimaschäden auf die Kapitalbildung und den Kapitalstock (OECD 2015, S.81-84), allerdings wird darauf hingewiesen, dass die Zerstörung von veraltetem Kapital auch die Chance bietet, die technologischen Innovationen zu beschleunigen und so möglicherweise die Produktivität zu steigern (OECD 2015, S.839).

Werden Schäden am Kapitalstock durch Investitionen ersetzt, ändert sich die Altersstruktur des Kapitalstocks, weil jüngere Investitionsjahrgänge ältere (beschädigte) Kapitalgüter ersetzen. Der erhöhte Modernitätsgrad des Kapitalstocks könnte sich positiv auf die Kapitalproduktivität auswirken.

Fankhauser, Tol 2004 erwarten im Rahmen theoretischer Überlegungen negative Effekte von Klimaschäden auf das Wachstum und den Kapitalstock, weil in ihren Überlegungen die Sparquote sinkt. Auch die OECD (OECD 2015) erwartet, dass über den Einkommenseffekt und die sinkende Ersparnis Klimaschäden negative Effekte auf die Kapitalbildung und damit auf das Wirtschaftswachstum haben. Simulationsstudien bestätigen den negativen Einfluss von Klimaschäden auf die Kapitalbildung und den Kapitalstock (OECD 2015, S.81-84), allerdings wird auf darauf hingewiesen, dass die Zerstörung von veraltetem Kapital auch die Chance bietet, die technologischen Innovationen zu beschleunigen und so möglicherweise die Produktivität zu steigern (OECD 2015, S.839).

3.1.3.1.2 Anpassungsmaßnahmen

Die Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel haben einen langfristigen Horizont und haben das Ziel zukünftige Klimaschäden zu verringern. Bezogen auf Anpassungsmaßnahmen zum Schutz von Gebäuden und technischen Infrastrukturen sind auch planerische Maßnahmen von

⁶³ Bestehen die Schäden an Wohngebäuden, stellt sich die Frage in wie weit die Funktion Wohnen dadurch eingeschränkt ist. Eine Möglichkeit ist, dass die Nutzer Einschränkungen hinnehmen und ihre Wohnung/ihr Haus weiter, aber eingeschränkt nutzen. Dies entspräche einem Nutzen- und Konsumverzicht, der keine unmittelbaren weiteren Wirkungen in der Volkswirtschaft entfalten würde. Ist eine weitere Nutzung zu Wohnzwecken nicht möglich, würde sich zusätzliche Nachfrage nach Wohnraum ergeben, der (vorübergehend) mit zusätzlichen Ausgaben verbunden ist.

Bedeutung. Insoweit es um den Schutz vor Überschwemmungen und Sturzfluten geht, können langfristig auch Veränderungen der Siedlungsstruktur an Bedeutung gewinnen, zum Beispiel in dem bei Neubauten oder Ersatzbauten sowohl von Gebäuden wie auch von Infrastrukturen Gebiete mit besonderem Risikopotential eher gemieden werden. Dies könnte auch für Regionen gelten, die vom Anstieg des Meeresspiegels in besonderem Umfang bedroht sind. Solche planerischen Maßnahmen dürften zwar zu regionalen Verschiebungen von wirtschaftlichen Aktivitäten führen, jedoch nur in geringerem Umfang mit zusätzlichen wirtschaftlichen Impulsen verbunden sein.

Vorsorgende Anpassungsmaßnahmen an Gebäuden⁶⁴ werden vor allem im Rahmen des Hochwasserschutzes durchgeführt. Es werden zahlreiche Maßnahmen diskutiert, die dafür sorgen sollen, dass Schäden an Gebäuden im Hochwasserfall geringer ausfallen. In Betracht kommen Maßnahmen zur Rückstausicherung und zur Gebäudeabdichtung. Es können auch stationäre oder mobile Wassersperren vorgehalten werden, damit diese im Krisenfall schneller zur Verfügung stehen. Eine wichtige Rolle können die besondere Sicherung von Heizungsanlage und Öltanks sowie eine Verlagerung der Heizungsanlage in obere Stockwerke spielen. Denkbar sind auch Anpassungen an der Inneneinrichtung, um im Hochwasserfall die Schäden kleiner zu halten. Belastbare Schätzungen über die Kosten solcher Maßnahmen auf nationaler Ebene liegen derzeit nicht vor.

Die energetische Gebäudesanierung wird üblicherweise als eine Vermeidungsmaßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz im Wärmebereich gesehen. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Maßnahmen ist beachtlich (Gornig u.a. 2016), insbesondere wenn die vorgegebenen Energieeffizienzziele zu einer deutlichen Steigerung der Aktivitäten zur energetischen Gebäudesanierung in der Zukunft führen (Blazejczak, Edler, Schill 2014). Durch die energetische Sanierung insbesondere der Außenhülle einschließlich Fenster und Türen werden Gebäude besser gegen Temperaturschwankungen und auch gegen Temperaturextreme geschützt. Insofern könnte man unter Umständen auch einen (kleinen) Teil der Maßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung den Anpassungsmaßnahmen gegen den Klimawandel zuordnen.

Bauliche Maßnahmen an der Verkehrsinfrastruktur zum Schutz vor Klimaschäden zielen zum überwiegenden Teil darauf ab, die Straßen und Schienen (einschließlich der ingenieurtechnischen Bauten) vor Überschwemmungen und Sturzfluten zu schützen. Bednar-Friedl et al. 2015 diskutieren auch Beeinträchtigungen, die sich aus der Zunahme von Sturmereignissen für die Verkehrsinfrastruktur ergeben können, insbesondere umgestürzte Bäume können zu Beeinträchtigungen führen. Als vorsorgende Anpassungsmaßnahme kommen hier eventuell der Schutz vor umstürzenden Bäumen oder entsprechende Schnitt- oder Rodungsmaßnahmen in Betracht. Eine wichtige Anpassungsmaßnahme zum Schutz der Küstenregionen vor der Zunahme des Meeresspiegels und vor verstärkt auftretenden Hochwasserfluten ist ein vorsorgender Deichbau.⁶⁵

Die ökonomischen Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen im Gebäudebereich und in der Infrastruktur weisen in ihren Wirkungen auf den Kapitalstock Ähnlichkeiten mit den bereits diskutierten Effekten auf, die denkbar sind, wenn Maßnahmen zur Beseitigung von klimabedingten Schäden ergriffen werden. Es kommt zu Änderungen in der Struktur und im Modernitätsgrad des Kapitalstocks, die wiederum Rückwirkungen auf die Produktion und die Wachstumsrate der Volkswirtschaft haben. Zu problematisieren ist die Frage, inwieweit

⁶⁴ Die UP Transfer erarbeitet im Rahmen dieses Projektes Anpassungsoptionen zur Bauvorsorge an Gebäuden gewerblicher Infrastruktur.

⁶⁵ Die UP Transfer erarbeitet im Rahmen dieses Projektes Anpassungsoptionen durch Deichausbau.

Investitionen zur Anpassung im Klimawandel für die Bereiche Gebäude und Infrastruktur in gleichem Umfang wie andere Investitionen auf die Produktivität wirken oder ob es zu einer Verlangsamung des Produktivitätsfortschritts kommt.

Kurzfristig haben Anpassungsinvestitionen positive Produktionswirkungen, wenn sie zusätzlich zu den sowieso geplanten Investitionen stattfinden. Je nach der Verfügbarkeit von Finanzierungsmöglichkeiten (Sparquote der Volkswirtschaft, geldpolitisches Regime) sowohl des Staates (bei öffentlichen Investitionen zur Anpassung) als auch der Privaten kann es zu Verdrängungseffekten von anderen Investitionsvorhaben kommen. Ohne weitere Annahmen zu diesen Rahmendbedingungen kann über das Ausmaß einer möglichen Verdrängung anderer Investitionen keine quantitative Aussage getroffen werden.

Falls ein überwiegender Anteil der Anpassungsmaßnahmen durch den Staat erbracht wird, so wie dies vor allem bei Anpassungsmaßnahmen für die Infrastruktur zu erwarten ist, könnte es zu Verdrängungseffekten (crowding out) zwischen öffentlichen und privaten Investitionen kommen. Soweit bei erhöhten öffentlichen Investitionen für Anpassungsmaßnahmen der Staat nicht auf andere öffentliche Investitionen verzichtet, kommt es zu einem höheren Finanzierungsbedarf des Staates. Setzt der Staat zur Finanzierung auf ein höheres Steueraufkommen, kann dies zu einer geringeren Sparquote der Privaten führen, was sich wiederum negativ auf die Wachstumsaussichten der Volkswirtschaft auswirken kann, falls die privaten Investitionen davon beeinflusst werden (INFRAS u.a. 2007, S.80).⁶⁶ Alternativ könnte der Staat sich zur Finanzierung der zusätzlichen öffentlichen Investitionen stärker verschulden. Die daraus folgenden ökonomischen Wirkungen hängen vom geldpolitischen Regime und auch von den Erwartungsbildungsprozessen der Akteure ab. Falls der Klimawandel das BIP reduziert, kommt es selbst bei einer konstanten Spar- und Investitionsquote zu sinkenden Investitionen, was sich über einen reduzierten Kapitalstock negativ auf die Wachstumsrate des BIP auswirkt (Fankhauser, Tol 2004).

3.1.3.1.3 Zusammenfassung

Ökonomische Impulse durch Klimaschäden an Gebäuden und Infrastrukturen sind oft lokal begrenzt und entfalten nur indirekt gesamträumliche Wirkungen. Jedoch können sie die Erwartungen und damit die Entscheidungen von Investoren bereits vor dem Schadenseintritt beeinflussen; insbesondere können geringere Renditeerwartungen die Spar- und Investitionsneigung dämpfen. Beim Eintritt von Schäden kann es zu Produktionsausfällen kommen, dabei kommt es darauf an, wie leicht die beeinträchtigten Kapitalgüter durch andere Produktionsfaktoren substituiert werden können. Zum Ausgleich der Produktionsausfälle kommen höhere Importe oder – in manchen Fällen - nachgeholte Produktion in Frage. Eine Wiederherstellung zerstörter Gebäude oder Infrastrukturen kann, wenn die nötigen volkswirtschaftlichen Ressourcen mobilisiert werden können, Produktion und Einkommen erhöhen, gegenüber einer Situation ohne Klimawandel kommt es aber nicht ohne weiteres zu höherer Wohlfahrt. Dauerhafte Wachstumsimpulse sind denkbar, wenn der Kapitalstock im Zuge der Wiederherstellung verjüngt und modernisiert wird und sich die Kapitalproduktivität und die Totale Faktorproduktivität erhöhen.

Auch die Impulse durch Anpassungsmaßnahmen sind oft lokal fokussiert, und die gesamträumlichen Wirkungen bleiben begrenzt; das gilt insbesondere für planerische Anpassungsmaßnahmen. Im Zuge von Anpassungsmaßnahmen kann es wie bei Wiederherstellungsmaßnahmen zu einer Modernisierung des Kapitalstocks verbunden mit Innovations- und Wachstumseffekten kommen. In Abhängigkeit von der konjunkturellen

⁶⁶ Bei einer solchen Argumentation wird implizit angenommen, dass private Investitionen stärkere Wachstumseffekte entfalten als öffentliche Investitionen.

Situation muss mit der Möglichkeit eines (realen oder finanziellen) Crowding Out gerechnet werden. Soweit Anpassungsmaßnahmen von der öffentlichen Hand finanziert werden, kommt es für die Wirkungen auch darauf an, ob der Staat zusätzliche Budgetdefizite in Kauf nimmt oder andere Ausgaben kürzt oder sich zusätzliche Einnahmen verschafft.

3.1.3.2 Gesundheitsschäden durch Hitzebelastung

Veränderte Klimasignale führen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ zu einer Vielzahl von Klimawirkungen. Haas u. a. (2015, S.192) unterscheiden Gesundheitsschäden durch veränderte Temperaturen und durch Extremwetterereignisse als direkte Klimawirkungen sowie Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung, durch Wasser- und Lebensmittelverunreinigungen, durch vektor- und nagetierübertragene Krankheiten und im Zusammenhang mit Flucht und Wanderungen als indirekte Klimawirkungen. Dabei werden Mortalitäts- und Morbiditätsrisiken berücksichtigt.

In der Vulnerabilitätsstudie (Buth 2015a, S.605) werden vier Gesundheitswirkungen des Klimawandels näher untersucht: Hitzebelastung, Atembeschwerden durch bodennahes Ozon, vektorübertragene Krankheiten und schließlich als Folge aller Klimawirkungen auf die Gesundheit die Belastung von Rettungsdiensten, Krankenhäusern und Ärzten; hierbei spielen auch Verletzungen und Erkrankungen infolge von Extremwetterereignissen eine Rolle. Als hoch bedeutend wird für die Gegenwart die Hitzebelastung eingeschätzt. Sie ist bei starkem Klimawandel - wie auch die Belastung durch bodennahes Ozon⁶⁷ - ebenfalls in der nahen Zukunft von hoher Bedeutung. Hübler und Klepper (2007, S.48 ff.) diskutieren auch kältebezogene Gesundheitsfolgen.

Die folgende Darstellung fokussiert auf Gesundheitsschäden durch Hitzebelastung. Sie gelten als die in West- und Südeuropa größte Bedrohung für die menschliche Gesundheit durch den Klimawandel (Haas u. a. 2015, S.194). Auch sind von den anderen genannten Klimawirkungen wohl keine grundsätzlich anderen ökonomischen Impulse zu erwarten. Neben unmittelbaren Gesundheitsschäden werden in diesem Abschnitt auch Beeinträchtigungen der Arbeitsproduktivität durch Hitze berücksichtigt.⁶⁸ Neben dem Ausfall von Arbeitstagen (Absentismus) sind auch Produktivitätsverluste bei Arbeitskräften zu berücksichtigen, die zur Arbeit erscheinen, aber in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt sind (Präsentismus; siehe Urban und Steininger 2015, S.306).

3.1.3.2.1 Schäden, Beseitigungsmaßnahmen

Die Zunahme von Hitzetagen führt zu zusätzlichen Sterbefällen, insbesondere in städtischen Gebieten (Buth 2015a, S.606 ff.). Damit ist als ökonomischer Impuls eine Verringerung des Arbeitskräfteangebots verbunden. Dieser Impuls ist allerdings schwach, weil von der erhöhten Sterblichkeit vor allem ältere Personen betroffen sind, die in geringerem Umfang oder gar nicht mehr am Erwerbsleben teilnehmen. Weitere ökonomische Impulse ergeben sich aus erhöhten Krankheitsrisiken. Sie führen zu zusätzlichen Behandlungskosten, Produktivitätsverlusten und zu Beeinträchtigungen der Lebensqualität.

Bei der Monetarisierung der erhöhten Anzahl von Hitzetoten machen die intangiblen Kosten aufgrund des Verlusts an Lebensqualität den größten Anteil aus (s. z.B. UBA 2012 S.115 ff.), der zwar ökonomisch von Bedeutung ist, sich in konventionellen Rechensystemen wie der

⁶⁷ Gesamträumlich gesehen könnte bei schwachem Klimawandel die Zunahme von Hitzetagen durch den Rückgang von Ozon-Vorläuferstoffen ausgeglichen werden (Buth 2015a, S. 610).

⁶⁸ Sie sind im Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (UBA 2015) dem Handlungsfeld Industrie und Gewerbe zugeordnet. In der Vulnerabilitätsstudie (UBA 2015a) wird die Beeinträchtigung der Arbeitsproduktivität nicht als direkte Klimawirkung erfasst.

Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und darauf beruhenden Modellen aber nicht niederschlägt.

In UBA 2012 (S.98) werden hitzebedingte Mortalitätskosten in Form des entgangenen Bruttoinlandsprodukts erfasst.⁶⁹ Dazu werden verlorene Lebensmonate mit dem durchschnittlichen BIP pro Kopf multipliziert. Unberücksichtigt bleibt bei diesem Verfahren, dass die Produktivität der am stärksten betroffenen älteren Personen unterdurchschnittlich ist, so dass die BIP-Verluste tendenziell überschätzt werden.

Die Ecoplan-Studie (2007, S.136 ff.) für die Schweiz berücksichtigt den hitzebedingten Anstieg der Mortalität, lässt aber Arzt- und Krankenhauskosten unberücksichtigt.⁷⁰ Bei der Ermittlung der Schadenskosten werden Anpassungsmaßnahmen in Form einer Klimatisierung vorausgesetzt. Zur Monetarisierung der Schäden wird auf verlorene Lebensjahre von über 60-jährigen abgestellt, mit einem Wert, der die gesamten individuell getragenen Kosten verlorener Lebensjahre repräsentiert und der mit dem BIP zunimmt. Für hitzebedingte Todesfälle sind erst nach 2050 überhaupt spürbare Schadenskosten zu erwarten, selbst im Jahr 2100 im Mittel von weniger als einem halben Prozent des BIP, mit einer erheblichen Streuung.⁷¹

Sauer und Neubert (2017) präsentieren Modellierungskonzepte für eine höhere Mortalität durch Hitze- sowie durch Ozonbelastung. Dabei werden Klimawandelszenarien mit und ohne Anpassungsmaßnahmen einer Situation ohne Klimawandel gegenübergestellt. Für die Abschätzung der volkswirtschaftlichen Impulse durch Todesfälle können Schadenskostenansätze aus der Verkehrsunfallforschung (z. B. Baum u. a. 2010; zitiert bei Sauer, Neubert 2017) und der Gesundheitsökonomie (z. B. Zweifel u. a. 2013; zitiert bei Sauer, Neubert 2017) ergänzend zu früher angewandten Methoden (z. B. in Hübler und Klepper 2007 und in UBA 2012) zum Einsatz kommen. Die kurzfristigen und reversiblen gesundheitlichen Effekte der Hitzebelastung können monetär durch die Abschätzung von Behandlungskosten sowie die Ermittlung von Produktionsausfällen infolge von Arbeitsunfähigkeit erfasst werden (Sauer, Neubert 2017, S.13).

Hübler und Klepper (2007, S. 29 ff.) unterscheiden bei der Abschätzung zusätzlicher Sterbefälle durch Hitze nach den Wirkungen durch die Zunahme von Hitzetagen (bei unveränderter Demographie) einerseits und den Wirkungen durch die erwartete zukünftige Alterung der Bevölkerung andererseits.⁷² Insgesamt schätzen sie für das Ende des Jahrhunderts eine Zahl von 12.000 zusätzlichen Todesfällen, von denen etwa 5.000 der Zunahme von Hitzetagen zugerechnet werden können. Die hitzebedingten Krankheitskosten (ohne ambulante Behandlung und Medikamente sowie ohne Beeinträchtigungen des Wohlbefindens) gegen Ende des Jahrhunderts schätzen Hübler und Klepper (2007, S.42) – unter großen Unsicherheiten - auf 0,88% der gesamten Krankenhauskosten, das entspricht 0,27% der deutschen Gesundheitsausgaben. Davon entfällt etwas mehr als die Hälfte auf die Zunahme von Hitzetagen (unter der Annahme unveränderter Demographie), der Rest auf die Alterung der Bevölkerung.

Die in der Vulnerabilitätsstudie operationalisierten unmittelbaren Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ betreffen in erster Linie das System Gesundheit selbst, daneben das System Infrastrukturen. Auf die Systeme Umwelt und Wirtschaft werden keine unmittelbaren Auswirkungen identifiziert (Buth 2015a, S.643). Das Handlungsfeld Gesundheit gehört aber zu denen, die mit anderen Handlungsfeldern am stärksten vernetzt sind (Ebenda,

⁶⁹ Dazu werden Ergebnisse von Ecoplan 2007 für die Schweiz auf Deutschland übertragen.

⁷⁰ Es wird nicht ausgeschlossen, dass diese Kosten hitzebedingt aufgrund vorzeitiger Sterbefälle niedriger ausfallen.

⁷¹ Die Ecoplan-Studie ermittelt die Streuung der Schadenskosten mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen.

⁷² Dabei berücksichtigen sie die damals aktuelle Bevölkerungsvorausschätzung des Statistischen Bundesamtes bis 2050.

S.648). Vor allem ist dies dadurch zu begründen, dass Klimawirkungen in anderen Handlungsfeldern auch Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. In vielen Fällen ziehen Gesundheitsbeeinträchtigungen auch mittelbare Konsequenzen in anderen Handlungsfeldern wie etwa Industrie und Gewerbe sowie der Finanzwirtschaft nach sich.

Die Abschätzung der Produktivitätswirkungen von Hitzetagen unterliegt erheblichen Unsicherheiten (UBA 2015). Bei einer umfassenden Klimatisierung wären von Leistungseinbußen lediglich „Outdoor-Arbeitsplätze“ betroffen, die geschätzte 10 bis 15% der Wertschöpfung der Volkswirtschaft erbringen und hauptsächlich in den Sektoren Land- und Forstwirtschaft und Baugewerbe sowie in Teilbereichen der Industrie- und der Dienstleistungssektoren angesiedelt sind (Ecoplan 2007, S.132 ff.). In Zeiten hoher Hitzebelastung werden bei den betroffenen Arbeitsplätzen Produktivitätsabnahmen um 3 bis 12% angenommen. Erst nach 2050 ist dann mit merkbaren Einbußen beim BIP zu rechnen, im Jahr 2100 im Mittel im Umfang von gut 0,1%, bei einer erheblichen Streuung.

Hübler und Klepper (2007, S.45 ff.) kommen für Produktivitätsabnahmen um 3 bis 12% bei allen Erwerbstätigen für das Ende des Jahrhunderts zu Einbußen beim BIP um 0,12% bis 0,48%. Bei Leistungsverlusten von 30 bis 50% könnten es sogar bis zu 5% sein. Ökonomische Folgewirkungen wie etwa eine Beeinträchtigung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit werden dabei nicht berücksichtigt; Hübler und Klepper würden davon wohl eine Reduzierung der Schadenskosten erwarten (ebenda, S.46). Urban und Steininger (2015, S.306) weisen auf einen Gegeneffekt durch die Verlängerung des Jahresabschnitts hin, der für Arbeiten im Freien genutzt werden kann.

Zusammenfassend ergeben sich Impulse einer höheren Hitzebelastung auf die Produktivität zum einen bezüglich der Stundenproduktivität (Output pro geleisteter Arbeitsstunde), zum anderen bezüglich der durchschnittlichen Arbeitszeit (der in einem Zeitraum (z. B. in einem Jahr) von jedem Beschäftigten geleisteten Arbeitsstunden); das Produkt dieser Größen ist die Personenproduktivität. Das Produkt aus Personenproduktivität und der Zahl der eingesetzten Arbeitskräfte ergibt den Output. Als Messgröße für den Output schlagen Urban und Steininger (2015, S.311) alternativ die Lohnsumme oder das BIP vor; erstere repräsentiert die Kosten von Produktivitätseinbußen für die Unternehmen⁷³, letzteres die Kosten für die Gesellschaft.

Eine Folgewirkung geringerer Arbeitsproduktivität kann eine Verringerung der Produktivität auch anderer Produktionsfaktoren sein. So könnte die Auslastung der Maschinen eingeschränkt sein, wenn die Arbeitskräfte weniger produktiv sind (Urban und Steininger 2015, S.311). In der COIN-Studie wird das durch eine (exogene) Verringerung der Totalen Faktorproduktivität berücksichtigt (ebenda).

In der COIN-Studie wird weiter angenommen, dass die Unternehmen nicht als Reaktion auf die geringere Produktivität zusätzliche Arbeitskräfte einstellen (Urban und Steininger 2015, S.314); deshalb bleiben die Produktivitätsverluste ohne Auswirkungen auf die Beschäftigung und auf die Arbeitslosigkeit. Stattdessen sinkt die Produktion in den betroffenen Wirtschaftsbereichen. Damit ist eine geringere Nachfrage nach Vorleistungen verbunden, was zu Produktionseinbußen auch in anderen, vorgelagerten Produktionsbereichen führt.

Schließlich führen Produktivitätseinbußen in dem in der COIN-Studie angewandten Modell aufgrund der verminderten Produktion und folglich der Haushaltseinkommen zu Steuerausfällen. Da ein unveränderter Staatsverbrauch (dabei handelte es sich überwiegend um Personalausgaben) und ein unveränderter Budgetsaldo des Staates angenommen werden, muss der Staat folglich die Transfers an Haushalte kürzen (Urban und Steininger 2015, S.316).

⁷³ Unter der Annahme, dass die Arbeit nach ihrem Grenzprodukt entlohnt wird.

3.1.3.2.2 Anpassungsmaßnahmen

Eine Systematik von Anpassungsmaßnahmen an die Effekte von Temperaturänderungen mit einer qualitativen Einschätzung der jeweiligen Kosten stellen Hübler und Klepper (2007, S.56 f.) vor. Die Anpassungsmaßnahmen umfassen Verhaltensänderungen und Akklimatisierung, die keine Kosten verursachen, außerdem Verhaltensinformationen, Frühwarnsysteme und Aktionspläne, verbunden mit geringen oder moderaten Kosten. Die Betreuung Älterer und Kranker verursacht hohe Personalkosten, bauliche und planerische Maßnahmen sind ebenfalls kostenintensiv. Eine verstärkte Ausstattung mit Klimaanlage ist nicht nur mit hohen Anlagenkosten, sondern auch mit erheblichen Energie- und möglicherweise Netzausbaukosten verbunden, während passive Maßnahmen wie Ventilation und Belüftung relativ geringe Kosten verursachen.

Neubert (2017) diskutiert als Anpassungsmaßnahmen für Hitze-Wirkungsketten auf der Ebene des Bundes die Anpassung von Infrastrukturen, die Anpassung von Rechtsinstrumenten, Bildungs- und Ausbildungsmaßnahmen, die Integration von Klimaanpassungsmaßnahmen in Förderprogramme, Forschungs- und Monitoringprojekte, den Auf- und Ausbau von Netzwerken zum Informationstransfer und zur Frühwarnung, Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und die Erarbeitung von Hitzeaktionsplänen. Außerdem werden planerische Instrumente, verbunden mit investiven und organisatorischen Maßnahmen, die insbesondere auf der kommunalen Ebene ansetzen, aufgezeigt, etwa die Entwicklung klimawirksamer Freiraumsysteme, die Einrichtung von „Cooling Centres“, die Schaffung medizinischer Versorgungsstrukturen, und die Einrichtung von Schattenplätzen, Trinkwasserspendern und Befeuchtungsanlagen. Als bauliche Maßnahmen werden Dämmung, Begrünung sowie passive und aktive Kühlung in Betracht gezogen, unterstützt durch eine entsprechende Anpassung einschlägiger Vorschriften.⁷⁴ Eine Auswertung einer UBA-internen Datenbank, basierend auf Recherchen des Vorhabens Policy Mix und des IÖW (UBA 2016b) führt bei den berücksichtigten Anpassungsmaßnahmen an Hitzefolgen zu einer Obergrenze der Kosten in Höhe von wenig mehr als 120 Mio. Euro pro Jahr, dominiert von den Kosten für die Sicherung der Trinkwasserversorgung in Höhe von bis zu 100 Mio. Euro pro Jahr (Neubert 2017).

Im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in Deutschland (UBA 2012) werden im Handlungsfeld Gesundheit die Maßnahmen „Hitzewarnsystem“ und „Kühlung von Krankenhäusern“ betrachtet. Außerdem wird im Handlungsfeld Bauwesen die „Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassung im Wohnungsbau“ und im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe die „Vermeidung von Produktionseinbußen durch Klimatisierung (von Arbeitsräumen)“ diskutiert. Schließlich bieten sich im Handlungsfeld Raumplanung als Anpassungsmaßnahmen, die geeignet sind, hitzebedingte Gesundheitsschäden und Produktivitätseinbußen zu vermeiden, die Planung von „Frischluftschneisen“ und die Einrichtung von „Grünen Dächern“ an.

Die zusätzlichen Kosten für den Ausbau eines flächendeckenden Hitzewarnsystems sind im Vergleich zu denen anderer Anpassungsmaßnahmen gering (UBA 2012 S.115 ff.). Bei Kosten von 250 Tsd. Euro pro Hitzetag für Informations- und Beratungsleistungen sowie eine Verstärkung von Notdiensten (allerdings ohne Krankenhaus- und Pflegekosten) und 20 Hitzetagen pro Jahr am Ende des Jahrhunderts (bei 10 Hitzetagen pro Jahr heute) ergeben sich zusätzliche Kosten von 5 Mio. Euro pro Jahr, in erster Linie in Form zusätzlicher Personalkosten. Durch ein Hitzewarnsystem könnten jährlich 5.000 hitzebedingte Todesfälle vermieden werden. Dafür wird basierend auf dem VOLY-Konzept ein Wert von 2,4 Mrd. Euro pro Jahr angesetzt; darin sind

⁷⁴ Auch für die Ozon-Wirkungskette werden Anpassungen von Infrastrukturen mit dem Ziel der Verringerung von NOX- und VOC-Emissionen, unterstützt durch Rechtsinstrumente, Bildungs- und Ausbildungsmaßnahmen, Förderprogramme, Forschungs- und Monitoringprojekte, den Auf- und Ausbau von Netzwerken und Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit vorgeschlagen.

zu 10% Rettungs-, Behandlungs- und Pflege- sowie administrative Kosten enthalten ebenso wie Produktionsverluste abzüglich Konsumausgaben; die übrigen 90% repräsentieren den Verlust von Lebensqualität. Gegenüber dem Nutzen durch vermiedene Todesfälle fallen eingesparte Kosten für Krankenhausbehandlungen in Höhe von geschätzten 165 Mio. Euro pro Jahr kaum ins Gewicht.

Wie in Wohnungen und in Produktionsstätten (s.u. in diesem Abschnitt) können auch in Gebäuden im Gesundheitsbereich passive und/oder aktive Vorrichtungen zur Kühlung installiert werden. Die Zusatzkosten für eine flächendeckende passive und aktive Kühlung von Krankenhäusern in Deutschland werden auf 150 bis 475 Mio. Euro pro Jahr geschätzt (UBA 2012, S.122 ff.) Im Endeffekt dürfte die Finanzierung wohl über Krankenversicherungsbeiträge erfolgen. Durch die zusätzliche Kühlung von Krankenhäusern können Krankenhauskosten für Patienten von rund 25 bis 75 Mio. Euro pro Jahr und Produktivitätsverluste des Krankenhauspersonals im Wert von 163 bis 200 Mio. Euro pro Jahr vermieden werden.

Im Handlungsfeld Bauwesen werden als Maßnahmen zur Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassung im Wohnungsbau

- ▶ eine flächendeckende Ausstattung der überdurchschnittlich von der Klimaerwärmung betroffenen Bevölkerung mit Klimaanlage und
- ▶ ein verstärkter Einbau von Jalousien als Verschattungselemente

diskutiert (UBA 2012, S.96 ff.).

Bei der Ausstattung von Wohnungen mit Klimaanlage werden zusätzlich aufzuwendende Stromkosten einschließlich der Kosten der notwendigen Zertifikate berücksichtigt. Dafür werden im Jahr 2050 rund 180 Mio. Euro (zu gegenwärtigen Preisen)⁷⁵ veranschlagt. Außerdem fallen Investitionskosten für Klimaanlage an, die auf jährlich 277 Mio. Euro (ebenfalls zu gegenwärtigen Preisen) geschätzt werden. Der Einbau von Jalousien im Neubau oder im Rahmen einer Grundsanierung zusammen mit neuen Fenstern im Bestand würde sich durch eingesparte Kosten für Kühlung rasch amortisieren. Die Gesamtkosten der Anpassungsmaßnahmen im Wohnungsbau könnten so um bis zu 30% reduziert werden und würden dann zwischen rund 320 und 460 Mio. Euro pro Jahr (zu gegenwärtigen Preisen) betragen.

Für die Klimatisierung von Büroräumen und Produktionsstätten in der Industrie und dem Dienstleistungssektor - soweit sie der Anpassung an den Klimawandel und nicht der Inanspruchnahme größerer Flächen und einer generellen Tendenz zur Klimatisierung zuzurechnen ist - werden in der Anpassungsstudie (UBA 2012, S.111) für das Jahr 2050 Kosten in Höhe von gut 1,1 Mrd. Euro, entsprechend 0,03% des BIP, angesetzt.^{76,77} Sie umfassen Investitionen von rund 260 Mio. Euro in den Dienstleistungssektoren und 17 Mio. Euro in der Industrie, außerdem Betriebskosten für Strom in Höhe von 745 Mio. Euro in den Dienstleistungsbereichen und von 23 Mio. Euro in der Industrie. Hinzu kommen gut 100 Mio. Euro für Zertifikate für die Produktion des benötigten Stroms. Auch bei flächendeckender Klimatisierung von Arbeitsräumen bleiben allerdings 2 bis 3 Mio. Arbeitskräfte, die in Deutschland überwiegend im Freien arbeiten, vor allem in der Bauwirtschaft, in der Land- und

⁷⁵ Nicht explizit angegeben; ergibt sich aus dem Kontext.

⁷⁶ Die Anpassungsstudie stützt sich dabei auf das EU-Projekt ADAM. Siehe Schade u.a. 2009.

⁷⁷ Eine Preisbasis ist nicht angegeben. Bezogen auf die Projektion des BIP in dem Ageing-Report (EC 2012) für das Jahr 2050 zu Preisen von 2010 machen 0,03% einen Betrag von 1,071 Mrd. Euro 2010 aus.

Forstwirtschaft, oder etwa auch im Gartenbau oder bei der Müllabfuhr, von Hitzebelastungen betroffen (UBA 2015).

Gründächer reduzieren den Wärmeinseleffekt in Städten und verbessern das Mikroklima, sie erleichtern außerdem durch ihre Retentionswirkung die Abwasserentsorgung und haben eine Dämmwirkung. Sie sind schon aus einzelwirtschaftlicher Sicht vorteilhaft: Zwar sind die Bau- und Unterhaltskosten höher als bei Kiesdächern, die höheren Kosten (12 gegenüber 7 Euro pro m^2 bzw. 0,5 gegenüber 0,2 Euro pro m^2 und Jahr) werden aber durch eine doppeltso hohe Lebensdauer mehr als ausgeglichen (UBA 2012, S.45 ff.). Aufgrund verschiedener Hemmnisse (Unsicherheiten bezüglich der Funktionalität; Nicht-Berücksichtigung der positiven externen Effekte im betriebswirtschaftlichen Kalkül) werden aber Anreize und Finanzierungshilfen für erforderlich gehalten. Eine Fallstudie für die Stadt Düsseldorf kommt zu dem Ergebnis, dass zur Erhöhung des Gründachanteils auf 50% ca. 11,5 Mio. m^2 Dachfläche zusätzlich begrünt werden muss, wozu bei einem Fördersatz von 5 Euro pro m^2 Fördermittel in Höhe von knapp 3 Mio. Euro pro Jahr über einen Zeitraum von 10 Jahren erforderlich wären, bei einem Fördersatz von 15 Euro pro m^2 wären es 8,6 Mio. Euro pro Jahr.

Raumplanerische Maßnahmen zur Freihaltung von Frischluftschneisen dienen sowohl der Vermeidung von Gesundheitsrisiken als auch der Sicherung der Arbeitsproduktivität (UBA 2012, S.33 ff.). Die (Opportunitäts-)Kosten solcher Maßnahmen in Form entgangener alternativer Nutzungen hängen aber sehr stark von lokalen Gegebenheiten ab und können nicht für Deutschland hochgerechnet werden.

„Kulturelle“ Anpassungsmaßnahmen (Urban und Steininger 2015, S.321) zur Minderung von Einschränkungen der Leistungsfähigkeit und der Produktivität könnten in der Einführung einer längeren Mittagsruhe oder in der Verlagerung von Urlaubszeiten in den Sommer bestehen. Damit dürften kaum tangible Kosten, sondern allenfalls Komforteinbußen verbunden sein.

3.1.3.2.3 Zusammenfassung

In einem Szenario mit Klimawandel, aber ohne Anpassungsmaßnahmen, sind als Impulse, die sich aus erhöhten Mortalitäts- und Morbiditätsrisiken ergeben, ein geringeres Angebot an Arbeitskräften und Arbeitszeit (pro Person) sowie öffentliche Ausgaben für Behandlungskosten, die überwiegend durch höhere Krankenkassenbeiträge finanziert werden, zu berücksichtigen. Zur Mitte dieses Jahrhunderts wird mit dadurch verursachten Schadenskosten - ohne Berücksichtigung von intangiblen Kosten - in der Größenordnung eines niedrigen dreistelligen Millionenbetrages (zu gegenwärtigen Preisen) gerechnet, was weniger als 0,005% des BIP entspricht. Auch für das Ende des Jahrhunderts wird mit Kosten unter 0,01% des BIP gerechnet. Erheblich stärkere Impulse sind von hitzebedingten Leistungseinbußen zu erwarten. Die Personenproduktivität und das Arbeitskräfteangebot sind geringer als in einem Szenario ohne Klimawandel. Das entgangene BIP könnte Ende des Jahrhunderts in einer Spanne von 0,1 bis 0,5% liegen. Zudem könnte die Produktivität anderer Produktionsfaktoren beeinträchtigt werden.

In einem Szenario, das Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren und Produktivitätseinbußen berücksichtigt, entstehen als Impulse gegenüber einem Klimawandelszenario ohne diese Maßnahmen zusätzliche Investitionen, dabei hauptsächlich Bauinvestitionen (Wohnungsbau-, öffentliche und Unternehmensinvestitionen), zusätzliche Personalkosten (der öffentlichen Hand; in der VGR als Verbrauchsausgaben des Staates verbucht), sowie zusätzliche Stromkosten einschließlich der Kosten für erforderliche Emissionszertifikate. Soweit die Kosten von Anpassungsmaßnahmen in den oben zitierten Studien beziffert sind, lässt sich durch Addition grob ein Gesamtbetrag der Anpassungskosten in

einer Größenordnung um 2 Mrd. Euro pro Jahr zu gegenwärtigen Preisen abschätzen.⁷⁸ Bezogen auf das BIP des Jahres 2017 sind das 0,06%. Bezüglich der Finanzierung sind eventuelle Subventionen zu berücksichtigen. Gegenzurechnen sind Impulse durch vermiedene Schadenskosten. Dabei ist zu beachten, dass durch Anpassungsmaßnahmen nicht immer sämtliche Klimaschäden vermieden werden können.⁷⁹

3.1.3.3 Beeinträchtigung von Böden

3.1.3.3.1 Schäden, Beseitigungsmaßnahmen Zusammenfassung

Die Vulnerabilitätsstudie (Buth 2015a, S.170 ff.) berücksichtigt im Handlungsfeld „Boden“ als direkte Klimawirkungen (ökologische Impulse):

- ▶ Bodenerosion durch Wasser und Wind, Hangrutschung;
- ▶ Veränderungen von Bodenwassergehalt, Sickerwasser;
- ▶ Beeinträchtigungen von Standortstabilität und Bodenfruchtbarkeit;
- ▶ Verringerung von Boden-Biodiversität, mikrobieller Aktivität;
- ▶ Verlust von organischer Bodensubstanz, Beeinträchtigung des Stickstoff- und Phosphor-Haushalts, Stoffausträge.

Eine hohe Bedeutung für Deutschland wird bei starkem Klimawandel in der nahen Zukunft der Klimawirkung „Veränderungen von Bodenwassergehalt, Sickerwasser“ zugesprochen. Bei allen übrigen Klimawirkungen wird bei starkem Wandel in der nahen Zukunft von einer mittleren Bedeutung ausgegangen. Bei schwachem Klimawandel haben in der nahen Zukunft „Veränderungen von Bodenwassergehalt, Sickerwasser“, „Verringerung von Boden-Biodiversität, mikrobieller Aktivität“ und „Verlust von organischer Bodensubstanz, Beeinträchtigung des Stickstoff- und Phosphor-Haushalts, Stoffausträge“ eine mittlere Bedeutung für Deutschland.

Die primären Klimawirkungen im Handlungsfeld Böden wirken nicht direkt auf die Systeme Wirtschaft und Infrastrukturen (Buth 2015a, S.643). Die ökonomischen Impulse von Klimawirkungen werden aber außer durch die direkten ökologischen Impulse hinaus auch durch die wechselseitigen Wirkungsbeziehungen zwischen den Handlungsfeldern bestimmt. Für das Handlungsfeld Boden wurden in der Vulnerabilitätsstudie (Buth 2015a, S.647) 30 Wirkungsbeziehungen mit anderen Handlungsfeldern identifiziert, vor allem mit den Handlungsfeldern Landwirtschaft und Wald- und Forstwirtschaft. Die Wirkungen in diesen Handlungsfeldern haben ihrerseits vielfältige ökologische Wirkungen in den Systemen Wirtschaft und Infrastrukturen, die in der ökonomischen Analyse als Impulse zu berücksichtigen sind.

Schätzungen von Schadenskosten liegen in der Regel nicht nach den genannten direkten Klimawirkungen im Handlungsfeld Boden vor. Meist werden Schadenskosten für den Sektor Landwirtschaft angegeben. Eine Ausnahme bildet in dieser Hinsicht die Untersuchung von Sauer und Neubert (2016a und b), die Schäden durch Wassererosion beim Bodenselbst, bei angebauten Nutzpflanzen und deren Erträgen sowie bei Gebäuden, Infrastrukturen und

⁷⁸ Der größte Einzelbetrag (1,1 Mrd. Euro) fällt 2050 für die Klimatisierung von Arbeitsräumen an; hier wurde angenommen, dass dieser Betrag in gegenwärtigen Preisen jährlich anfällt.

⁷⁹ Aaheim u.a. 2009, S.1, geben an, dass sich im Kontext ihrer Untersuchung die Schadenskosten durch endogene Anpassung um 80 bis 85% verringern.

Gewässern durch Sedimentablagerungen untersuchen (Sauer, Neubert 2016a). Das Schadenspotenzial durch klimabedingte Ertragsänderungen ergibt sich unter Berücksichtigung der Anbauverteilung der verschiedenen Kulturen aus den kulturspezifischen Erträgen und den auf dem Markt erzielbaren Preisen (Sauer, Neubert 2016b).

Die OECD-Studie (2015, S.32 ff.) untersucht die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft mit globaler Perspektive. Als ökonomische Impulse werden Ertragseinbußen berücksichtigt.⁸⁰ Sie werden (mangels besserer Informationen je zur Hälfte) als Rückgang der Produktivität des Produktionsfaktors Boden und als Rückgang der Totalen Faktorproduktivität des Landwirtschaftssektors modelliert (siehe auch Dellink et al. 2014). Der angenommene Rückgang der Totalen Faktorproduktivität spiegelt die Vorstellung, dass die Klimawirkungen in der Landwirtschaft nicht nur die Ertragsraten, sondern auch andere Faktoren wie Management-Praktiken beeinflussen. Mit den Gesundheitsauswirkungen – hauptsächlich durch eine verringerte Arbeitsproduktivität – tragen Impulse durch Klimaschäden in der Landwirtschaft am meisten zum Rückgang des globalen BIP gegenüber einem Szenario ohne Klimawandel bei (S.53 ff.). Für Deutschland und die anderen großen EU-Länder sind die Auswirkungen von Klimaschäden in der Landwirtschaft auf das BIP aber gering (S.60); in Sensitivitätsrechnungen, in denen der CO₂-Düngeeffekt berücksichtigt wird, spielen sie praktisch keine Rolle für die Höhe des BIP (S.69 ff.).

Bosello et al. 2012 leiten aus einer Auswertung von Wirkungsstudien für Nordeuropa für das Jahr 2050 als Impulse in der Landwirtschaft eine Erhöhung der Bodenproduktivität durch den Klimawandel um gut 11% ab; dem stehen Verluste an Landwirtschaftsflächen durch Überflutungen von 0,013% gegenüber. Als Ergebnis eines CGE-Modells (ICES; Intertemporal General Equilibrium System) kommt dadurch es in einem +2°C-Szenario im Jahr 2050 in Nordeuropa zu einem Anstieg des BIP um gut 0,2% (S.14).

Im COIN-Projekt (Steininger et al. eds., 2015) werden die wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels nach Wirkungsbereichen (fields of impact) untersucht, darunter die Landwirtschaft (Mitter et al. 2015). Als Impulse werden berücksichtigt

- ▶ Ertragseinbußen durch Hitze und Trockenheit; bei großräumlichem Auftreten verringern sie die Erträge; angesichts unelastischer Nachfrage nach Nahrungsmitteln kann das zu Preissteigerungen führen; meist tragen die Konsumenten die zusätzlichen Kosten; unter Umständen erhalten die Landwirte Kompensationszahlungen; Ertragsveränderungen werden in der ökonomischen Analyse als Veränderungen der Produktivität abgebildet;
- ▶ Produktivitätsbeeinträchtigungen durch Starkregen; er kann die landwirtschaftliche Produktivität auch langfristig beeinträchtigen; er tritt typischerweise allerdings räumlich begrenzt auf, deswegen ist mit Preissteigerungen kaum zu rechnen; aber es kommt in den betroffenen Regionen zu Einkommenseinbußen der Landwirte;
- ▶ Produktivitätssteigerungen durch höhere Temperaturen und eine höhere atmosphärische CO₂-Konzentration, die in wasserreichen Regionen das Pflanzen-Wachstum begünstigen; das erhöht die Produktivität in der Landwirtschaft.

⁸⁰ Auswirkungen auf Weideland sowie Kohlenstoff-Dünge-Effekte bleiben unberücksichtigt. Erstere werden qualitativ diskutiert (IOECD 2015, S.86 f.), letztere werden in einer Sensitivitätsanalyse erfasst (OECD 2015, S.69 ff.).

Mit Ertragsänderungen können veränderte Produktionskosten verbunden sein; so kann im Zusammenhang mit höheren Erträgen der Düngereinsatz steigen oder bei höherer Futtermittelproduktion die Anschaffung zusätzlichen Viehs erforderlich sein.

Weitere ökonomische Impulse können sich durch Kostensteigerungen ergeben, etwa für Bewässerung oder Pestizideinsatz. Weitere (in der quantitativen Analyse allerdings nicht berücksichtigte) Ertragsseinbußen können die Folge von Verschlechterungen der Produktqualität, etwa in Folge von Frostschäden, sein.

Die Ecoplan-Studie (2007, S.144) nimmt eine qualitative Einschätzung für die Landwirtschaft in der Schweiz vor. Bei moderatem Klimawandel erwartet sie positive Wirkungen, bei stärkerem Klimawandel und bei längeren Trockenperioden oder Hitzewellen rechnet sie mit Schäden. Sie geht aufgrund der in Zukunft geringer werdenden Bedeutung der Landwirtschaft und der verfügbaren Anpassungsmöglichkeiten aber nicht von gravierenden Schäden oder Nutzen des Klimawandels für diesen Sektor aus.

Lehr et al. 2015 untersuchen die gesamtwirtschaftlichen und sektoralen ökonomischen Wirkungen von Überschwemmung und Hitzewellen. Die Impulse sind aus globalen und nationalen Klimawirkungsstudien abgeleitet (Drosdowski et al. 2014). Die Impulse für die Landwirtschaft werden als Produktionsrückgänge in das verwendete sektoral disaggregierte makro-ökometrische Modell eingespeist. Anpassungsmaßnahmen wie Deicherhöhungen oder Dachbegrünungen werden als zusätzliche Bauinvestitionen modelliert; boden- oder landwirtschaftsspezifische Anpassungsmaßnahmen werden nicht untersucht.

Die im COIN-Projekt berücksichtigten Impulse des Klimawandels für die Landwirtschaft – die Erhöhung des Produktionswertes der Landwirtschaft (insbesondere höhere Erträge auf Weideland) abzüglich der erhöhten Produktionskosten – sind per Saldo positiv. Sie werden in ein Allgemeines Gleichgewichtsmodell eingespeist, um die makroökonomischen Folgewirkungen abzuschätzen. Das Modell zeigt positive Effekte (niedrigere Preise) in nachgelagerten Sektoren (Herstellung von Nahrungsmitteln). Das verfügbare Einkommen der Haushalte ist höher, die Endnachfrage z.B. auch nach Wohnraum und Bauleistungen oder Handelsleistungen steigt und damit die Produktion dieser Sektoren (S.138), verbunden mit allerdings mäßigen Preissteigerungen. Schließlich resultiert ein höheres BIP, zum ganz überwiegenden Teil handelt es sich dabei aber um Preis- nur zum kleinen Teil um Mengeneffekte. Dabei sind allerdings Rückwirkungen des Klimawandels in anderen Regionen über internationale Märkte wie höhere Preise von Nahrungsmittelimporten nicht berücksichtigt (S.143). Die Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft würden das BIP mittelfristig um jährlich knapp 280 Mio. Euro, längerfristig um 500 Mio. Euro erhöhen (Mitter u.a. 2014); das sind 0,08% bzw. 0,15% des BIP des Jahres 2014. Überwiegend handelt es sich dabei um Mehrkonsum von Erzeugnissen anderer Sektoren als der Landwirtschaft, der aufgrund von Preissenkungen bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen möglich ist. Dabei nicht berücksichtigte Klimawirkungen in der Landwirtschaft wie Dürren oder Biodiversitätsverlust könnten die positiven Wirkungen allerdings jede für sich in ihr Gegenteil verkehren (ebenda).

In Lehr et al. (2015, S.2) werden Produktionsrückgänge im Inland infolge von Überschwemmung und Hitzewellen durch zusätzliche Importe teilweise substituiert. Der Verlust von Kapital führt zu einer Verschiebung der Produktion von kapital- zu arbeitsintensiven Sektoren, mit der Konsequenz einer insgesamt erhöhten Arbeitsnachfrage und – bei elastischem Arbeitsangebot – zu zusätzlicher Beschäftigung (S.4). Auch eine geringere Arbeitsproduktivität wird durch zusätzliche Beschäftigung kompensiert. Verluste an landwirtschaftlicher Produktion führen zu Preissteigerungen; in späteren Jahren kommt es dadurch zu einer Überkompensation der ursprünglichen Verluste (S.8).

Wird berücksichtigt, dass der Klimawandel global eintritt, geraten auch internationale Rückwirkungen in den Blick (Eboli et al. 2009, Dellink et al. 2017). Die Verknappung des Angebots landwirtschaftlicher Erzeugnisse tritt nicht weltweit im gleichen Umfang auf, je nach Klimawirkungen, und Ressourcenausstattung. kann sie unterschiedlich stark ausfallen, so dass sich die Terms of Trade und in der Folge auch internationale Handelsströme verändern. In Regionen, die stark von Klimaschäden betroffen sind, steigen die Produktionskosten stark, die Wettbewerbsfähigkeit verschlechtert sich und die Exporte gehen zurück, während die Importe zunehmen, um Produktionsausfälle zu kompensieren. Zum Ausgleich der Handelsbilanz steigt der reale Wechselkurs. Entwickelte Länder profitieren von diesem Effekt. Auch internationale Kapitalströme können sich verändern: Verluste an Land oder Infrastruktur führen zu einer höheren Knappheit von Kapital, dadurch steigt die Kapitalertragsrate, es strömt Kapital zu. Das dämpft den negativen Effekt der Klimawirkungen, gleichzeitig nimmt die Auslandsverschuldung die später zurückgezahlt werden muss, zu.

3.1.3.3.2 Anpassungsmaßnahmen

Das technische Potenzial zur Anpassung im Handlungsfeld Boden wird als hoch bis sehr hoch eingeschätzt (Buth 2015b, S.25). Als Beispiele für Anpassungsmaßnahmen werden Bewässerung, Düngung und Fruchtartenwahl genannt (ebenda sowie Mitter et al. 2015, S.143). Anpassungsmaßnahmen sind überwiegend mit zusätzlichem Ressourcenverbrauch oder Ertragseinbußen verbunden (ebenda). Dabei hängt die Anpassungskapazität auch von dem in der Landwirtschaft verfügbaren Wissenskapital und den Finanzierungsmöglichkeiten ab (Mitter et al. 2015, S.127).

Eine zentrale Anpassungsmaßnahme im Handlungsfeld Boden ist die bodenschonende konservierende Bewirtschaftung von Ackerflächen (UBA 2012, S.127 ff.), bei der eine wendende Bodenbearbeitung mit Pflug vermieden wird. Zur Umstellung sind Investitionen, etwa in Direktsaatmaschinen, notwendig, außerdem kann es in der Umstellungsphase zu Ertragsrückgängen kommen. Für ein einschlägiges Förderprogramm des Landes Sachsen wird für die erste Hälfte der Zweitausender-Jahre ein Förderbetrag von 260 Euro/ha ermittelt (ebenda, S.128). Es wird geschätzt, dass durch Maßnahmen der bodenschonenden Bewirtschaftung gegenüber einer Situation mit Klimawandel aber ohne Anpassung jährliche Ertragsrückgänge von 80 Euro/ha (zu Preisen von 2010) vermieden werden können. Durch die Vermeidung von „off-site-Schäden“ wie die Versandung von Gräben und Wasserläufen, die Beschädigung von Dämmen und Kanälen und die Beeinträchtigung von Verkehrswegen werden zudem Beseitigungskosten eingespart. Da Angaben zu den für eine konservierende Bewirtschaftung geeigneten Flächen in Deutschland nicht vorliegen, sind Kostenschätzungen für die nationale Ebene nicht möglich.

Zur Vermeidung von Ertragsausfällen kann im Handlungsfeld Landwirtschaft die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen ausgeweitet werden,⁸¹ dabei wird in Deutschland von einem Flächenpotenzial von zusätzlichen 2% der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausgegangen (UBA 2012, S.148 ff.). Dazu sind privat finanzierte Investitionen in der Größenordnung von 3,5 Mrd. Euro erforderlich; die Nutzungsdauer der Anlagen wird auf 10 Jahre geschätzt; hinzu kommen laufende Ausgaben für Wasser, Energie, Wartung und Reparaturen in Höhe von 30 bis 50 Mio. Euro pro Jahr (ebenda). Damit liegen die Kosten dieser Maßnahme in einer Größenordnung von 400 Mio. Euro pro Jahr (zu gegenwärtigen Preisen).

Die Kosten einer Umstellung auf resistente Fruchtarten bestehen hauptsächlich in Ertragsausfällen (gegenüber einer Situation ohne Klimawandel), sie könnten in einer

⁸¹ Diese Anpassungsmaßnahme ist wegen möglicher Konflikte mit dem Ziel nachhaltige Wassernutzung und der Abhängigkeit vom Wasserdargebot nicht unumstritten.

Größenordnung von 10% liegen (UBA 2012, S.152 ff.). Unter der Annahme, dass dies ein Viertel der landwirtschaftlichen Wertschöpfung betreffen könnte, ergeben sich dafür jährliche Kosten in Höhe eines mittleren dreistelligen Millionen-Euro-Betrags.

Lehr et al. (2015, S.5) modellieren Anpassungsmaßnahmen an extreme Wetterereignisse (Überflutungen und Hitzewellen) als zusätzliche Nachfrage nach Bauleistungen, nach Transportleistungen und nach weiteren Gütern, die für Anpassungsmaßnahmen benötigt werden. Zudem berücksichtigen sie Zahlungen an die Landwirtschaft für die Schaffung von Ausgleichsflächen bei Überflutungen. Unter Berücksichtigung aller Folgewirkungen werden die BIP-Verluste infolge extremer Wetterereignisse durch die berücksichtigten Anpassungsmaßnahmen längerfristig um gut 0,5 Prozentpunkte reduziert.

3.1.3.3.3 Zusammenfassung

Szenarien der ökonomischen Auswirkungen von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen sind überwiegend nach Wirtschaftsbereichen statt nach Handlungsfeldern gegliedert; Konsequenzen von Bodenbeeinträchtigungen werden meist als Wirkungen im Sektor Landwirtschaft diskutiert.

In einem Klimawandelszenario sind als ökonomische Impulse aus der Beeinträchtigung von Böden vor allem negative Veränderungen der Produktivität des Produktionsfaktors Boden und Verluste an Anbaufläche in der Landwirtschaft zu berücksichtigen. Daneben können Impulse in Form einer Beeinträchtigung der Totalen Faktorproduktivität im Sektor Landwirtschaft, von Strukturänderungen der sektoralen Nachfrage, von Handelswirkungen und von Kompensationszahlungen wirken. Die Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und Gewässern durch Sedimentablagerungen lassen sich durch die Investitionen und laufenden Ausgaben für die Beseitigung dieser Schäden charakterisieren. Während die Verluste an Produktion und Einkommen durch Klimaschäden in der Landwirtschaft weltweit bedeutend sind, spielen sie in Ländern wie Deutschland gesamtwirtschaftlich nur eine begrenzte Rolle. Das liegt einerseits an dem geringen Gewicht der Landwirtschaft im Verhältnis zur Gesamtwirtschaft, andererseits daran, dass Erhöhungen der Bodenproduktivität Verluste an Bodenfläche kompensieren können.

Anpassungsmaßnahmen lösen ökonomische Impulse in Form von Investitionen, Ausgaben für Käufe von Waren und Dienstleistungen sowie Personalausgaben und Beeinträchtigungen der Bodenproduktivität aus. Mit einer Ausweitung der Bewässerung landwirtschaftlicher Anbauflächen könnten Impulse in Form überwiegend von Investitionen, daneben auch von laufenden Ausgaben der Landwirtschaft, in einer Größenordnung von einer halben Milliarde Euro pro Jahr zu gegenwärtigen Preisen, eine Umstellung auf resistente Fruchtarten könnte mit Ernteaussfällen in einer ähnlichen Größenordnung verbunden sein. Zusammen entspricht das 0,03 % des BIP von 2017. Die Finanzierung würde wohl zum Teil über Zuschüsse der öffentlichen Hand erfolgen müssen.

3.1.3.4 Kombinierte Klimawirkungen

Bachner u.a. 2015 präsentieren eine quantitative Gesamteinschätzung der Wirkungen des Klimawandels in Österreich⁸², soweit sie als Impulse in ein (Allgemeines Gleichgewichts-) Modell (AGM) eingespeist werden können. Sie sprechen von einer **guten** Implementierbarkeit, wenn die Kosten des Klimawandels modellbasiert ermittelt werden konnten und sie im AGM unmittelbar repräsentiert waren, z.B. als Produktionskosten, Nachfrage oder Produktivitäten. Bei nur annähernder Repräsentation im AGM, weil dort etwa die betroffenen Subsektoren nicht explizit abgebildet waren, sprechen sie von **annähernder** Implementierbarkeit (fair

⁸² Inwieweit die Ergebnisse im Einzelnen auf Deutschland übertragen werden können, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht überprüft.

implementation (ebenda, S.425)). Sämtliche Wirkungen in zwei als besonders wichtig eingeschätzten Wirkungsfeldern, nämlich Ökosystemleistungen und Gesundheit konnten nicht monetär bewertet und deshalb nicht implementiert werden (Bachner u.a. 2015, Tabelle 2.1, S.417 ff.).

Gut implementierbar waren im Wirkungsfeld Land- und Forstwirtschaft Veränderungen der Bodenproduktivität für Feldfrüchte und Weideland sowie für Holz-Biomasse aufgrund veränderter Temperaturen und Niederschläge. Im Wirkungsfeld Gebäudeheizung und -kühlung konnten Veränderungen der Energienachfrage gut implementiert werden, ebenso die daraus resultierenden Impulse in der Elektrizitätserzeugung, dort auch die Auswirkungen eines veränderten Wasserdargebots. Im Wirkungsfeld Verkehr waren Straßenschäden gut implementierbar, dabei konnte auch der Effekt wärmerer Winter berücksichtigt werden. Auch die durchschnittlichen (über die Zeit gemittelten) Schäden durch Flusshochwasser waren gut implementierbar, und schließlich auch Veränderungen der Nachfrage nach Winter- und Sommertourismusleistungen.

Annähernd implementierbar waren: die Wirkungen von Schädlingen auf Wälder, ein verringertes Wasserdargebot aus Quellen und Grundwasser, ein erhöhtes Abwasseraufkommen, Sedimentbildungen in Abwassersystemen in Trockenperioden, Veränderungen bei der Produktion von Elektrizität aus Windkraft und Photovoltaik sowie schließlich Veränderungen der Arbeitsproduktivität.

Die Klimawirkungen werden als Veränderungen -der Struktur der Produktionskosten, -von Produktivitäten, -der privaten und öffentlichen und Konsumnachfrage, -der Investitionen und -von öffentlichen Transfers und Steuern implementiert.

In dem verwendeten Gleichgewichtsmodell wird die Höhe der Investitionen durch die Sparquote bestimmt, die in den verschiedenen Szenarien als fix angenommen wird; das impliziert auch eine fixe Konsumquote, so dass Mehrausgaben z.B. für Wiederherstellungs- oder Anpassungsmaßnahmen immer durch Minderausgaben an anderer Stelle kompensiert werden müssen. Für zusätzliche Kosten werden Annahmen über deren Finanzierung getroffen – z.B. durch Überwälzung von den Unternehmen auf die Konsumenten über höhere Preise oder durch öffentliche Transfers. Im Allgemeinen wird auch angenommen, dass der Budgetsaldo des Staates in den verschiedenen Szenarien unverändert bleibt; das erfordert bei klimawandelbedingten zusätzlichen Staatsausgaben Einsparungen bei anderen Budgetpositionen oder Erhöhungen der Einnahmen.

Für alle berücksichtigten Impulse ergibt sich ein BIP, das im Zeitraum 2016 bis 2045 um durchschnittlich 0,08% und im Zeitraum 2036 bis 2065 um durchschnittlich 0,15% niedriger ist als ohne Klimawandel. Die negativen Wohlfahrtswirkungen sind stärker, weil darin Wiederherstellungskosten, etwa nach Überschwemmungen, die zu einem höheren BIP führen, nicht wohlfahrtsverbessernd wirken. Sie machen im ersten Teilzeitraum durchschnittlich -0,33% und im zweiten -0,48% aus.

Werden die Impulse in den verschiedenen Wirkungsfeldern einzeln in das Modell eingespeist und summiert, ergibt sich ein sehr ähnlicher Gesamteffekt wie bei einem Modelllauf, bei dem alle Impulse gleichzeitig eingespeist werden.

Gemessen an den Wirkungen auf die reale sektorale Bruttonproduktion „gewinnt“ der Bausektor am meisten, daneben in deutlich geringerem Umfang die Landwirtschaft, der Handel einschließlich der Reparatur von Kraftfahrzeugen und die Herstellung von Lebensmitteln (Abb. 21.4, S.435). In allen anderen Sektoren sinkt die Bruttonproduktion im Vergleich zum Szenario ohne Klimawandel. Über alle Sektoren ergibt sich per Saldo ein Produktionsrückgang.

Die per Saldo geringere Produktion führt zu einem Anstieg der Arbeitslosigkeit. Das Steueraufkommen ist geringer, außerdem werden zusätzliche Subventionen z.B. an die Forst- und Wasserwirtschaft berücksichtigt. Unter den Modellannahmen eines ausgeglichenen Budgets der öffentlichen Hand und unveränderter Verbrauchsausgaben des Staates müssen die Einnahmeausfälle durch niedrigere Transfers an die privaten Haushalte kompensiert werden. Wird alternativ angenommen, dass der Staatsverbrauch eingeschränkt wird, kommt es – wegen der hohen Arbeitsintensität in diesem Sektor – zu einem stärkeren Anstieg der Arbeitslosigkeit; zudem ergeben sich andere sektorale Strukturwirkungen, vor allem ein stärkerer Rückgang bei der Produktion öffentlicher Dienstleistungen.

Bei der Einschätzung der Größenordnung der im COIN-Projekt für Österreich ermittelten - insgesamt moderaten - gesamtwirtschaftlichen Wirkungen des Klimawandels ist zu beachten, dass

- ▶ das verwendete Modell endogene Anpassung (als Reaktion auf Preisänderungen) berücksichtigt; dabei werden alle – auch regulierte - Preise als flexibel angenommen;
- ▶ Extremwetterereignisse nur mit ihren durchschnittlichen Wirkungen (über mehrere Jahre) berücksichtigt sind;
- ▶ viele Klimawirkungen, die qualitativ beschrieben werden, nicht im Modell abgebildet werden, weil sie nicht monetarisiert werden können;
- ▶ Wirkungen im Inland von Klimaänderungen im Ausland nicht berücksichtigt sind;
- ▶ negative und positive Effekte sich in der Gesamtwirkung aufheben, das gilt auch für Wirkungen in positiv und negativ betroffenen Sektoren und Regionen.

Aaheim u.a. 2009 ermitteln im Rahmen des ADAM-Projektes mit Hilfe eines Gleichgewichtsmodells – unter ähnlichen Einschränkungen wie oben für die COIN-Studie genannt - für eine Reihe von Klimawirkungen für das nördliche Zentraleuropa (Deutschland, Österreich, Schweiz) Klimaschäden in der Größenordnung von 0,2% des BIP bei einem Temperaturanstieg um 2°C, um knapp 0,5% bei 3°C und um knapp 1% bei 4°C. Die Klimaschäden nehmen also nicht-linear mit dem Temperaturanstieg zu: bei einem Anstieg um 1°C verdoppeln sich jeweils die Schadenskosten. Endogene Klimaanpassung reduziert die Schadenskosten um 80 bis 85%.

3.1.4 Quantitative Illustration makroökonomischer Folgewirkungen: Multiplikatoranalyse

Die Auswertung der Literatur im vorhergehenden Abschnitt hat nur in wenigen Fällen Hinweise auf Folgewirkungen ergeben, die spezifisch für die jeweiligen Klimawirkungsbereiche sind. Jedoch entfalten Klimaschäden, Maßnahmen zur Beseitigung von Klimaschäden und zur Anpassung an den Klimawandel als generelle Impulse etwa in Form von zusätzlichen Investitionen oder Produktivitätsänderungen immer Folgewirkungen, die in gesamtwirtschaftlicher Betrachtung zunächst unabhängig davon sind, ob sie durch Klimawandel und -politik oder andere Politikanliegen motiviert sind. Spezifische Folgewirkungen können sich dann dadurch ergeben, dass je nach Politik- oder auch Klimawirkungsbereich unterschiedliche Wirtschaftssektoren betroffen sind und unterschiedliche Kombinationen von Impulsen zum Tragen kommen.

-Alternativszenario bezeichnet. Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen werden mit denen des Referenzszenarios verglichen, indem die Differenzen zwischen Sensitivitätsrechnungen und Referenzszenario den Differenzen zwischen dem Basisalternativszenario und Referenzszenario gegenübergestellt werden. Auf diese Weise werden die Wirkungen der in den Sensitivitätsrechnungen zusätzlich getroffenen Annahmen deutlich.

Die gesamtwirtschaftlichen Simulationen sind mit der Version v1.15a des NiGEM-Modells durchgeführt worden. NiGEM (National Institute Global Economic Model)⁸⁴ ist ein ökonometrisch geschätztes Modell, d.h. die Parameter der Verhaltensgleichungen sind mit statistischen Methoden aus Vergangenheitsdaten geschätzt. Es handelt sich um ein Mehrländermodell mit ausführlicher Repräsentation der meisten OECD-Länder, darunter Deutschland, und einer gröberen Abbildung weiterer Länder oder Ländergruppen. Internationale Handels- und Finanzströme werden konsistent abgebildet. Nach externen Schocks kehren die Modellvariablen allmählich zu ihren Gleichgewichtswerten zurück.⁸⁵ Bei Simulationen mit NiGEM können bestimmte Annahmen, zum Beispiel über die Erwartungsbildung der Wirtschaftssubjekte⁸⁶, die Geldpolitik oder die Fiskalpolitik verändert werden, außerdem können im Modell abgebildete Wirkungszusammenhänge ab- oder angeschaltet werden.⁸⁷ Das geschieht für einzelne Wirkungszusammenhänge in den Sensitivitätsrechnungen. Bei der Interpretation der Modellergebnisse sind die jeweils getroffenen Annahmen zu berücksichtigen.⁸⁸

3.1.4.2 Höhere Investitionen

Vielfach sind zur Beseitigung von Klimaschäden und zur Anpassung an den Klimawandel Investitionen erforderlich. Das können öffentliche Investitionen sein, wie etwa bei der Wiederherstellung zerstörter Verkehrsinfrastruktur, oder Wohnungsbau- oder Unternehmensinvestitionen bei Vorsorgemaßnahmen zum Hochwasserschutz.

3.1.4.2.1 Höhere öffentliche Investitionen

Werden die realen öffentlichen Investitionen gegenüber dem Referenzszenario dauerhaft um 1 Mrd. Euro erhöht, ergibt sich ein höheres reales Bruttoinlandsprodukt (Tabelle 29). Angenommen ist dabei, dass es nicht zu höheren Löhnen kommt.^{89,90} Kurz- und mittelfristig beträgt der BIP-Multiplikator etwa 0,5, längerfristig steigt er auf über 2 an. Kurzfristig steigt die Beschäftigung um 6.000 Personen, längerfristig - entsprechend dem stärkeren Anstieg des BIP - um 10.000 Personen. Kurzfristig entspricht die prozentuale Erhöhung der Beschäftigung der des realen BIP, es gibt also (noch) keine Produktivitätseffekte. Mittel- und längerfristig bleibt der prozentuale Beschäftigungsanstieg hinter dem Anstieg des realen BIP zurück, die Produktivität (pro Beschäftigtem⁹¹) steigt in Folge der erhöhten Produktion.

⁸⁴ Siehe NiSER 2016. Siehe auch Barell u.a. 2012.

⁸⁵ Das wird durch die Spezifikation der Verhaltensgleichungen als Fehlerkorrekturmodelle erreicht.

⁸⁶ Per default sind Erwartungen vorwärtsgerichtet (forward looking expectations), das Modell erlaubt aber auch die Annahme vergangenheitsorientierter Erwartungen.

⁸⁷ Durch die Exo- bzw. Endogenisierung von Modellvariablen.

⁸⁸ „Hence there is no such thing as ‚the NiGEM results suggest‘ but rather, under these assumptions the NiGEM simulation results suggest.“ Vgl. NiSER 2016.

⁸⁹ Technisch wird der Lohnsatz exogenisiert; im Alternativszenario wird für diese Variable also derselbe Wert verwendet wie im Referenzszenario.

⁹⁰ Eine Erhöhung der Investitionen bei endogenem Lohnsatz wird unten in diesem Abschnitt diskutiert.

⁹¹ Dabei steigt auch die durchschnittliche Arbeitszeit geringfügig an.

Tabelle 29: Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario

	Öffentliche Investitionen real Mrd. Euro2010	Brutto-inlands-produkt real Mrd.Euro2010	Beschäftigte Arbeit-nehmer Tsd. Personen
1. Jahr	1,00	0,46	6,26
5. Jahr	1,00	0,54	5,94
15. Jahr	1,00	2,13	10,36
	in %	in %	in %
1. Jahr	1,683	0,017	0,017
5. Jahr	1,593	0,018	0,016
15. Jahr	1,456	0,064	0,030

Veränderungen Basis-Alternativ- gegenüber dem Referenzszenario.

© J. Blazejczak

Das verwendete Modell weist eine hohe Eigendynamik der öffentlichen Investitionen auf, die im Basis-Alternativszenario nicht berücksichtigt wurde. Darin spiegelt sich, dass in der Vergangenheit öffentliche Investitionen häufig mit Folgeinvestitionen verbunden waren. Werden Eigen-Rückwirkungen der Investitionen zugelassen, führt ein dauerhafter Impuls bei den öffentlichen Investitionen von 1 Mrd. Euro2010 pro Jahr schon kurzfristig zu einer weiteren Erhöhung der öffentlichen Investitionen um fast 1 Mrd. Euro2010, langfristig sogar zu einer Erhöhung um insgesamt mehr als 4 Mrd. Euro2010 (Tabelle 30). Die Veränderungen von Sozialprodukt und Beschäftigung sind im Vergleich zum Fall eines exogenen Investitionsimpulses (Tabelle 29) annähernd proportional zu der stärkeren Veränderung der öffentlichen Investitionen.

Tabelle 30: Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario ,Endogene öffentliche Investitionen‘

	Öffentliche Investitionen real Mrd. Euro2010	Brutto-inlands-produkt real Mrd.Euro2010	Beschäftigte Arbeit-nehmer Tsd. Personen
1. Jahr	1,98	0,96	13,69
5. Jahr	4,02	1,94	22,85
15. Jahr	4,18	8,16	38,58

Veränderungen Alternativszenario ,Endogene öffentliche Investitionen‘ gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

Bei den bisher vorgestellten Simulationen sind rationale (modellkonsistente⁹²) Erwartungen angenommen worden.⁹³ Nimmt man stattdessen adaptive – also nur an der Vergangenheitsentwicklung orientierte – Erwartungen an, fallen die Sozialproduktmultiplikatoren und dann auch die Beschäftigungswirkungen deutlich niedriger aus (Tabelle 31).

Tabelle 31: Höhere öffentliche Investitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – – Alternativszenario ‚Adaptive Erwartungen‘

	Brutto- inlands- produkt real Mrd. Euro2010	Beschäftigte Arbeit- nehmer Tsd. Personen
1. Jahr	0,39	4,11
5. Jahr	0,42	4,37
15. Jahr	1,84	7,86

Veränderungen Alternativszenario ‚Endogene öffentliche Investitionen‘ gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

3.1.4.2.2 Höhere Wohnungsbauinvestitionen

Dauerhaft um 1 Mrd. Euro höhere Wohnungsbauinvestitionen als im Referenzszenario (ohne Berücksichtigung von Rückwirkungen auf diese Größe) führen ebenfalls zu höherer Produktion und Beschäftigung (Tabelle 32), allerdings sind die langfristigen Wirkungen deutlich geringer als bei einer vergleichbaren Erhöhung der öffentlichen Investitionen (vgl. Tabelle 29). Die Beschäftigung nimmt mittel- und langfristig prozentual stärker zu als das reale Bruttoinlandsprodukt: anders als bei öffentlichen Investitionen dämpfen höhere Wohnungsbauinvestitionen also die Produktivität.

⁹² Siehe Kromphardt 2014.

⁹³ Technisch: das Modell wird in einem iterativen Prozess gelöst und die Lösungswerte werden als erwartete Werte eingesetzt, bis Konvergenz erreicht ist.

Tabelle 32: Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Basis-Alternativszenario

	Wohnungsbau- investitionen real	Brutto- inlands- produkt real	Beschäftigte Arbeit-nehmer
	Mrd. Euro2010	Mrd.Euro2010	Tsd. Personen
1. Jahr	1,00	0,46	5,55
5. Jahr	1,00	0,44	5,80
15. Jahr	1,00	0,32	4,16
	in %	in %	in %
1. Jahr	0,626	0,017	0,015
5. Jahr	0,532	0,015	0,016
15. Jahr	0,626	0,010	0,012

Veränderungen Basis-Alternativ- gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

Eigen-Rückwirkungen auf die Wohnungsbauinvestitionen sind gering (Tabelle 33), deshalb ändern sich die Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung gegenüber dem Fall exogener Wohnungsbauinvestitionen (Tabelle 31) nur wenig.

Tabelle 33: Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario ,Endogene Wohnungsbauinvestitionen‘

	Wohnungsbau- investitionen real	Brutto- inlands- produkt real	Beschäftigte Arbeit-nehmer
	Mrd. Euro2010	Mrd.Euro2010	Tsd. Personen
1. Jahr	1,00	0,48	5,69
5. Jahr	1,00	0,44	5,73
15. Jahr	1,00	0,32	3,82

Veränderungen Alternativszenario ,Endogene Wohnungsbauinvestitionen‘ gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

Tabelle 34 zeigt, dass die Effekte, die das Modell ausweist, annähernd proportional zu dem Betrag der Erhöhung der Wohnungsbauinvestitionen sind. Bei einem Impuls von dauerhaft 10 Mrd. Euro2010 zusätzlicher Wohnungsbauinvestitionen pro Jahr liegen die Sozialproduktmultiplikatoren und die Beschäftigungswirkungen unter sonst gleichen Bedingungen etwa in der 10-fachen Größenordnung derjenigen bei einem Impuls von 1 Mrd. Euro2010 pro Jahr (Tabelle 32).

Tabelle 34: Höhere Wohnungsbauinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario ‚Verstärkter Impuls‘

	Wohnungsbau- investitionen real	Brutto- inlands- produkt real	Beschäftigte Arbeit-nehmer
	Mrd. Euro2010	Mrd.Euro2010	Tsd. Personen
1. Jahr	10,00	4,60	55,34
5. Jahr	10,00	4,45	58,08
15. Jahr	10,00	3,65	46,35

Veränderungen Alternativszenario ‚Verstärkter Impuls‘ gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

3.1.4.2.3 Höhere Unternehmensinvestitionen

Eine dauerhafte Erhöhung der Unternehmensinvestitionen um 1 Mrd. Euro2010 pro Jahr zeigt ähnliche Auswirkungen auf das reale Bruttoinlandsprodukt und die Beschäftigung wie eine gleich große Erhöhung der Wohnungsbauinvestitionen (Tabelle 35 und Tabelle 32). Kurz- und mittelfristig liegen die Effekte in einer ähnlichen Größenordnung, langfristig sind sie im Fall der Unternehmensinvestitionen etwas geringer. Dies erklärt sich durch höhere Konsumausgaben im Fall zusätzlicher Wohnungsbauinvestitionen, weil die Ausweitung des Immobilienvermögens in diesem Szenario als Bestimmungsgrund des privaten Verbrauchs eine Rolle spielt.

Tabelle 35: Höhere Unternehmensinvestitionen – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario

	Unternehmens- investitionen real	Brutto- inlands- produkt real	Beschäftigte Arbeit-nehmer
	Mrd. Euro2010	Mrd.Euro2010	Tsd. Personen
1. Jahr	1,00	0,43	5,23
5. Jahr	1,00	0,40	5,26
15. Jahr	1,00	0,24	3,25
	in %	in %	in %
1. Jahr	0,294	0,016	0,014
5. Jahr	0,282	0,013	0,014
15. Jahr	0,325	0,007	0,009

Veränderungen Basis-Alternativ- gegenüber dem Referenzszenario

© J. Blazejczak

3.1.4.3 Technischer Fortschritt

Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel können den Anstieg Arbeitsproduktivität dämpfen. Das gilt etwa bei zusätzlichen Hitzebelastungen, aber auch, wenn

es durch Anpassungsmaßnahmen zu einer Verdrängung anderer, produktivitätssteigernder Investitionen kommt.

Eine dauerhafte Senkung der Rate des arbeitssparenden Technischen Fortschritts um 1% (ohne Berücksichtigung eventueller Rückwirkungen auf diese Variable, siehe dazu unten) führt zu einem niedrigeren realen Bruttoinlandsprodukt (Tabelle 36). Anfangs ist der Effekt gering, er verstärkt sich aber mittelfristig (auf -0,5%) und langfristig (auf -0,8%). Die Wirkung auf die Beschäftigung ist nur kurzfristig bedeutend: im ersten Jahr steigt sie um fast 0,5%; dem negativen Produktivitätseffekt steht (noch) kein negativer Wachstumseffekt gegenüber. Später sind die Beschäftigungswirkungen teils negativ, teils positiv, aber immer klein.

Tabelle 36: Niedrigere Rate des Technischen Fortschritts – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung - Basis-Alternativszenario

	Rate des Technischen Fortschritts	Bruttoinlandsprodukt real	Beschäftigte Arbeitnehmer
1. Jahr	-1,00	-0,08	0,45
5. Jahr	-1,00	-0,51	-0,01
15. Jahr	-1,00	-0,84	0,00

Veränderungen Basis-Alternativszenario gegenüber dem Referenzszenario in %

© J. Blazejczak

Die niedrigere Produktion dämpft den Produktivitätsanstieg. Wird diese Rückwirkung berücksichtigt, kommt es mittelfristig zu einem Produktivitätsrückgang gegenüber dem Referenzszenario, der wesentlich größer (gut -4%) ist als der in das Modell eingespeiste dauerhafte Impuls von -1% (Tabelle 37). Entsprechend dem stärkeren Produktivitätsrückgang sinkt auch das reale Bruttoinlandsprodukt gegenüber dem Referenzszenario deutlich stärker. Die Beschäftigung ist anfangs höher, längerfristig nähert sie sich dem Wert des Referenzszenarios an.

Tabelle 37: Niedrigere Rate des Technischen Fortschritts – Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung – Alternativszenario ‚Endogener Technischer Fortschritt‘

	Rate des Technischen Fortschritts	Bruttoinlandsprodukt real	Beschäftigte Arbeitnehmer
1. Jahr	-0,89	-0,23	0,43
5. Jahr	-4,15	-1,54	0,21
15. Jahr	-4,31	-3,78	-0,01

Veränderungen Alternativszenario ‚Endogener Technischer Fortschritt‘ gegenüber dem Referenzszenario in %

© J. Blazejczak

3.1.4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich für die makroökonomischen Folgewirkungen zusätzlicher Investitionen wie sie bei Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen anfallen festhalten:

- ▶ Die indirekten, über ökonomische Interdependenzen – etwa zwischen Produktion, Einkommen und Konsumausgaben - ausgelösten Wirkungen sind bedeutend.
- ▶ Sie dämpfen im Allgemeinen die Auswirkungen zusätzlicher Investitionen auf das Bruttoinlandsprodukt (die BIP-Multiplikatoren sind i.A. kleiner als Eins), die Dämpfungseffekte sind aber nicht stärker als der ursprüngliche Impuls (die BIP-Multiplikatoren sind positiv).
- ▶ Wenn die zusätzlichen Investitionen mittel- und längerfristig zu deutlichen Produktivitätssteigerungen führen, kann der ursprüngliche Impuls verstärkt werden (die BIP-Multiplikatoren sind dann größer als Eins).
- ▶ Die Beschäftigungseffekte sind (in %) kleiner als die BIP-Wirkungen, weil die höhere Produktion und Kapazitätsauslastung zu einer höheren Arbeitsproduktivität führt.
- ▶ Die Höhe der Folgewirkungen hängt stark von Annahmen über wirtschaftliche Wirkungsmechanismen ab. So sind etwa höhere BIP-Multiplikatoren zu erwarten, wenn es eine Eigendynamik der zusätzlichen Investitionengibt, die zu weiteren Zusatzinvestitionen führt, und die Folgewirkungen sind stärker, wenn die Akteure ihre Entscheidungen stärker an Zukunftserwartungen statt an Vergangenheitsentwicklungen ausrichten.
- ▶ Die Folgewirkungen können sich nach der Art der zusätzlichen Investitionen unterscheiden; im verwendeten Modell sind BIP-Multiplikatoren zusätzlicher öffentlicher Investitionen aufgrund von Produktivitätseffekten besonders hoch.

Produktivitätseinbußen wie sie etwa infolge zunehmender Hitze zu erwarten sind,

- ▶ führen mittel- und längerfristig zu Wachstumseinbußen,
- ▶ dabei können die Produktivitätseinbußen sich verstärken.
- ▶ Die Auswirkungen auf die Beschäftigung sind gering, weil sich die Wirkungen geringerer Produktion und geringerer Produktivität annähernd ausgleichen.

3.1.5 Quantitative Illustration sektoraler Interdependenzen: Input-Output-Analyse

3.1.5.1 Zur Methode

Die quantitative Untersuchung der sektoralen Interdependenzen einer Volkswirtschaft erfordert einen konsistenten Analyse- und Datenrahmen. Die Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes stellt die Verflechtung der Sektoren der deutschen Volkswirtschaft in abgestimmter Form im Kontext der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) dar und stellt damit einen geeigneten Analyserahmen für die Untersuchung der Verflechtung der Sektoren zur Verfügung (Stäglich, Edler, Schintke, 1992). Die Ergebnisse der Input-Output-Rechnung geben einen detaillierten Einblick in die Güterströme und Produktionsverflechtungen in der Volkswirtschaft sowie mit der übrigen Welt. Die Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes werden regelmäßig in der Fachserie 18, Reihe 2 Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Input-Output-Rechnung, veröffentlicht. In den Tabellen werden für jeden Produktionsbereich zum einen die Lieferungen von Vorleistungen an die anderen Produktionsbereiche ausgewiesen, so dass die gesamte Vorleistungsverflechtung der

Produktionsbereiche der Volkswirtschaft quantitativ abgebildet ist. Bei der Vorleistungsverflechtung wird zusätzlich zwischen Lieferungen aus inländischer Produktion und Lieferungen aus ausländischer Produktion (Vorleistungsimporte) unterschieden. Zum anderen werden die Lieferungen der Produktionsbereiche an die letzte Verwendung von Gütern (Endnachfrage) dargestellt. Zur letzten Verwendung von Gütern gehören zum Beispiel der Private Verbrauch, Investitionen (unterteilt nach Ausrüstungen und sonstigen Anlagen sowie Bauten) und die Ausfuhr von Gütern. Es wird in Anlehnung an die Wirtschaftszweigsystematik WZ 2008 zwischen insgesamt 73 Produktionsbereichen unterschieden.⁹⁴ Die Input-Output-Rechnung folgt den konzeptionellen Änderungen und den Revisionen in der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (Räth, Braakmann 2014).

Nach den Konzepten der Input-Output-Rechnung wird der gesamte Absatz eines Produktionsbereichs als Bruttoproduktion⁹⁵ bezeichnet. Die Bruttoproduktion umfasst nicht nur die direkte (unmittelbare) Produktion von Gütern im eigenen Produktionsbereich, sondern auch die Produktion auf allen vorgelagerten Produktionsstufen, die als Vorleistungen in den Produktionsprozess eingehen (indirekte Produktion).

Mit Hilfe des offenen statischen Mengenmodells der Input-Output-Analyse (Holub, Schnabl 1994) kann modellmäßig bestimmt werden, wieviel Güter in welchen Produktionsbereichen insgesamt, also direkt und indirekt, produziert werden müssen, damit ein bestimmtes Güterbündel an die Endnachfrage geliefert werden kann. Es kann also modellmäßig bestimmt werden, welche Güter direkt und indirekt (in den vorgelagerten Produktionsbereichen) produziert werden müssen, damit zum Beispiel Investitionen in Höhe 1 Milliarde Euro in Bauten investiert werden können. Solche Abschätzungen werden in den folgenden Abschnitten für unterschiedliche Investitionsmaßnahmen zur Beseitigung von klimabedingten Schäden vorgenommen.

Die Anwendung des statischen offenen Mengenmodells der Input-Output-Analyse ist mit einer Reihe von modellspezifischen Annahmen und Restriktionen verbunden. In der Input-Output-Analyse wird angenommen, dass in einer Analyseperiode (1 Jahr) die in der jeweiligen Tabelle abgebildeten Produktionsbeziehungen fixiert sind (Leontief-Produktionsfunktion), d. h. in einem Analysejahr bleiben die Einsatzverhältnisse der Produktionsfaktoren unverändert. Eine preisinduzierte Substitution zwischen den Produktionsfaktoren ist nicht modelliert. Obwohl die Gliederungstiefe der Input-Output-Tabelle mit 73 Produktionsbereichen tief und detailliert ist, gibt es in der Volkswirtschaft tatsächlich eine viel größere Zahl von Produktionsprozessen. In der Input-Output-Rechnung werden diese (nach dem Schwerpunktprinzip) den 73 Produktionsbereichen zugeordnet, für die dann durchschnittliche, sektorspezifische Relationen gelten. So wird zum Beispiel für unterschiedliche Produkte des Maschinenbaus eine einheitliche Produktionsstruktur (die durchschnittliche des Produktionsbereichs Maschinenbau) angenommen. Zur Illustration der sektoralen Interdependenzen wird ein statisches Modell genutzt, dynamische, über mehrere Zeitperioden wirksame Zusammenhänge bleiben bei diesem Modelltyp ausgeblendet.

Über die modellmäßig bestimmte Bruttoproduktion kann mit Hilfe von sektoralen Arbeitskoeffizienten⁹⁶ die notwendige Beschäftigung in Personenjahren errechnet werden, die notwendig ist, um ein bestimmtes Güterbündel für die Endnachfrage bereitzustellen. Wie bei der

⁹⁴ In der Input-Output-Rechnung sind die Produktionsbereiche nach der Classification on Products by Activity (CPA) gegliedert, die der WZ 2008 entspricht. Die Abgrenzung der Produktionsbereiche entspricht derjenigen für Gütergruppen.

⁹⁵ Die Bruttoproduktion eines Produktionsbereichs entspricht konzeptionell dem Umsatz eines Unternehmens in einzelwirtschaftlicher Betrachtungsweise.

⁹⁶ Die Arbeitskoeffizienten liegen in einer Gliederungstiefe von 73 Produktionsbereichen vor. Sie geben für jeden Produktionsbereich an, welcher Arbeitsinput jeweils notwendig ist, um Güter im Wert von einer Million Euro zu produzieren.

Bruttoproduktion kann bei der errechneten Beschäftigung zwischen direkter und indirekter Beschäftigung unterschieden werden, die addiert die Bruttobeschäftigung ergeben. Die Ableitung der Beschäftigungseffekte steht am Ende der untersuchten Wirkungszusammenhänge zwischen Investitionen (Endnachfrage), Bruttoproduktion und Beschäftigung. Im Ergebnis ergeben sich für unterschiedliche Investitionen gleicher Dimension in Euro unterschiedliche Beschäftigungswirkungen, da in den Produktionsbereichen unterschiedlich arbeitsintensiv produziert wird. Entscheidend für den Beschäftigungseffekt eines Nachfrageimpulses ist also die damit verbundene Güterstruktur, durch die unterschiedliche Produktionsbereiche mit unterschiedlichen Arbeitsintensitäten angestoßen werden.⁹⁷

3.1.5.2 Schäden an Schieneninfrastruktur

Klimabedingte Schäden an der Schieneninfrastruktur entfalten unterschiedliche Folgewirkungen für die Branchen einer Volkswirtschaft. Schäden an der Schieneninfrastruktur können zum Beispiel dazu führen, dass diese zeitweise nicht genutzt werden kann und es somit zu einem Ausfall von Eisenbahndienstleistungen kommen kann. Hiervon sind die Branchen der Volkswirtschaft ganz unterschiedlich betroffen, je nachdem in welchem Umfang sie solche Dienstleistungen in Anspruch nehmen. Auch von der Beseitigung von klimabedingten Schäden an der Schieneninfrastruktur, also der Wiederherstellung z.B. durch Gleisbau, werden die Branchen der Volkswirtschaft in unterschiedlichem Umfang beeinflusst.

3.1.5.2.1 Branchen, die direkt und indirekt stark von inländischen Eisenbahndienstleistungen abhängig sind

Die wirtschaftliche Bedeutung von Eisenbahndienstleistungen für andere Wirtschaftssektoren kann mit Hilfe folgender Kennziffern der Input-Output-Rechnung verdeutlicht werden⁹⁸:

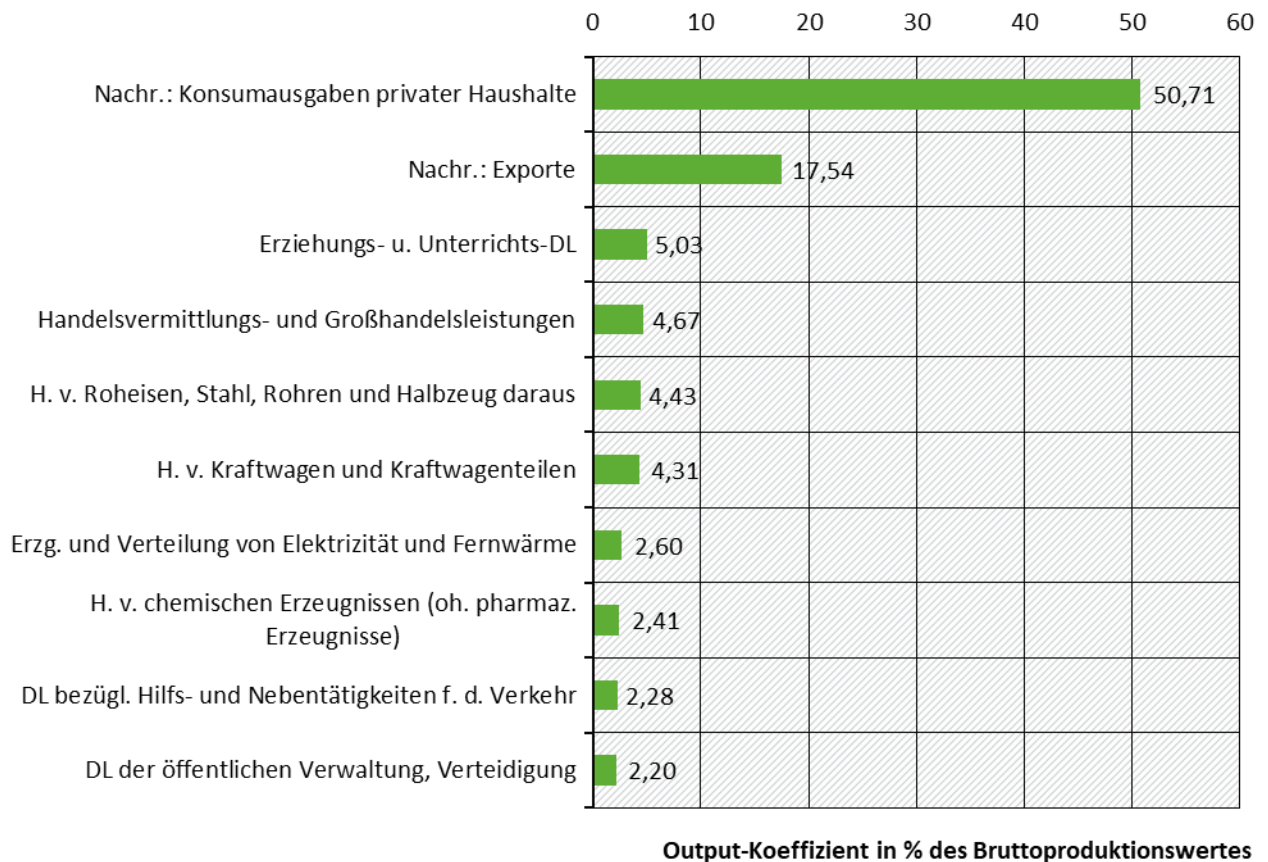
- ▶ Output-Koeffizienten geben an, welche Branchen oder Endnachfrager (z.B. Konsumausgaben privater Haushalte, Staatsverbrauch, Auslandsnachfrage) welchen Anteil der inländischen Eisenbahndienstleistungen in Anspruch nehmen;
- ▶ Input-Koeffizienten zeigen, zu welchem Anteil ihres Umsatzes eine Branche inländische Eisenbahndienstleistungen bezieht;
- ▶ Inverse Koeffizienten verdeutlichen, wie viele (Geld-)Einheiten inländischer Eisenbahndienstleistungen direkt und indirekt benötigt werden, damit eine Branche eine (Geld-)Einheit an Gütern für die Endnachfrage bereitstellen kann.

⁹⁷ Andere Faktoren spielen auch eine Rolle, so werden in unterschiedlichen Produktionsbereichen in unterschiedlichem Umfang importierte Vorleistungen eingesetzt. Wenn der Anteil importierter Vorleistungen hoch ist, fällt ein höherer Anteil der angestoßenen Bruttoproduktion und indirekten Beschäftigung im Ausland und nicht in Deutschland an.

⁹⁸ Der Sektor Eisenbahndienstleistungen ist in der Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes zuletzt für das Jahr 2007 separat ausgewiesen. In jüngeren Tabellen sind die Eisenbahndienstleistungen mit anderen Verkehrsdienstleistungen zu Landverkehrsdienstleistungen (und Transportleistungen in Rohrfernleitungen) zusammengefasst.

Abbildung 47 zeigt, die Inanspruchnahme inländischer Eisenbahndienstleistungen für die Endnachfrage nach Komponenten und für Vorleistungen nach inländischen Wirtschaftsbereichen. Die starke Inanspruchnahme durch das Erziehungs- und Unterrichtswesen repräsentiert den Schülerverkehr.

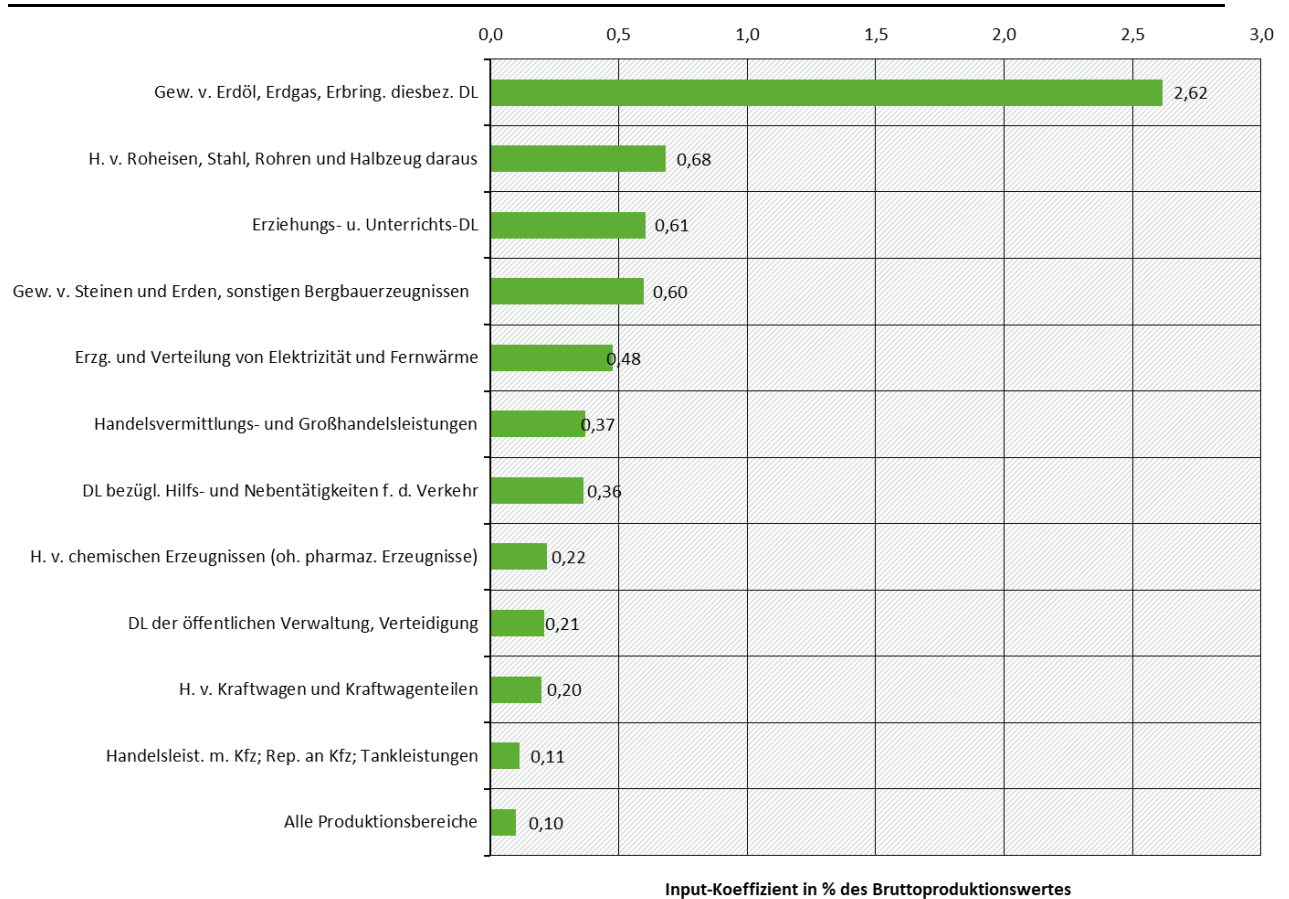
Abbildung 47: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Berechnungen: Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes; J. Blazejczak.

Abbildung 48 zeigt, für welche Wirtschaftsbereiche Eisenbahndienstleistungen einen besonders großen Anteil ihrer Vorleistungen ausmachen, welche Sektoren also auf besonders stark auf Eisenbahndienstleistungen angewiesen sind. Sowohl bei der Gewinnung von Erdöl, Erdgas wie auch bei der Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus spielen Eisenbahndienstleistungen als Vorleistungen eine wichtige Rolle, in beiden Branchen werden die als Vorleistungen eingesetzten Waren in großem Umfang auf der Schiene transportiert (z. B. Eisenerze oder Hüttenkoks). Der Schülerverkehr per Schiene wird – wie bereits erwähnt - als Vorleistung des Erziehungs- und Unterrichtswesens verbucht. Im den danach folgenden Bereichen spielt der Transport von Gütern als Massenfracht ebenfalls eine wichtige Rolle.

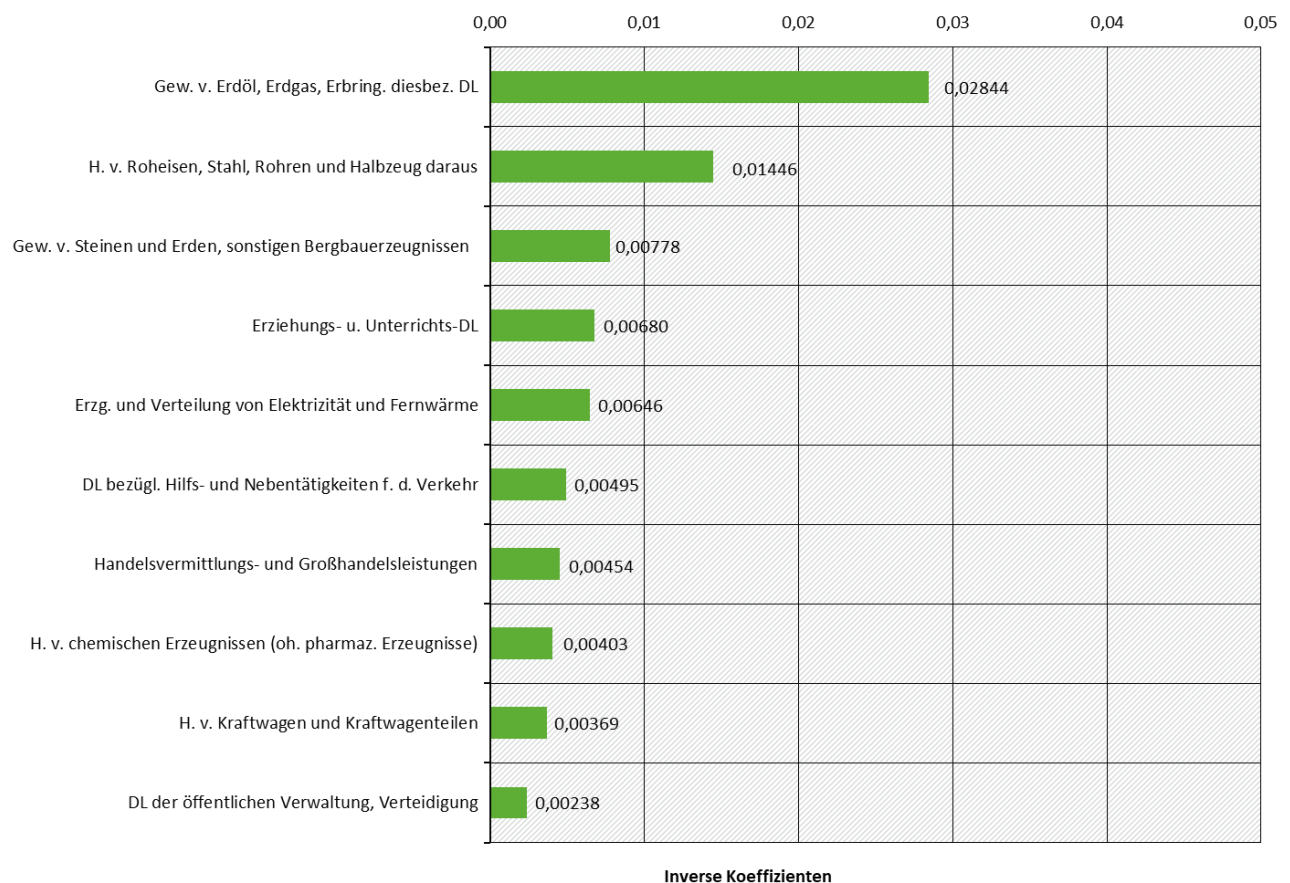
Abbildung 48: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Berechnungen: Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes.

Abbildung 49 zeigt, welche Wirtschaftsbereiche direkt und über ihre Vorleistungsbezüge indirekt Eisenbahndienstleistungen in Anspruch nehmen, um die Endnachfrage nach einer Einheit ihrer Produktion zu bedienen. Es sind die zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten inversen Koeffizienten dargestellt. Gegenüber der direkten Inanspruchnahme von Eisenbahndienstleistungen gibt es nur geringe Abweichungen in der Reihenfolge.

Abbildung 49: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten inversen Koeffizienten (ohne den intrasektoralen inversen Koeffizienten) für inländische Eisenbahndienstleistungen 2007



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Berechnungen: Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes.

Als Ergebnis lässt sich festhalten:

- ▶ Vor allem Energie- und Grundstoffindustrien sowie der Handel, daneben die (exportintensiven) Chemie- und die Autoindustrien sind auf Eisenbahndienstleistungen angewiesen.
- ▶ Daneben spielen Eisenbahndienstleistungen für den Schülertransport und für Bereiche der öffentlichen Verwaltung eine wichtige Rolle.
- ▶ In erheblichem Umfang werden Eisenbahndienstleistungen auch von privaten Haushalten und ausländischen Kunden in Anspruch genommen.
- ▶ Die zusätzliche Berücksichtigung der indirekten Inanspruchnahme von Eisenbahndienstleistungen ändert das Bild nicht.

3.1.5.2.2 Direkte und indirekte Produktions- und Beschäftigungswirkungen nach Branchen für 1 Mrd. Euro Gleisbauinvestitionen

Die Wiederherstellung von klimabedingten Schäden an der Schieneninfrastruktur erfordert entsprechende Investitionen in den Gleisbau. Zur Durchführung von Gleisbauinvestitionen ist ein Bündel unterschiedlicher (technischer) Teilmaßnahmen notwendig, die teilweise auch den Einsatz anderer Investitionsgüter erfordern. Studien zur Substanzerhaltung der Verkehrsinfrastruktur und der damit verbundenen notwendigen Ersatzinvestitionen liefern wichtige Informationen über die Struktur der durchzuführenden Investitionen (Kunert, Link, 2001; Kunert, Link 2013). Folgende Teilmaßnahmen sind bei der Wiederherstellung der Schieneninfrastruktur von Bedeutung:

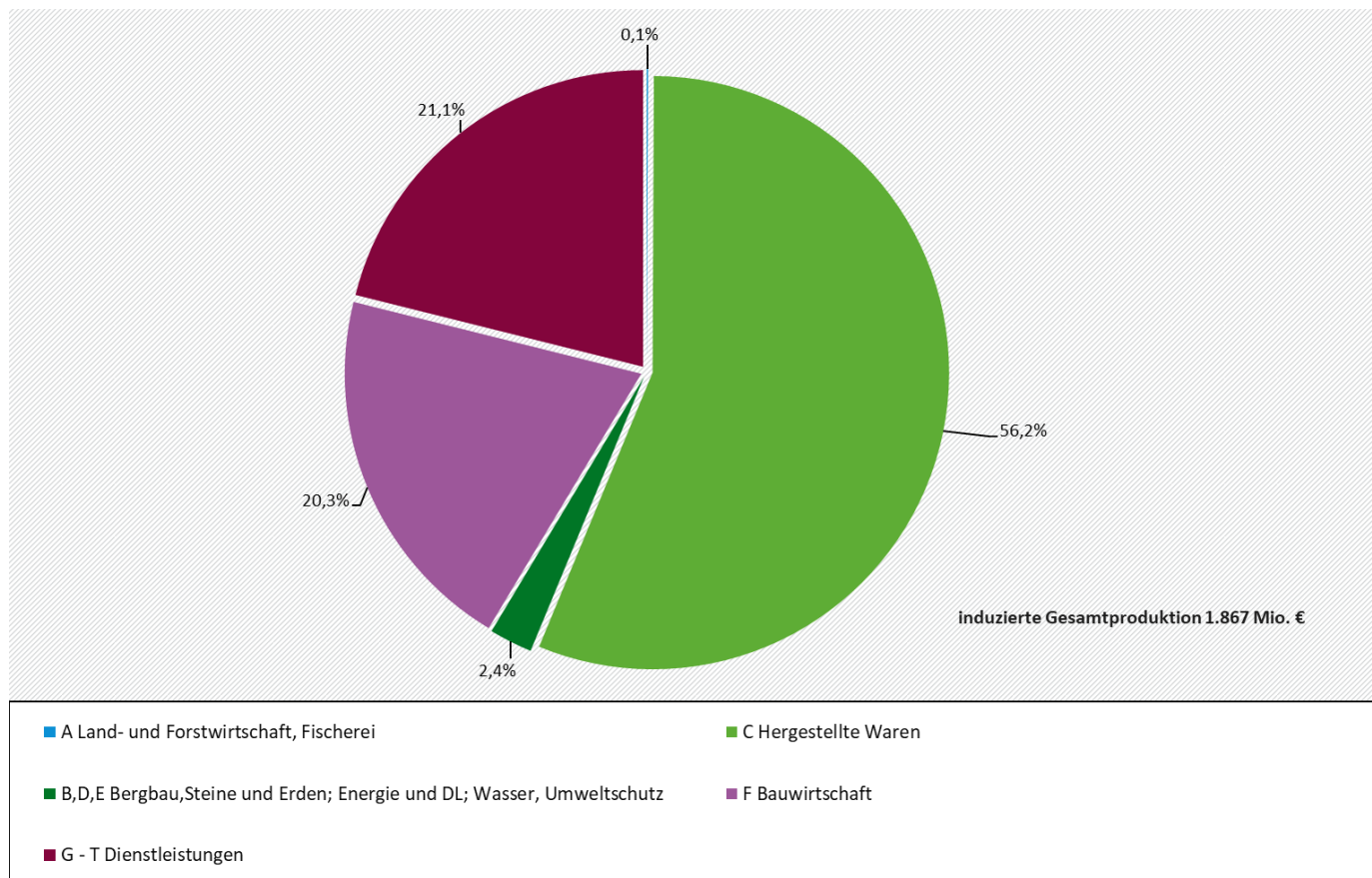
- ▶ Erdbau
- ▶ Kunstbauten
- ▶ Oberbau (Gleise)
- ▶ Ausrüstungen (Strecke)
- ▶ Hochbauten
- ▶ Maschinen, Ausrüstungen
- ▶ Schienenfahrzeuge
- ▶ Straßenfahrzeuge

Aus diesen Teilmaßnahmen und ihrer quantitativen Bedeutung an den Gesamtmaßnahmen lässt sich eine Güterstruktur für Gleisbauinvestitionen in Abgrenzung der Input-Output-Rechnung ableiten.

Mit diesen Informationen lässt sich mit dem statischen offenen Mengenmodell der Input-Output-Analyse berechnen, in welchem Umfang und in welchen Wirtschaftszweigen Produktionskapazitäten in Anspruch genommen werden, wenn 1 Mrd. Euro Gleisbauinvestitionen getätigt werden. Über sektorale Arbeitskoeffizienten lässt sich bestimmen, wieviel Personen benötigt werden, um diese Güter und Dienstleistungen zu produzieren.

Ein Investitionsimpuls in Höhe von 1 Mrd. € für die Wiederherstellung von Schieneninfrastruktur löst in der Volkswirtschaft insgesamt eine Bruttoproduktion von knapp 1,9 Mrd. € aus; die in vorgelagerten Produktionsbereichen (Vorleistungen) angestoßene indirekte Bruttoproduktion ist mit knapp 0,9 Mrd. also fast so bedeutsam (46,4% der gesamten Produktion) wie die Bruttoproduktion in den Produktionsbereichen, die die benötigten Investitionsgüter für den Gleisbau direkt liefern. Von der gesamten Bruttoproduktion entfallen 56,2% auf die Produktion von hergestellten Waren, 21,1% auf die Bereitstellung von Dienstleistungen und 20,3% auf die Bauwirtschaft (vgl. Abbildung 50).

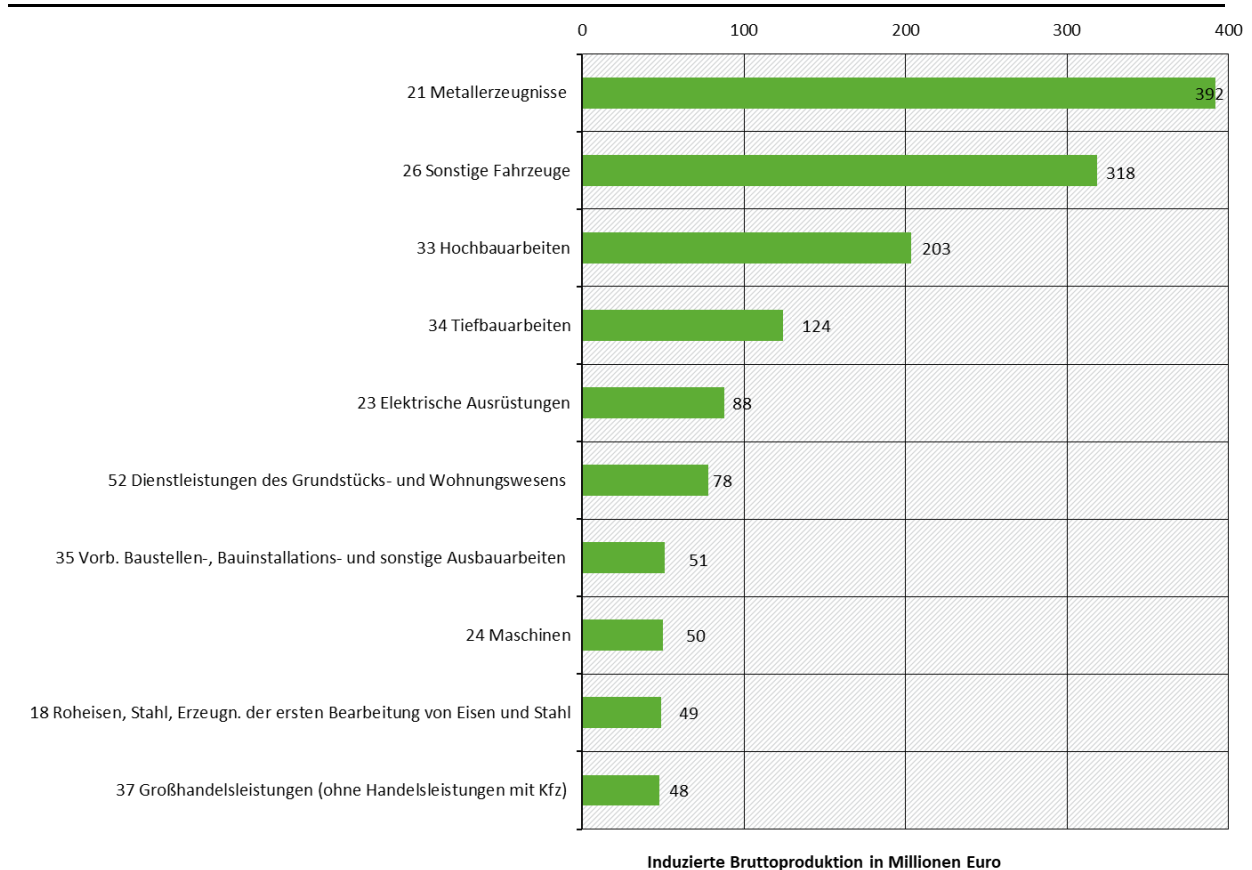
Abbildung 50: Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau



© eigene Darstellung, J. Blazejczak.

Betrachtet man in tieferer sektoraler Gliederung (73 Produktionsbereiche der Input-Output-Rechnung), welche Produktionsbereiche von der Wiederherstellung der Schieneninfrastruktur am stärksten profitieren (Abbildung 51), so zeigt sich, dass die größte Bruttoproduktion im Bereich Metallerzeugnisse anfällt (392 Mio. €). Danach folgt der Produktionsbereich Sonstige Fahrzeuge, der auch Schienenfahrzeuge umfasst, mit 318 Mio. €. Die Schienenfahrzeuge werden als Investitionsgüter bei den durchzuführenden Gleisbauarbeiten benötigt. An dritter und vierter Stelle folgen die Teilbereiche Hochbauarbeiten und Tiefbauarbeiten der Bauwirtschaft. Der fünftwichtigste Bereich ist die Produktion von elektrischen Anlagen.

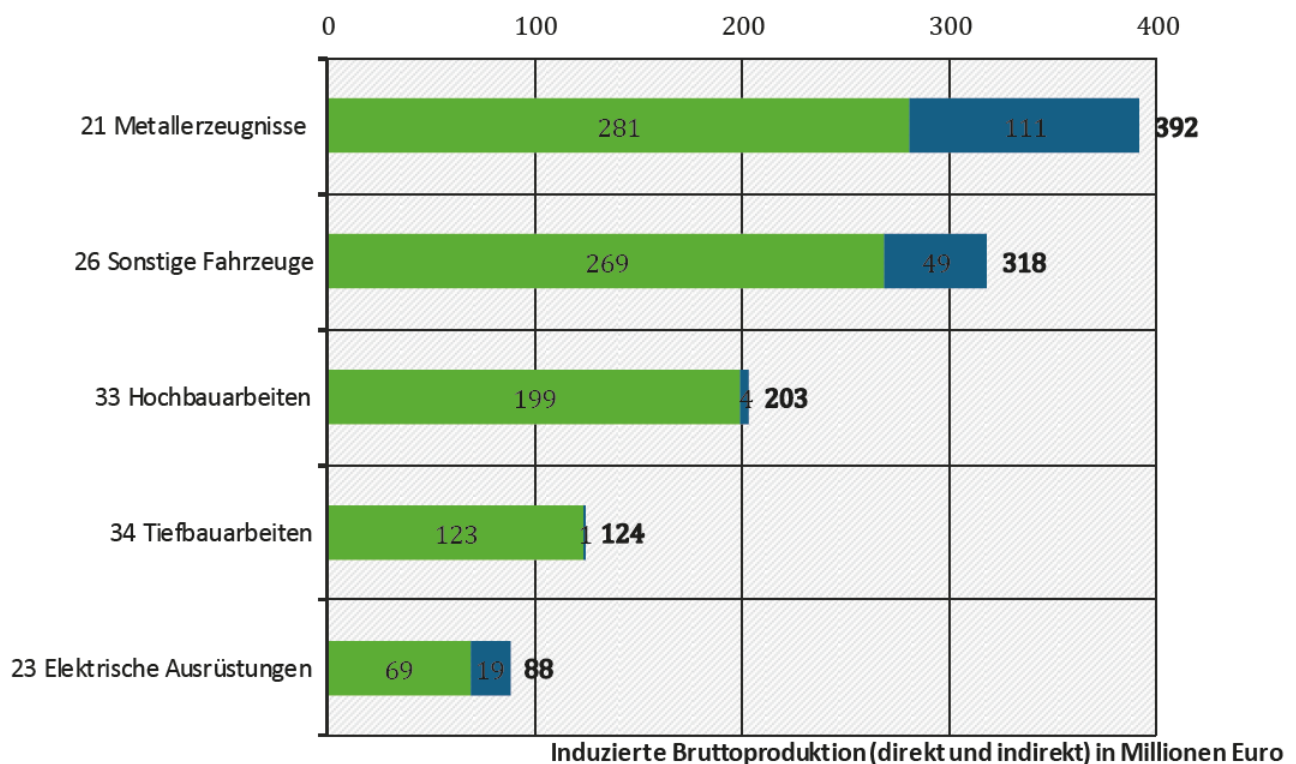
Abbildung 51: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Betrachtet man für die fünf am stärksten angestoßenen Wirtschaftsbereiche, wie diese direkt und indirekt von 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau profitieren (Abbildung 52), so erkennt man, dass insbesondere der Produktionsbereich Metallerzeugnisse auch erheblich von indirekten Produktionseffekten profitiert. Eine Bruttoproduktion von 111 Mio. € fällt in den vorgelagerten Produktionsbereichen an, wird also Vorleistung benötigt, um andere Güter für den Gleisbau herzustellen. Bei den Hoch- und Tiefbauarbeiten spielt die indirekte Produktion dagegen praktisch keine Rolle; die Bauaktivitäten fließen direkt in die Wiederherstellung der Schieneninfrastruktur ein.

Abbildung 52: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Sektoren)

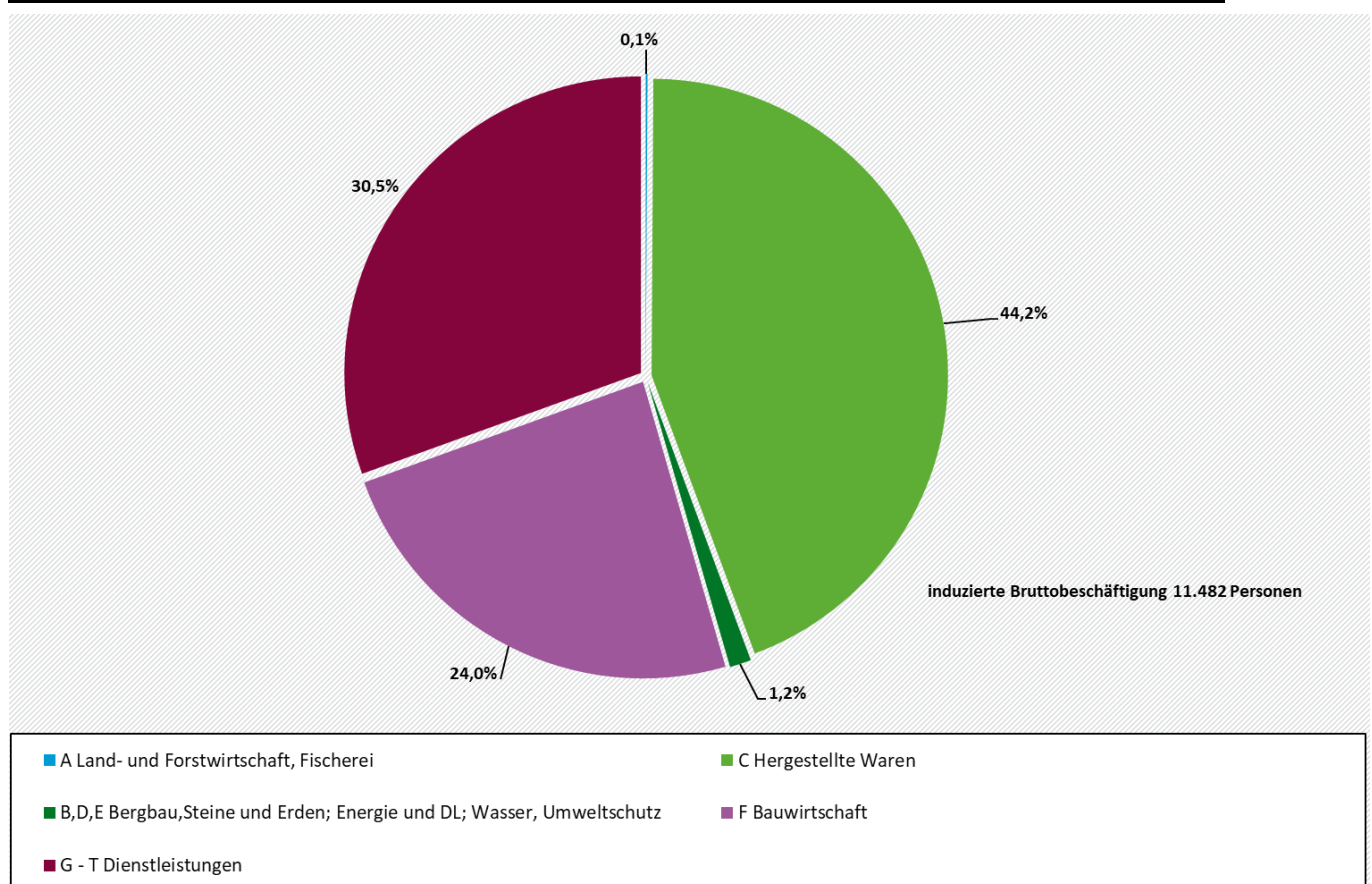


© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Zusätzlich zu den Produktionswirkungen, die sich durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau ergeben, lässt sich mit dem statischen Mengenmodell der Input-Output-Analyse auch die durch diese Investition induzierte Bruttobeschäftigung abschätzen (Abbildung 53). Durch die Investitionen von 1 Mrd. € zur Wiederherstellung der Schieneninfrastruktur ergibt sich eine Bruttobeschäftigung von rund 11.5000 Personen, davon fallen direkt 5.700 Personen und indirekt 5.800 Personen in den vorgelagerten Produktionsbereichen an. Damit ist die Bedeutung der indirekten Effekte bei der Bruttobeschäftigung (50,4% der gesamten Beschäftigung) noch einmal höher als bei der Bruttoproduktion (46,4% der gesamten Produktion).

Von der gesamten durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierten Bruttobeschäftigung entfallen 44,2% auf die Produktion von hergestellten Waren, 30,5% auf die Bereitstellung von Dienstleistungen und 24,0% auf die Bauwirtschaft.

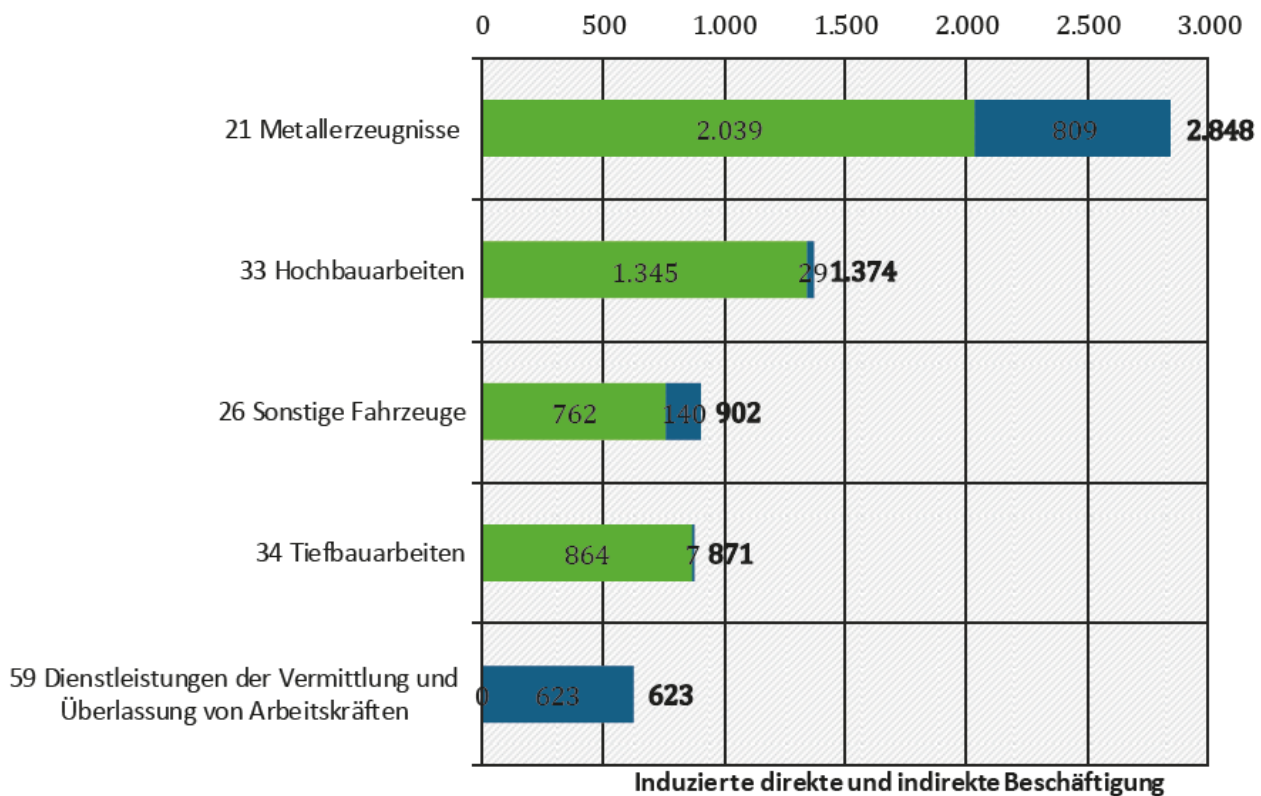
Abbildung 53: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Betrachtet man die fünf Produktionsbereiche, in denen die größte Bruttobeschäftigung anfällt (Abbildung 54), so steht der Produktionsbereich Metallerzeugnisse (wie bei der Produktion) an erster Stelle. In diesem Bereich wird eine Bruttobeschäftigung von gut 2.800 Personen ausgelastet, davon immerhin 800 Personen in den vorgelagerten Bereichen (indirekte Beschäftigung). Es folgen der Hochbau (1.400 Personen), Sonstige Fahrzeuge (900 Personen) und der Tiefbau mit knapp 900 Personen. Der fünftwichtigste Bereich bei der Beschäftigung ist der Bereich Dienstleistungen der Vermittlung und Überlassung von Arbeitskräften (600 Personen); Beschäftigung fällt hier nur indirekt als zuliefernder Produktionsbereich an.

Abbildung 54: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Gleisbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



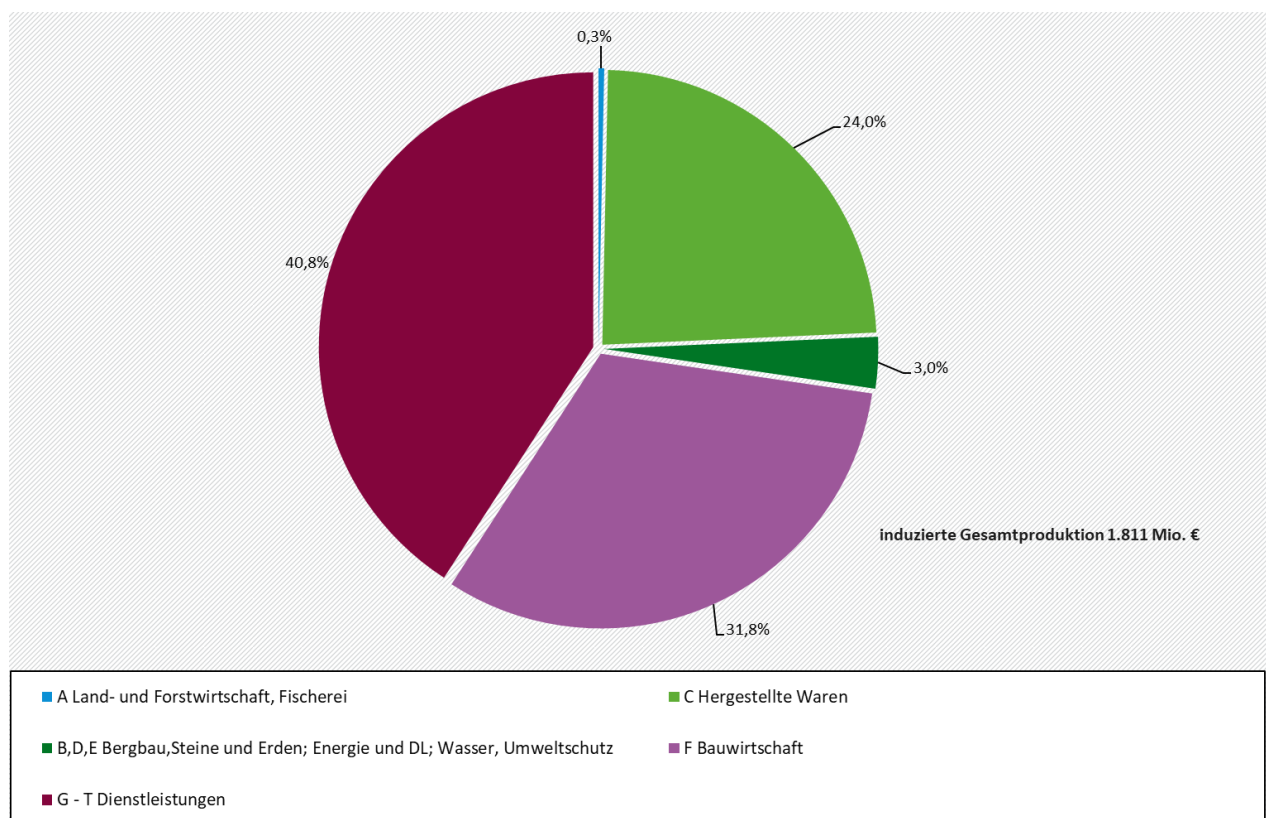
© eigene Darstellung, J. Blazejczak

3.1.5.2.3 Direkte und indirekte Produktions- und Beschäftigungswirkungen nach Branchen für 1 Mrd. Euro Deichbauinvestitionen

Zusätzlicher Deichbau wird als Anpassungsmaßnahme zum Schutz vor steigendem Meeresspiegel oder vor Überflutungen durchgeführt. Bei der Umsetzung spielen Maßnahmen des Baugewerbes, insbesondere Tiefbaumaßnahmen eine sehr wichtige Rolle.

Abbildung 55 zeigt die Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Bruttoproduktion durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau. Insgesamt wird durch einen solchen Investitionsimpuls eine Bruttoproduktion in Höhe von 1,8 Mrd. € angestoßen. Die hohe Bedeutung der Bauwirtschaft zeigt sich mit einem Anteil von 31,8%, der größte Produktionseffekt entsteht allerdings in den Dienstleistungsbereichen (40,8%). Bedeutend kleiner als zum Beispiel beim Gleisbau ist das Gewicht der Produktion von hergestellten Waren (24,0%).

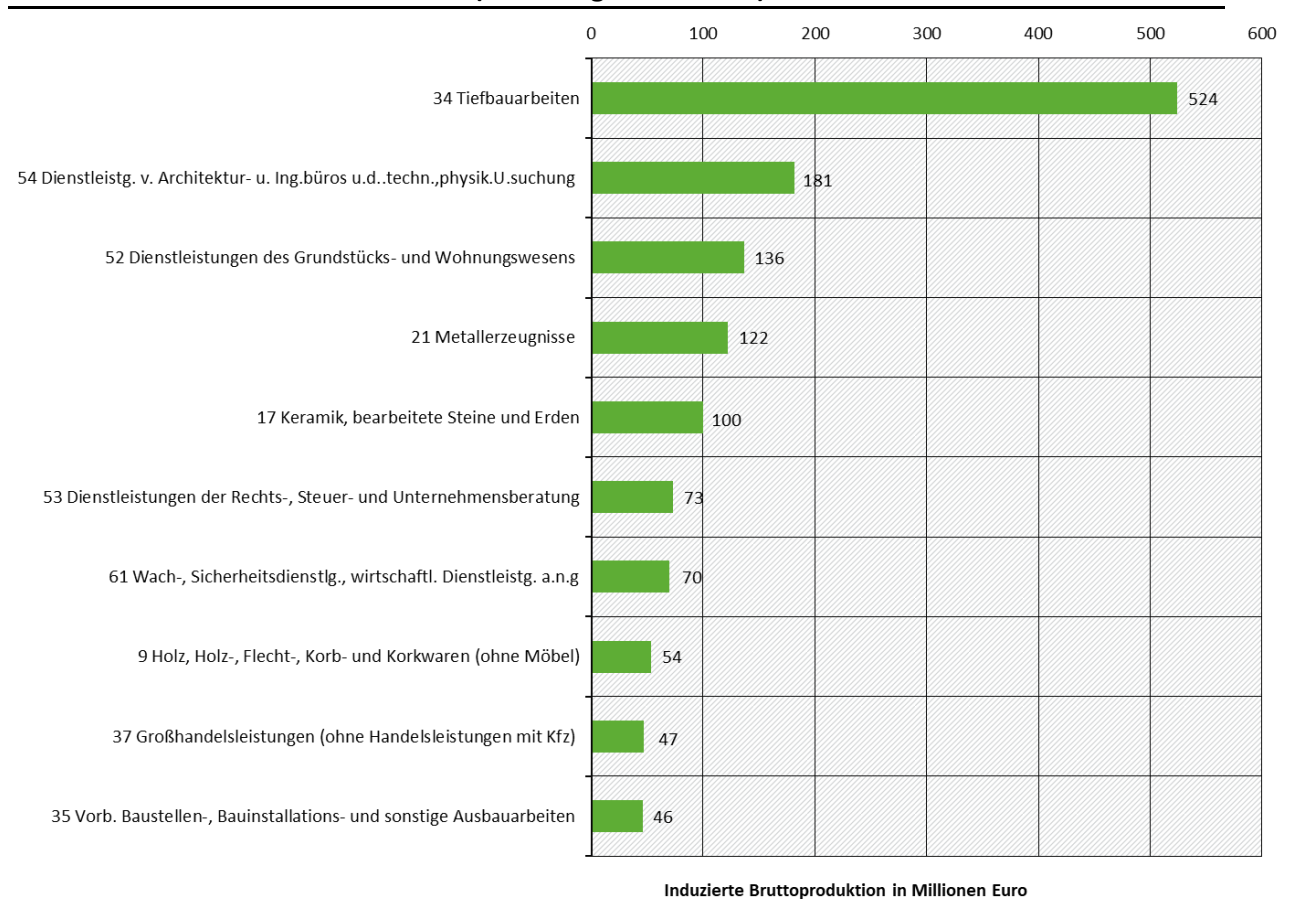
Abbildung 55: Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Betrachtet man die 10 Produktionsbereiche, die durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau am stärksten profitieren (Abbildung 56), so zeigt sich der größte Produktionseffekt im Tiefbau (524 Mio. €). Danach folgt – mit erheblich geringerem Gewicht (181 Mio. €) - der Bereich Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros und der technisch, physikalischen Untersuchung eine Dienstleistungsbereich, der vorwiegend Planungsleistungen für die Bauwirtschaft erbringt. Auch der Bereich Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens ist auf Dienstleistungen im Baubereich fokussiert. Mit Metallerzeugnissen und Keramik und bearbeitete Steine folgen zwei Produktionsbereiche, die der Warenproduktion zuzurechnen sind.

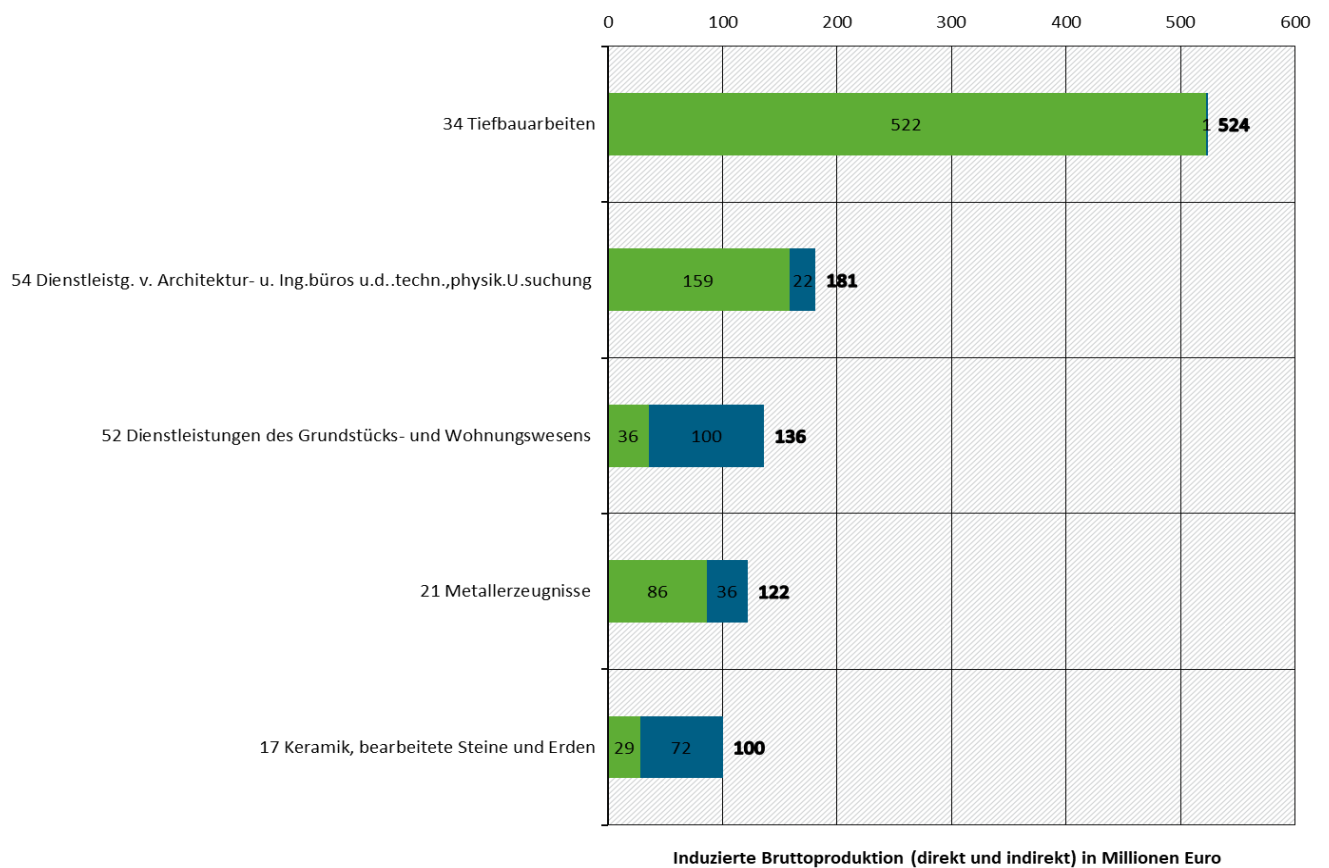
Abbildung 56: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte Bruttoproduktion nach Wirtschaftsbereichen (10 wichtigste Bereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

In Abbildung 57 wird für die fünf am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereiche ausgewiesen, inwieweit direkte und indirekte Produktionseffekte von Bedeutung sind. Insbesondere Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens sowie der Produktionsbereich Keramik und bearbeitete Steine werden vorwiegend indirekt als vorleistende Bereiche angestoßen, während die drei anderen Produktionsbereich überwiegend direkt angestoßen werden.

Abbildung 57: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Bereiche)

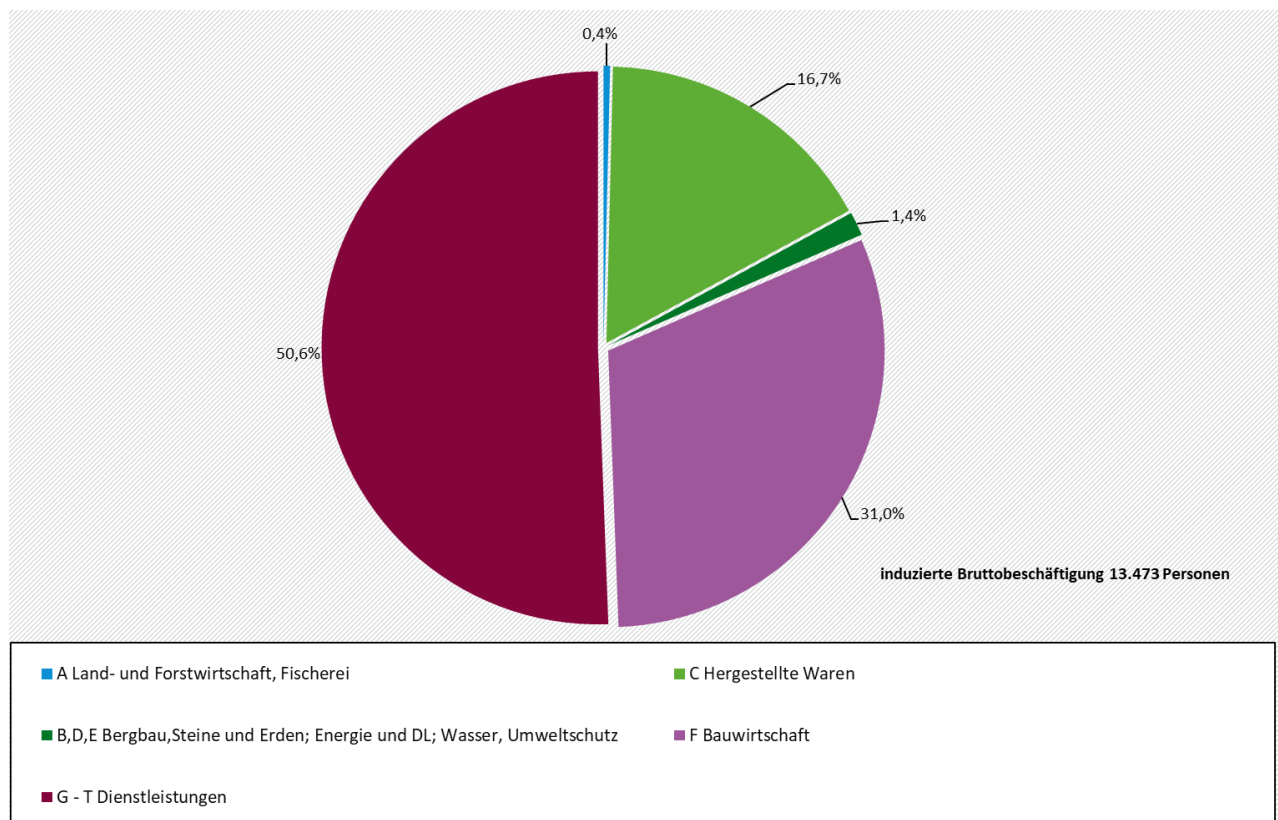


© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Durch die Deichbauinvestitionen in Höhe von 1 Mrd. € ergibt sich eine Bruttobeschäftigung von rund 13.5000 Personen, davon fallen direkt 8.100 Personen und indirekt 5.400 Personen in den vorgelagerten Produktionsbereichen an. Die direkte Beschäftigung macht also rund 60%, die indirekte rund 40% der gesamten Bruttobeschäftigung aus

Von der gesamten durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierten Bruttobeschäftigung entfallen 50,6% auf die Bereitstellung von Dienstleistungen 44,2%, 31,0% auf die Bauwirtschaft und 16,7% auf die Produktion von hergestellten Waren (Abbildung 58). Im Deichbau verteilt sich die Beschäftigung also deutlich anders als bei den Gleisbauinvestitionen, dort entfiel der größte Anteil auf die Herstellung von Waren.

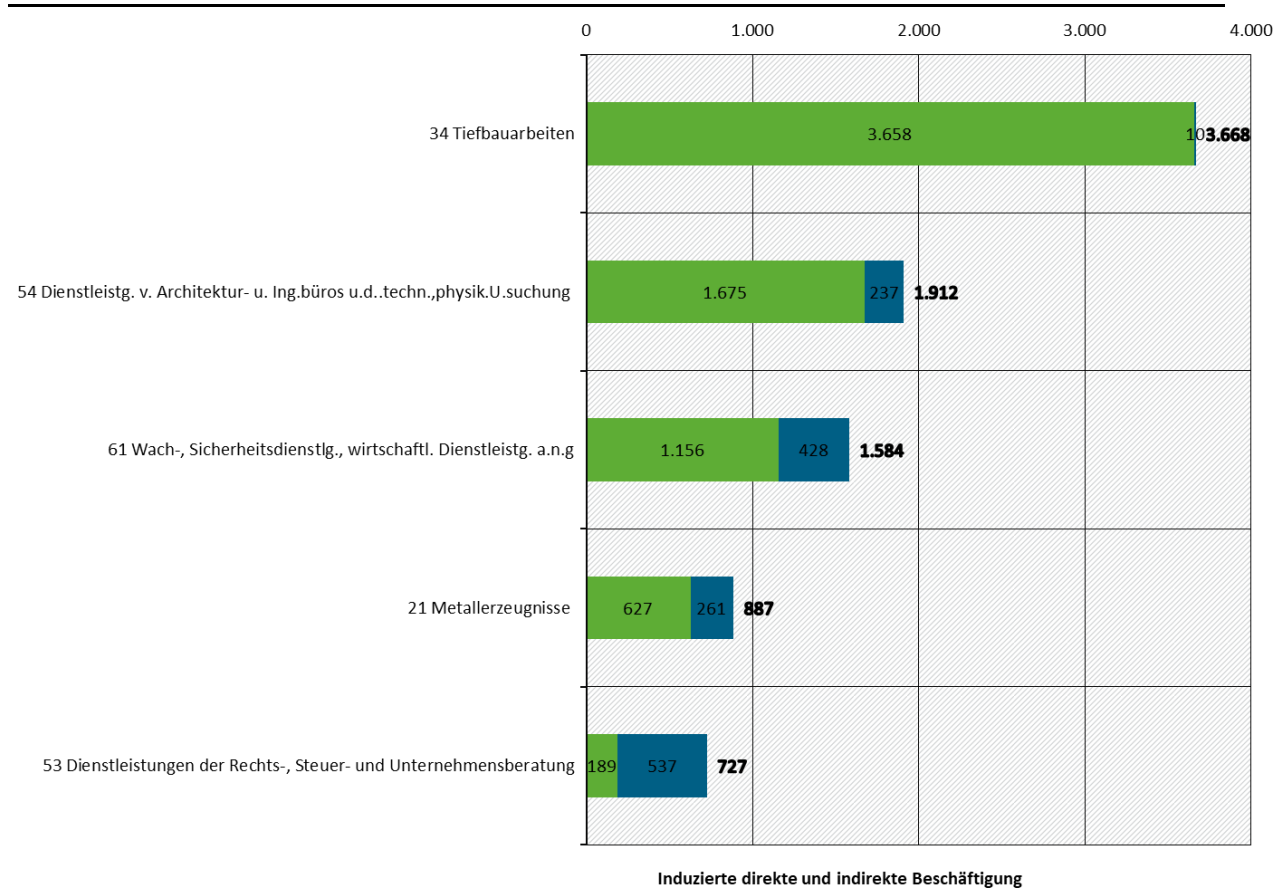
Abbildung 58: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Abbildung 59 zeigt die durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte Beschäftigung nach direkten und indirekten Effekten in den 5 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen. Die größten Beschäftigungseffekte gibt es im Tiefbau (3.700 Personen) und im Bereich Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros und der technisch, physikalischen Untersuchung (1.900 Personen). In beiden Bereichen gab es auch die größten Produktionseffekte. Danach folgt mit Wach- und Sicherheitsdienstleistungen ein Dienstleistungsbereich, der bei den Produktionseffekten erst an siebter Stelle liegt, bei der Beschäftigung auf Grund der Personalintensität der Leistungserbringung jedoch an dritter Stelle.

Abbildung 59: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Deichbau induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

3.1.5.3 Schäden an Wohngebäuden

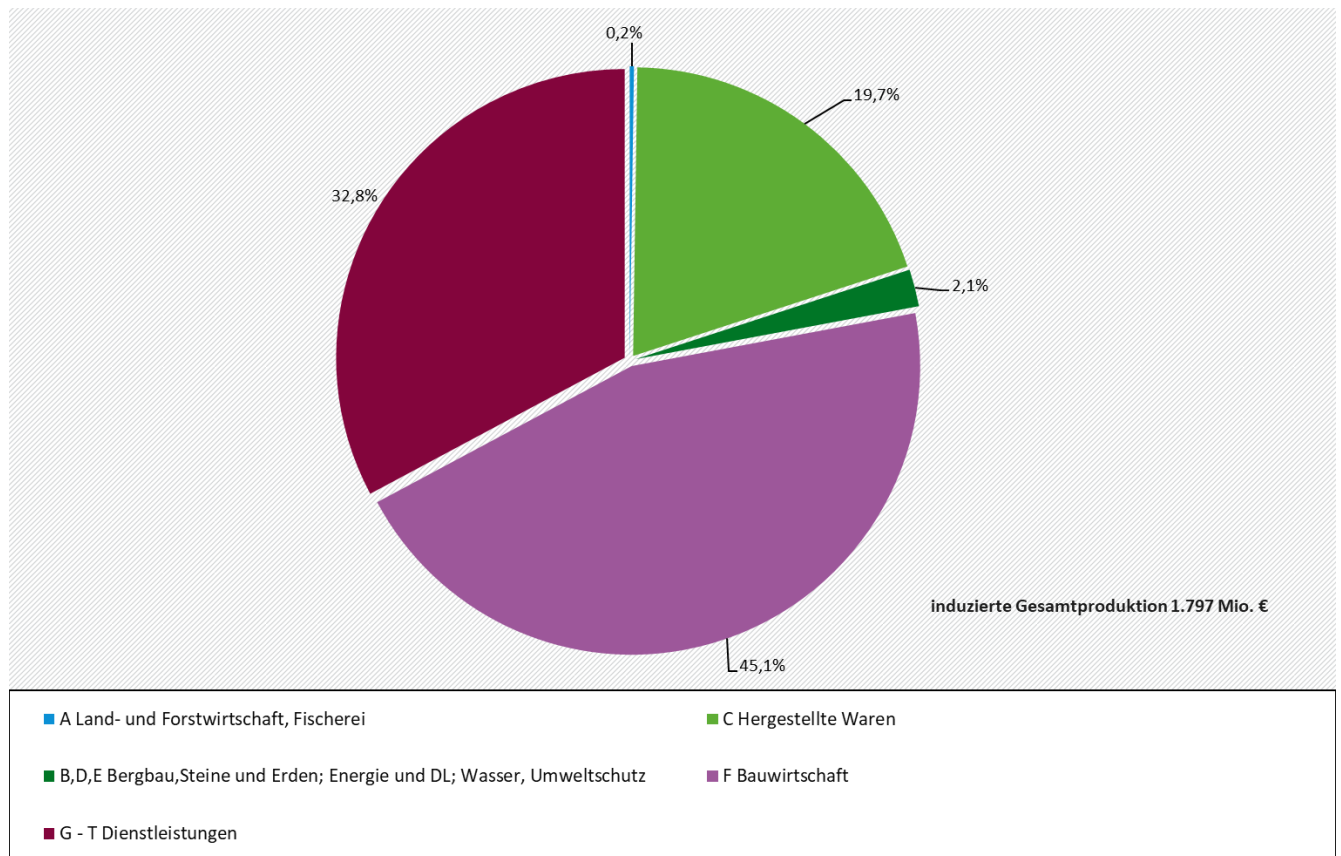
3.1.5.3.1 Direkte und indirekte Produktions- und Beschäftigungswirkungen nach Branchen für 1 Mrd. Euro Wohnungsbauinvestitionen

Mit dem statischen offenen Mengenmodell der Input-Output-Analyse lässt sich berechnen, in welchen Wirtschaftszweigen Produktionskapazitäten in Anspruch genommen werden, wenn 1 Mrd. Euro Wohnungsbauinvestitionen (zur Behebung von Schäden an Wohngebäuden) getätigt werden. Über sektorale Arbeitskoeffizienten lässt sich bestimmen, wieviel Personen benötigt werden, um diese Güter und Dienstleistungen zu produzieren.

Wenn Wohnungsbauinvestitionen im Umfang von 1 Mrd. Euro getätigt werden, wird in der Volkswirtschaft insgesamt eine Bruttoproduktion von rund 1,8 Mrd. Euro angestoßen. Die indirekte Bruttoproduktion beträgt also fast 800 Millionen Euro.

Abbildung 60 zeigt die zusammengefassten Wirtschaftsbereiche, in denen durch Wohnungsbauinvestitionen die größten Produktionseffekte ausgelöst werden. Der größte Produktionseffekt tritt mit 45,1% in der Bauwirtschaft auf. Es folgen Dienstleistungen mit 32,8% und Hergestellte Waren mit 19,7%.

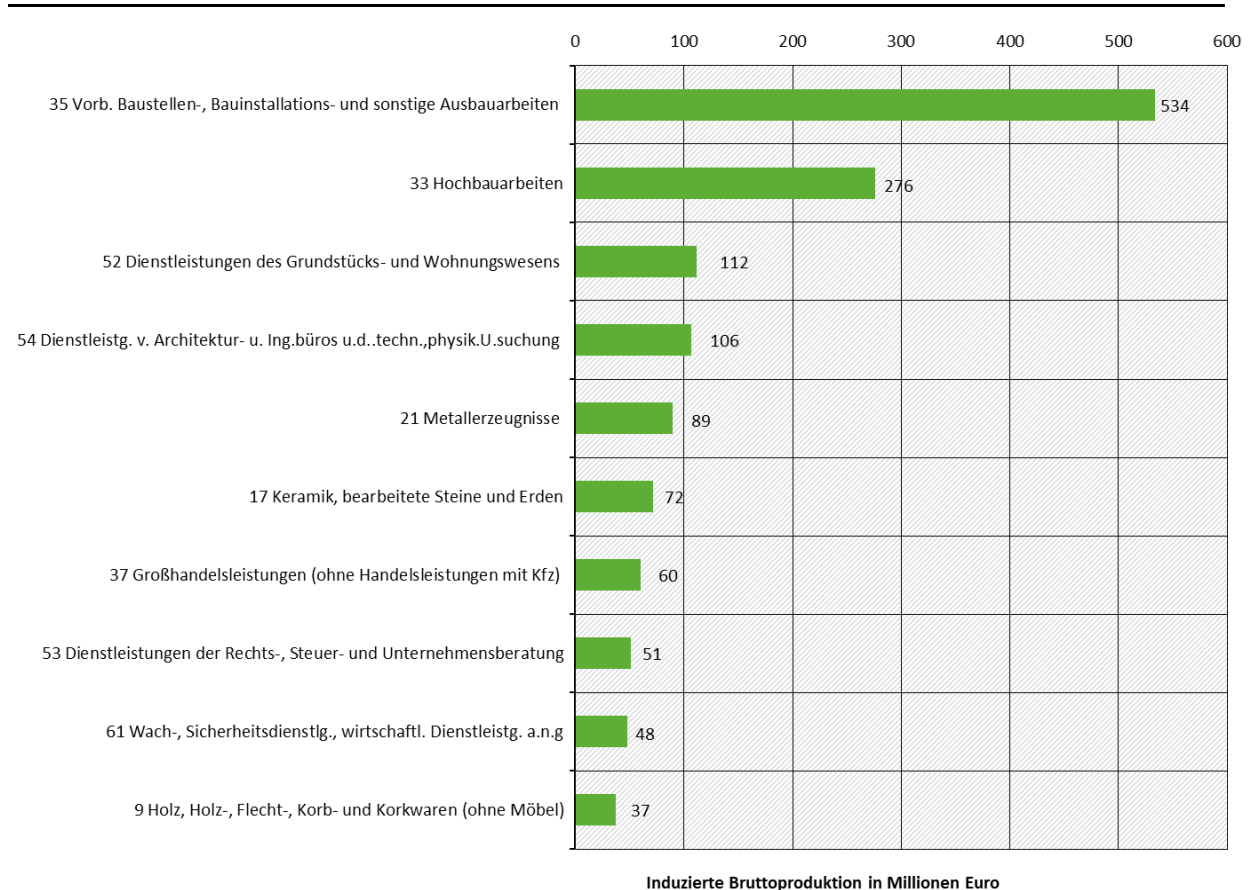
Abbildung 60: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Betrachtet man die 10 Produktionsbereiche, in denen durch Wohnungsbauinvestitionen die größten Produktionseffekte erzielt werden (Abbildung 61), so zeigt sich, dass in den beiden Baubereichen Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten sowie Hochbau mit 800 Mio. € rund 45% der gesamten Produktionseffekte (1,8 Mrd. €) anfallen. Danach – aber bereits mit deutlichem Abstand – folgen mit Bauaktivitäten verbundene Dienstleistungen. Erst an fünfter und sechster Position finden sich Produktionsbereiche, die Waren produzieren, die überwiegend als Vorleistungen Verwendung finden (Metallerzeugnisse sowie Keramik und bearbeitete Steine und Erden).

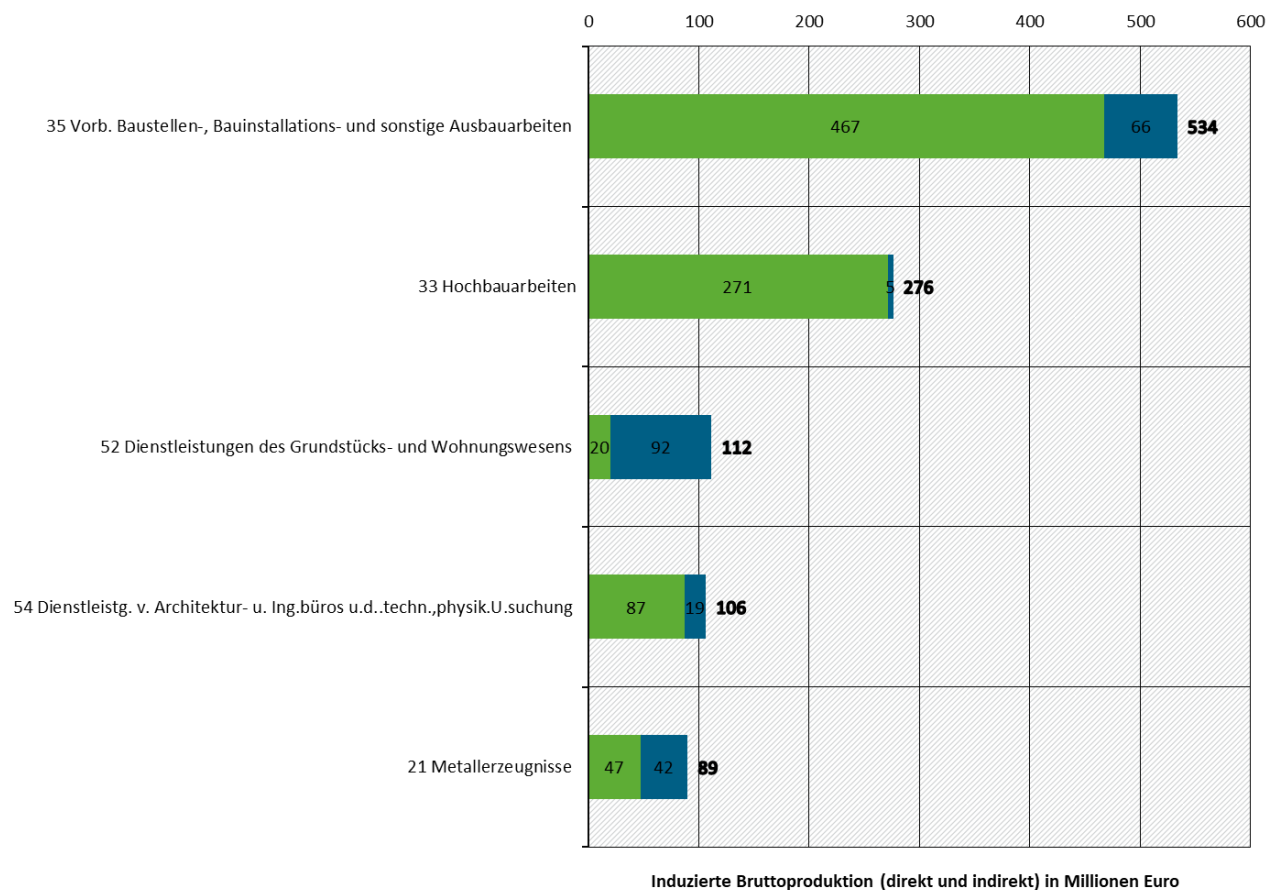
Abbildung 61: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion in den 10 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Blickt man darauf, ob die angestoßene Produktion direkt oder indirekt als Vorleistung in die Wohnungsbauinvestitionen einfließen (Abbildung 62), so wird deutlich, dass die quantitativ dominierenden Bauleistungen ganz überwiegend direkt einfließen. Nur bei Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens und bei Metallerzeugnissen spielen indirekte Effekte eine wichtige Rolle.

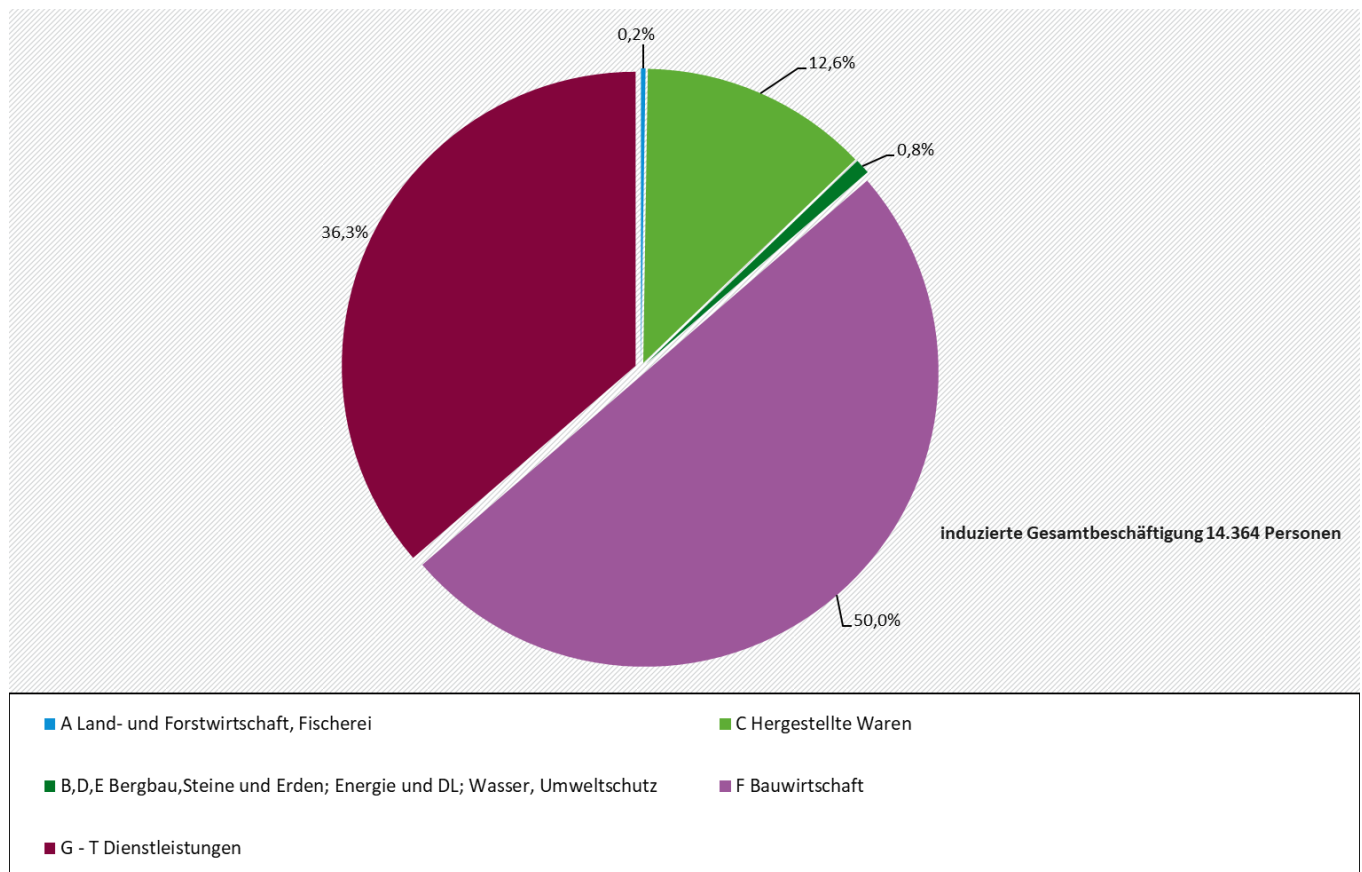
Abbildung 62: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttoproduktion nach direkten und indirekten Effekten in den 5 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

In zu erkennen, in welchen inländischen Wirtschaftsbereichen Arbeitskräfte eingesetzt werden müssen, um die Vorleistungen für die Erstellung von Wohngebäuden zu produzieren. Um die Güter und Dienstleistungen zu produzieren, die notwendig sind, um 1 Mrd. Euro Wohnungsbauinvestitionen zu erstellen, werden 14.400 Beschäftigte benötigt (Abbildung 63), davon 8.900 Personen direkt in den Branchen, die direkt an der Erstellung beteiligt sind, und 5.500 Personen indirekt auf den vorgelagerten Produktionsstufen der Zulieferindustrie (z. B. Baustoffe, Energie). Die Hälfte der insgesamt induzierten Beschäftigung entfällt auf die Bauwirtschaft.

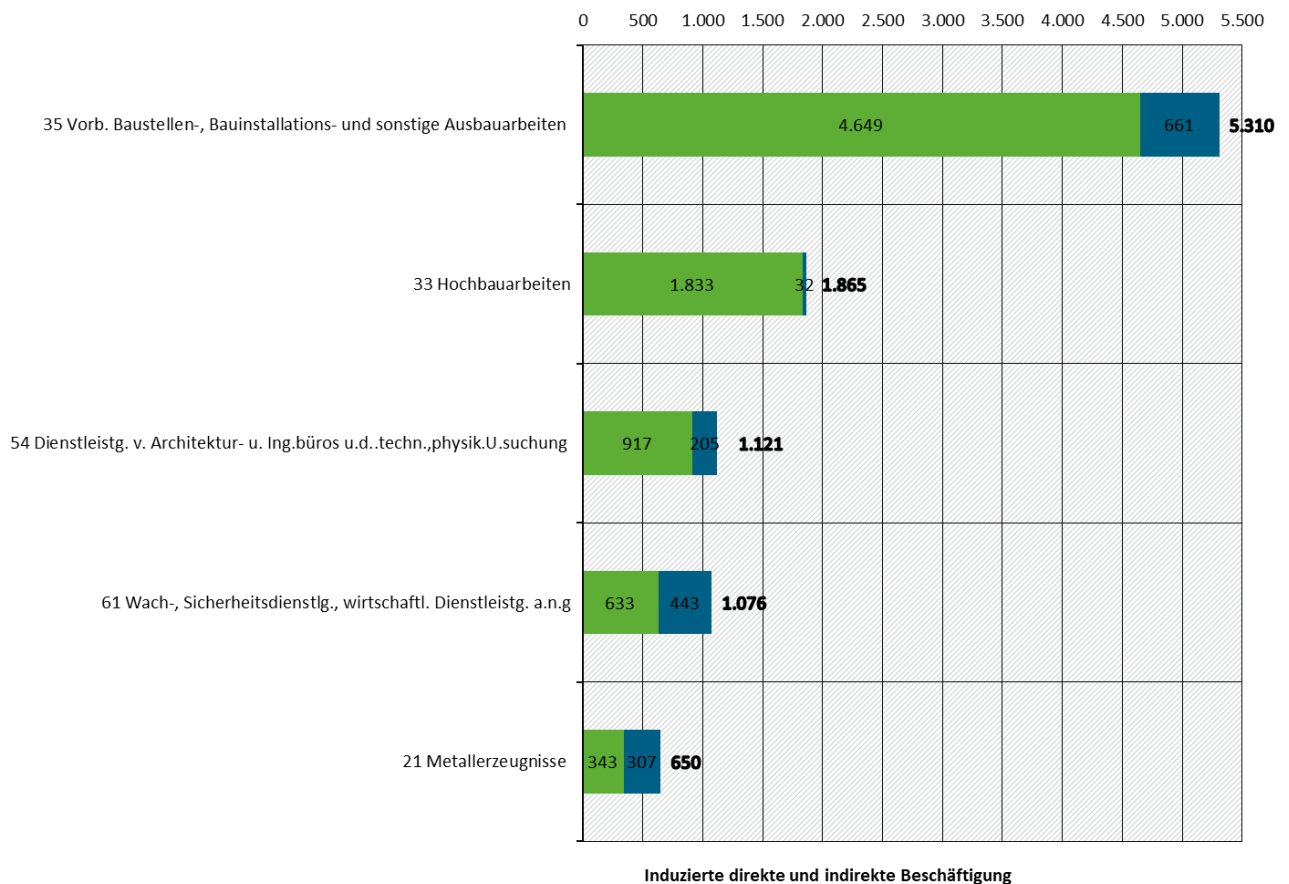
Abbildung 63: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Abbildung 64 zeigt, in welchen fünf Branchen die meisten Arbeitskräfte in Anspruch genommen werden, um Wohnungsbauten zu erstellen. Am stärksten profitiert der Baubereich Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten mit 5.300 Personen, davon gut 4.600 Personen direkt und knapp 700 Personen indirekt. Es folgt der Baubereich Hochbau mit knapp 1.800 Personen. Im Bereich Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros und der technisch, physikalischen Untersuchung werden 1.100 Personen ausgelastet, wenn 1 Mrd. Wohnungsbauinvestitionen getätigt werden.

Abbildung 64: Durch 1 Mrd. € Investitionen in den Wohnungsbau induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Bereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Erwartungsgemäß werden von der Bauwirtschaft die meisten Produktionskapazitäten beansprucht, wenn Schäden an Wohngebäuden beseitigt werden. Auf die Bauwirtschaft entfällt ungefähr 45% der erforderlichen Bruttoproduktion.
- Aber auch Ressourcen von weiteren Wirtschaftsbereichen wie Architektur- und Ingenieurleistungen, Metallerzeugnisse sowie Keramik, bearbeitete Steine und Erden werden in erheblichem Umfang in Anspruch genommen.
- Schaut man nur auf die Produktion, die in vorgelagerten Produktionsbereichen angestoßen wird, sind die größten Ressourcenbedarfe bei Dienstleistungen des Grundstücks- und

Wohnungswesens, bei Großhandelsleistungen und in der Branche Keramik, bearbeitete Steine und Erden zu beobachten.

- 50 Prozent der insgesamt induzierten Beschäftigung entfallen auf die Bauwirtschaft. Von den zuliefernden Bereichen sind es vor allem Dienstleistungsbereiche. Die größten Anteile entfallen hier auf Großhandelsleistungen, auf Wach-, Sicherheitsdienstleistungen und sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen sowie auf Dienstleistungen der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung.

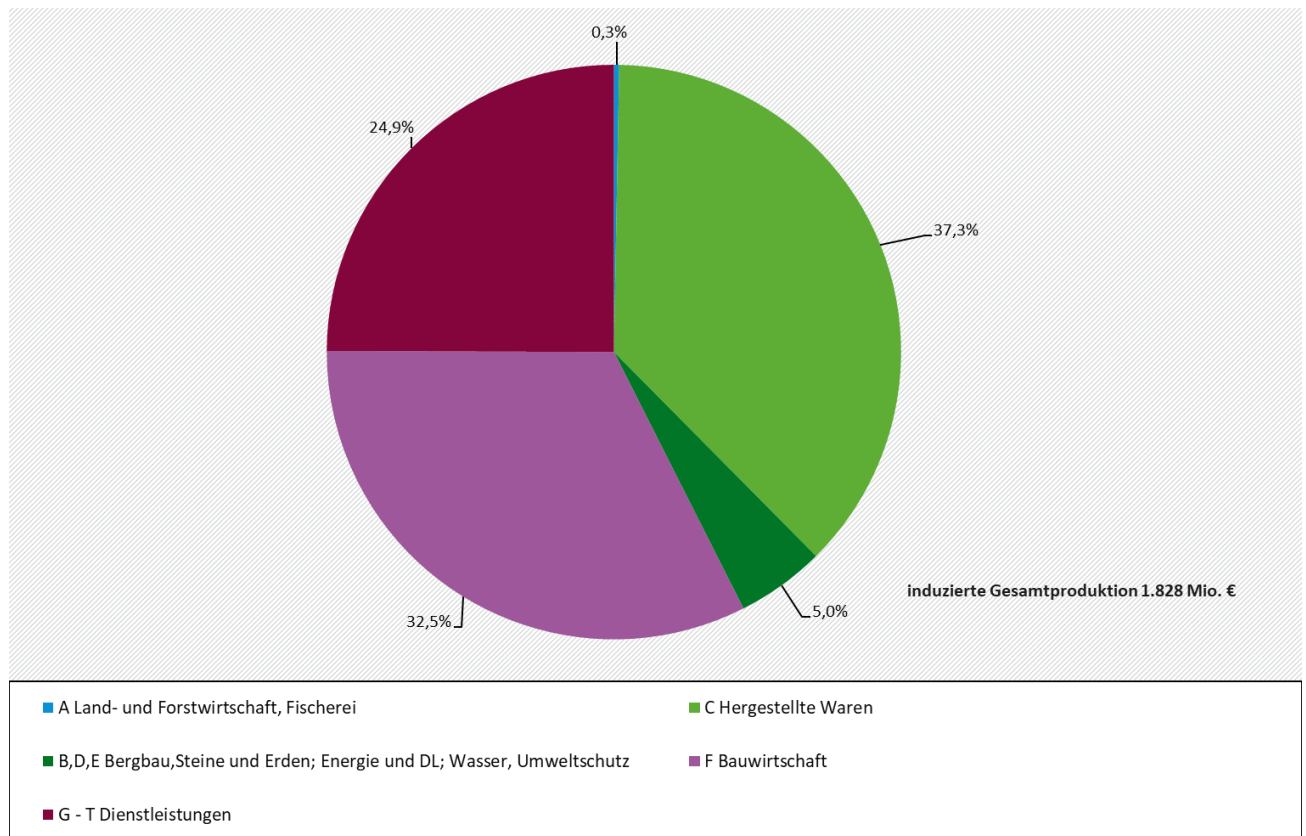
3.1.5.3.2 Direkte und indirekte Produktions- und Beschäftigungswirkungen nach Branchen für 1 Mrd. Euro Bauvorsorge

Im Rahmen der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel werden an Gebäuden Maßnahmen durchgeführt, die diese vorsorgend vor Hochwasser und Überschwemmung schützen sollen. Diese Maßnahmen umfassen zum Beispiel Maßnahmen zur Gebäudeabdichtung und zur Rückstausicherung und das Vorhalten bzw. Errichten von stationären oder mobilen Wassersperren. Darüber hinaus sind Anpassungen der Inneneinrichtung sowie die besondere Sicherung von Heizungsanlagen und Öltanks sowie eine Verlagerung der Heizungsanlage obere Stockwerke denkbare Maßnahmen.

Aus diesen Überlegungen zur Bauvorsorge wird eine Güterstruktur für Maßnahmen zur Bauvorsorge in Abgrenzung der Input-Output-Rechnung abgeleitet.

Abbildung 65 zeigt die Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden. Von der insgesamt angestoßenen Bruttonproduktion 1,8 Mrd. € entfallen 37,3% auf hergestellte Waren, 32,5% auf die Bauwirtschaft und 24,9% auf Dienstleistungen.

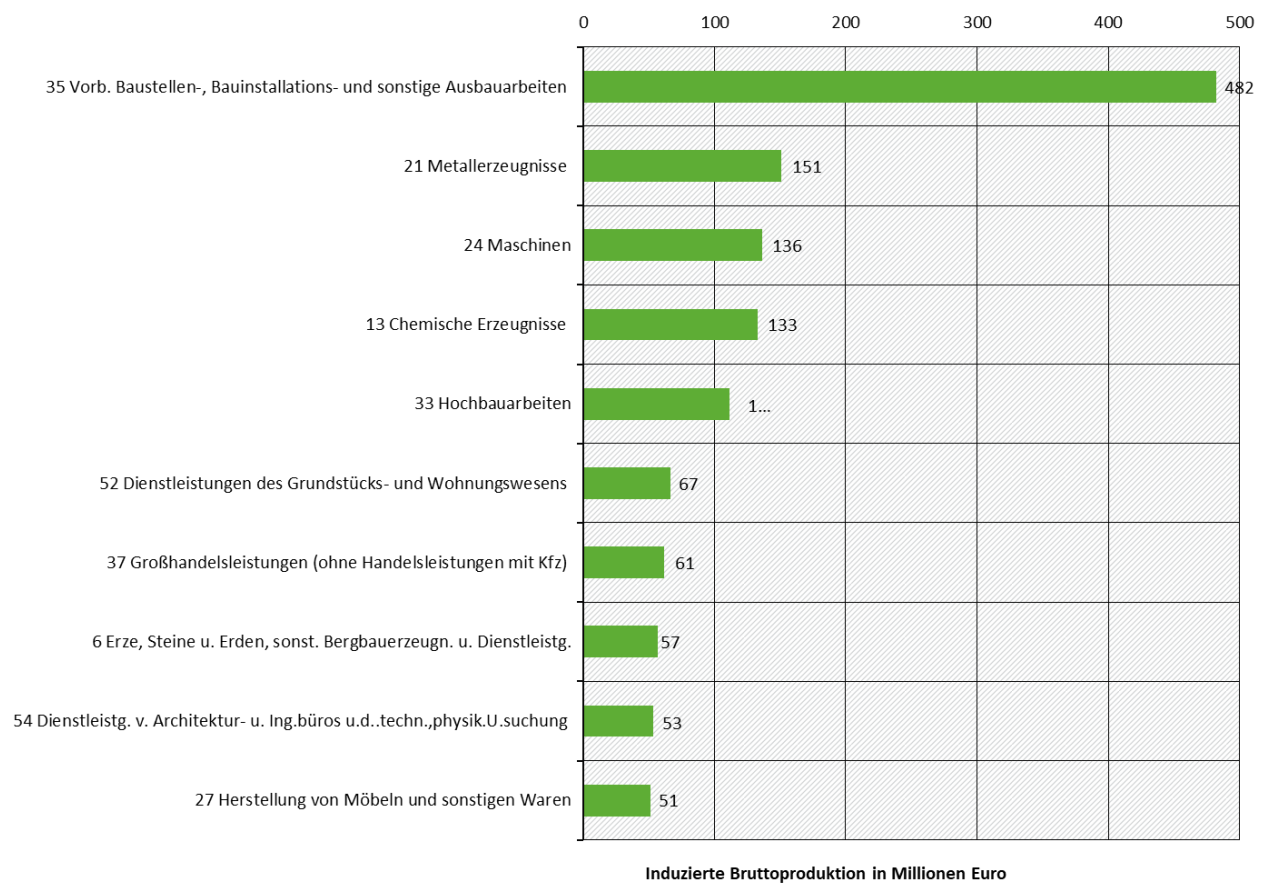
Abbildung 65: Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Abbildung 66 zeigt, welche 10 Produktionsbereichen 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden am stärksten bei der Bruttonproduktion profitieren. Der größte Produktionseffekt tritt im Baubereich Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten ein (480 Mio. €). Es folgen wichtige Industriezweige wie Metallerzeugnisse, Maschinen und Chemie.

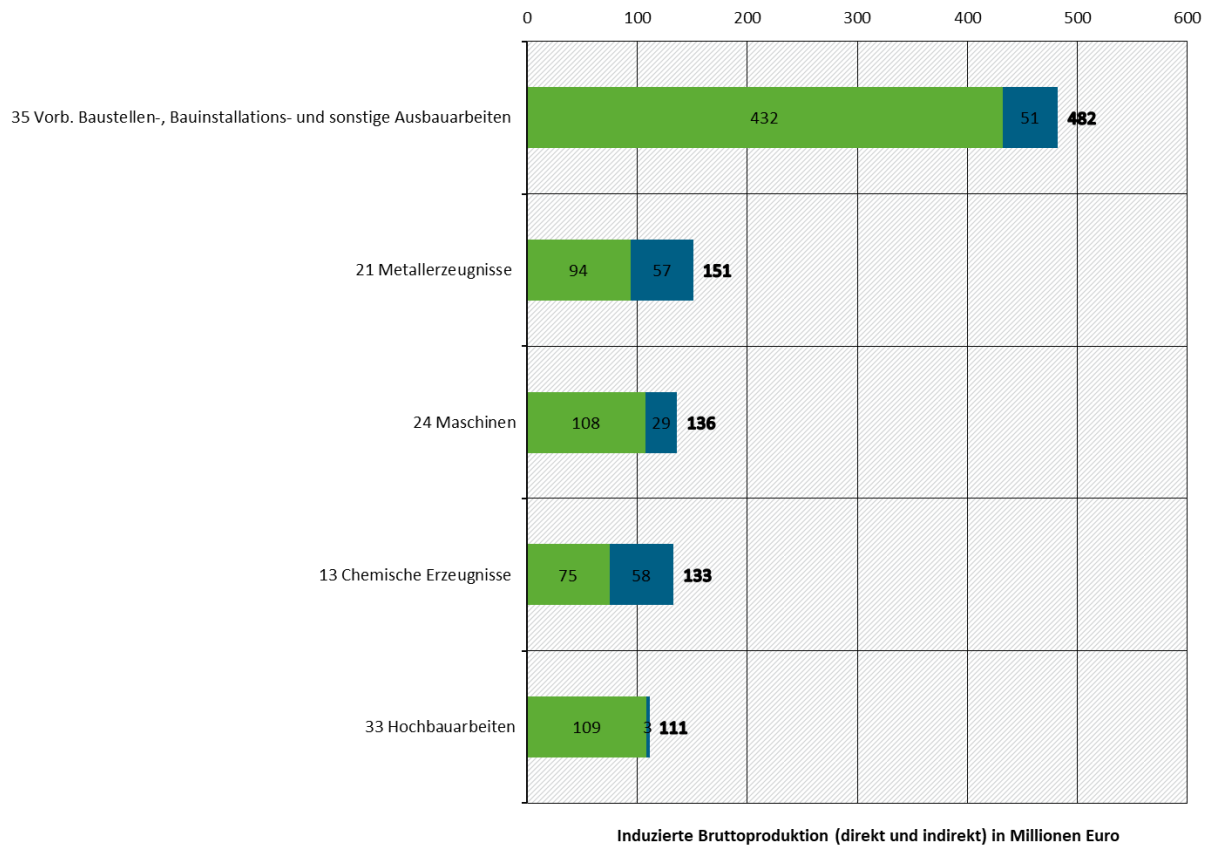
Abbildung 66: Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Betrachtet man bei den fünf am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen (Abbildung 67), ob sich die Produktionseffekte vorwiegend direkt oder indirekt einstellen, so zeigt sich, dass vor allem in der Bauwirtschaft, aber auch bei anderen Bereichen die direkten Effekte überwiegen. Bei Metallerzeugnisse und bei chemischen Erzeugnissen sind aber auch die indirekten Effekte, also die Verwendung als Vorleistungen, wichtig.

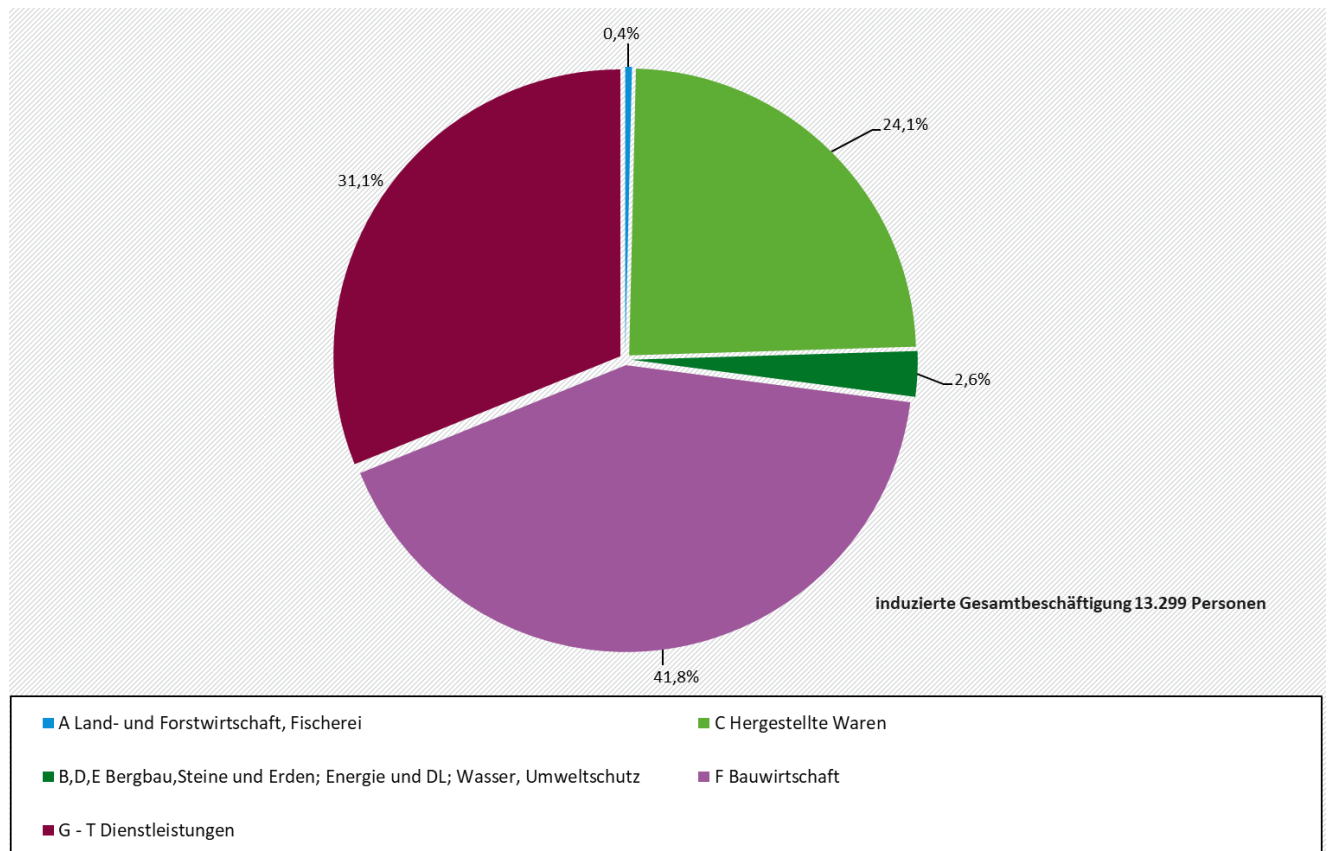
Abbildung 67: Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Bereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Abbildung 68 zeigt die durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen. Insgesamt wird durch einen solchen Investitionsimpuls eine Bruttobeschäftigung von 13.300 Personen induziert. Der größte Anteil von 41,8% der Bruttobeschäftigung entfällt auf die Bauwirtschaft. Es folgen Dienstleistungen (31,1%) und die Herstellung von Waren (24,1%).

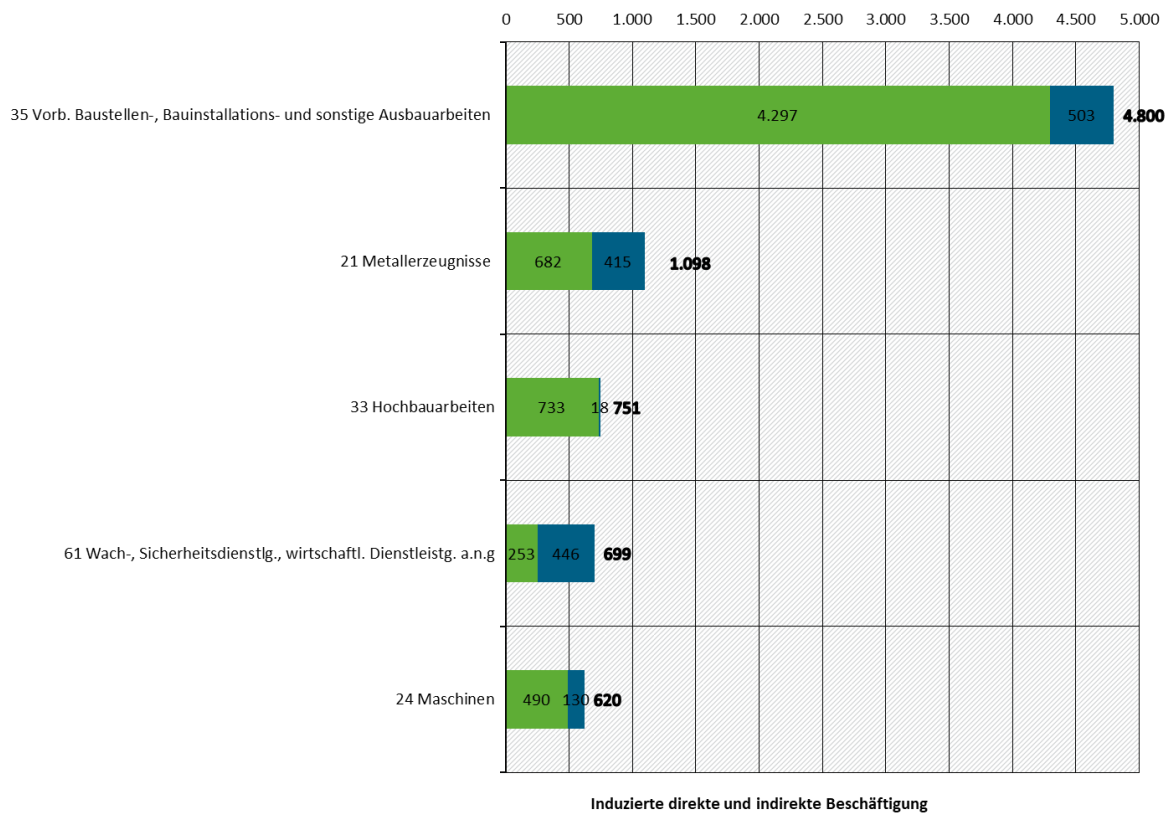
Abbildung 68: Durch 1 Mrd. € in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak

Abbildung 69 zeigt die durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte Beschäftigung nach direkten und indirekten Effekten in den 5 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen. An erster Stelle steht der Bereich Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten mit 4.800 Personen. Beim zweitwichtigsten Bereich Metallerzeugnisse (1.100 Personen) spielen auch indirekte Beschäftigungseffekte eine wichtige Rolle.

Abbildung 69: Durch 1 Mrd. € Investitionen in die Bauvorsorge bei Gebäuden induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)



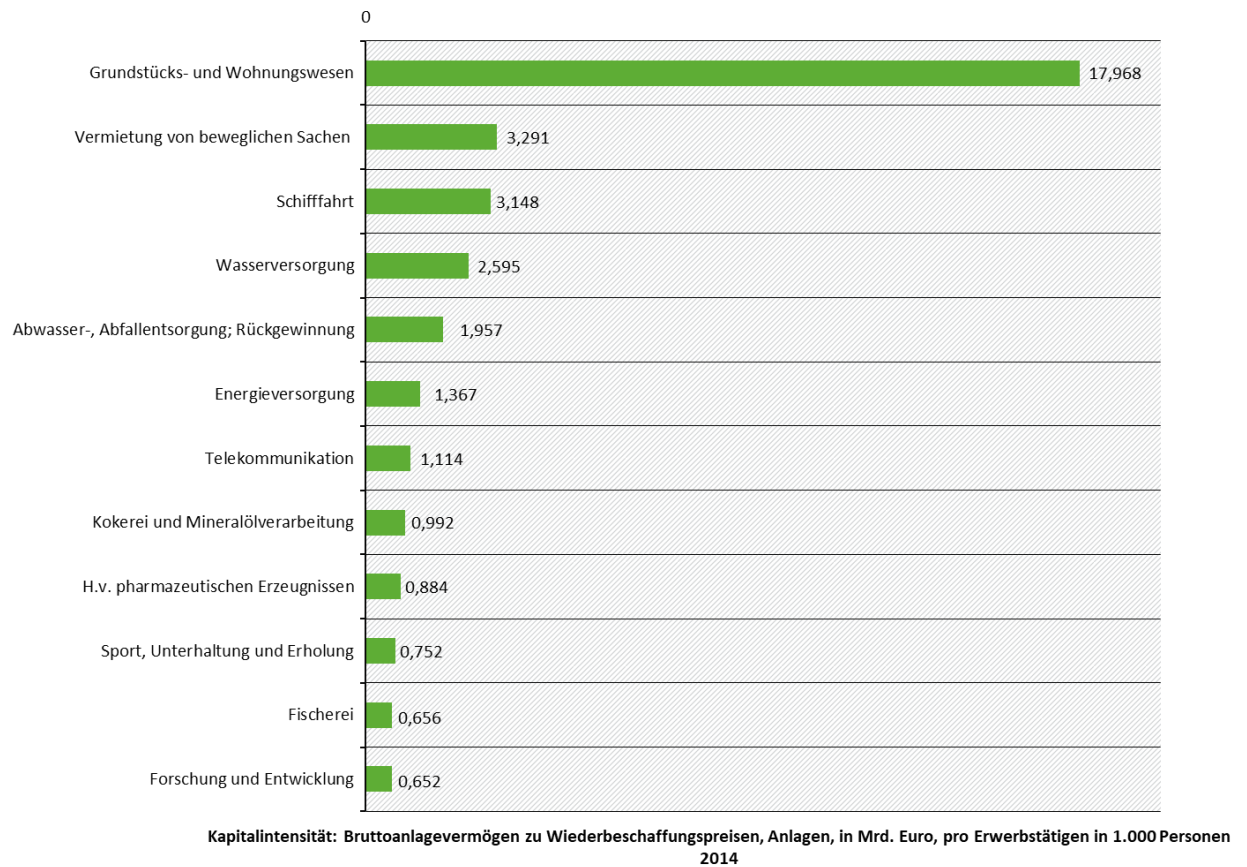
© eigene Darstellung, J. Blazejczak

3.1.5.4 Schäden an gewerblicher Infrastruktur

3.1.5.4.1 Branchen mit hoher Kapitalintensität

Abbildung 70 zeigt die Wirtschaftsbereiche mit besonders hohem Kapitaleinsatz im Verhältnis zu den eingesetzten Arbeitskräften. Diese Sektoren sind von Klimaschäden am Kapitalstock möglicherweise stark betroffen. Dazu gehören wichtige Infrastrukturektoren wie Wasserversorgung, Wasser- und Abfallentsorgung, Energieversorgung und Telekommunikation.

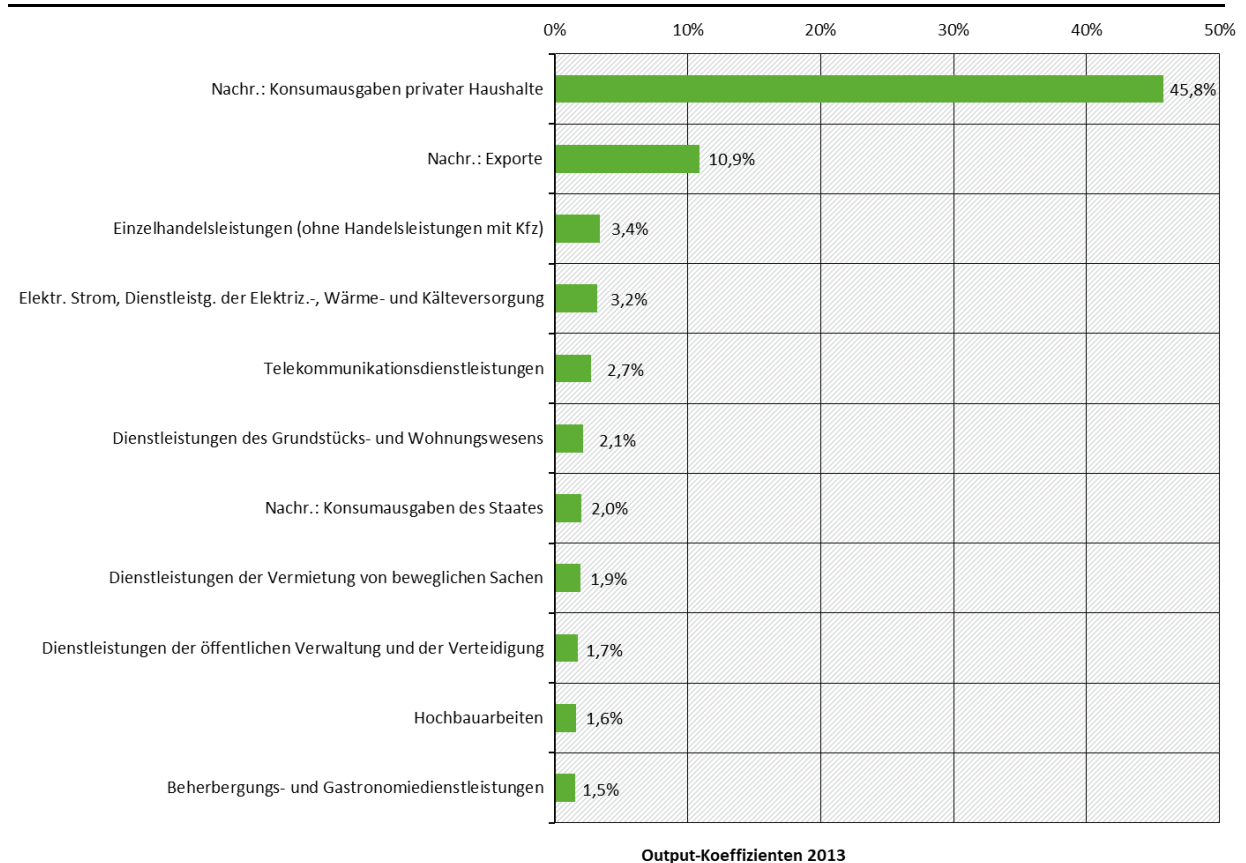
Abbildung 70: Kapitalintensität nach Wirtschaftsbereichen (Sektoren mit den höchsten Kapitalintensitäten)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Die 10 kapitalintensivsten Sektoren liefern den überwiegenden Teil ihrer Produktion direkt an Endnachfrager im In- und Ausland, das meiste als Konsumgüter an private Haushalte (Abbildung 71). Beeinträchtigungen des Kapitalstocks und damit möglicherweise einhergehende Störungen der Produktion sowie Preissteigerungen treffen also unmittelbar die privaten Haushalte, daneben auch ausländische Abnehmer. Es gibt aber auch eine Reihe stark betroffener Produktionssektoren, die einen überdurchschnittlichen hohen Anteil der Vorleistungslieferungen der kapitalintensiven Sektoren abnehmen. Dazu gehören insbesondere der Einzelhandel, die Elektrizitätserzeugung und die Telekommunikation.

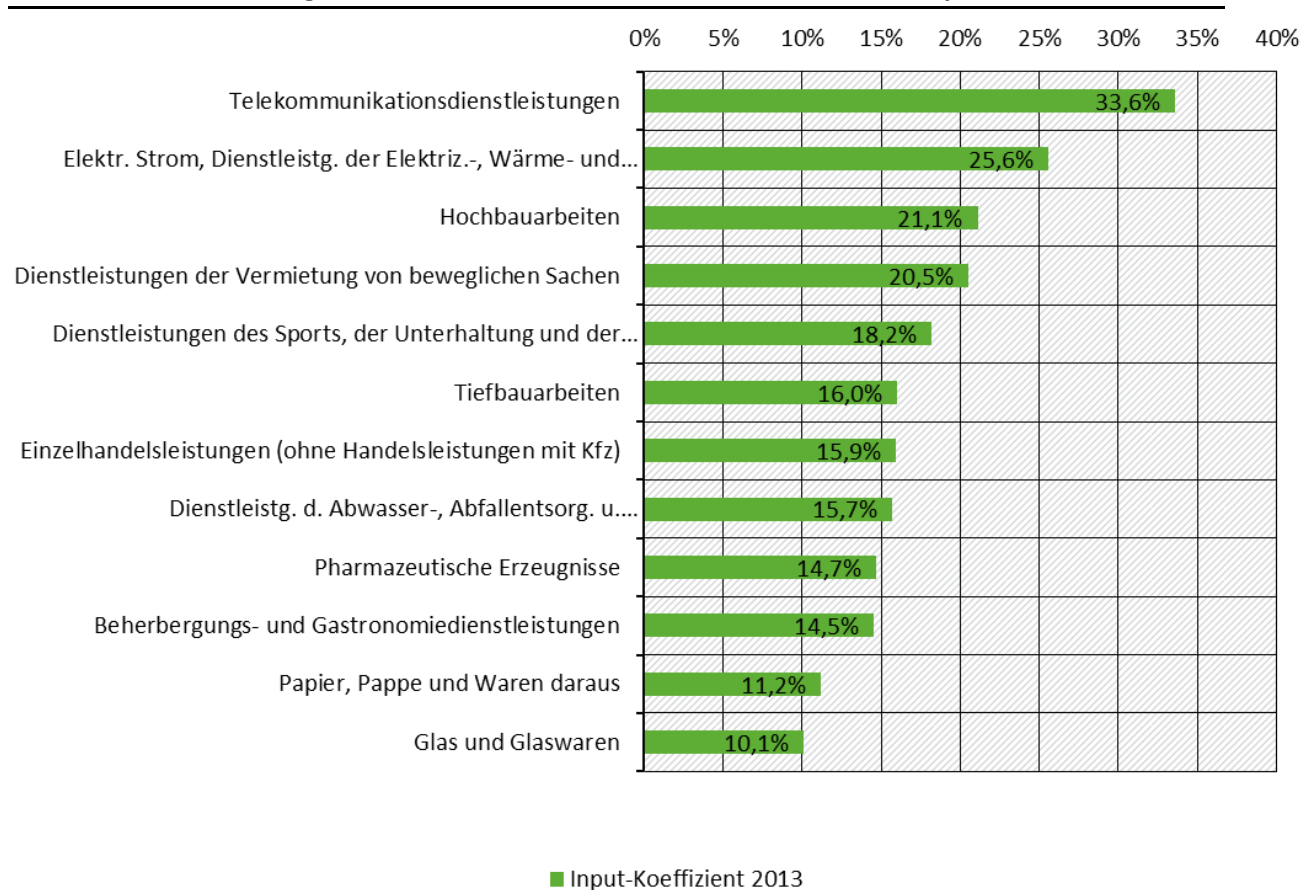
Abbildung 71: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Lieferungen der 10 Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Kapitalkoeffizienten



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Für die Telekommunikation und die Elektrizitätserzeugung sowie – in etwas geringerem Maße – für den Einzelhandel sind die Lieferungen der kapitalintensiven Sektoren auch als Inputs in den Produktionsprozess und damit als Kostenfaktor bedeutend (Abbildung 72). Daneben gibt es eine Reihe weiterer Sektoren, für die Störungen Vorleistungslieferungen der kapitalintensiven Sektoren wegen des hohen Anteils an ihren gesamten Inputs erhebliche Auswirkungen haben können. Dazu gehören die Bauwirtschaft, der Leasing-Sektor, verschiedene Dienstleistungsbereiche und einige Bereiche der Industrie wie die Pharmazie und die Papier- und Glasindustrie.

Abbildung 72: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Lieferungen der 10 Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Kapitalkoeffizienten



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Zusammenfassend lässt sich feststellen

- ▶ Zu den besonders kapitalintensiven Sektoren, die von Beeinträchtigungen des Kapitalstocks direkt stark betroffen sein können, gehören wichtige Infrastrukturbereiche wie die Wasserversorgung, die Wasser- und Abfallentsorgung, die Energieversorgung und die Telekommunikation.
- ▶ Eine hohe indirekte Betroffenheit von klimabedingten Beeinträchtigungen des Kapitalstocks ist bei den Sektoren zu erwarten, die Hauptabnehmer von kapitalintensiv produzierten Vorleistungen sind und bei denen diese Vorleistungen gleichzeitig einen hohen Anteil ihrer

Inputs und damit ihrer Kosten darstellen; dazu gehören insbesondere die Telekommunikation und die Elektrizitätserzeugung sowie der Einzelhandel.

- Einen großen Teil ihrer Produktion liefern die kapitalintensiv produzierenden Sektoren direkt an Endnachfrage, vor allem an private Haushalte, die deshalb von Produktionsstörungen und Preissteigerungen infolge von Beeinträchtigungen des Kapitalstocks unmittelbar betroffen sind.

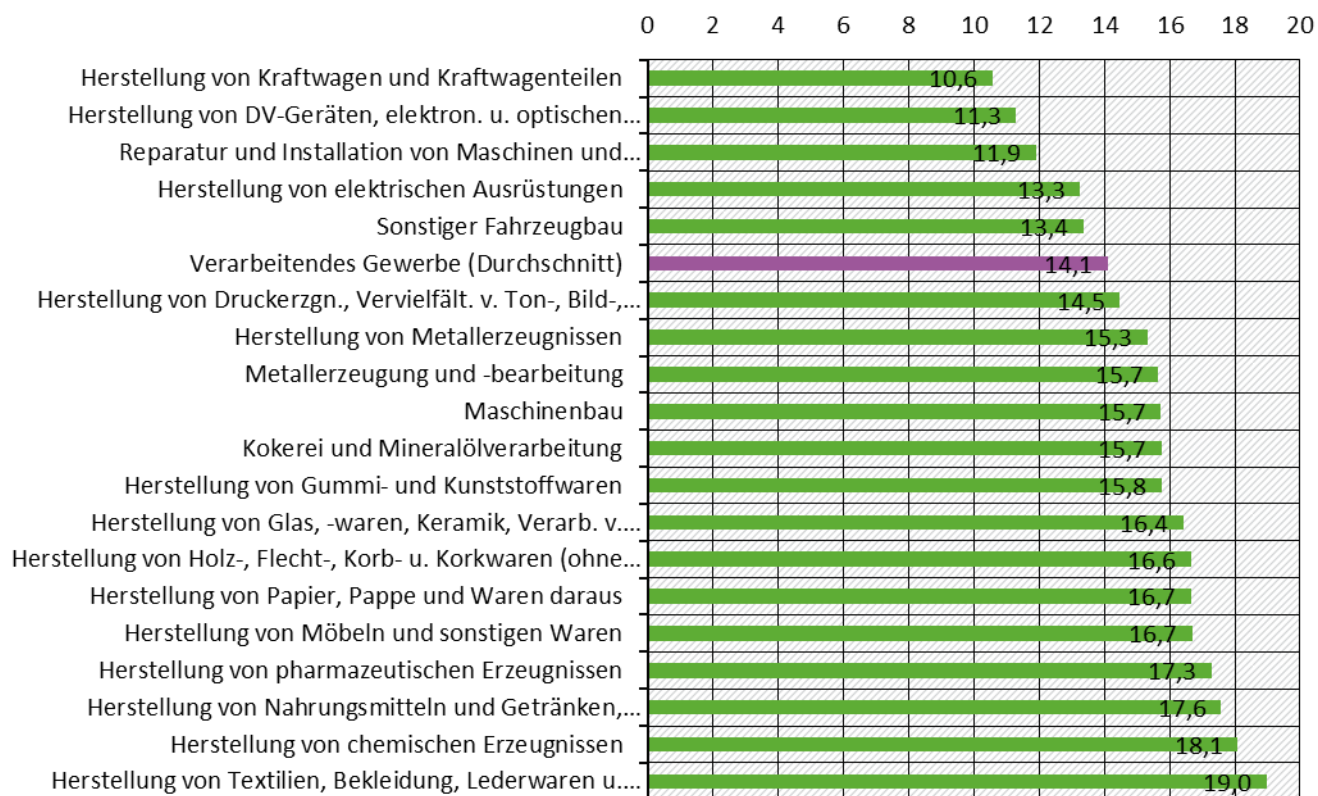
3.1.5.4.2 Branchen mit niedriger Nutzungsdauer des Kapitalstocks

Grundsätzlich kann die Wirtschaft auf den Klimawandel reagieren, indem sie Produktionsprozesse und den Kapitalstock anpasst. Die Fähigkeit zur Anpassung und die damit verbundenen Kosten hängen von der Nutzungsdauer der Kapitalgüter ab, die je nach Sektor unterschiedlich ist. Eine lange Nutzungsdauer von Kapitalgütern erschwert den Strukturwandel und erhöht die Kosten der Anpassung. Eine kürzere Nutzungsdauer erhöht die Anpassungsfähigkeit des Wirtschaftsbereichs, weil bestehende Produktionsanlagen schneller aus dem Anlagenbestand ausscheiden und dann kostengünstig durch angepasste Produktionsanlagen ersetzt werden können.

Im Durchschnitt über alle Branchen des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland beträgt die Nutzungsdauer der Anlagen (Bauten und Ausrüstungen) gut 14 Jahre (Abbildung 73, Säule flüchtig eingefärbt).⁹⁹ Unter den Wirtschaftsbereichen des Verarbeitenden Gewerbes hatte im Jahr 2015 der Bereich Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen mit 10,6 Jahren die kürzeste Nutzungsdauer des Kapitalstocks. Die Herstellung von Textilien, Bekleidung, Lederwaren und Schuhen hatte dagegen die längste Nutzungsdauer (19 Jahre). Mit 18,1 Jahren folgt die chemische Industrie. Weitere Branchen mit überdurchschnittlicher Nutzungsdauer ihres Kapitalstocks sind die Papierherstellung, die Glasindustrie und die Metallerzeugung und -bearbeitung.

⁹⁹ Die durchschnittliche Nutzungsdauer ergibt sich aus der Division von Abschreibungen und Anlagevermögen.

Abbildung 73: Durchschnittliche Nutzungsdauer der Anlagen in den Branchen des Verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2015 in Jahren



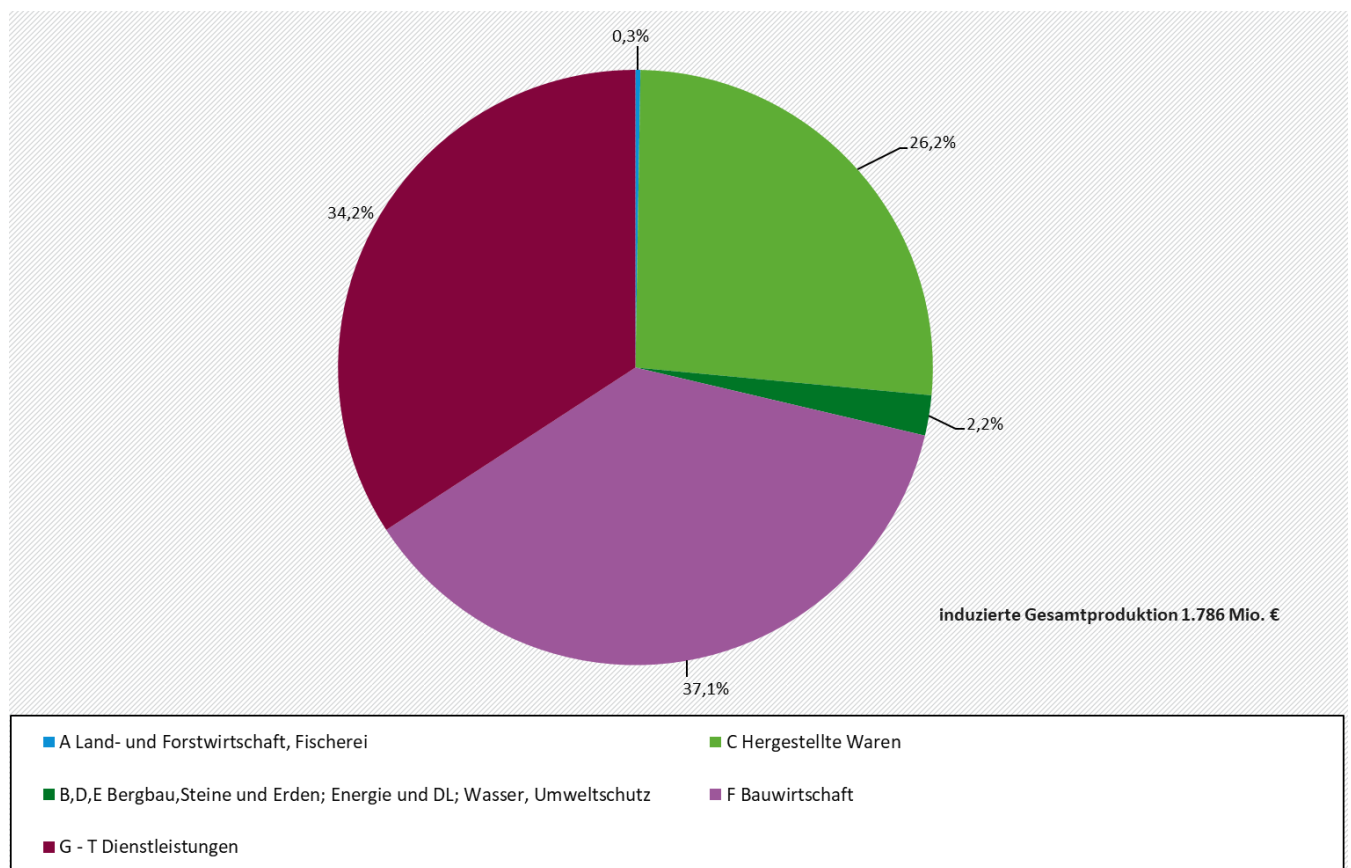
© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

3.1.5.4.3 Direkte und indirekte Produktions- und Beschäftigungswirkungen nach Branchen für 1 Mrd. Euro Investitionen in gewerbliche Infrastruktur

Investitionen in die gewerbliche Infrastruktur stellen im Wesentlichen Bauten und ausgewählte Ausrüstungen dar. Die Nachfragestruktur der Investitionen in die gewerbliche Infrastruktur wird aus der amtlichen Input-Output-Rechnung übernommen.

Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur wird eine Bruttoproduktion in Höhe von knapp 1,8 Mrd. Euro angestoßen (Abbildung 74). Der größte Anteil entfällt in Abgrenzung der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche auf die Bauwirtschaft (37,1%) gefolgt von Dienstleistungen (34,2%).

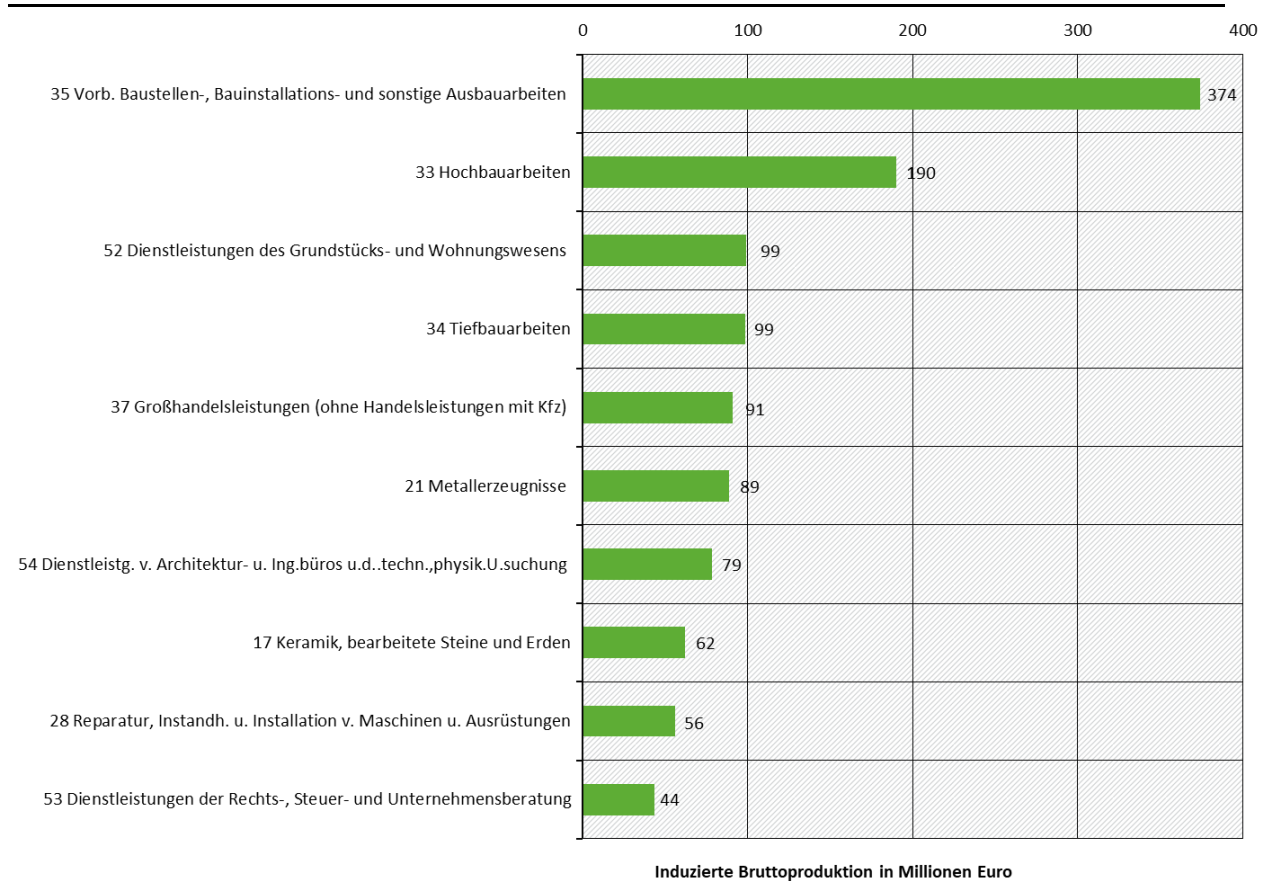
Abbildung 74: Anteile der zusammengefassten Wirtschaftsbereiche an der induzierten Produktion durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Betrachtet man, welche 10 Produktionsbereiche am stärksten bei der Bruttoproduktion begünstigt werden, wenn 1 Mrd. € in die gewerbliche Infrastruktur investiert werden (Abbildung 75), so wird deutlich, dass vor allem die Bauwirtschaft von der Beseitigung von Schäden an der gewerblichen Infrastruktur profitieren würde. Der größte Produktionseffekt entsteht im Baubereich Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten. Danach folgen der Hochbau an zweiter und der Tiefbau an vierter Stelle. Die an dritter Stelle verorteten Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens sind ebenfalls mit der Bauwirtschaft verbunden.

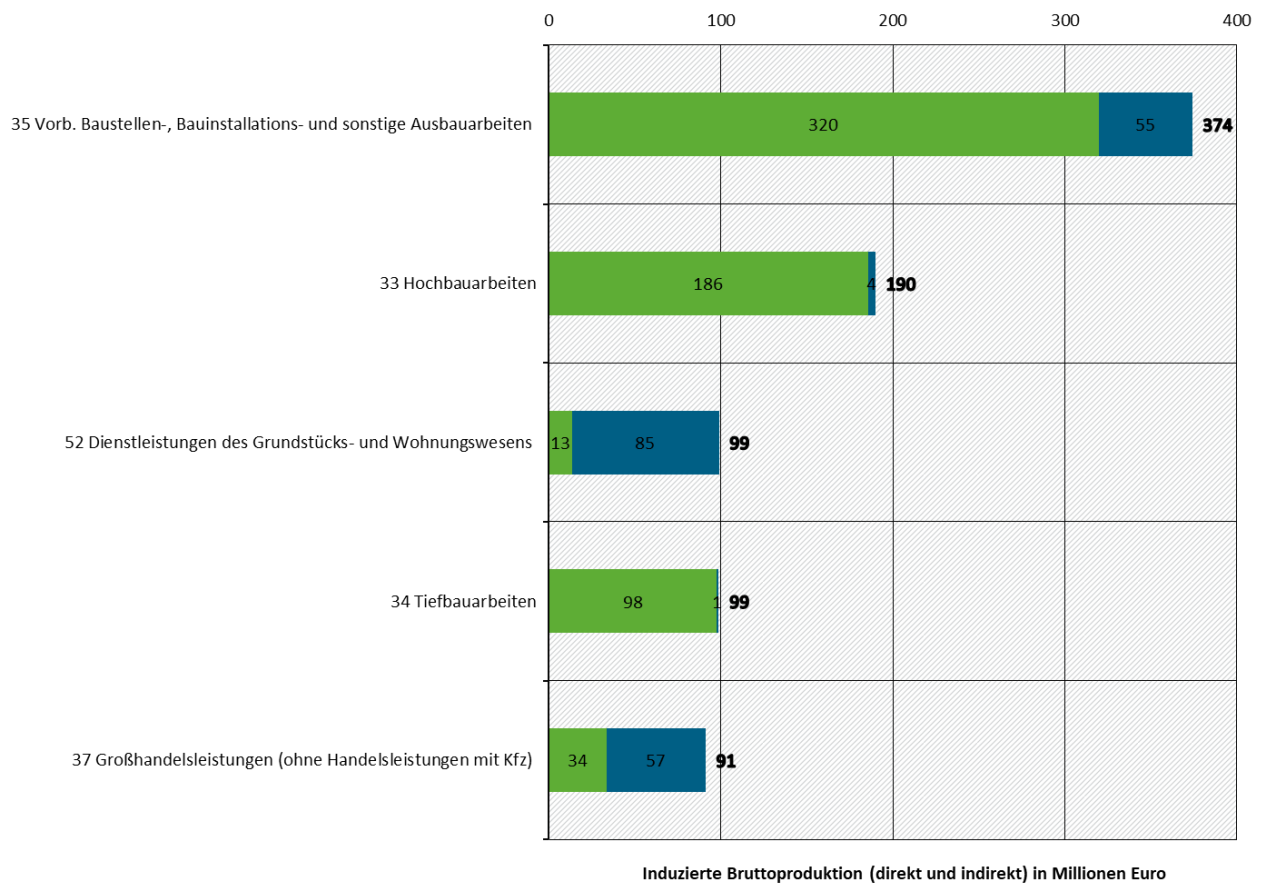
Abbildung 75: Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Bruttoproduktion nach Sektoren (10 wichtigste Bereiche)



© J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt, Berechnungen: J. Blazejczak

Abbildung 76 zeigt die durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Produktion in den fünf am stärksten profitierenden Wirtschaftsbereichen, wobei jeweils nach direkten und indirekten Effekten unterschieden wird. Während in den Branchen der Bauwirtschaft überwiegend direkte Produktionseffekte anfallen, werden die Dienstleistungsbereiche überwiegend indirekt angestoßen, d. h. Dienstleistungen fließen als Vorleistungen in die Investitionen zur Wiederherstellung der gewerblichen Infrastruktur ein.

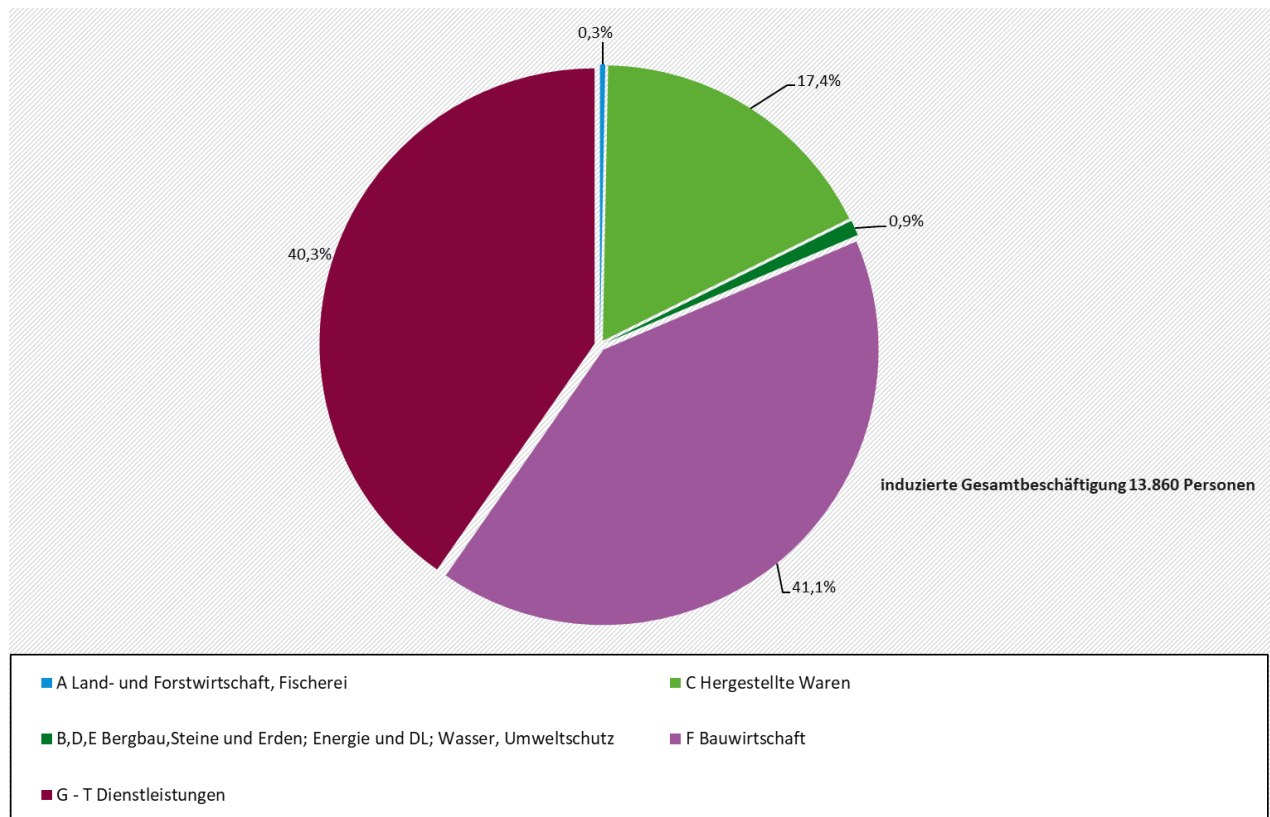
Abbildung 76: Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte direkte und indirekte Produktion (5 wichtigste Wirtschaftsbereiche)



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur wird in der gesamten Volkswirtschaft eine Beschäftigung von knapp 14.000 Personen ausgelöst (Abbildung 77). Von dieser Bruttobeschäftigung entfallen 41,1% auf die Bauwirtschaft. 40,3% der Bruttobeschäftigung werden für die Erbringung von Dienstleistungen benötigt, während für die Herstellung von Waren nur 17,4% der Gesamtbeschäftigung benötigt werden.

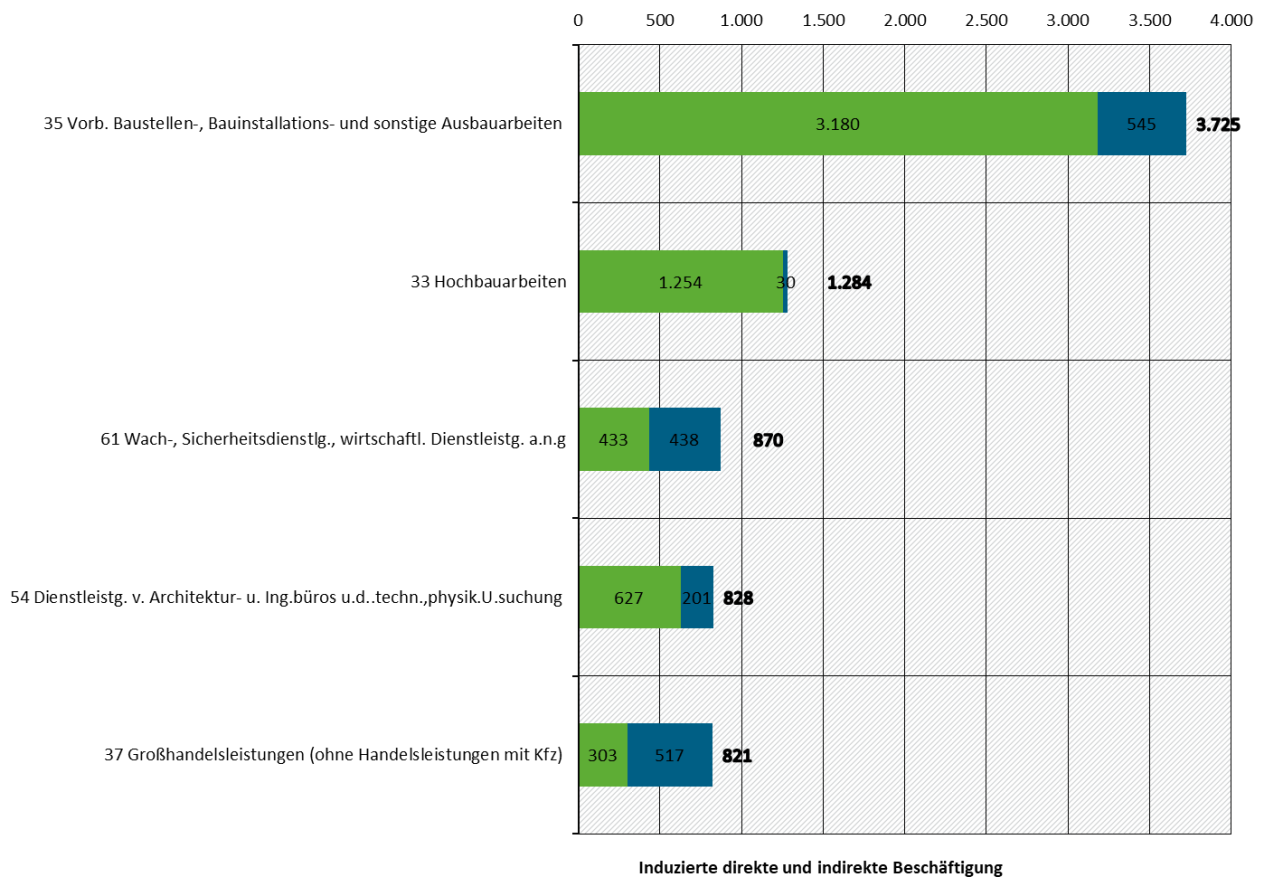
Abbildung 77: Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Bruttobeschäftigung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Abbildung 78 zeigt die durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte Beschäftigung nach direkten und indirekten Effekten in den 5 am stärksten betroffenen Wirtschaftsbereichen. Der Produktionsbereich mit dem größten Beschäftigungseffekt ist Baubereich Vorbereitende Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten (3.700 Personen insgesamt, davon 550 Personen indirekt durch die Nachfrage Vorleistungen). Nach dem weiteren Baubereich Hochbau (knapp 1.300 Personen) folgen dann in der Rangfolge Dienstleistungsbereiche.

Abbildung 78: Durch 1 Mrd. € Investitionen in gewerbliche Infrastruktur induzierte direkte und indirekte Beschäftigung (5 wichtigste Sektoren)



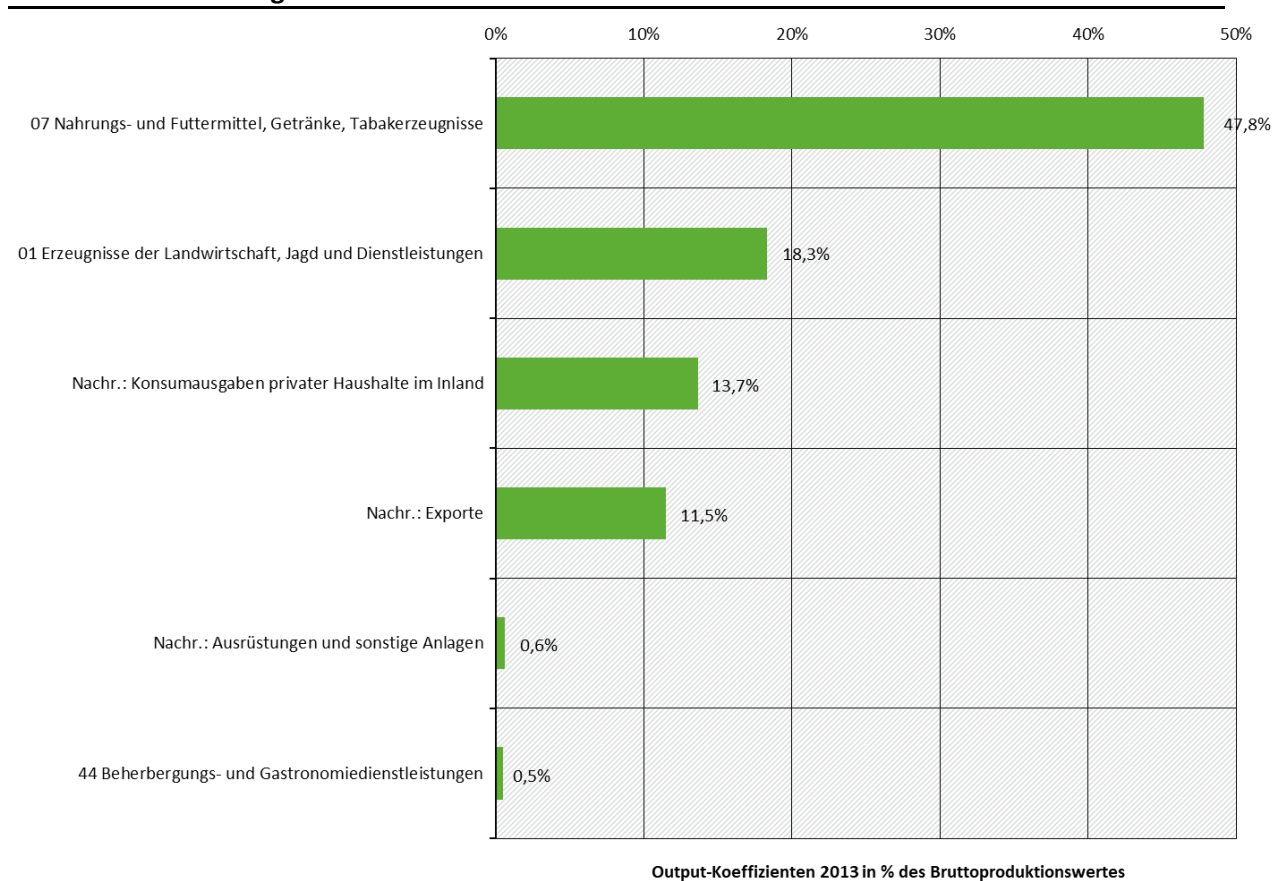
© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

3.1.5.5 Wassererosion

3.1.5.5.1 Branchen, die direkt und indirekt stark von inländischen Lieferungen der Landwirtschaft abhängig sind

Der größte Teil der landwirtschaftlichen Produktion wird von nur wenigen Sektoren abgenommen. Fast die Hälfte der landwirtschaftlichen Erzeugnisse gehen als Vorleistungen in die Nahrungs-, Futtermittel- und Getränkeindustrie; dieser Sektor ist also von Produktionsausfällen in der Landwirtschaft und damit möglicherweise verbundenen Preissteigerungen abhängig (Abbildung 79). Landwirtschaftliche Erzeugnisse werden auch innerhalb der Landwirtschaft von anderen Betrieben als Vorleistungen eingesetzt; das verstärkt die Auswirkungen von Störungen der landwirtschaftlichen Produktion. Daneben liefert die Landwirtschaft auch einen Teil ihrer Produkte direkt an Endnachfrager im Inland (fast 14%) und an ausländische Abnehmer (knapp 12%).

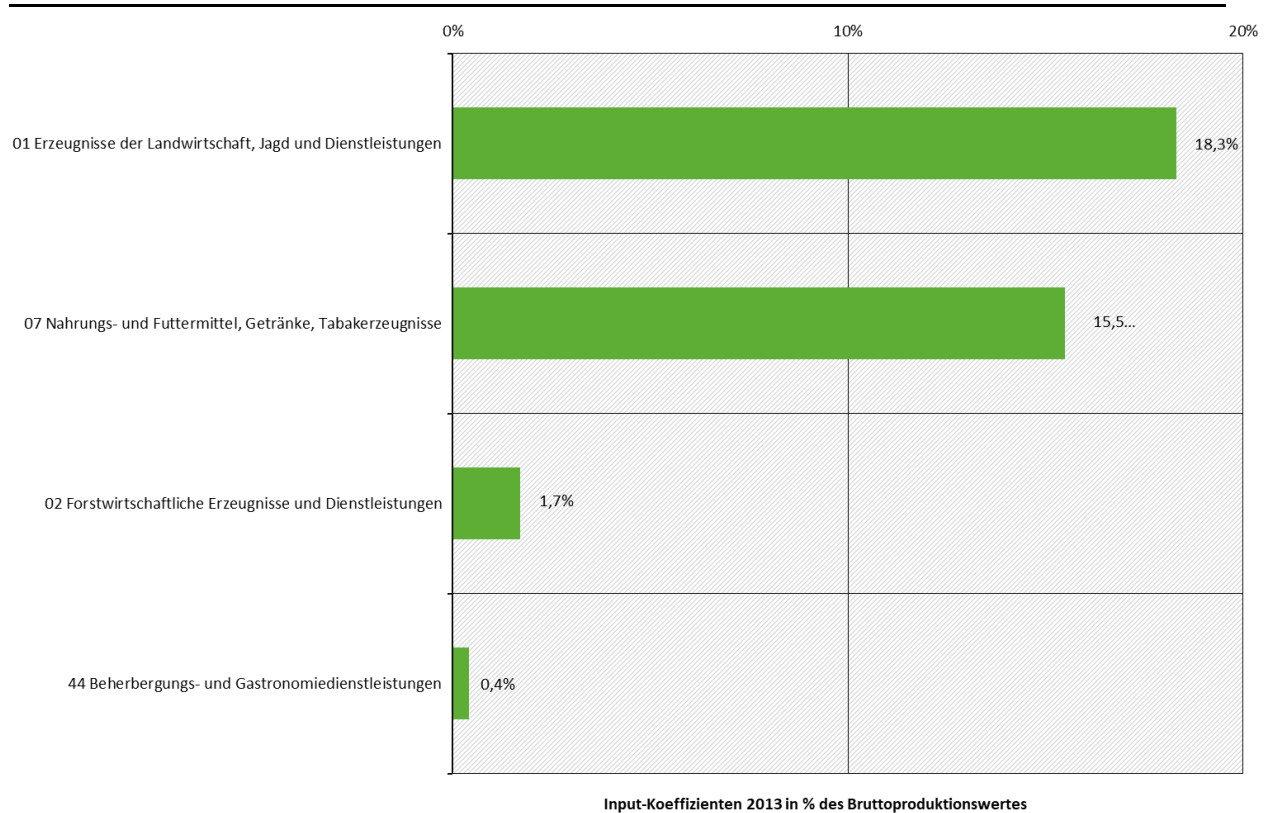
Abbildung 79: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Output-Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Dem entsprechend spielen landwirtschaftliche Erzeugnisse in der Bezugs- und Kostenstruktur nur weniger Wirtschaftsbereiche eine herausragende Rolle, am stärksten in der Landwirtschaft selbst – das lässt eine kräftige Selbstverstärkung von Störungen der landwirtschaftlichen Produktion erwarten – und in der Nahrungs-, Futtermittel- und Getränkeindustrie (Abbildung 80).

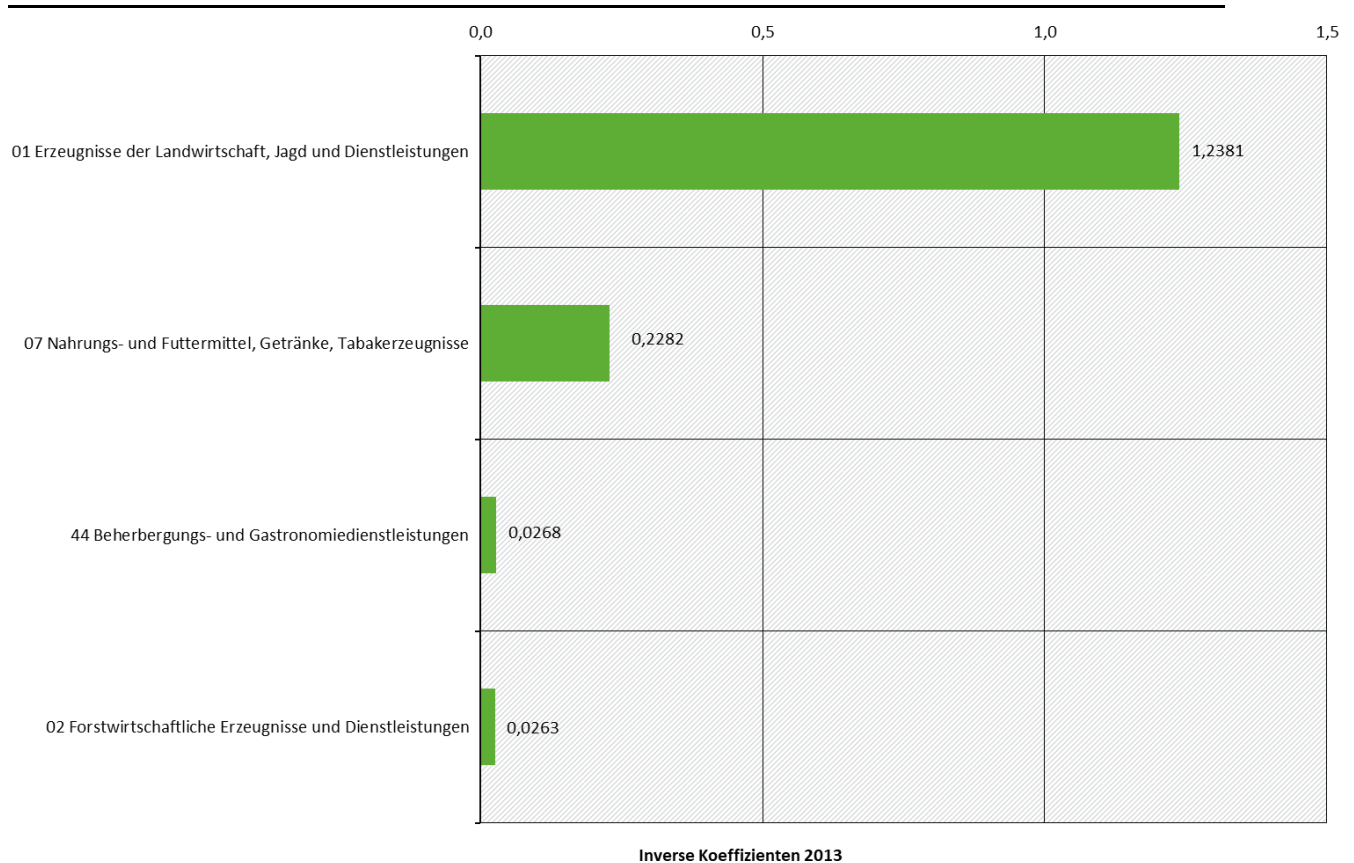
Abbildung 80: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten Input-Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Abbildung 81 zeigt, dass sich dieser Befund nicht ändert, wenn in anderen Vorleistungen enthaltene indirekte Lieferungen landwirtschaftlicher Erzeugnisse mitberücksichtigt werden (inverse Koeffizienten).

Abbildung 81: Wirtschaftsbereiche mit den höchsten inversen Koeffizienten für inländische Erzeugnisse der Landwirtschaft



© eigene Darstellung, J. Blazejczak. Daten: Statistisches Bundesamt

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass

- ▶ die Erzeugnisse der Landwirtschaft zu einem großen Teil als Vorleistungen an nur wenige Abnehmersektoren geliefert werden, dabei insbesondere die Nahrungs-, Futtermittel- und Getränkeindustrie;
- ▶ dass dementsprechend der Anteil landwirtschaftlicher Produkte an den Inputs und damit an den Kosten der Nahrungs-, Futtermittel- und Getränkeindustrie besonders hoch ist; unter Berücksichtigung des indirekten Gehalts landwirtschaftlicher Erzeugnisse erweist sich – in schwächerem Maße – auch das Gastgewerbe als von der Landwirtschaft abhängiger Bereich;
- ▶ dass landwirtschaftliche Produkte in hohem Maße auch innerhalb der Landwirtschaft als Vorleistungen eingesetzt werden, so dass bei Produktionsstörungen eine kräftige Selbstverstärkung zu erwarten ist.

3.1.5.6 Zusammenfassung

Die Impulse von Klimaschäden sowie von Maßnahmen zu ihrer Beseitigung und von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel wirken aufgrund der wirtschaftlichen Verflechtung durch Lieferbeziehungen zwischen den Wirtschaftsbereichen weit über die unmittelbar betroffenen Branchen hinaus.

Weil zur Herstellung der unmittelbar benötigten Güter vielfältige Vorleistungsgüter erforderlich sind, sind die insgesamt ausgelösten Produktionseffekte deutlich größer als der ursprüngliche Nachfrageimpuls. Dabei unterscheidet sich die Höhe der Produktionseffekte nach der jeweiligen Maßnahme. Besonders deutlich wird das bei den ausgelösten Beschäftigungswirkungen, weil dabei zusätzlich Unterschiede in der Arbeitsproduktivität zwischen den Branchen ins Spiel kommen. So löst eine Ausgabe von 1 Mrd. Euro für den Gleisbau oder für gewerbliche Infrastruktur Beschäftigungseffekte im Umfang von 12,6 Tausend Personen aus, bei Ausgaben für den Wohnungsbau sind es 14,4 Tausend Personen.

Das Hauptgewicht der Produktions- und Beschäftigungseffekte liegt bei den meisten der untersuchten Impulse bei der Bauwirtschaft. Allerdings sind je nach Maßnahme unterschiedliche Teilbereiche betroffen. So erfordern Maßnahmen der Bauvorsorge Produktionskapazitäten im Ausbaugewerbe, während der Deichbau in erster Linie Tiefbauleistungen in Anspruch nimmt. Neben Bauleistungen müssen für Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen auch in großem Umfang industrielle Erzeugnisse bereitgestellt werden; bei Gleisbauarbeiten etwa machen diese den Hauptteil der Produktionseffekte aus.

Über die Verflechtung der Wirtschaftsbereiche breiten sich die Impulse von Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen auch auf die Dienstleistungsbereiche aus, insbesondere sind unternehmensnahe Dienstleistungen und Handelsleistungen betroffen.

Mit Hilfe von Input-, Output- und inversen Koeffizienten lässt sich darstellen, welche nachgelagerten Branchen von Produktionsstörungen (und damit möglicherweise verbundenen Preissteigerungen) in vorgelagerten Sektoren besonders betroffen sein könnten. Landwirtschaftliche Erzeugnisse etwa werden – außer direkt von Endnachfragern – nur von wenigen anderen Sektoren in Anspruch genommen; zum großen Teil gehen sie in die Nahrungs-, Futtermittel- und Getränkeindustrie, die damit von der Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Produkte besonders stark abhängig und von Preissteigerungen erheblich betroffen ist. Im Gegensatz dazu sind Eisenbahnverkehrsleistungen für eine größere Anzahl von Branchen bedeutend. Wenn Schäden an der gewerblichen Infrastruktur Branchen mit hoher Kapitalintensität besonders stark treffen, leiden darunter vornehmlich auch wichtige Infrastrukturbereiche wie die Telekommunikation und die Elektrizitätserzeugung.

Häufig – etwa bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen oder bei kapitalintensiv produzierten Gütern – ist auch die intrasektorale Verflechtung hoch: ein erheblicher Teil der Produktion eines Sektors wird von anderen Unternehmen derselben Branche in Anspruch genommen. In diesen Fällen ist bei Produktionsstörungen von einer Selbstverstärkung zu rechnen.

Wie stark Unternehmen in den einzelnen Wirtschaftssektoren von Klimaschäden an der gewerblichen Infrastruktur betroffen sind und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel umsetzen können, wird auch von ihrer Fähigkeit zur Anpassung ihrer Produktionsprozesse und ihres Kapitalstocks bestimmt, sie ist umso höher je kürzer die Nutzungsdauer ihrer Kapitalgüter ist. Im Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes liegt die Nutzungsdauer bei 14 Jahren, eine besonders kurze Nutzungsdauer ihrer Anlagen hat die Kraftfahrzeugherstellung, überdurchschnittlich lang ist die Nutzungsdauer der Anlagen in der chemischen Industrie.

3.1.6 Zusammenfassung

Die direkten Kosten des Klimawandels und von Anpassungsmaßnahmen wirken als Impulse, die über vielfältige Interdependenzen im ökonomischen System auch weit verzweigte Folgewirkungen für wirtschaftliche Zielgrößen entfalten. Mit der vorliegenden Untersuchung soll die Bedeutung dieser Folgewirkungen verdeutlicht werden.

Dabei sind die Einschränkungen zu beachten, die sich aus ökonomischen Rechen- und Analysesystemen ergeben: In der Regel sind lediglich tangible Kosten abgebildet, intangible Kosten wie der Verlust an Lebensqualität durch Krankheit bleiben unberücksichtigt. Auch sind sie zur Darstellung von Folgewirkungen extremer Ereignisse und von Engpässen bei Schlüsselressourcen wenig geeignet. Häufig bleibt auch ausgeblendet, dass der Klimawandel weltweit zu Schäden führt, die sich über internationale Wirtschaftsverflechtungen im betrachteten Land auswirken. Schließlich hängt die Einschätzung der Kosten des Klimawandels davon ab, in welchem Umfang endogene Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt sind.

Bei den Impulsen sind solche, die auf der Angebots- und solche, die auf der Nachfrageseite des Gütermarktes ansetzen, zu unterscheiden. Die Folgewirkungen angebotsseitiger Impulse lassen sich mit der Produktionsfunktion erfassen: Klimaschäden, Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen verringern die sonstigen Produktionsmöglichkeiten, es kann zu Kapazitätsengpässen, Preissteigerungen und Beeinträchtigungen der Wettbewerbsfähigkeit kommen. Auf der Nachfrageseite können Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen zu einer Verdrängung anderer Nachfrage führen, gleichzeitig kann es zu Verstärkungseffekten durch die Verausgabung neu entstandener Einkommen oder den Aufbau zusätzlicher Produktionskapazitäten kommen. In sektoral disaggregierter Betrachtung zeigt sich, dass Klimaschäden über die Vorleistungsverflechtung zwischen den Sektoren Folgewirkungen in weiteren Sektoren haben, die von diesen Vorleistungen abhängen. Teils sind die Folgewirkungen von schwer vorhersehbaren Entscheidungen von Wirtschaftssubjekten abhängig und es müssen Annahmen darüber getroffen werden, wie die Akteure entscheiden. Beseitigungs- und Anpassungsmaßnahmen können zu höherer wirtschaftlicher Aktivität führen. Wenn aber dazu bisher ungenutzte Produktionsfaktoren nicht mobilisiert werden können, sondern auf alternative Verwendungen verzichtet werden muss, verbessert sich die Wohlfahrt im Vergleich zu einer Situation ohne Klimawandel nicht.

Für drei ausgewählte Klimawirkungsbereiche werden wichtige ökonomische Impulse, Interdependenzen und Wirkungen dargestellt.

- Impulse durch Klimaschäden an Gebäuden und Infrastrukturen und durch darauf bezogene Anpassungsmaßnahmen können bereits vor Schadenseintritt die Renditeerwartungen von Investoren dämpfen; sie können zu Produktionsausfällen führen, wenn sie eintreten, und durch die Inanspruchnahme volkswirtschaftlicher Ressourcen Opportunitätskosten verursachen, wenn sie beseitigt werden. Wenn der Kapitalstock dabei modernisiert wird, sind dauerhafte Wachstumsimpulse denkbar.
- Erhöhte Mortalitäts- und Morbiditätsrisiken durch Hitzebelastung führen zu einem geringeren Arbeitsangebot und zu höheren Behandlungskosten. Erheblich stärkere tangible Impulse und volkswirtschaftliche Wirkungen sind von hitzebedingten Leistungseinbußen zu erwarten. Anpassungsmaßnahmen erfordern zusätzliche Investitionen und Ausgaben für Personal- und Energie.

- Die Impulse aus der Beeinträchtigung von Böden stellen sich vor allem als verringerte Produktivität des Produktionsfaktors Boden und als Verluste an Anbaufläche der Landwirtschaft dar, daneben als Ausgaben für die Schadensbeseitigung. Anpassungsmaßnahmen lösen ökonomische Impulse in Form von Investitionen, laufende Personal- und Sachausgaben sowie Beeinträchtigungen der Bodenproduktivität aus.

Gesamteinschätzungen der Schäden durch den Klimawandel soweit sie monetär bewertbar sind kommen für mitteleuropäische Länder wie Deutschland unter Berücksichtigung von Folgewirkungen in einem 2°C-Klimaszenario zu Kostenschätzungen unter 0,2% des BIP; dabei sind Rückwirkungen des weltweiten Klimawandels auf Deutschland nicht berücksichtigt. Die Wohlfahrtsverluste könnten deutlich höher ausfallen als die Auswirkungen auf das BIP. Mit höherem Temperaturanstieg könnten die Schadenskosten zudem überproportional steigen.

Für zusätzliche Investitionen und für Produktivitätseinbußen wurden die makroökonomischen Folgewirkungen untersucht und als BIP-Multiplikatoren dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die indirekten Wirkungen bedeutend sind und im Allgemeinen die Impulse dämpfen aber nicht aufheben. Wenn allerdings zusätzliche Investitionen zu Produktivitätssteigerungen führen, kann der ursprüngliche Impuls verstärkt werden. Produktivitätseinbußen führen mittel- und längerfristig zu Wachstumseinbußen, dabei können sich die Produktivitätseinbußen verstärken. Die Folgewirkungen hängen stark von Annahmen über wirtschaftliche Wirkungsmechanismen ab.

Aufgrund der Lieferverflechtungen zwischen den Wirtschaftsbereichen wirken die Impulse von Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen weit über die unmittelbar betroffenen Branchen hinaus. Die insgesamt ausgelösten Produktionseffekte sind größer als der ursprüngliche Impuls, unterscheiden sich in ihrer Höhe aber nach der jeweiligen Maßnahme. Das Hauptgewicht der Produktions- und Beschäftigungseffekte liegt meist bei der Bauwirtschaft, je nach Art der Schäden allerdings bei unterschiedlichen Teilbereichen. Schließlich breiten sich die Impulse auch auf die Dienstleistungsbereiche aus.

Produktionsstörungen wirken sich in nachgelagerten Wirtschaftsbereichen aus, dabei lassen sich Unterschiede in der Zahl und dem Grad der Abhängigkeit der betroffenen Branchen ausmachen, und es lässt sich zeigen, dass es über intrasektorale Lieferverflechtungen zu einer Selbstverstärkung der Produktionsstörungen kommen kann. Die Reaktionsmöglichkeiten der Unternehmen auf Produktionsstörungen hängen nicht zuletzt von der Nutzungsdauer ihrer Kapitalgüter ab, die sich nach Wirtschaftssektoren deutlich unterscheidet.

Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen lösen also bedeutende und komplexe Folgewirkungen aus. Soweit rechenbar, berühren sie den Wachstumspfad der gesamten Volkswirtschaft aber nur wenig. Jedoch können die sektoralen und lokalen Wirkungen gravierend ausfallen, zumal sie sich über Lieferverflechtungen auch auf Wirtschaftsbereiche ausbreiten, die direkt nur wenig betroffen sind. Tendenziell dämpfen makroökonomische Interdependenzen die Folgewirkungen, jedoch hängen sie von vielen Annahmen über die Reaktionsweisen der Wirtschaftsakteure ab. Positive Wachstumseffekte können vor allem erreicht werden, wenn Wiederherstellungs- und Anpassungsmaßnahmen für eine Modernisierung des Kapitalstocks genutzt werden. Über Lieferverflechtungen breiten sich die Wirkungen von Klimaschäden auch auf Wirtschaftsbereiche aus, die zunächst nur wenig betroffen erscheinen.

4 Schluss

Ein Ziel des Vorhabens war es, systematisch die zu erwartenden Effekte des Klimawandels auf Deutschland zu untersuchen sowie relevante Anpassungsziele und –maßnahmen zu evaluieren, Potentiale für sektorale Ziele des Klimawandels zu erkennen, gemeinsam mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ kombinierte Politikinstrumente der Klimaanpassung priorisieren zu können und volkswirtschaftliche Folgen des Klimawandels zu verstehen. Hierzu gab es einerseits einen regelmäßigen Informationsaustausch zwischen dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ und dem Konsortium und andererseits Diskussionen des Konsortiums mit Fachexperten einzelner Bundesbehörden.

4.1 Modellierung von Schadenspotentialen

Es wurden Wirkungsketten identifiziert, die für Deutschland aufgrund ökonomischer, sozialer, kultureller, ökologischer und/oder flächenmäßiger Aspekte von besonderer Bedeutung sind. Hierbei wurde, wo dies als möglich und sinnvoll erachtet wurde, eine ökonomische Schadensanalyse durchgeführt. Die anschließende Auswertung von Zielen der Klimaanpassung ließ vor allem Widersprüche und Synergien in unterschiedlichen Handlungsfeldern deutlich werden. Im Rahmen dieser Analyse, die vom IÖR und UP Transfer bearbeitet wurde, wurden 8 Wirkungsketten detailliert analysiert. Für die Schwerpunkte Starkregen und Sturmfluten wurden derzeitige Schadenspotentiale, wo möglich, potenzielle Veränderungen aufgrund des Klimawandels sowie die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen abgeschätzt. Für die Schwerpunkte Mortalität, Leistungsfähigkeit, Waldbrand und Erosion wurden mögliche Veränderungen durch den Klimawandel und entsprechende Schadensprozesse eingehend betrachtet. Wo die Datenlage es erlaubte, wurden zukünftige Veränderungen des Schadenspotentials aufgrund des Klimawandels oder sozio-ökonomischer Veränderungen (wie verstärkte Bebauung) quantifiziert.

Das Schadenspotential an **Wohngebäuden durch Starkregen** in NRW wurde anhand von Fallstudien abgeleitet. Das Schadenspotenzial beziffert dabei die Summe aller potenziell durch Starkregen betroffenen Gebäudewerte und stellt somit nicht das mögliche Ergebnis eines einzelnen Starkregenereignisses dar. So ist nicht davon auszugehen, dass ganz NRW von einem einzelnen extremen Starkregenereignis flächendeckend betroffen sein wird. Hierbei ergab sich Schadenspotential von insgesamt 13 Mrd. €. Unter der Annahme, dass die Wohnbaufläche im Laufe der Jahre weiter ansteigt, ist mit einer Steigerung des Schadenspotenzials bis 2030 um etwa 6 % zu rechnen. Die Anpassung der Bauvorsorge (z.B. Abdichten von Kellern, Installation von Rückstausicherungen und Wassersperren) verspricht ein Schadenminderungspotential von 36 % und könnte durch rechtliche oder ökonomische Anreize gefördert werden. Die Erstellung von Starkregenkarten (mit Mindest- und Qualitätsstandards) sollte systematisch und flächendeckend erfolgen. Der Effekt von **Sturmfluten auf Wohngebäude** lässt sich für die Küstenbundesländer aufgrund sehr unterschiedlicher Gefahrenkarten kaum vergleichend darstellen. So unterscheiden sich z. B. die Annahmen hinsichtlich der Jährlichkeiten der

Überflutungsszenarien und der Wirkung des bestehenden Hochwasserschutzes teils deutlich (siehe Tabelle 5). Auch die exponierten Werte in Risikogebieten variieren stark zwischen den Bundesländern. Für das Extremszenario wird in der Regel der unwahrscheinliche Fall angenommen, dass alle Hochwasserschutzmaßnahmen versagen und alle Risikogebiete überflutet werden. Vor diesem Hintergrund - abhängig von den Randbedingungen - errechnen sich in den Küstenbundesländern potentielle Schäden an Wohngebäuden zwischen 6,3 Mrd. Euro für einen Stadtstaat wie Bremen und bis zu 14 Mrd. Euro für ein Flächenbundesland wie Niedersachsen. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich auch bei diesen Werten um Schadenspotenziale und nicht um die möglichen Folgen eines einzelnen Ereignisses handelt. Auch hier wird mit zunehmender Wohnbaufläche das Schadenspotential bis 2030 voraussichtlich um etwa 5 % steigen. Weitere Schäden durch eine zukünftig erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit von Sturmfluten sind möglich. Diesen könnte jedoch durch eine Aufrechterhaltung des derzeitigen Schutzniveaus und eine optimale Bauvorsorge entgegengewirkt werden. So könnte durch eine optimale Bauvorsorge eine durchschnittliche Minderung des Schadenspotentials um 59 % erzielt werden. Die Erstellung der Gefahrenkarten durch die Länder sollte durch die Verwendung einheitlicher Überflutungsszenarien (Wiederkehrintervalle) weiter harmonisiert werden.

Um das Schadenspotential von **Sturmfluten an Industrie und Gewerbe** abzuschätzen, wurden Schäden an Gebäuden, Betriebseinrichtungen, Waren, Produkten und Lagerbeständen in Betracht gezogen. Auch hier variieren die Schadenspotenziale sehr stark zwischen den unterschiedlichen Küstenbundesländern aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen und reichen für die bundeslandspezifischen Extremszenarien von 14,8 Mrd. € für einen Stadtstaat wie Hamburg bis zu 25 Mrd. € für ein Flächenbundesland wie Niedersachsen. Die Unterschiede lassen sich wiederum auf die sehr unterschiedlichen Überflutungsszenarien der Küstenbundesländer und die sehr unterschiedliche Exposition von Werten in Risikogebieten zurückführen. Auch im Extremfall wird hier der unwahrscheinliche Fall einkalkuliert, dass die Küstenschutzmaßnahmen versagen. Eine Zunahme der Industrie- und Gewerbeflächen wird das Schadenspotential bis 2030 um vermutlich 5 % ansteigen lassen. Dies könnte durch eine optimale Bauvorsorge in Bezug auf Gebäude (- 33 %), Betriebseinrichtungen (- 28 %) sowie Waren, Produkte und Lagerbestände (- 25 %) verringert werden. In dem Bereich Industrie und Gewerbe bestehen aufgrund der hohen Heterogenität der Unternehmen und der schlechten Datenlage aber große Unsicherheiten in der Abschätzung potenzieller Schäden. Dieser Bereich sollte deshalb bei zukünftigen Forschungsvorhaben verstärkt Berücksichtigung finden.

Potenzielle **Schäden an der Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten** in den Küstenbundesländern reichen für die Extremszenarien von ca. 935 Mio. € in einem Stadtstaat wie Hamburg bis zu 3,2 Mrd. € in einem Flächenbundesland wie Niedersachsen. Die großen Unterschiede lassen sich wiederum mit den oben genannten Faktoren erklären. Anpassungsmaßnahmen werden hier voraussichtlich nicht direkt an der Schieneninfrastruktur vorgenommen, sondern diese wird durch eine Anpassung der Deichinfrastruktur geschützt. Der Bund als Eigentümer der Bahn könnte jedoch auf eine

verbesserte Datenlage zur Entwicklung und Validierung von Schadensmodellen für die Schieneninfrastruktur hinwirken.

Die menschliche Mortalität durch **Hitzebelastung** wird robust für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 zunehmen. Für die nahe Zukunft wurde ein möglicher Szenario-unabhängiger Anstieg um das Vierfache und für die ferne Zukunft ein möglicher Anstieg um das Sechs- (RCP 4.5) bis Zwölfwache (RCP 8.5) ermittelt. Die Auswirkung von Hitzebelastung auf die menschliche Leistungsfähigkeit wurde exemplarisch durch die Veränderung der Arbeitsproduktivität an Büroarbeitsplätzen veranschaulicht. Hierbei ist mit einer deutlichen Zunahme der Kosten für die Kompensation einer hitzebedingten Verringerung der Leistungsfähigkeit (z.B. durch Klimatisierung, Verschattung) zu rechnen. In der nahen Zukunft ist unabhängig von der Projektion eine mittlere Steigerung der mittleren Kühlgradtage um das Dreifache möglich. Für die ferne Zukunft wurde eine mittlere Steigerung um das Vier- (RCP 4.5) bis mehr als das Achtfache (RCP 8.5) ermittelt.

Potentielle **Schäden durch Wassererosion** lassen sich nur bedingt ermitteln. Die absoluten Abtragsmengen auf konkreten Flächen lassen sich mangels Kenntnis sowohl aktueller als auch der zukünftigen Nutzungen bzw. Fruchtfolgen sowie des Saldos der Erosion (=Erosion – Deposition) nicht belastbar analysieren, weshalb die Ermittlung von Schäden derzeit nicht möglich ist. Es empfiehlt sich eine bundesweit vereinheitlichte und zentral verfügbare Dokumentation von Erosionsschadensfällen unter besonderer Berücksichtigung der on- und off-site Schäden und deren Kosten.

Aussagen zu Schäden durch **Waldbrand** sind derzeit aufgrund der aus den anderen Wirkungsketten sichtbaren großen Bandbreiten wenig aussagekräftig. Für die nahe Zukunft zeigt sich eine Zunahme der Brandanfälligkeit um den Faktor 2 bis 4, für die ferne Zukunft ein Rückgang der Brandanfälligkeit auf Referenzniveau, vermutlich hervorgerufen durch Änderungen der Niederschlagsverhältnisse. Zur Ergänzung zur Waldbrandstatistik des Bundes sollte eine einheitliche Datenbank mit allen Waldbrandereignissen in Deutschland und Beschreibungen zu Ort und Zeit der Brände aufgebaut werden. Die Verringerung der bestandsbedingten Brandanfälligkeit durch Maßnahmen des Waldumbaus hat weiterhin hohe Bedeutung.

5 Quellenverzeichnis

Aaheim, A.; Amudsen, H.; Dokken, T.; Ericson, T.; Wie, T. (2009): A Macroeconomic Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change in Europe – CICERO Report 2009:06. CICERO, Oslo.

adelphi, PRC, EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, Umweltbundesamt, Climate Change 24, Dessau-Roßlau.

Aerts, JCJC (2018): A review of cost estimates for flood adaptation, Water 10(11), 1646. 33 S.

Ahlhelm, I., Frerichs, S., Hinzen, A., Noky, B., Simon, A., Riegel, C., Trum, A., Altenburg, A., Janssen, G., Rubel, C. (2016): Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe): Starkregen, Hochwasser, Massenbewegungen, Hitze, Dürre - Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung, UBA (Hrsg.), Dessau-Roßlau, 130 Seiten.

Aktion Deutschland Hilft (2016): Katastrophenvorsorge zahlt sich aus. Eine Meta-Analyse zum Kosten-Nutzen-Verhältnis von Vorsorgemaßnahmen. Bonn.

Anderson, G.B.; Bell, M.L.; Peng, R.D. (2013) Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. Environmental Health Perspectives 121, 1111–1119.

Anthoff, D.; Tol, R.S.J.; Yohe, G. (2009): Discounting for Climate Change. In: Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal, Vol. 3, 2009-24, Institut für Weltwirtschaft, Kiel.

Ashley, R.M.; Balmforth, D.J.; Saul, A.J.; Blanskby, J.D. (2005): Flooding in the future predicting climate change, risks and responses in urban areas. In: Water Science and Technology 52(5), IWA Publishing, London, S.265 - 273.

Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C. (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. In: Climate Change 24/2015, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Bachner, G.; Bednar-Friedl, B.; Nabernegg, S.; Steiniger, K.W. (2015): Economic Evaluation Framework and Macroeconomic Modelling. In: Steiniger et al. Eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S. 101-120.

Barell, R.; Holland, D.; Hurst, I. (2012): Ray Barell, Dawn Holland und Ian Hurst, Fiscal Multipliers and Prospects for Consolidation. OECD Journal: Economic Studies, vol. 2012/1.

Baum, H.; Kranz, T.; Westerkamp, U. (2010): Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit, Heft M 208, Wirtschaftsverband NW, Bremerhaven.

Bayern (2009): Bayerische Klima Anpassungsstrategie. Online verfügbar unter <http://www.bestellen.bayern.de> (08.08.2018)

Bayerisches Landesamt für Umwelt; Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz; Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Korrigierte Version vom 02.01.2017.

Becker, P.; Becker, A.; Dalelane, C.; Deutschländer, T.; Junghänel, T.; Walter, A (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland – Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt (Hrsg.), Offenbach, 7 Seiten.

Bednar-Friedl, B.; Wolking, B.; König, M.; Bachner, G.; Formayer H.; Offenthaler, I.; Leitner, M. (2015): Transport. In: Steiniger et al. eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S. 279-300.

Belgien (2010): Belgian National Climate Change Adaptation Strategy. Online verfügbar unter <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/adaptatie/bestandenmap/NASpublicatieweb.pdf> (08.08.2018)

Berlin (2011): Stadtentwicklungsplan Klima – Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Online verfügbar unter <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/de/klima/> (08.08.2018)

Blazejczak, J.; Edler, D.; Schill, W.-P. (2014): Steigerung der Energieeffizienz: ein Muss für die Energiewende, ein Wachstumsimpuls für die Wirtschaft. In: DIW Wochenbericht 4 /2014, DIW, Berlin, S. 47-60.

BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2015): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2014. – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn. Online: http://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/01_Markt/10_Statistik/Waldbrandstatistik/Waldbrandstatistik-2014.pdf (11.10.2018)

BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat, Berlin.

Bosello, F.E.; Pierfederici, R. (2012): Assessing the Economic Impacts of Climate Change. An Undated CGE Point of View. Nota di Lavoro 2.2012, Fondazione Eni Enrico Mattei, Mailand.

Botzen, W.J.W.; Monteiro, E.; Estrada, F.; Pesaro, G.; Menoni, S. (2017): Economic Assessment of Mitigating Damage of Flood Events: Cost-Benefit Analysis of Flood-Proofing Commercial Buildings in Umbria, Italy. The Geneva Papers on Risk and Insurance 42(4), Palgrave Macmillan, Basingstoke, S.585-608.

Bouwer, L.M.; Bubeck, P.; Wagtendonk, A.J.; Aerts, J.C.J.H. (2009): Inundation scenarios for flood damage evaluation in polder areas. Natural Hazards and Earth System Sciences (9), 1995-2007, Copernicus, Göttingen.

Bronstert, A.; Bormann, H.; Bürger, G.; Haberlandt, U.; Hattermann, F.; Heistermann, M.; Huang, S.; Kolokotronis, V.; Kundzewicz, Z.W.; Menzel, L.; Meon, G.; Merz, B.; Meuser, A.; Paton, E.N.; Petrow, T. (2017): Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: Brasseur, G.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (Hrsg): Klimawandel in Deutschland, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S.88-101.

BSH (2017): Aktuelle Kenntnislage zum Meeresspiegelanstieg: neue Ergebnisse seit dem IPCC AR5 (2014). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg.

Bubeck, P.; Kreibich, H. (2011): Natural Hazards: direct costs and losses due to the disruption of production processes. FP7 CONHAZ project report. Potsdam.

Büchele, B.; Kreibich, H.; Kron, A.; Thielen, A.H.; Ihringer, J.; Oberle, P.; Merz, B.; Nestmann, F. (2006): Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. In: Natural Hazards and Earth System Sciences (6), Copernicus, Göttingen, S.485–503.

Bundesamt für Naturschutz (2008): Welternährung, Biodiversität und Gentechnik – Kann die Agro-Gentechnik zur naturverträglichen und nachhaltigen Sicherung der Welternährung beitragen? Positionspapier des BfN. Online Verfügbar unter: <https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/agrogentechnik/PositionspapierWelternaehrungGT.pdf> (08.08.2018)

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS), vom Bundeskabinett am 17.12.2008 beschlossen. Berlin.

Bundesregierung (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Berlin.

Buth, M. et al. (2015a): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. In: Climate Change 24/2015, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Buth, M. et al. (2015b): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Kurzfassung. In: Climate Change 24/2015, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

CEDIM (2013): Winterstorm Xaver – Report. CEDIM Forensic Disaster Analysis Group (FDA). Potsdam und Karlsruhe.

Ciscar, J.-C.; Szabó, L.; van Regemorter, D.; Soria, A. (2012): The integration of PESETA sectoral economic impacts into the GEM-E3 Europe model: methodology and results. In: Climatic Change 112.1 (2012), Springer, Berlin und Heidelberg, S.127-142

Dänemark (2008): Danish strategy for adaptation to a changing climate. Online verfügbar unter <http://www.kebmin.dk/node/845>. (08.08.2018)

Dellink, R.; Hwang, H.; Lanzi, E.; Chateau, J. (2017): International trade consequences of climate change. In: OECD Trade and Environment Working Papers, 2017/01, OECD Publishing, Paris.

Dellink, R.; Lanzi, E.; Chateau, J.; Bosello, F.; Parrado, R.; de Bruin, K. (2014): Consequences of Climate Damages for Economic Growth: A Dynamic Quantitative Assessment. In: OECD Economics Department Working Papers, 1135, OECD Publishing, Paris.

Deutscher Bundestag (2014): Unterrichtung durch die Bundesregierung: Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014. 18. Wahlperiode. Drucksache 18/3682. Berlin.

Deutschland (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Berlin

Deutschland (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Berlin

Disse, M. (2013): Hydrologische Grundlagen. In: Patt, H.; Jüpner, R. (Hrsg.): Hochwasser-Handbuch (2), Springer Vieweg, Wiesbaden, Kapitel 3.

DIW (2018): Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Grundlinien der Wirtschaftsentwicklung im Frühjahr 2018. In: DIW Wochenbericht 11/2018, DIW, Berlin.

DKKV – Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge (2017): DKKV Statement of the Art. Starkregen in Deutschland. Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten. DKKV, Bonn.

Doleschel, P.; Heißenhuber, A. (1991): Externe Kosten der Bodenerosion. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 68, Kastner Verlag, Wolnzach, S.187–209.

Dominati, E.; Mackay, A. (2013): An Ecosystem Services Approach to the Cost of Soil Erosion and Value of Soil Conservation Land and Environment. AgResearch Limited, Grasslands Research Centre, Palmerston North.

Drosowski et al. (2014): Ökonomie des Klimawandels. Integration ökonomischer Modellierungen und institutioneller Analyse auf verschiedenen Skalenebenen. Manuskript, Osnabrück.

Duffus, J.; Nordberg, M.; Templeton D. (2007): Glossary of Terms used in Toxicology (2). In: Pure and Applied Chemistry 79, Walter de Gruyter, Berlin, S.1153–1344.

DWA (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten – Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. In: DWA-Themen HW 4,2, T1/2013, 61 S., DWA, Hennef.

DWA (2016): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. In: DWA-Regelwerk – Merkblatt DWA-M 119, 53 S., DWA, Hennef.

DWD (2018): KOSTRA-DWD. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html (10.01.2018)

DWD (2018a): Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018 – eine Bilanz extremer Wetterereignisse. Abteilung für Klimaüberwachung und Agrarmeteorologie. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180803_bericht_sommer2018.pdf?blob=publicationFile&v=4 (08.08.2018)

DWD (2018b): Wetterlexikon. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906> (10.01.2018)

DWD (2018c): Wetterlexikon: Starkregen, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html> (10.01.2018)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2016): Dokumentation. Waldbrandgefahrenindex WBI. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, Offenbach. Online verfügbar unter: http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbx_erlaeuterungen.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (09.05.2018)

Eboli, F.; Parrado, R.; Roson, R. (2009): Climate Change Feedback on Economic Growth: Explorations with a Dynamic General Equilibrium Model. Nota di Lavoro 43.2009. Fondazione Eni Enrico Mattei, Mailand.

EC – European Commission (1996): Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) 1488/94 on Risk Assessment for existing substances and Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Part II. European Commission, Joint Research Center, Ispra.

EC (2012): European Commission, The 2012 Ageing Report. European Economy 2/2012. Europäische Kommission, Brüssel.

Ecoplan 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft. Projektbericht. Online verfügbar unter https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/externe-studien-berichte/auswirkungen_der_klimaaenderung_auf_die_schweizer_volkswirtschaft_nati.pdf.download.pdf/auswirkungen_der_klimaaenderung_auf_die_schweizer_volkswirtschaft_nati.pdf (04.04.18).

European Commission (2016): EU overview of methodologies used in preparation of Flood Hazard and Flood Risk Maps. Final Report. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

Fankhauser, S.; Tol, R.S.J. (2004): On climate change and economic growth. In: Resource and Energy Economics 27 (2005), Elsevier, Amsterdam, S.1-17.

Finland (2005): Finland's National Strategy for Adaptation to Climate Change. Online verfügbar unter http://ilmastotyokalut.fi/files/2014/10/MMMiulkaisu2005_1a-1.pdf (08.08.2018)

Flemming, G. (1994) Wald-Wetter-Klima. Einführung in die Forstmeteorologie. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

Frankreich (2011): National plan climate change adaptation. Online verfügbar unter http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_PNACC_Eng_part_1.pdf (08.08.2018)

GDV (2012): Naturgefahrenreport 2012: Naturgefahren und versicherte Schäden in Deutschland – eine statistische Übersicht von 1970 bis 2011, Berlin.

GDV (2015): Naturgefahrenreport 2015: Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen, Berlin.

GDV (2017): Unwetter „Paul“ und „Rasmund“ verursachen Schäden von über einer halben Milliarde Euro, Pressemitteilung der Versicherungswirtschaft vom 12.07.2017. GDV, Berlin.

GDV (2018): Unterschätzte Gefahr: Starkregen kann jeden treffen. Mitteilung vom 03.04.2018, online verfügbar unter: <https://www.gdv.de/de/themen/news/starkregen-kann-jeden-treffen-31882> (08.08.2018)

Gornig, M.; Görzig, B.; Michelsen, C.; Steinke, H. (2016): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe, Berechnungen für das Jahr 2016. BBSR-Online-Publikation 15/2017. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

Haas, W.; Weisz, U.; Maier, P.; Scholz, F. (2015): Human Health. In: Steininger et al. eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S.191-213.

Holub, H.-W.; Schnabl, H. (1994): Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse. De Gruyter, Berlin.

HSB (2017): Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen, Praxisleitfaden, erstellt im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts "KLASII", Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hochschule Bremen, Bremen.

Hübler, M.; Klepper, G. (2007) Kosten des Klimawandels. Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. http://mobil.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Kosten_des_Klimawandels_Gesundheitsstudie.pdf (30.05.18)

Infas Geodaten (2011): Das Data Warehouse. INFAS GEOdaten GmbH, Bonn, Daten von 31.12.2011.

INFRAS, Ecologic, Rütter+Partner (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft. Internationale Einflüsse. Ecologic Institut, Berlin.

IPCC (1995): Climate Change 1995 – Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editors James P. Bruce, Hoesung Lee, Eric F. Haites. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf.

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. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf.

IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht, Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen, Deutsche Übersetzung durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

IPCC (2013): Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Irland (2012): National Climate Change Adaptation Framework. Online verfügbar unter <http://www.environ.ie/en/Publications/Environment/ClimateChange/FileDownload.32076.en.pdf> (08.08.2018)

Island (2007): Iceland's Climate Change Strategy. Online verfügbar unter https://eng.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/Stefnumorkun_i_loftslagsmalum_enlokagerd.pdf (08.08.2018)

ISO (2009) ISO 31000. Risk management – Principles and guidelines. International Organization for Standardization, Genf.

Italien (2009): Fifth National Communication under the UN Framework Convention on CC. Online verfügbar unter http://unfccc.int/resource/docs/natc/ita_nc5.pdf (08.08.2018)

Käse, H. (1969): Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern. Akademie-Verlag, Berlin. (=Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik 94/12).

Kellermann, P.; Schöbel, A.; Kundela, G.; Thielen, A.H. (2015): Estimating flood damage to railway infrastructure – the case study of the March River flood in 2006 at the Austrian Northern Railway. Natural Hazards and Earth System Sciences (15), Copernicus, Göttingen, S.2485-2496.

Kleist, L.; Thielen, A.H.; Köhler, P.; Müller, M.; Seifert, I.; Borst, D.; Werner, U. (2006): Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany, Natural Hazards and Earth System Sciences 6(4), Copernicus, Göttingen, S.541-552.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2009): Weißbuch Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0147:FIN:DE:PDF> (08.08.2018)

Kranzl, L.; Hummel, M.; Loibl, W.; Müller, A.; Schicker, I.; Toleikyte, A.; Bachner, G.; Bednar-Friedl, B. (2015): Buildings: Heating und Cooling. In: Steining et al. eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S. 235-255.

Kreibich, H.; Thielen, A.H.; Petrow, T.; Müller, M.; Merz, B. (2005): Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures – lessons learned from the Elbe flood in August 2002, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (1), Copernicus, Göttingen, S.117–126.

Kreibich, H.; Seifert, I.; Merz, B.; Thielen, A.H. (2010): Development of FLEMOcs – A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. In: *Hydrological Sciences Journal* 55(8), Taylor and Francis, London, S.1302-1314.

Kreibich, H.; Christenberger, S.; Schwarze, R. (2011): Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, Copernicus, Göttingen, S.309-321.

Kreibich, H, Christenberger, S, Schwarze, R, (2012): Corrigendum to "Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods". In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, Copernicus, Göttingen, S.309–321 und *Natural Hazards Earth System Sciences* 12, Copernicus, Göttingen, S.391-392.

Kromphardt, J. (2014): Das NiGEM-Modell: neue Argumente für Lohnmoderation? In: Sebastian Dullien, Eckhard Hein, Achim Truger (Hg.): *Makroökonomik, Entwicklung und Wirtschaftspolitik*, Metropolis, Marburg, S. 84-99.

Kron, W. (2009): Überschwemmungsüberraschung: Sturzfluten und Überschwemmungen fernab von Gewässern. In: *WasserWirtschaft* 6, Springer, Berlin und Heidelberg, S.15-21.

Kunert, U.; Link, H. (2001): Prognose des Ersatzinvestitionsbedarfs für die Bundesverkehrswege bis zum Jahre 2020, *Beiträge zur Strukturforchung des DIW*, Heft 187, Berlin.

Kunert, U.; Link, H. (2013): Verkehrsinfrastruktur: Substanzerhaltung erfordert deutlich höhere Investitionen. In: *DIW Wochenbericht* 26/2013, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, S. 32-38.

Kwaad, F.J.P.M. (2016): Economic costs of soil erosion. Online verfügbar unter: <http://www.kwaad.net/EconomicCostsOfSoilErosion.html> (19.09.2016)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen. Recklinghausen.

Landratsamt Schwäbisch Hall (2016): Unwetter-Schadensliste Landkreis Schwäbisch Hall. Online verfügbar unter: [http://www.lra-sha.de/index.php?id=302&id=302&publish\[id\]=457120](http://www.lra-sha.de/index.php?id=302&id=302&publish[id]=457120) (10.01.2017)

Landtag Nordrhein-Westfalen (2015): Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen, Klimaschutz und Klimafolgenanpassung. Drucksache 16/127, S.20.

Laudan, J.; Rözer, V.; Sieg, T.; Vogel, K.; Thielen, A.H. (2017): Damage assessment in Braunsbach 2016: data collection and analysis for an improved understanding of damaging processes during flash floods. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17, Copernicus, Göttingen, S.2163-2179.

LAWA (2017): Empfehlungen für die Überprüfung der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos und der Risikogebiete nach EU-HWRM-RL, 15 S, Karlsruhe.

LAWA (2017a): Textbaustein Starkregen. für den zweiten Zyklus der Erstellung der Risikomanagementpläne in Deutschland. Beschlossen auf der 153. LAWA-Vollversammlung, 16./17. März 2017 in Karlsruhe.

Lehr, U; Nieters, A.; Drosowski, T. (2015): Climate Change Adaptation and the German Economy. In: *GWS Discussion Paper* 2015/10, Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, Osnabrück.

Liechtenstein (2015): Klimastrategie Liechtenstein. Online verfügbar unter: <http://www.llv.li/files/srk/bua-116-2015-web.pdf> (08.08.2018)

LUBW (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, 64 Seiten, Karlsruhe.

Luxemburg (2012): Anpassung an den Klimawandel - Strategien für die Raumplanung in Luxemburg. Online verfügbar unter: http://www.dat.public.lu/publications/documents/C-Change/CChange_conclusions.pdf (08.08.2018)

Malta (2012): National Climate Change Adaptation Strategy. Online verfügbar unter: <https://www.gov.mt/en/Government/Publications/Documents/MSDEC/National%20Adaptation%20Strategy.pdf> (08.08.2018)

Mecklenburg Vorpommern (2010): Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg Vorpommern 2010 A+B. Online verfügbar unter: http://service.mvnet.de/php/download.php?datei_id=54482 bzw. <http://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=54486> (08.08.2018)

Merz, B. (2017): Flood Risk Analysis. In: Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science, Oxford University Press, Oxford.

Merz, B.; Thielen, A.H. (2009): Flood risk curves and uncertainty bounds. *Natural Hazards* 51(3), Springer, Berlin und Heidelberg, S.437-458.

Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thielen, A.H. (2010): Review article "Assessment of economic flood damage", *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, Copernicus, Göttingen, S.1697-1724.

Meyer, V. (2005): Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Dissertationsschrift. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig.

Meyer, V.; Schwarze, R.; Becker, N.; Markantonis, V.; van den Bergh, J.C.J.M.; Bouwer, L.M.; Bubeck, P.; Ciavola, P.; Genovese, E.; Green, C.; Hallegatte, S.; Kreibich, H.; Lequeux, Q.; Logar, I.; Papyrakis, E.; Pfurtscheller, C.; Poussin, J.; Przyluski, V.; Thielen, A.H.; Viavattene, C. (2014): Assessing the Costs of Natural Hazards – State of the Art and the Way Forward. In: *Hydrometeorological Hazards*. John Wiley & Sons, Hoboken.

MILB – Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (2011): Waldbrandstatistik 2010. Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Eberswalde.

Ministerium Für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt Und Ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2013): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012. Kiel.

Ministry for the Environment (2011): Contaminated Land Management Guidelines No. 5. Site Investigation and Analysis of Soils. Ministry for the Environment, Wellington.

Mitter, H. u.a. (2015): Agriculture. In: Steininger et al. eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S.123-146.

Mitter, H. u.a. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die pflanzliche Produktion in Österreich. CCCA Fact Sheet 2/2014. Climate Change Centre Austria, Wien.

Murawski, A.; Zimmer, J.; Merz, B. (2016): High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951-2006, *International Journal of Climatology* 36, Wiley-Blackwell, Hoboken, S.2582-2597.

Nadal, N.; Zapata, R.; Pagán, I.; López, R.; Agudelo, J. (2010): Building Damage due to Riverine and Coastal Floods. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 136, American Society of Civil Engineers, Reston, S.327-336.

Neubert, M. (2017): Anpassungsmaßnahmen und Kosten-Nutzen-Analysen. Präsentation beim Fachworkshop „Wirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit“ am 20.9.2017 in Dessau.

Neuhaus, P.; Fiener, P.; Botschek, J. (2010): Einfluss des globalen Klimawandels auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagsintensität in NRW. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen.

Niederlande (2007): National Programme for Spatial Adaptation to Climate Change. Online verfügbar unter: http://www.climatechangepatialplanning.nl/gfx_content/documents/documentation/National_Adaptation_Strategy_The_Netherlands.pdf (08.08.2018)

Niedersachsen (2013): Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Online verfügbar unter: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/100543> (08.08.2018)

Nordrhein-Westfalen (2009): Anpassung an den Klimawandel - Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter: <http://www.umwelt.nrw.de/klima-energie/klimawandel-und-anpassung/klimaanpassung-in-nrw/> (08.08.2018)

OECD (2007): Instrument Mixes for Environmental Policies. OECD Publishing, Paris.

OECD (2015): Climate Change Risks and Adaptation: Linking Policy and Economics. OECD Publishing, Paris.

OECD (2015): The Economic Consequences of Climate Change. OECD Publishing, Paris.

Österreich (2013): The Austrian Strategy for Adaptation to Climate Change. Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.

Penning-Rowsell, E. (1992): The Economics of Coastal Management: A Manual of Assessment Techniques: the Yellow Manual. Wiley-Blackwell, Hoboken.

Penning-Rowsell, E.; Johnson, C.; Tunstall, S.; Tapsell, S.; Morris, J.; Chatterton, J.; Green, C. (2005): The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Manual of Assessment Techniques. Middlesex Univ. Press, London.

Pimentel, D.; Harvey, C.; Resosudarmo, P.; Sinclair, K.; Kurz, D.; McNair, M.; Crist, S.; Shpritz, L.; Fitton, L.; Saffouri, R.; Blair, R. (1995): Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. In: Science 267, American Association for the Advancement of Science, Washington, S.1117–1123.

Polen (2013): Polish National Strategy for Adaptation to Climate Change (NAS 2020). Online verfügbar unter https://klimada.mos.gov.pl/wp-content/uploads/2014/12/ENG_SPA2020_final.pdf (08.08.2018)

Poussin, J.K.; Bubeck, P.; Aerts, J.C.J.H.; Ward, P.J. (2012): Potential of semi-structural and non-structural adaptation strategies to reduce future flood risk: case study for the Meuse. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 12, Copernicus, Göttingen, S.3455–3471.

Räth, N.; Braakmann, A. (2014): Generalrevision der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen 2014 für den Zeitraum 1991 bis 2014. In: Wirtschaft und Statistik, September, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

RKI – Robert-Koch-Institut; UBA - Umweltbundesamt (2013): Klimawandel und Gesundheit. Allgemeiner Rahmen zu Handlungsempfehlungen für Behörden und weitere Akteure in Deutschland. Online verfügbar unter: http://www.apug.de/archiv/pdf/klimawandel/allgemeiner_rahmen_zu_handlungsempfehlungen_klimawandel_und_gesundheit_final.pdf (14.06.2018)

Rothfus, L.P. (1990): The heat index equation. NWS Southern Region Technical Attachment, SR/SSD90-23. US-EPA, Fort Worth.

Rözer, V.; Müller, M.; Bubeck, P.; Kienzler, S.; Thieken, A.H.; Pech, I.; Schröter, K.; Buchholz, O.; Kreibich, H. (2016): Coping with Pluvial Floods by Private Households. In: Water 8(7), Multidisciplinary Publishing Institute, Basel, S.304, 24 S.

Saarland (2008): Klima schützen - die Klimafolgen bewältigen - Saarländisches Klima - Schutzkonzept 2008-2013. Online verfügbar unter: http://ee-waerme-info.i-ner.de/images/4/4f/Klimaschutzkonzept_Saarland_2008-2013.pdf (08.08.2018)

Sachsen (2012): Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012. Online verfügbar unter: http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Energie-_und_Klimaprogramm_Sachsen_2012.pdf (08.08.2018)

Sachsen-Anhalt (2013): Aktualisierung der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel. Online verfügbar unter: http://www.mlu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/MLU/a-Themen/Klima_Energie/Klimawandel/Anpassungsstrategie/Anpassungsstrategie_25_9_13.pdf (08.08.2018)

Safecoast (2008): Coastal flood risk and trends for the future in the North Sea Region: Synthesis report. The safecoast project team, The Hague.

Sächsische Staatskanzlei (2003): Schadensausgleich und Wiederaufbau im Freistaat Sachsen. Dresden.

Sächsische Staatskanzlei (2013): Der Wiederaufbau im Freistaat Sachsen nach dem Hochwasser im Juni 2013. Dresden.

Santos Telles, T.; Guimarães, M.; Falci Dechen, S.C. (2011): The costs of soil erosion. Revista Brasileira de Ciência do Solo 35, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Vicosa, S.287–298.

Sauer, A. (2014): Methodik zur flächendifferenzierten Analyse und Bewertung von stofflichen Hochwasserrisiken. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften.

Sauer, A.; Neubert, M. (2016a): Kennblatt zur Modellierung der Klimawirkung Wassererosion. Manuskript. Entwurf 30.9.2016.

Sauer, A.; Neubert, M. (2016b): Kennblatt zur Modellierung der Klimawirkung Ertragsänderung. Manuskript. Entwurf 30.9.2016.

Sauer, A.; Neubert, M. (2017): Modellierungskonzepte Hitzebelastung: Leistungsfähigkeit, Hitzebelastung Mortalität, Ozonbelastung Mortalität. Version 2.1. Manuskript. Februar 2017.

Schade, W.; Jochem, E.; Barker, T.; Catenazzi, G.; Eichhammer, W.; Fleiter, T.; Held, A.; Helfrich, N.; Jakob, M.; Criqui, P.; Mima, S.; Quandt, L.; Peters, A.; Ragwitz, M.; Reiter, U.; Reitze, F.; Schelhaas, M.; Scricciu, S.; Turton, H. (2009): ADAM 2-degree scenario for Europe – policies and impacts. Deliverable D-M1.3 of ADAM (Adaptation and Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy), Karlsruhe.

Schleswig-Holstein (2013): Fahrplan Anpassung an den Klimawandel. Online verfügbar unter: http://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/Service/Broschueren/Broschueren_V/Umwelt/pdf/Fahrplan_Klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (08.08.2018)

Schönthaler, K.; von Andrian-Werburg, S. (2015): Evaluierung der DAS-Berichterstattung und Schließung von Indikatorenlücken. In: Climate Change 13/2015, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schönthaler, K.; von Andrian-Werburg, S.; Nickel, D. (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). In: Climate Change 22/2011, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schönthaler, K.; von Andrian-Werburg, S.; Nickel, D.; Pieck, S.; Tröltzsch, J.; Küchenhoff, H.; Rubenauer, S. (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). In: Climate Change 22/2011, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schwegler, P. (2014): Economic valuation of environmental costs of soil erosion and the loss of biodiversity and ecosystem services caused by food wastage. ETH Zürich, Institute for Environmental Decisions, Zürich.

- Schweiz (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Online verfügbar unter: http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01673/index.html?lang=de&download=NHZLpZig7t,lnp6I0NTU042I226ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gplCGfIJ_gWym162dpYbUzd.Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2ldvoaCVZ,s-.pdf (08.08.2018)
- Seifert, I.; Thielen, A.H.; Merz, B.; Borst, D.; Werner, U. (2010a): Estimation of industrial and commercial assets values for hazard risk assessment. In: Natural Hazards 52(2), Springer, Berlin und Heidelberg, S.453-479.
- Seifert, I.; Kreibich, H.; Merz, B.; Thielen, A.H. (2010b): Application and validation of FLEMOcs – A flood loss estimation model for the commercial sector. In: Hydrological Sciences Journal 55(8), Taylor and Francis, London, S.1315-1324.
- Sieg, T.; Vogel, K.; Merz, B.; Kreibich, H. (2017): Tree-based flood damage modeling of companies: Damage processes and model performance. – Water Resources Research 53: 6050-6068.
- Slowakei (2014): Adaptation Strategy of the Slovak Republic on Adverse Impacts of Climate Change. Online verfügbar unter: <http://climate-adapt.eea.europa.eu/documents/18/0/Slovakia+NAS+summary/06f4dc4d-a071-4ac2-b02a-83433fd2ee00> (08.08.2018)
- Smit, B.; Burton, I.; Klein, R.J.T., Street, R. (1999): The Science of Adaptation: A Framework for Assessment. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 4, Springer, Berlin und Heidelberg, S.199-213.
- Spanien (2008): Plan Nacional de adaptación al cambio climático. Online verfügbar unter: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pna_v3_tcm7-12445_tcm7-197092.pdf (08.08.2018)
- Spekkers, M.H. (2015): On rainstorm damage to building structure and content. Dissertation, TU Delft.
- Spekkers, M.H.; Rözer, V.; Thielen, A.; Ten Veldhuis, M.C.; Kreibich, H. (2017): A comparative survey of the impacts of extreme rainfall in two international case studies, Natural Hazards and Earth System Sciences 17, Copernicus, Göttingen, S.1337-1355.
- SRU Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1999): Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen: Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen. Deutscher Bundestag, Berlin. BT-Drucksache 14/2300.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2010): Input-Output-Rechnung im Überblick. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Stäglin, R.; Edler, D.; Schintke, J. (1992): Der Einfluss der gesamtwirtschaftlichen Nachfrageaggregate auf die Produktions- und Beschäftigungsstruktur - eine quantitative Input-Output-Analyse. Schwerpunktuntersuchung im Rahmen der Strukturberichterstattung. In: Beiträge zur Strukturfor schung, Heft 127/I (Textband) und 127/II (Materialband), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Steadman, R.G. (1979): The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. In: Journal of Applied Meteorology 18, American Meteorological Society, Boston, S.861-873.
- StEB Köln & Stadt Köln (2016): Leit faden für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung in Köln - Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und für die Überflutungsvorsorge bei extremen Niederschlagsereignissen. Stadt Köln, Köln, 76 Seiten.
- Steininger, K.; König, M.; Bednar-Friedl, B.; Kranzl, L.; Loibl, W.; Prettenhaler, F. (2015): Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Springer, Berlin und Heidelberg.
- Stemplewski, J.; Johann, G.; Bender, P.; Grün, B. (2015): Das Projekt „Stark gegen Starkregen“. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 2, DWA, Hennef, S.108-114.

Sue Wing, I.; Fisher-Vanden, K. (2013): Confronting the Challenge of Integrated Assessment of Climate Adaptation: A Conceptual Framework. In: *Climatic Change* 117(3), Springer, Berlin und Heidelberg, S.497-514.

Sue Wing, I.; Lanzi, E. (2014): Integrated Assessment of Climate Change Impacts: Conceptual Frameworks, Modelling Approaches and Research Needs. OECD Environment Working Papers No. 66. OECD Publishing, Paris.

Thieken, A.H.; Müller, M.; Kreibich, H.; Merz, B. (2005): Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. In: *Water Resources Research* 41, Wiley Blackwell, Hoboken.

Thieken, A.H.; Müller, M.; Kleist, L.; Seifert, I.; Borst, D.; Werner, U. (2006): Regionalisation of asset values for risk analyses, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, Copernicus, Göttingen, S.167-178.

Thieken, A.H.; Olischewski, A.; Kreibich, H.; Kobsch, S.; Merz, B. (Hrsg.) (2008): Development And Evaluation Of FLEMOps – A New Flood Loss Estimation Model For The Private Sector. WIT Press, Southampton.

Thieken, A.H.; Cammerer, H.; Dobler, C.; Lammel, J.; Schöberl, F. (2016a): Estimating changes in flood risks and benefits of non-structural adaptation strategies - a case study from Tyrol, Austria, In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21(3), Springer, Berlin und Heidelberg, S.343-376.

Thieken, A.H.; Kienzler, S.; Kreibich, H.; Kuhlicke, C.; Kunz, M.; Mühr, B.; Müller, M.; Otto, A.; Petrow, T.; Pisi, S.; Schröter, K. (2016b): Review of the flood risk management system in Germany after the major flood in 2013. In: *Ecology and Society* 21(2), Wolfville, S.51.

Thieken, A.H.; Kreibich, H.; Müller, M.; Lamond, J. (2017): Data collection for a better understanding of what causes flood damage – experiences with telephone surveys. In: *Flood damage survey and assessment: new insights from research and practice* (D. Molinari, S. Menoni, F. Ballio). AGU, Wiley, Hoboken.

Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M.; Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. In *Climate Change* 10/2012, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Thüringen (2013): IMPAKT - Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen. Online verfügbar unter <http://www.thueringen.de/th8/klimaagentur/impakt/>. (08.08.2018)

Tschechien (2015): Adaptacni strategie. Online verfügbar unter: <http://urbanadapt.cz/cs/system/files/downloads/oeok-adaptacni-strategie-20151029.pdf> (08.08.2018)

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel – Landwirtschaft. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikationen/kompass_themenblatt_landwirtschaft_2015_net.pdf (08.08.2018)

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. In: *Climate Change* 10/2012, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2014): Ozon. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ozon> (08.08.2018)

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2016a): Praxishilfe Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2016b): Vorschlag für einen Policy Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel. In: *Climate Change* 19/2016, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge vom März 2018. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

UN (2004) Living with Risk – A global review of disaster reduction initiatives, Bd. 2. United Nations (UN), New York, Genf.

UN (2017) World Population Prospects: The 2017 Revision. Volume I: Comprehensive Tables. ST/ESA/SER.A/399. United Nations, New York. Online verfügbar unter: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf (09.09.2019)

Ungarn (2010): Vahava Report - Climate Change and Hungary: Mitigating the Hazard and Preparing for the Impacts. Online verfügbar unter: http://www.preventionweb.net/files/18582_thevahavareport08dec2010.pdf (08.08.2018)

United Kingdom (2013): The National Adaptation Programme - Making the country resilient to a changing climate. Online verfügbar unter: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/209866/pb13942-nap-20130701.pdf (08.08.2018)

Urban, H.; Steininger, K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger et al. eds. 2015, Springer International Publishing, Basel, S.301-322.

Vogel, K.; Öztürk, U.; Riemer, A.; Laudan, J.; Sieg, T.; Wendi, D.; Agarwal, A.; Rözer, V.; Korup, O.; Thielen, A.H. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“, Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. In: Hydrologie & Wasserbewirtschaftung 61(3), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S.163-175.

Von Storch, H.; Gönner, G.; Meine, M. (2008): Storm surges - An option for Hamburg, Germany, to mitigate expected future aggravation of risk. In: Environmental Science & Policy 11, Elsevier, Amsterdam, S.735-742.

Vousdoukas, M.I.; Voukouvalas, E.; Annunziato, A.; Giardino, A.; Feyen, L. (2016). Projections of extreme storm surge levels along Europe. In: Climate Dynamics 47, Springer Science + Business Media, Berlin und Heidelberg, S.3171-3190.

Vousdoukas, M.I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Bianchi, A.; Dottori, F.; Feyen, L. (2018). Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. In: Nature Climate Change 8(9), Macmillan Publishers, London, S.776.

WAZ (2014): Unwetter verursacht in Duisburg Schaden von rund 1,2 Millionen Euro. Online verfügbar unter: <https://www.waz.de/staedte/duisburg/unwetter-verursacht-in-duisburg-schaden-von-rund-1-2-millionen-euro-id9448134.html> (10.01.2018)

Winterrath, T.; Brendel, C.; Hafer, M.; Junghänel, T.; Klameth, A.; Walawender, E.; Weigl, E.; Becker, A. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 251, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 71 S.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1999): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltisiken. Jahresgutachten 1998. Springer, Berlin und Heidelberg.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2011): Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation. Zusammenfassung für Entscheidungsträger. WBGU, Berlin.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2014): Sondergutachten Klimaschutz als Weltbürgerbewegung vom 18.07.2014. WBGU, Berlin.

Wünsch, A.; Herrmann, U.; Kreibich, H.; Thielen, A.H. (2009): The Role of Disaggregation of Asset Values in Flood Loss Estimation: A Comparison of Different Modeling Approaches at the Mulde River, Germany. In: Environmental Management 44(3), Elsevier, Amsterdam, S.524-541.

Zweifel, P.; Breyer, F.; Kifmann, M. (2013) Gesundheitsökonomie. 6. Auflage, Springer, Berlin und Heidelberg.