



**Pilotstudie
„Klimawirkungskarten Bayern“**

A decorative marbled pattern in shades of blue and white, resembling a stone or marble texture, located in the middle section of the cover.

klima



Pilotstudie „Klimawirkungskarten Bayern“

Impressum

Pilotstudie „Klimawirkungskarten Bayern“

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

plan + risk consult – Prof. Dr. Greiving & Partner, Ingenieurgesellschaft für Raumplanung und Umweltforschung
Stockumer Str. 435/437, 44227 Dortmund
Prof. Dr. Stefan Greiving, Florian Hurth, Dr. Mark Fleischhauer, Dr. Christian Lindner,
Christina Gollmann, Madeleine Kirstein, Marius Lüke, Gaby Lehmkübler

ThINK – Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz GmbH
Leutragraben 1, 07743 Jena
Dr. Uwe Kurmutz, Jakob Maercker, Daniel Knopf

Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünlandlehre
Alte Akademie 12, 85354 Freising
Prof. Dr. Karl Auerswald, Franziska K. Fischer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Lange Point 6, 85354 Freising
Franziska K. Fischer

Deutscher Wetterdienst Offenbach, Hydrometeorologie
Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach/M.
Dr. Tanja Winterrath

LfU, Referat 81, Padia Lariu

Fachliche Begleitung:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr
Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Redaktion:

LfU, Referat 81, Padia Lariu, Dr. Michael Joneck, Rebekka Eichstädt

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Stand:

Ausgangsbericht: 18.01.2018;
Kapitel 5.2: 22.06.2019;
Redaktionelle Bearbeitung: Juli 2019

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Zusammenfassung	13
Summary	16
1 Einleitung	19
2 Konzept und Methodik	20
2.1 Konzeptioneller Ansatz	20
2.2 Berechnung der Klimawirkungen	22
2.2.1 Auswahl der Handlungsfelder	22
2.2.2 Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität	23
2.2.3 Normalisierung als Ansatz zur Herstellung der Vergleichbarkeit	24
2.2.4 Szenariokombinationen eines starken und schwachen Wandels	25
2.2.5 Raumtypen sich ähnelnder Klimawirkungen	26
2.3 Darstellung der Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse	27
3 Klima und Klimawandel in Bayern	29
3.1 Datengrundlagen	29
3.2 Datenprozessierung	33
3.3 Ausgewählte Klimaeinflüsse	34
4 Ausgewählte Faktoren der Klimasensitivität in Bayern	40
4.1 Datengrundlagen	40
4.2 Datenprozessierung	42
4.3 Ausgewählte Sensitivitäten	44
5 Klimawirkungen in den Handlungsfeldern	54
5.1 Naturschutz	55
5.1.1 NA-1-2017, Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit	55
5.2 Bodenschutz und Georisiken	60
5.2.1 R-Faktor – Regenerosivität	61
5.3 Wald- und Forstwirtschaft	69
5.3.1 Trockenheit auf Waldflächen	70

5.3.2	Waldbrandgefahr (nicht bearbeitet/Projektidee)	72
5.3.3	Borkenkäferbefallsrisiko (Projektidee)	73
5.4	Landwirtschaft	74
5.4.1	LW-1-2017, Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn	75
5.4.2	LW-2-2017, Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit	78
5.4.3	LW-3-2017, Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost	81
5.5	Wasserwirtschaft	84
5.5.1	WW-1-2017, Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ ₁₀₀	85
5.5.2	WW-2-2017, Sturzflutpotenzial	87
5.6	Bauen	90
5.6.1	BA-1-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser	90
5.6.2	BA-2-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten	94
5.6.3	BA-3-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln	97
5.6.4	BA-4-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen	101
5.7	Industrie und Gewerbe	104
5.7.1	IG-1-2017, Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	104
5.7.2	IG-2-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	107
5.7.3	IG-3-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)	111
5.7.4	IG-4-2017, Potenzielle Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Flusshochwasser	114
5.7.5	IG-5-2017, Potenzielle Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Sturzfluten	117
5.8	Energiewirtschaft	120
5.8.1	EW-1-2017, Potenzieller Heizenergiebedarf	121
5.8.2	EW-2-2017, Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage	124
5.8.3	EW-3-2017, Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser	125
5.9	Tourismus	129
5.9.1	TO-1-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser	129
5.9.2	TO-2-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten	133
5.9.3	TO-3-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze	136

5.10	Gesundheit	139
5.10.1	GE-1-2017, Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre	139
5.11	Straßenbau und Verkehr	143
5.11.1	VE-1-2017, Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	143
5.11.2	VE-2-2017, Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	147
5.11.3	VE-3-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser	150
5.11.4	VE-4-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten	153
6	Raumtypen der Klimawirkungen in Bayern	156
6.1	Methodik zur Ermittlung der Raumtypen	156
6.2	Durchführung der Clusteranalyse	158
6.3	Ergebnisse Clusteranalyse Klimawirkungen	160
6.4	Anwendungsbeispiele und weiterführende methodische Überlegungen zur Clusterung von Klimaeinfluss- und Klimawirkungsdaten	166
7	Schlussfolgerungen	170
7.1	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse	170
7.1.1	Zentrale Klimaeinflüsse	170
7.1.2	Zentrale Sensitivitäten	170
7.1.3	Zentrale Klimawirkungen und handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte	171
7.2	Reflexion verwendeter Daten und der Methodik	172
7.2.1	Weiterentwicklung von Datengrundlagen im Rahmen der Pilotstudie	172
7.2.2	Datenlücken und methodische Weiterentwicklung bei der Analyse von Klimawirkungen	173
7.2.3	Methodische Reflexion und Forschungsbedarf	178
7.3	Fazit	179
	Literaturverzeichnis	180
	Anhang: Klimawirkung-Kennblätter	187

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
AdSVIS	Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel
ALP FFIRS	Alpine Forest Fire Warning System
BaSIS	Bayerisches Standortinformationssystem
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BayKLAS	Bayerische Klima-Anpassungsstrategie
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNetzA	Bundesnetzagentur
CATS	Clustering after Transformation and Smoothing
CC-LandStraD	Climate Change – Land Use Strategies (Strategien für eine nachhaltige Landnutzung im Zeichen des Klimawandels für Deutschland)
CLC	CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETP	potenzielle Evapotranspiration
EURO-CORDEX	Europäischer Ableger der internationalen CORDEX-Initiative zur Ableitung verbesserter regionaler Klimaprojektionen
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FF _{mean}	Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m
FWI	Fire Weather Index
GCM	General Circulation Model
GIS	Geoinformationssystem
GLORIA	Global Observation Research Initiative
GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufs

GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
HQ ₁₀₀	Ein Hochwasserereignis, das statistisch einmal in 100 Jahren zu erwarten ist
IDW	Inverse Distance Weighting
IPCC	Weltklimarat; Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Bodenerodierbarkeit
KLAM-Wald	Klima-Arten-Matrix für Waldbäume
KLIWA	Klimaveränderung und Wasserwirtschaft
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LDBV	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern
LEP	Landesentwicklungsprogramm
LfStat	Bayerisches Landesamt für Statistik
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
NetCDF	Network Common Data Form
OBB	Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (aktuell: Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, StMB)
PM ₁₀	Feinstaub, dessen aerodynamischer Durchmesser weniger als 10 µm beträgt
PM _{2,5}	Feinstaub, dessen aerodynamischer Durchmesser weniger als 2,5 µm beträgt
R	Regenerosivität
RCM	Regional climate model
RCP	Representative Concentration Pathways
RR	Tägliche Niederschlagssumme
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
StMI	Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (bis 03/2018), Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Sport und Integration (seit 11/2018)

StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (bis 03/2018), Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (seit 11/2018)
T _{max}	Tagesmaximum der Lufttemperatur in 2 m
T _{mean}	Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m
T _{min}	Tagesminimum der Lufttemperatur in 2 m
UBA	Umweltbundesamt
UHI	Urban Heat Island; urbane Wärmeinsel
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WBI	Waldbrandgefahrenindex des Deutschen Wetterdienstes
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schema für das methodische Vorgehen zur Berechnung der Klimawirkungen (eigene Darstellung nach (Buth et al. 2015))	22
Abb. 2:	Beispielhafte Darstellung der Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivitätsindikatoren zur Berechnung von Klimawirkungen	24
Abb. 3:	Erläuterungen zu den Karten der Klimawirkungen	27
Abb. 4:	Beispiel für einen, auf das Untersuchungsgebiet Bayern zugeschnittenen, NetCDF-Rasterdatensatz, mit der Verteilung der Tagesmaximaltemperatur am 01.08.1986	30
Abb. 5:	In ein Punktgitter überführter NetCDF-Rasterdatensatz und räumliche Abdeckung des Untersuchungsgebietes	33
Abb. 6:	Klimaeinfluss Jahresmitteltemperatur in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	35
Abb. 7:	Klimaeinfluss Heiße Tage in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	35
Abb. 8:	Klimaeinfluss Tropennächte in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	36
Abb. 9:	Klimaeinfluss Wechselfrosttage (± 3 °C) in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	37
Abb. 10:	Klimaeinfluss Tag des Vegetationsbeginns in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	37
Abb. 11:	Klimaeinfluss Starkregentage in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen	38
Abb. 12:	Klimaeinfluss Flusshochwasser (HQ ₁₀₀) in der Gegenwart, keine Projektion verfügbar	39
Abb. 13:	Flächen wasserabhängiger Biotope (Auspielung 2017)	45
Abb. 14:	Anteil der Siedlungsfläche an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)	46
Abb. 15:	Bevölkerungsdichte in den Landkreisen und kreisfreien Städten (2009 und Veränderung bis 2030)	47
Abb. 16:	Anteil der versiegelten Fläche an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)	48
Abb. 17:	Anteil der Industrie- und Gewerbeflächen an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)	49
Abb. 18:	Landverkehrsinfrastrukturfläche in den Landkreisen und kreisfreien Städten (2009 und Veränderung bis 2020–2030)	51
Abb. 19:	Standorte der Kraftwerke mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW nach Energieträger in Bayern für die Gegenwart (2016) und unter Berücksichtigung des Zu- und Rückbaus von konventionellen Kraftwerken für die Zukunft (ab 2019)	52
Abb. 20:	Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre (2009 und 2030)	53
Abb. 21:	Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit	59
Abb. 23:	Vergleich der mit der Transferfunktion berechneten Regenerosität mit der aus Radardaten in 5-minütiger Auflösung abgeleiteten Regenerosität (n = 605.738, Entwicklungsdatensatz) und mit Regenerositäten aus Ombrometermessungen (n = 15 133, Validierungsdatensatz).	65

Abb. 23:	Linke Karte: Aus Radardaten (2001 bis 2017; Zentraljahr 2009) ermittelter R-Faktor mit einer Auflösung von 1 km ² (aus(Auerswald et al. 2019a) der nach (Auerswald et al. 2019b) für das Zentraljahr 2010,5 angepasst wurde (Anpassungsfaktor: 1,026). Rechte Karte: Aus 16 Klimaprojektionen berechnete Regenerosivität im Mittel der Jahre 2001 bis 2020 (Zentraljahr 2010,5). Die in drei verschiedenen Klimaprojektionsrastern vorliegenden Daten wurden geostatistisch auf ein gemeinsames Raster interpoliert und anschließend gemittelt.	66
Abb. 25:	Veränderung des relativen R-Faktors zwischen 1971 und 2050 für 13 Projektionen basierend auf dem EUR-11-Gitter (rote Kreise). Zum Vergleich sind die Projektionen, die das Remo-Gitter (blaue Quadrate, 2 Projektionen) und die Projektion, die das Aladin-Gitter verwenden (grüne Dreiecke) mit eingezeichnet. Die braune Linie ist eine quadratische Regression. Die schwarzen Kreise sind aus Niederschlagsmessungen bestimmt (aus AUERSWALD ET AL. 2019b). Jedem Punkt liegen bei Ombrometermessungen (weiß gefüllte Kreise) mindestens 50 Stationsmessjahre (insgesamt 5515 Stationsjahre) und bei Radarmessungen (schwarze gefüllte Kreise) 452503 Pixeljahre (insgesamt 8,2 Millionen Pixeljahre) zugrunde. Diese Werte gingen nicht mit in die Regression (braune Linie) ein.	67
Abb. 26:	Veränderung der projizierten Regenerosivität zwischen dem Zeitraum 1971 bis 2000 und dem Zeitraum 2021 bis 2050; rote Kreise zeigen alle Rasterzellen des EUR-11-Gitters (jeweils Mittelwert aus 13 Projektionen), blaue Quadrate alle Rasterzellen des Remo-Gitters (jeweils Mittelwert aus 2 Projektionen) und grüne Dreiecke alle Rasterzellen des Aladin-Gitters (eine Projektion). Die Linie ist eine lineare Regression über alle Punkte ($y = 1,72 x$; $r^2 = 0,7827$).	68
Abb. 26:	Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn	77
Abb. 27:	Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit	80
Abb. 28:	Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost	83
Abb. 29:	Überschwemmungsfläche durch Flusshochwasser bei HQ ₁₀₀	87
Abb. 30:	Sturzflutpotenzial durch Starkniederschläge in Verbindung mit starkem Gefälle	89
Abb. 31:	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser	93
Abb. 32:	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten	96
Abb. 33:	Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln	100
Abb. 34:	Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen	103
Abb. 35:	Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser	107
Abb. 36:	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	110
Abb. 37:	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)	113
Abb. 38:	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser	116
Abb. 39:	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten	119
Abb. 40:	Potenzieller Heizenergiebedarf anhand der Heiztage, Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte	123
Abb. 41:	Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage	125

Abb. 42:	Potenzielle Schäden an Kraftwerken mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW durch Flusshochwasser	128
Abb. 43:	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser	132
Abb. 44:	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten	135
Abb. 45:	Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze	138
Abb. 46:	Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre	142
Abb. 47:	Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	146
Abb. 48:	Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur	149
Abb. 49:	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser	152
Abb. 50:	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten	155
Abb. 51:	Korrelationsanalyse der Eingangsdaten für die Clusteranalyse. Je größer das Punktsymbol, desto stärker ist die Korrelation. Blaue Symbole zeigen positive Korrelationen, rote Symbole zeigen hingegen negative Korrelationen an.	157
Abb. 52:	Clusterung der Klimawirkungen für Bayern; Varianten „2-9 Cluster“, Darstellung der mittels k-Means ermittelten Clusterlösungen	159
Abb. 53:	Clusterung der Klimawirkungen für Bayern; Variante „4 Cluster“	161
Abb. 54:	Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „4 Cluster“	161
Abb. 55:	Clusterung der Klimawirkungen für Bayern; Variante „6 Cluster“	163
Abb. 56:	Merkmalsausprägung der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „6 Cluster“	163
Abb. 57:	Clusterung der Klimawirkungen für Bayern; Variante „8 Cluster“	165
Abb. 58:	Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „8 Cluster“	165

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Ensemble der 16 Modellläufe regionaler Klimamodelle für die Klimaperiode 1971 bis 2000 (Gegenwart, t_0) und 2021 bis 2050 (Zukunft, t_1). Für die Auswertung nicht verwendete Projektionen sind mit x markiert. Die im Nachgang der Projektbearbeitung vom DWD bzw. den Modellentwicklern zurückgezogenen Projektionen sind mit xx markiert. Projektionen, die nach einer internen Qualitätsprüfung ausgeschlossen wurden, sind mit xxx markiert.	29
Tab. 2:	Ensemble der nicht-bias-korrigierten Modellläufe regionaler Klimamodelle für die Klimaperiode 1971 bis 2000 (Gegenwart, t_0) und 2021 bis 2050 (Zukunft, t_1) zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	31
Tab. 3:	Klimaeinflüsse, deren Definitionen und zur Berechnung verwendete Klimamodelldaten. T_{mean} : Mittlere Lufttemperatur in 2 m [°C], T_{max} : Maximaltemperatur in 2 m [°C], T_{min} : Minimaltemperatur in 2 m [°C], RR: Niederschlag [mm], ETP: potenzielle Evapotranspiration [mm], FF_{mean} : mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m [m s^{-1}].	32
Tab. 4:	Übersicht der verwendeten Datensätze zur Berechnung der Sensitivität. Für nähere Erläuterungen zu bestimmten Datensätzen und zur Datenprozessierung siehe Kap. 4.2. LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt, BBSR: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, LfStat: Bayerisches Landesamt für Statistik, GWS: Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, LDBV: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, OBB: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, BMVI: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BNetzA: Bundesnetzagentur, StMi: Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr	40
Tab. 5:	Anzahl der Kraftwerke mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW nach Energieträger in Bayern in der Gegenwart und Zukunft	53
Tab. 6:	Ensemble der Klimaprojektionen, für die der R-Faktor für die Periode 1971 bis 2050 berechnet wurde. Alle Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario. Die Koordinaten der oberen Gruppe von Projektionen beruht auf dem EUR-11-Gitter, die mittlere Gruppe aus 2 Projektionen verwendet das Remo-Gitter und die letzte Projektion verwendet das Aladin-Gitter. Abkürzungen siehe Hübener et al. (2017)	63
Tab. 7:	Häufigkeit Clusterlösungen für jede Clustervariante (jeweils in 100 Modellläufen)	159

Zusammenfassung

Die vorliegende Pilotstudie hat die methodische Entwicklung von Klimawirkungskarten für Bayern auf der Basis der vom Umweltbundesamt (UBA) 2015 herausgegebenen Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ zum Ziel. Die UBA-Studie stellt den methodischen Rahmen für die Pilotstudie bereit. Einige der dort verwendeten Daten konnten zwar für die Pilotstudie übernommen werden, insgesamt stellen die Erarbeitung von Klimawirkungskarten und die Ermittlung von Klimawirkungs-Raumtypen für Bayern jedoch ein von der UBA-Studie unabhängiges Ergebnis dar. Die hier vorgestellten Klimawirkungskarten wurden unter fachlicher Mitarbeit mehrerer Fachreferate des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, des Bayerischen Staatsministeriums des Innern, für Bau und Verkehr sowie des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie erstellt. Wir danken allen Beteiligten für die konstruktive Zusammenarbeit. Mit der Pilotstudie werden Entscheidungsträgern und Planern vor Ort regional differenzierte Informationen zu Klimawirkungen in der Gegenwart und in der Zukunft bereitgestellt.

Um die **Folgen des Klimawandels** abschätzen zu können (Kap. 2), bedarf es einer intensiven Auseinandersetzung mit der regionalklimatischen Situation (Klimaeinfluss). Darüber hinaus gilt es, Aussagen zur Empfindlichkeit der Region (Sensitivität) gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu treffen. Eine Klimawirkung beschreibt die (potenzielle) Wirkung des Klimas auf Wirtschaft, Gesellschaft oder Umwelt. Die Abschätzung von Klimawirkungen wird in dieser Pilotstudie sowohl für die heutige Situation (Gegenwart) als auch für die nahe Zukunft (2021–2050) vorgenommen. Zusätzlich wird die Veränderung zwischen der Gegenwart und der Zukunft („Delta“) abgebildet. Die Ergebnisse werden in der Pilotstudie für Bayern räumlich differenziert auf Kreisebene (Landkreise und kreisfreie Städte), jeweils für ein Szenario des schwachen und eines des starken Wandels, dargestellt. Die Analyse erfolgte für Klimawirkungen in mehreren Handlungsfeldern der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie. Um bei einer solchen sektorenübergreifenden Analyse Aussagen vergleichbar zu machen, werden die Ergebnisse normalisiert dargestellt, da nur auf diese Weise Informationen, die auf unterschiedlichen Skalen vorliegen, miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Als Datengrundlage für die Berechnung der **Klimaeinflüsse** und deren künftiger Veränderung (Kap. 3) dienten die Klimamodelldaten aus der EURO-CORDEX-Initiative (EUR-11 Ensemble) für das RCP8.5-Szenario. Aus den 13 Modellläufen wurde für die Gegenwart (1971-2000) der Median als Klimaeinfluss verwendet. Für die Zukunft (2021–2050) wurden aus den 13 Modellläufen die Werte für das 15. und 85. Perzentil ermittelt, um einen schwachen und einen starken klimatischen Wandel abzubilden. Für die Pilotstudie wurden die Klimaeinflüsse Jahresmitteltemperatur, Heiße Tage, Tropennächte, Tage mit Wechselfrost (0 °C), Tage mit Wechselfrost (± 3 °C), Tag des Vegetationsbeginns, Heiztage, Kühltage, Winterniederschlag, Sommerniederschlag, Starkregentage, Regenerosivität sowie Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode berechnet und verwendet (siehe Tab. 3). Darüber hinaus wurden auch die Überschwemmungsflächen eines gegenwärtig 100-jährlichen Hochwassers betrachtet. Aufgrund noch fehlender Abflussprojektionen konnten jedoch keine Aussagen über die Veränderung von Flusshochwassern und deren Überschwemmungsflächen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen getroffen werden.

Die **Raummuster des Klimaeinflusses** zeigen, dass es im Vergleich zwischen der Gegenwart und der Zukunft teilweise zu erheblichen Veränderungen bei den Niederschlägen und Temperaturen kommen kann, insbesondere bei den Modellläufen, die einen stärkeren Wandel bei den Klimaänderungen beschreiben. Bezüglich des temperaturbezogenen Klimaeinflusses treten die Bereiche des Unterbayerischen Hügellands und der Isar-Inn-Schotterplatten sowie die Mainfränkischen Platten mit deutlich mehr Heißen Tagen und Tropennächten sowie einer Verschiebung des Vegetationsbeginns um bis zu fast drei Wochen hervor. Beim niederschlagsbezogenen Klimaeinfluss sind deutliche Zu-

nahmen bei den Sommer- und bei den Winterniederschlägen insbesondere in den Mittelgebirgen zu erwarten, im Alpenraum vor allem Starkregen.

Die Eingangsdaten für die Berechnung der **Sensitivitäten** (Kap. 4) wurden in verschiedenen Formaten und auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen geliefert. Zum einen lagen standortgenaue Vektordaten, wie beispielsweise Shapefiles zu den Kraftwerken, vor. Daten zu hitzeempfindlichen Einrichtungen oder Gästeübernachtungen waren hingegen als Werte, bezogen auf die Kreisebene, vorhanden. Zudem wurden einzelne Datensätze (z. B. Verkehrsinfrastruktur) manuell georeferenziert und vektorisiert. Für die Berechnung der Sensitivitäten wurden die Indikatoren Flächen wasserabhängiger Biotope, Siedlungsfläche, Bevölkerungsdichte, versiegelte Fläche, Industrie- und Gewerbeflächen, (Land-)verkehrsinfrastrukturflächen, Kraftwerke, Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre, landwirtschaftlich genutzte Fläche, Bevölkerungszahl, hitzeempfindliche Einrichtungen, Kläranlagen, Gästeübernachtungen sowie Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte verwendet. Einige Indikatoren sind deutlich häufiger in die Berechnung von Klimawirkungen eingeflossen als andere. Da die Sensitivität bei mehreren Klimawirkungen direkt und indirekt von der Landnutzung (Art und Maß) und ihrer Verteilung abhängt, wurden vergleichsweise häufig Datensätze verwendet, die sich auf den gegenwärtigen Stand sowie die zukünftige Entwicklung der Landnutzung beziehen.

Als besonders **sensitive Räume Bayerns** treten insbesondere die Verdichtungsräume hervor, da hier hohe Bevölkerungszahlen und Infrastrukturdichten sowie hohe Anteile an Industrie- und Gewerbeflächen und hohe Versiegelungsgrade bestehen. Von einer besonderen Dynamik und daher von zukünftig steigender Sensitivität geprägt ist Oberbayern mit seinen starken Wachstumsraten in Bezug auf die Bevölkerung. In den Regierungsbezirken Frankens und entlang der östlichen Landesgrenze besteht eine hohe Sensitivität aufgrund des höheren – und zukünftig vor allem in den nördlichen Landesteilen weiter steigenden – Anteils der über 60-jährigen an der Gesamtbevölkerung. Andere Sensitivitäten – wie beispielsweise die Verteilung von Kraftwerksstandorten – folgen keinem spezifischen räumlichen Muster und sind relativ gleichmäßig verteilt.

Klimawirkungskarten wurden in Abstimmung mit den zuständigen Landesfachbehörden exemplarisch für die nachfolgenden Handlungsfelder entwickelt (siehe Kap. 5): Naturschutz, Bodenschutz und Georisiken, Wald- und Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Bauen, Industrie und Gewerbe, Energiewirtschaft, Tourismus, Gesundheit sowie Straßenbau und Verkehr. In einigen Handlungsfeldern wurden Klimawirkungen lediglich beschrieben und Vorschläge zu deren Operationalisierung diskutiert, in anderen Handlungsfeldern wiederum wurden mehrere Klimawirkungen berechnet und anhand mehrerer Karten deren gegenwärtige und zukünftige Stärke und räumliche Verteilung, deren Veränderung und Einflussgrößen dargestellt. Generell sind in den Karten, auch für die Gegenwart, potentielle Klimawirkungen dargestellt, da die Operationalisierung weitgehend über Proxyindikatoren erfolgte.

Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse zeigen einige **handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte**:

Betroffenheiten durch die ansteigende **Hitzebelastung** in Verdichtungsräumen spielen im Handlungsfeld Bauen mit der potenziellen Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln und in hitzeempfindlichen Einrichtungen, im Handlungsfeld Gesundheit durch die potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre sowie im Handlungsfeld Straßenbau und Verkehr bezüglich der potenziellen hitzebedingten Schäden an Verkehrsinfrastruktur eine Rolle. Die Zunahme von **Starkregen**, beziehungsweise erosiver Niederschläge, betrifft vor allem das Handlungsfeld Bodenschutz. In ländlichen Räumen spielen die **Regenerosivität** und damit die Bodenerosion eine große Rolle. Bereits heute haben sich nachweislich die Regenerosivität und damit der Bodenabtrag flächendeckend verdoppelt. Bis 2050 ist eine Zunahme auf das Dreifache zu erwarten. Unmittelbar damit zusammen hängen auch die Zunahme von Sturzfluten und von Wasserdefiziten (verstärkte Sommertrockenheit und verringerte

Grundwasserneubildung durch Abflussverluste, verminderter Bodenwasserspeicher durch Erosion). Außerdem wurden Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch **Sturzfluten** in den Handlungsfeldern Wasserwirtschaft, Bauen (Potenzielle Schäden an Gebäuden), Industrie und Gewerbe (Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen, Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs), Tourismus (Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus) sowie Straßenbau und Verkehr (Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur) angesprochen. Dieselben Handlungsfelder und zusätzlich die Energiewirtschaft (Lage von Kraftwerken in potenziellen Überschwemmungsflächen) werden auch von **Flusshochwasser** betroffen. Auch zunehmende **Sommertrockenheit** führt in mehreren Handlungsfeldern zu Betroffenheiten, so beim Naturschutz bezüglich der Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit, in der Landwirtschaft aufgrund von Schäden durch Trockenheit sowie auch in der Wald- und Forstwirtschaft (Trockenheit auf Waldflächen; Klimawirkung jedoch nicht berechnet).

Insbesondere in den dynamisch wachsenden Kreisen Oberbayerns überlagern sich Flächenwachstum, steigende Bevölkerungszahlen sowie Hitzebelastungen. Darüber hinaus liegen viele wachsende Gemeinden auch in der Nähe von Flüssen wie der Donau oder dem Main, sodass es dort zu einer Überlagerung von Siedlungsflächenwachstum und Überschwemmungsgefährdung kommt und in der Folge zu steigenden Schadenspotenzialen. Die bereits längerfristig bestehenden Anstrengungen der Wasserwirtschaft zur Freihaltung von Überschwemmungsgebieten sind hier von besonders hoher Bedeutung. In Oberbayern und Unterfranken überlagern sich die Muster von Trockenheit sowie landwirtschaftlicher Nutzung. Im Alpenraum ist die Siedlungs- und Infrastrukturdichte zwar geringer, aber aufgrund des ausgeprägten Sturzflutpotenzials bestehen hier handlungsfeldübergreifende Auswirkungen. Die Analyse bietet für Bayern insgesamt eine Vergleichsmöglichkeit, welche Landkreise und kreisfreien Städte bezüglich der Handlungsfelder der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie in Zukunft vor Anpassungs Herausforderungen stehen.

Schließlich wurden **Klimawirkungs-Raumtypen** für Bayern mithilfe einer Clusteranalyse pilothaft bestimmt (Kap. 6). Die Raumtypen der Klimawirkungen in Bayern fassen Kreise zusammen, in denen Ähnlichkeitsmuster dominanter Klimawirkungen bestehen. Dabei werden Varianten mit vier, sechs und acht Raumtypen vorgestellt und beschrieben. Eine derartige Typisierung von Räumlichkeiten der Klimawirkungen kann beispielsweise dazu dienen, eine Orientierungshilfe bei der Abgrenzung von Kooperationsräumen oder Fördergebietskulissen zu bieten. Innerhalb bereits bestehender Kooperationsräume (z. B. Flussgebietseinheiten, Regierungsbezirken oder Regionalen Planungsverbänden) können die Raumtypen für die Definition und Fokussierung von bedeutenden Themen zur Anpassung verwendet werden. Auf diese Weise können beispielsweise auf die einzelnen Raumtypen zugeschnittene Maßnahmenpakete entwickelt und von den Landkreisen und kreisfreien Städten aufgegriffen werden, die dem jeweiligen Raumtyp angehören.

Abschließend erfolgen eine zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse und eine Reflexion der Methodik sowie der verwendeten beziehungsweise zur Verfügung stehenden Daten und ein Fazit (Kap. 7). Verbesserungsbedarf wird bei der Qualität der Eingangsdaten insbesondere zur Sensitivität gesehen sowie bei der methodischen Weiterentwicklung bei der Normalisierung und Clusterung von Daten und Ergebnissen. Insgesamt ist die Erstellung von Klimawirkungskarten sehr aufwändig. Im Ergebnis erhält man einen guten Überblick über regional relevante Handlungsfelder. Allerdings reicht die Belastbarkeit meist nicht aus, um sie allein als lokale Planungsgrundlage heran zu ziehen. Dafür sind Experteneinschätzungen und lokale Abstimmungsprozesse unerlässlich.

Summary

The main objective of the present pilot study was the development of a methodology for climate impact maps for Bavaria based on the study “Germany’s vulnerability towards climate change”, which was published by the Federal Environment Agency in 2015. The FEA-study provides the methodological framework and some of the input data were taken from there. Overall, however, the development of climate impact maps and the determination of a typology of climate impact regions in Bavaria is an independent result on its own. The climate impact maps for Bavaria were developed with support of several departments of the Bavarian Environment Agency, the Bavarian State Agency for Health and Food Safety, der the Bavarian State Agency for Forestry, the Bavarian State Ministry of the Interior, for Construction and Transport and the Bavarian State Ministry of Economics, Regional Development and Energy. We thank the participating specialist authorities for the collaboration. The pilot study provides regionally differentiated information on climate impacts in the present and future for decision-makers and planners.

In order to assess the **impacts of climate change** (Chap. 2), an intensive analysis of the regional climate situation (climate effect) is required. Furthermore, the sensitivity of the regions towards the impacts of climate change (sensitivity) has to be considered. A climate impact specifies the (potential) impact of climate change on economy, society or the environment. In the present pilot study, climate impacts are assessed for the present as well as for the near future (2021-2050). Additionally, the change between present and future (“delta”) is addressed. The results are presented on the level of districts (administrative districts and district-free cities) for a scenario of minor and a scenario of major change. Climate impacts were analysed for several fields of action according to the Bavarian Adaptation Strategy. In order to compare the results of so many different fields, the results were normalised. This is the only way to relate the differently scaled data.

The **climate effects** and their future changes (Chap. 3) were calculated based on the climate models from the EURO-CORDEX-Initiative (EUR-11 ensemble) for the RCP8.5 Scenario. From the 13 model runs, the median was used to depict the present climate effect (1971-2000). The future climate effects (2021-2050) are represented by the 15th and 85th percentile of the 13 model runs in order to depict minor and major climate change. The following climate effects were determined: annual mean temperature, hot days, tropical nights, days with freeze and thaw cycle (± 0 °C and ± 3 °C), day of the beginning of growing season, heating days, cooling days, winter precipitation, summer precipitation, days with heavy rain, rain erosivity and climatic water balance. Additionally, the inundation areas for flood levels that occur statistically once in 100 years were considered. However, no changes of inundation areas as a result of climate change are presented due to lacking discharge projections.

Spatial patterns of climate effects show substantial precipitation and temperature changes between present and future in some areas, especially for the model runs of major climate change. Concerning the temperature based climate effect, *Unterbayerisches Hügelland* and *Isar-Inn-Schotterplatten*, as well as *Mainfänkische Platten* clearly show an increasing number of hot days and tropical nights as well as a shift of the beginning of the growing season of nearly three weeks. Concerning the precipitation based climate effect, a summer and winter precipitation increase is expected especially in the low mountain ranges and heavy rain in the alpine regions.

The input data for **sensitivity** calculations (Chap. 4) were provided in variable formats and on variable spatial scales. On the one hand, precisely located positions were provided in shape files, for example for power plant locations. Data on heat sensitive institutions and overnight accommodations were available as abundances per district. Some of the data had to be georeferenced and vectorised manually (e.g. transport infrastructure). The following indicators were used for the calculation of sensitivities: area of water-dependent biotopes, settlement area, population density, sealed area, industrial

and trade area, (terrestrial) transport infrastructure, power plants, population fraction over the age of 60, agricultural area, population, heat sensitive institutions, sewage treatment plants, overnight accommodations and spas and health resorts. Some indicators were used for the calculation of several climate impacts, others only for one. For many climate impacts, the sensitivity is directly or indirectly dependent on land use (type and intensity) and its distribution. Therefore, present and future land use data were used in many cases.

Urban areas, where high population meets high density of infrastructure as well as industrial and trade areas and high degrees of sealing, appear as most **sensitive areas in Bavaria**. The high population growth rates in Upper Bavaria result in an increasing sensitivity of this region. On the other hand, the eastern Franconian regions are sensitive with respect to the high population fraction over the age of 60, which is further increasing in the northern part. Other sensitivities, for example power plant locations, are distributed evenly and do not show specific spatial patterns.

Climate impact maps were developed with consultation of the relevant state agencies exemplarily for the following fields of action (Chap. 5): nature conservation, soil protection and geological risks, forestry, agriculture, water management, construction, industry and trade, energy sector, tourism, health and road construction and transportation. In some fields of action, climate impacts were merely described and the calculation was proposed and discussed. In other fields of action, several climate impacts were calculated and the current and future intensity and distribution as well as the predicted changes and influencing factors were depicted in several maps. Generally, the maps show potential climate impacts, because they were operationalised with proxy indicators.

The results of the climate impact analysis show some **general priorities**:

Concernments that are related to the increasing **heat exposure** in urban areas are relevant in the fields construction (potential heating of buildings in urban heat islands and in heat sensitive institutions), health (potential heat exposure of the population over the age of 60) and road construction and transport (potential heat-related damage of transport infrastructure). The increase of **heavy rainfalls** is in particular relevant for soil protection. In rural areas, the increase of **rain erosivity** and subsequently the increase of soil erosion play a pivotal role. Countrywide, rain erosivity and in turn soil erosion have already doubled now and a threefold increase is to be expected until 2050. This also implies an increase of flash floods and an increase of water deficits (runoff losses intensify summer drought and reduce groundwater recharge; soil erosion deteriorates the soil water storage capacity). Additionally, potential damage to buildings and infrastructure thorough **flash floods** were addressed in several fields of action: water management, construction (potential damage to buildings), industry and trade (industrial and trade areas in potential inundation areas, damage to terrestrial transport infrastructure), tourism (potential impairment of tourism) as well as road construction and transport (potential damage to transport infrastructure). Those fields of action and additionally the energy sector (power plants in potential inundation areas) are also concerned by **river flooding**. Increasing **summer drought** also leads to concernments in several fields of action. Those are nature conservation (impairment of water-dependent biotopes by drought), agriculture (drought damage) and forestry (drought damage, climate impact not calculated).

Especially in the fast growing districts of Upper Bavaria, area expansions coincide with population increase and heat exposure. Additionally, many growing towns are located in close proximity to rivers such as the Danube or the Main. Therefore, settlement area expansion and inundation areas overlap and lead to increasing damage potentials. The long term efforts of water management to keep flood-prone areas free from sensitive usage are especially important in those areas. In Upper Bavaria and Lower Franconia, agricultural areas overlap with relatively high drought risk. In the alpine regions, settlement and infrastructure densities are less intense. Nevertheless, the pronounced flash flood potential has an impact on several fields of action. Overall, the analysis provides a direct comparison, which

Bavarian districts and district-free cities are facing adaptation challenges in the fields of action according to the Bavarian Adaptation Strategy.

Additionally, a **typology of climate impact regions** in Bavaria was determined exemplarily using cluster analysis (Chap. 6). The region types of climate impact aggregate districts in Bavaria with similar patterns of dominant climate impacts. Three alternatives (four, six and eight region types) are presented and described. Such a typology of spatial patterns of climate impacts can for example be used as guideline when cooperation areas or assisted areas need to be defined. Within existing cooperation areas (e.g. river basins, administrative districts or regional planning authorities), the region types can be used to define and focus on important aspects of climate adaptation. For example, appropriate packages of measures can be developed for the regional types, which can be used by the respective districts and district-free cities.

Finally, the results are concluded and the methods and input data are reflected (Chap. 7). Improvements with respect to data quality are required in particular for the sensitivity input data. For the further development of the methodology, the normalisation technique and the choice of the appropriate cluster analysis should be considered. The realisation of climate impact maps is very effortful. As a result, you get a good overview of regionally relevant fields of action. However, they are generally not accurate enough to serve as the sole basis for regional planning. For this purpose, expert assessments and local coordination processes are essential.

1 Einleitung

Klimaschutz und die Anpassung an die Folgen des Klimawandels sind in Bayern seit vielen Jahren Gegenstand politischer und wissenschaftlicher Aktivitäten. Zuletzt zeigte der Klima-Report 2015 Erkenntnisse zum Klimawandel in Bayern sowie Auswirkungen in den verschiedenen Umwelt- und Lebensbereichen auf (StMUV 2015). Im Rahmen der Fortschreibung der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) im Jahr 2016 (StMUV 2016) wurden für Bayern relevante Klimawirkungen, Betroffenheiten und Anpassungsmaßnahmen für 15 klimasensitive Handlungsfelder aus allen gesellschaftlichen Bereichen dargestellt. Um die Anpassung an den Klimawandel effektiv umzusetzen, sind die Vernetzung aller Beteiligten, ein fortlaufendes Monitoring sowie eine zielgerichtete Forschung notwendig. Besondere Bedeutung kommt dabei der Bandbreite raumordnerischer Instrumente und Strategien seitens der Landes- und Regionalplanung zu.

Mit der Fortschreibung des Landesentwicklungsprogramms Bayern (LEP; (Bayerische Staatsregierung 2013) sowie durch den Klima-Report (StMUV 2015) werden Klimaschutz und Klimaanpassung gezielt angesprochen. Um Bayerns Regionen und Gemeinden gezielt an die Folgen des Klimawandels anzupassen, bedarf es einer verbesserten Wissensbasis über die regional differenzierten Auswirkungen des Klimawandels für Planer auf Landes- und Regionsebene, regionale Akteure und Entscheidungsträger vor Ort. Dabei sind neben den klimatischen Veränderungen auch mögliche sozio-ökonomische Veränderungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung, Landnutzung) zu berücksichtigen.

Die vorliegende Pilotstudie zielt auf die methodische Entwicklung von Klimawirkungskarten für Bayern auf der Basis der DAS-Vulnerabilitätsanalyse ab (Buth et al. 2015). Ziel ist es Entscheidungsträgern und Planern auf verschiedenen räumlichen Ebenen regional differenzierte „Klimawirkungskarten“ und darüber hinaus „Raumtypen“ von Klimawirkungen in Bayern zur Verfügung zu stellen. Im Gegensatz zur DAS-Vulnerabilitätsanalyse war es von Beginn an das Ziel dieser Studie, Klimawirkungen zu analysieren und in Karten darzustellen, nicht jedoch Aspekte der Anpassungskapazität und somit die Frage der Klimavulnerabilität mit zu betrachten. Bei den Ergebnissen handelt es sich somit tatsächlich um Klimawirkungs- und nicht um Vulnerabilitätskarten.

Für ausgewählte Handlungsfelder wurden in Abstimmung mit den zuständigen Landesfachbehörden exemplarisch Klimawirkungskarten entwickelt. Die Klimawirkungskarten stellen den Einfluss des Klimas (Klima der Gegenwart und dessen Veränderungen in der Zukunft) dar, wobei Teilräume je nach Ausprägung der ökologischen, ökonomischen oder sozialen Strukturen unterschiedlich empfindlich auf diesen Klimaeinfluss reagieren. Klimawirkungskarten stellen damit eine wissenschaftlich abgeleitete Grundlage zur Identifikation des Handlungsbedarfs und der Planung von Anpassungsmaßnahmen dar. Diesen Klimawirkungskarten ist letztlich zu entnehmen, welche Handlungsfelder vor Ort bereits gegenwärtig für eine Klimaanpassung potenziell relevant sind und wo eine frühzeitige Anpassung im Rahmen von Planungsverfahren zur Berücksichtigung zukünftiger Veränderungen notwendig ist. Die Analyse wurden vorwiegend mit Daten durchgeführt, die auf Rasterzellen- (z. B. Temperaturdaten, Siedlungsflächen) oder Polygonebene (z. B. Überschwemmungsflächen) vorlagen. Die Ergebnisse wurden auf Ebene der Kreise (Landkreise und kreisfreie Städte) Bayerns dargestellt und bieten damit für Bayern insgesamt eine Vergleichsmöglichkeit, welche Landkreise und kreisfreien Städte bezüglich der Handlungsfelder der BayKLAS in Zukunft vor Anpassungsherausforderungen stehen. Die Raumtypen der Klimawirkungen in Bayern fassen schließlich Kreise zusammen, in denen Ähnlichkeitsmuster dominanter Klimawirkungen bestehen.

Die Ergebnisse sind im gesamträumlichen Zusammenhang als erster Überblick zu interpretieren: Es werden Raummuster und räumliche „Hot Spots“ identifiziert, die einen räumlichen (alle Landkreise und kreisfreien Städte untereinander) und zeitlichen (Gegenwart und Zukunft) Vergleich des klimatischen Einflusses, der Empfindlichkeit von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft sowie der Auswirkungen des

Klimas und seiner Änderungen auf Kreisebene in Bayern ermöglichen. Insgesamt kann die Pilotstudie somit dazu beitragen, die Klimaanpassung und die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen leichter in die Instrumente der Landes- und Regionalplanung zu integrieren. Die Analyse ersetzt jedoch keine kleinräumigen Untersuchungen, die als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Maßnahmen auf kommunaler Ebene notwendig sind.

2 Konzept und Methodik

Der ursprüngliche Ansatz der Pilotstudie war es, die UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015) auf Bayern zu übertragen, indem die dort verwendeten Methoden und Datengrundlagen für die Erarbeitung von Klimawirkungskarten in Bayern übernommen werden. Im Projektverlauf hat sich früh gezeigt, dass eine Verwendung dieser Daten für Bayern allein aufgrund der größeren Maßstabebene nicht möglich ist. Entsprechendes gilt auch für die methodische Umsetzung, da in Bayern fachlich z. T. sehr unterschiedliche Ansätze verfolgt werden.

Weiterhin standen mittlerweile die Ergebnisse der Klimaprojektionen auf Grundlage der neuen RCP-Treibhausgasszenarien (Representative Concentration Pathways) gemäß dem Weltklimarat (IPCC 2014) zur Verfügung, welche die bisherigen SRES-Emissionsszenarien (Special Report on Emissions Scenarios), die in der UBA-Studie verwendet wurden, abgelöst haben. Es handelt sich bei diesen neuen Szenarien um Konzentrations-Pfade, bei denen die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt bilden und nicht wie bei den früheren SRES-Szenarien die zukünftige Entwicklung von sozio-ökonomischen Faktoren. Als Datensatz für die Abschätzung des Klimaeinflusses für Bayern diente ein Klimamodellensemble, dem das RCP8.5-Szenario zugrunde liegt (Kap. 3). Es geht als „Business-as-usual-Szenario“ von einem weiteren Anstieg der Kohlendioxidemissionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts aus („very high baseline emission scenario“; van Vuuren et al. 2011).

Darüber hinaus standen für Bayern in vielen Fällen aktuellere Daten zur Darstellung der Sensitivität der Raumnutzung zur Verfügung (z. B. Straßeninfrastruktur, Kraftwerke), deren Verwendung im Hinblick auf Aktualität und Anschlussfähigkeit angezeigt war. Zwar konnten für die Abschätzung der gegenwärtigen und zukünftigen Sensitivität teilweise Daten aus der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ übernommen werden, in vielen Fällen wurden jedoch auch spezifisch für Bayern erhobene und zum Teil aktuellere Daten verwendet (Kap. 4 unten). Die verwendeten Daten jeder Klimawirkung sind in den jeweiligen Abschnitten zur Beschreibung der Erstellung der Klimawirkungskarten und in den Kennblättern im Detail dargestellt (Anhang).

Die Vulnerabilitätsstudie Deutschland bietet somit zwar den methodischen Rahmen und es konnten einige Daten übernommen werden, insgesamt stellt die Pilotstudie mit den Klimawirkungskarten und den Klimawirkungs-Raumtypen jedoch ein von der UBA-Studie unabhängiges Ergebnis dar.

2.1 Konzeptioneller Ansatz

Wesentliche Grundlagen für die Erarbeitung der Klimawirkungskarten Bayern bilden die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) sowie die Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (StMUV 2016). Die Klimawirkungskarten wurden unter Berücksichtigung des vom Umweltbundesamt empfohlenen „Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen“ (Buth et al. 2017) erarbeitet. Abb. 1 zeigt die wesentlichen methodischen Zusammenhänge zur Berechnung der Klimawirkungen.

Um die Folgen des Klimawandels abschätzen zu können, bedarf es einer intensiven Auseinandersetzung mit der regionalklimatischen Situation (Klimaeinfluss). Wichtige Parameter sind hier unter ande-

rem die Temperaturverhältnisse oder das Niederschlagsregime sowie Daten zu Extremereignissen, z. B. zu Heißen Tagen oder Sturzfluten. Darüber hinaus gilt es, Aussagen zur Empfindlichkeit der Region (Sensitivität) gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu treffen. Grundlagen sind Daten zu Raumfunktionen und -nutzungen sowie zu Bevölkerungsdichte und -struktur. Die folgende Definition der zentralen Begriffe erfolgt in Anlehnung an den „Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen“ (Buth et al. 2017), der auf Grundlage der Erfahrungen bei der Bearbeitung der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ erstellt wurde:

- Der *Klimaeinfluss* wird durch die für eine Klimawirkung relevanten Klimagrößen wie Temperatur, Niederschlag usw. beschrieben. Es wird zwischen dem Klima in der Gegenwart (t_0) und dem möglichen Klima der Zukunft (t_1) unterschieden. Die Veränderung zwischen t_0 und t_1 (Delta) beschreibt Klimaveränderungen wie steigende Temperaturen, Veränderungen im Niederschlag oder Veränderungen von Wetterextremen.
- Die *Sensitivität* beschreibt die Empfindlichkeit eines Systems (z. B. Wirtschaftssektor, Bevölkerungsgruppe, Ökosystem) gegenüber einem klimatischen Einfluss. Dies wird beeinflusst von dem räumlichen Vorkommen potenziell betroffener Systeme sowie von sozioökonomischen, Umwelt-, geografischen und anderen Faktoren. Es wird zwischen der Sensitivität des Mensch-Umwelt-Systems der Gegenwart und der veränderten Sensitivität eines zukünftigen Systems unterschieden.
- Eine *Klimawirkung* beschreibt im Zeitraum t_0 die (potenzielle) Wirkung des Klimas der Gegenwart auf das System der Gegenwart unter Berücksichtigung der entsprechenden Sensitivität. Zum Zeitpunkt t_1 beschreibt eine Klimawirkung die potenzielle Wirkung des zukünftigen Klimas auf ein zukünftiges System unter Berücksichtigung der zukünftigen Sensitivität. Aus dem Delta der Klimawirkungen t_0 und t_1 lassen sich potenzielle Veränderungen der Klimawirkung, aber auch andere Veränderungsprozesse ablesen. Um für die Zukunft einen Korridor möglicher Entwicklungen abbilden zu können, werden für t_1 zwei Szenariokombinationen dargestellt („schwacher Wandel“ sowie „starker Wandel“), die sich jeweils aus unterschiedlichen möglichen Annahmen/Ausprägungen des Klimaeinflusses und der Sensitivität ergeben.

Die Abschätzung von klimatischen Auswirkungen (Klimawirkungen) für Gesellschaft und Umwelt wird in dieser Pilotstudie sowohl für die heutige Situation (Gegenwart) als auch für die nähere Zukunft (2021–2050) vorgenommen:

- Die *Gegenwart* umfasst sowohl für den Klimaeinfluss als auch für die Sensitivität den Ausgangspunkt bei der Analyse der Klimawirkungen. Eingangsdaten für die Gegenwart können sich auf bestimmte Referenzzeiträume, wie beispielsweise auf den Zeitraum 1971 bis 2000 beim Klimaeinfluss oder auf bestimmte, nach Möglichkeit aktuelle, Stichpunkte der Datenerhebung beziehen, wie z. B. der 31. Dezember eines Jahres in Bezug auf den Bevölkerungsstand. In der Regel handelt es sich bei den Daten zur Gegenwart um gemessene Daten.
- Die *Zukunft* umfasst in dieser Pilotstudie die sogenannte „nähere Zukunft“, also einen Zeitraum von 2021 bis 2050 beziehungsweise einen Mittelwert von 2035. Hingegen wird die ferne Zukunft (2071–2100) in der vorliegenden Studie, anders als bei der UBA-Studie, nicht betrachtet. Daten, die für die Abbildung der Zukunft in dieser Studie verwendet wurden, beruhen in der Regel auf Projektionen zum Klima und zur Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung, teilweise aber auch auf konkreten Planungsabsichten vonseiten der Behörden (z. B. Verkehrsprojekte, Abschaltung Kraftwerke).

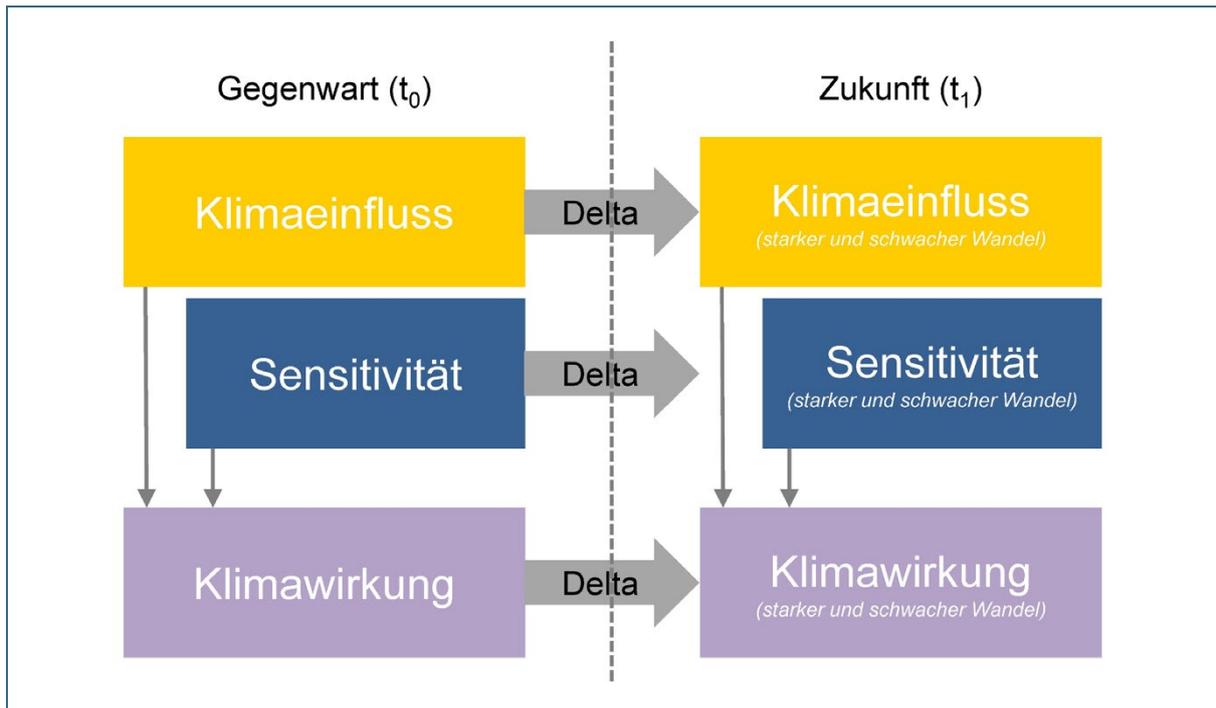


Abb. 1: Schema für das methodische Vorgehen zur Berechnung der Klimawirkungen (eigene Darstellung nach (Buth et al. 2015))

Bei den Projektionen klimatischer Parameter beziehungsweise Projektionen von Raumnutzungen, Raumfunktionen und Bevölkerungsentwicklung für die Zukunft fließen unterschiedliche Szenarien in die Berechnung der Klimawirkungen ein, so dass ein Korridor möglicher Entwicklungen aufgezeigt werden kann. Die Veränderung zwischen der Gegenwart und der Zukunft („Delta“) ist ein Maß für die Stärke der Veränderung der Klimawirkungen, aber auch der beiden Komponenten Klimaeinfluss und Sensitivität. Die Ergebnisse werden in der Pilotstudie für Bayern räumlich differenziert auf Kreisebene dargestellt:

- Unter dem Begriff *Kreis* werden die Gebietseinheiten zusammengefasst, für die die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse dargestellt werden. Der Begriff beinhaltet sowohl die bayerischen Landkreise als auch die kreisfreien Städte Bayerns.

2.2 Berechnung der Klimawirkungen

2.2.1 Auswahl der Handlungsfelder

Grundsätzlich wurden die Handlungsfelder der BayKLAS betrachtet, nicht jedoch die Handlungsfelder „Katastrophenschutz“, „Raumordnung“ sowie „Städtebau/Bauleitplanung“. Diese weisen nach der UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ keine eigenen Klimawirkungen auf und wurden daher in dieser Pilotstudie nicht berücksichtigt. Grund dafür ist, dass diese Handlungsfelder Akteure repräsentieren, deren eigenes Handeln die Anpassungsfähigkeit in anderen Handlungsfeldern (z. B. Gesundheit, Bauen, Straßenbau und Verkehr) maßgeblich beeinflussen und folglich die Vulnerabilität direkt verringern können.

Für das Handlungsfeld Finanzwirtschaft konnten bereits in der UBA-Studie keine Klimawirkungen quantitativ berechnet werden. Abgesehen von der Frage der Datenverfügbarkeit, die sich gleichermaßen für Bayern gestellt hat, wurde auch aus konzeptionellen Erwägungen heraus von einer Betrachtung

tung dieses Handlungsfelds abgesehen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die bayerische Finanzwirtschaft hängen vermutlich nur zu einem sehr kleinen Teil von den Klimawirkungen in Bayern selbst ab. Zu einem größeren Teil dürften die Klimawirkungen in vom Klimawandel betroffenen Drittländern (z. B. USA, Ostasien) die Finanzwirtschaft bei uns beeinflussen. Insofern passt der räumliche Umgriff der Analyse auf Bayern hier nicht mit den tatsächlichen Wirkmustern zusammen.

2.2.2 Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität

Die Analyse der Klimawirkungen in der vorliegenden Pilotstudie für Bayern wurde überwiegend auf der Grundlage einer Kombination von Proxyindikatoren aus den Kernelementen Klimaeinfluss und Sensitivität vorgenommen. Proxyindikatoren werden genutzt, um eine Situation, ein Phänomen oder eine Bedingung zu untersuchen, für die keine direkten Informationen verfügbar sind (Buth et al. 2016). So wird beispielsweise die Einschätzung der Klimawirkung „Hitzebelastung der Bevölkerung über 60 Jahre“ nicht durch eine direkte Befragung oder Messung vorgenommen, sondern durch den Verschnitt der Hitzetage und Tropennächte (Klimaeinfluss) mit dem Wärmeinselpotenzial und dem Anteil der Älteren an der Gesamtbevölkerung (Sensitivität) untersucht. Damit folgt die Art der Berechnung dem Vorgehen in der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“, bei der für die Berechnung der Klimawirkungen für jede Klimawirkung ein oder mehrere Klimaeinflüsse und Sensitivitätsindikatoren verwendet wurden.

Abb. 2 zeigt beispielhaft die Verknüpfung von Klimaeinfluss- und Sensitivitätsindikatoren zur Berechnung von Klimawirkungen. Für den Klimaeinflussindikator wurden die in der Regel auf der Ebene von Rasterzellen vorliegenden Daten für jede räumliche Gebietseinheit (Landkreis oder kreisfreie Stadt in Bayern) berechnet, sodass sich ein Durchschnittswert für jeden Kreis ergab. Im nächsten Schritt wurden diese Durchschnittswerte normalisiert, indem der niedrigste Durchschnittswert den Normalisierungswert 0 erhielt, der höchste Durchschnittswert den Normalisierungswert 1. Im Ergebnis wurde somit jedem Kreis in Bayern eine Größe für den Klimaeinfluss zugeordnet.

Die andere Komponente der Klimawirkungen, nämlich die auf die jeweilige Gebietseinheit bezogene Sensitivität, wurde in ähnlicher Weise berechnet. Im Gegensatz zum Klimaeinfluss setzt sich die Sensitivität im Beispiel in Abb. 2 aus zwei Indikatoren zusammen. Zur Abbildung der Sensitivität wurden hier ein absoluter (Gesamtbevölkerung) und ein relativer (Wohndichte) Indikator miteinander verknüpft. Dafür wurde auch hier zunächst jeder Indikator in einen normalisierten Wert zwischen 0 und 1 überführt. Im Beispiel wurden beide normalisierten Werte additiv miteinander verknüpft, sodass alle als Summe verknüpften Werte theoretisch zwischen 0 und 2 liegen. Auch diese Summen wurden wiederum zwischen 0 und 1 normalisiert. Der Grund für eine Summierung der Sensitivitätsindikatoren ist, dass sich bei der Kombination von zwei oder sogar mehreren Indikatoren mittels einer Multiplikation die Ergebniswerte zu weit spreizen würden.

Zur Berechnung der Klimawirkung wurden die normalisierten Werte des Klimaeinflusses pro Kreis mit den normalisierten Werten der Sensitivität des jeweiligen Kreises miteinander multipliziert. Der Ergebniswert liegt also immer zwischen 0 und 1. Die multiplikative Verknüpfung trägt der Tatsache Rechnung, dass eine sehr geringe Sensitivität einen hohen Wert des Klimaeinflusses zu nivellieren vermag, z. B. in einem Kreis, der zwar viele heiße Tage aufweist, in dem aber nur relativ wenige Menschen leben oder umgekehrt in einem Kreis, in dem zwar sehr viele Menschen leben aber kaum heiße Tage auftreten. Besonders stark ist die Klimawirkung dann, wenn – wie in den Verdichtungsräumen Bayerns – sowohl eine hohe Bevölkerungszahl und eine hohe Anzahl heißer Tage aufeinandertreffen.

Wichtig für die Vergleichbarkeit sowohl der Klimaeinfluss-, der Sensitivitäts-, als auch der Klimawirkungskarten ist es, dass bei der Normalisierung die Extremwerte 0 und 1 für die Gesamtheit aller auftretenden Werte aus der Gegenwart sowie den beiden Zukunftsszenarien „starker“ und „schwacher Wandel“ vergeben werden.

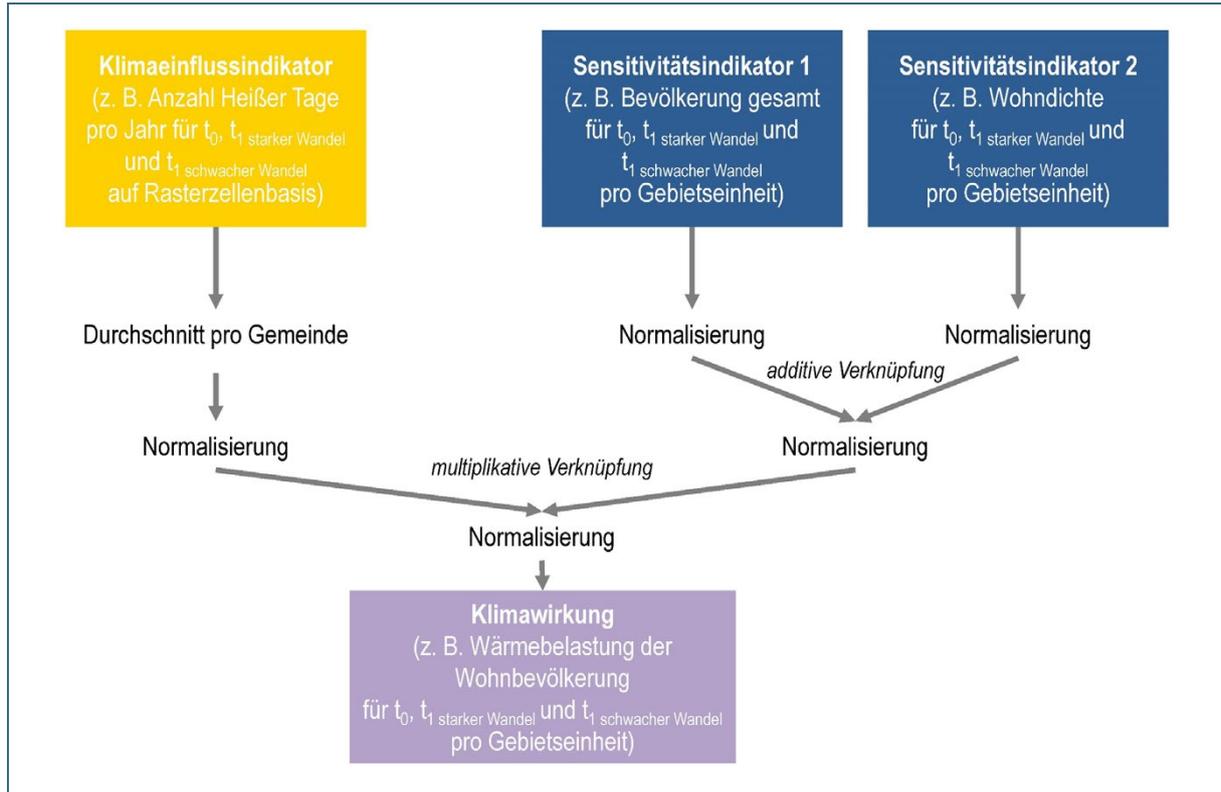


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung der Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivitätsindikatoren zur Berechnung von Klimawirkungen

Bei einigen Klimawirkungen eignen sich für den Klimaeinfluss Ausgangsdaten, die sich für geographische Überlagerungsoperationen verwenden ließen. Dies war zum Beispiel bei der Verknüpfung von Überschwemmungsflächen des Flusshochwassers mit den Standorten beziehungsweise Betriebsflächen von Kraftwerken möglich. In diesen Fällen wurden beispielsweise die Überschwemmungs- und Kraftwerksflächen nicht sofort für jeden Kreis normalisiert, sondern es wurde zunächst ermittelt, welche Kraftwerksbetriebsflächen überhaupt auf Überschwemmungsflächen liegen. Nur diese, sich aus der Verschneidung ergebenden Werte pro Kreis (z. B. Größe der potenziell überschwemmten Kraftwerksfläche) ging dann in die Normalisierung und somit in die Berechnung der Klimawirkung ein (Buth et al. 2015).

Die genauen Berechnungsvorgänge und Verknüpfungsarten sind für jede Klimawirkung im Abschnitt „Umsetzung“ (Kap. 55) sowie in detaillierterer Ausführung in den Klimawirkung-Kennblättern (Anhang) erläutert.

2.2.3 Normalisierung als Ansatz zur Herstellung der Vergleichbarkeit

Für die Verknüpfung der Informationen zum Klimaeinfluss und zur Sensitivität wurde – wie bereits zuvor erwähnt – eine Normalisierung über eine dimensionslose Skala zwischen 0 und 1 vorgenommen. Da in der Regel jede räumliche Einheit eine – wenn auch womöglich geringe – Sensitivität aufweist, beschreibt der Wert Null daher nicht eine nicht vorhandene, sondern nur die vergleichsweise geringste Sensitivität beziehungsweise den am schwächsten ausgeprägten Klimaeinfluss. Um die Aussagen über die verschiedenen Zeiträume vergleichbar zu machen, wurde der für die Sensitivität, den Klimaeinfluss und die Klimawirkung jeweils kleinste und größte Wert über beide betrachteten Zeiträume und gegebenenfalls Szenariokombinationen bestimmt und in den Legenden der Karten dargestellt (Buth et al. 2015).

Verknüpfung von relativen und absoluten Werten

Die Sensitivität kann grundsätzlich auf zwei Arten bestimmt werden. Zum einen können lediglich die absoluten Werte in die Berechnung einfließen. Demnach erhält beispielsweise der Kreis mit der höchsten Bevölkerungsdichte oder mit der größten Summe von Verkehrsinfrastrukturflächen bei der Normalisierung auch den höchsten Sensitivitätswert (also 1) und ist somit im Vergleich zu den anderen Kreisen im Untersuchungsraum am sensitivsten gegenüber dem untersuchten klimatischen Einfluss. Diese Herangehensweise hat den Nachteil, dass flächenmäßig große Kreise in der Regel auch den höchsten Sensitivitätswert erhalten. Eine andere Herangehensweise ist die Bestimmung der Sensitivität über die relativen Werte des ausgewählten Indikators. So wird beispielsweise demjenigen Kreis mit dem höchsten Anteil an Überschwemmungsflächen oder dem höchsten Anteil an Verkehrsinfrastrukturfläche an der Kreisfläche auch der höchste Sensitivitätswert zugeordnet (Buth et al. 2015).

Bei Aussagen zur relativen Sensitivität (beziehungsweise Klimawirkung) geht es um die Frage der Betroffenheit, unabhängig von der Anzahl der potenziell betroffenen Einheiten: Also darum, welche Kreise vermutlich höhere Anpassungsbedarfe angesichts einer verhältnismäßig hohen Sensitivität im Vergleich zu ihrer Größe aufweisen. Angaben in absoluten Werten helfen dagegen, beispielsweise die strategische Frage nach dem Mitteleinsatz beziehungsweise nach der Verteilung der Mittel zu beantworten: In welchen Kreisen besteht der größte Mittelbedarf, um die Sensitivität (beziehungsweise die Klimawirkungen) zu verringern?

Beide Vorgehensweisen besitzen bei der Berechnung von Klimawirkungen also ihre Berechtigung. Deshalb floss bei einem Großteil der Klimawirkungen eine Kombination aus absoluten und relativen Werten in die Berechnung ein. Hierzu wurden sowohl die absoluten, als auch die anteiligen Werte zunächst berechnet, dann normalisiert und anschließend additiv miteinander verknüpft. Dadurch konnte vermieden werden, dass Kreise aufgrund ihrer größeren Fläche und den damit verbundenen höheren absoluten Werten immer als sensitiver identifiziert werden (Abb. 2).

2.2.4 Szenariokombinationen eines starken und schwachen Wandels

Die Abschätzungen zu den zukünftigen klimatischen und sozioökonomischen Entwicklungen sind von Unsicherheiten geprägt. Deshalb wird für die Zukunft ein Korridor der möglichen Veränderungen aufgezeigt, der von einem Szenario des schwachen und einem Szenario des starken Wandels begrenzt wird. Grundsätzlich gilt, dass sowohl für den Klimaeinfluss als auch für die Sensitivität zwei verschiedene Szenarien ermittelt und schließlich in der Weise miteinander verknüpft werden sollten, dass sie zwei sich voneinander unterscheidende Zukunftsperspektiven aufzeigen.

Beim Klimaeinfluss wurden die beiden Szenarien in der Regel aus den Klimamodellrechnungen abgeleitet. Wie in der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ bilden sich die Szenarien aus dem 15. und 85. Perzentil der Klimamodellergebnisse. Das 15. Perzentil repräsentiert den Wert, für den 15 % der Modellergebnisse niedrigere Änderungen zeigen oder diesen Wert genau erreichen. Beim 85. Perzentil liefern nur noch 15 % der Simulationen höhere Änderungen oder erreichen diesen Wert genau. Bei der Sensitivität können ebenfalls unterschiedliche Szenarien für die Zukunft angenommen werden, wie beispielsweise ein stärkeres oder ein weniger starkes Bevölkerungswachstum. Was als Ergebnis der Verknüpfung zwischen den unterschiedlichen Entwicklungen als „starker“ und „schwacher Wandel“ definiert wird, hängt letztlich immer von den jeweiligen Klimawirkungsveränderungen ab. Dies soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden.

Bei der Klimawirkung „Landwirtschaftliche Schäden durch Wechselfrost“ hat das 85. Perzentil per Definition größere Werte als das 15. Perzentil. Einer der Extremwerte mit den potenziell höchsten Schäden wird durch die Verknüpfung einer hohen Anzahl von Wechselfrosttagen (85. Perzentil) mit einer großen Ackerfläche im Landkreis dargestellt. Das andere Extrem mit den potenziell geringsten Schä-

den wird durch eine geringe Anzahl von Wechselfrosttagen (15. Perzentil) kombiniert mit einer geringen Ackerfläche im Kreis dargestellt. Durch die Verknüpfung entstehen für die Gegenwart (t_0) und für die beiden Zukunftsszenarien (t_1) des starken und schwachen Wandels demnach je eine Klimawirkungskarte (insgesamt drei). Daraus lässt sich für beide Zukunftsszenarien jeweils eine „Veränderung der Klimawirkung“ gegenüber der Gegenwart berechnen und in den Klimawirkungskarten darstellen. Aus der Betrachtung dieser beiden Veränderungskarten der Klimawirkung wird festgelegt, welche Verknüpfung dem „starken“ und welche dem „schwachen“ Wandel zugeordnet werden kann. Am Beispiel der Wechselfrosttage wird ersichtlich, dass der 85. Perzentil nicht automatisch den „starken“ Wandel darstellt. Mit der projizierten Temperaturerhöhung ist auch die zukünftige Abnahme der Anzahl der Wechselfrosttage verknüpft - je stärker die Abnahme, desto stärker der Wandel. So ist eine geringe Anzahl an Wechselfrosttagen eine starke Veränderung gegenüber der Gegenwart, sodass hier der 15. Perzentil den starken Wandel darstellt. Im Gegensatz dazu zeigt der 85. Perzentil eine ähnliche Anzahl an Wechselfrosttage wie heutzutage an, sodass hier vom „schwachen“ Wandel die Rede ist.

Das Szenario des starken Wandels stellt also immer die vergleichsweise stärkere Veränderung dar, unabhängig davon, ob es durch Klimawirkungen des 15. oder 85. Perzentils repräsentiert wird oder in welche Richtung die Veränderung stattfindet (Abnahme/Zunahme). „Starker“ und „schwacher Wandel“ sagen somit nichts über „gut“ oder „schlecht“, „schlimmer“ oder „weniger schlimm“ aus. Die Unterscheidung zeigt lediglich, bei welcher Szenariokombination größere Veränderungen der Klimawirkung im Vergleich zur Gegenwart zu erwarten sind, unbedeutend in welche Richtung. Dies führt folglich dazu, dass nicht von vornherein feststeht, welche Szenariokombination letztlich als „starker“ oder „schwacher Wandel“ bezeichnet werden kann.

2.2.5 Raumtypen sich ähnelnder Klimawirkungen

Abschließend wurden für Bayern Raumtypen mit sich ähnelnden Kombinationen von Klimawirkungen für die Gegenwart ermittelt. Diese wurden mit Hilfe einer Clusteranalyse gebildet. Das Vorgehen unterscheidet sich von der UBA-Studie dahingehend, dass für Bayern eine Aussage zu Räumen mit ähnlichen Klimawirkungen erfolgt ist, während in der Vulnerabilitätsstudie Deutschland die Klimaeinflüsse für die Gegenwart, die nahe und ferne Zukunft geclustert wurden (Buth et al. 2015). Eine ausführliche Beschreibung des methodischen Vorgehens und der Ergebnisse zur Bildung der Klimawirkungsraumtypen erfolgt in Kapitel 6.

2.3 Darstellung der Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse

Für jede berechnete Klimawirkung wurde ein Kartenblatt erstellt, welches aus bis zu elf Karten besteht (Abb. 3). Für derartige Kartenblätter wurde im Rahmen der UBA-Studie eine „Leseanleitung“ erstellt (Buth et al. 2015), die auch für die Pilotstudie in Bayern gilt.

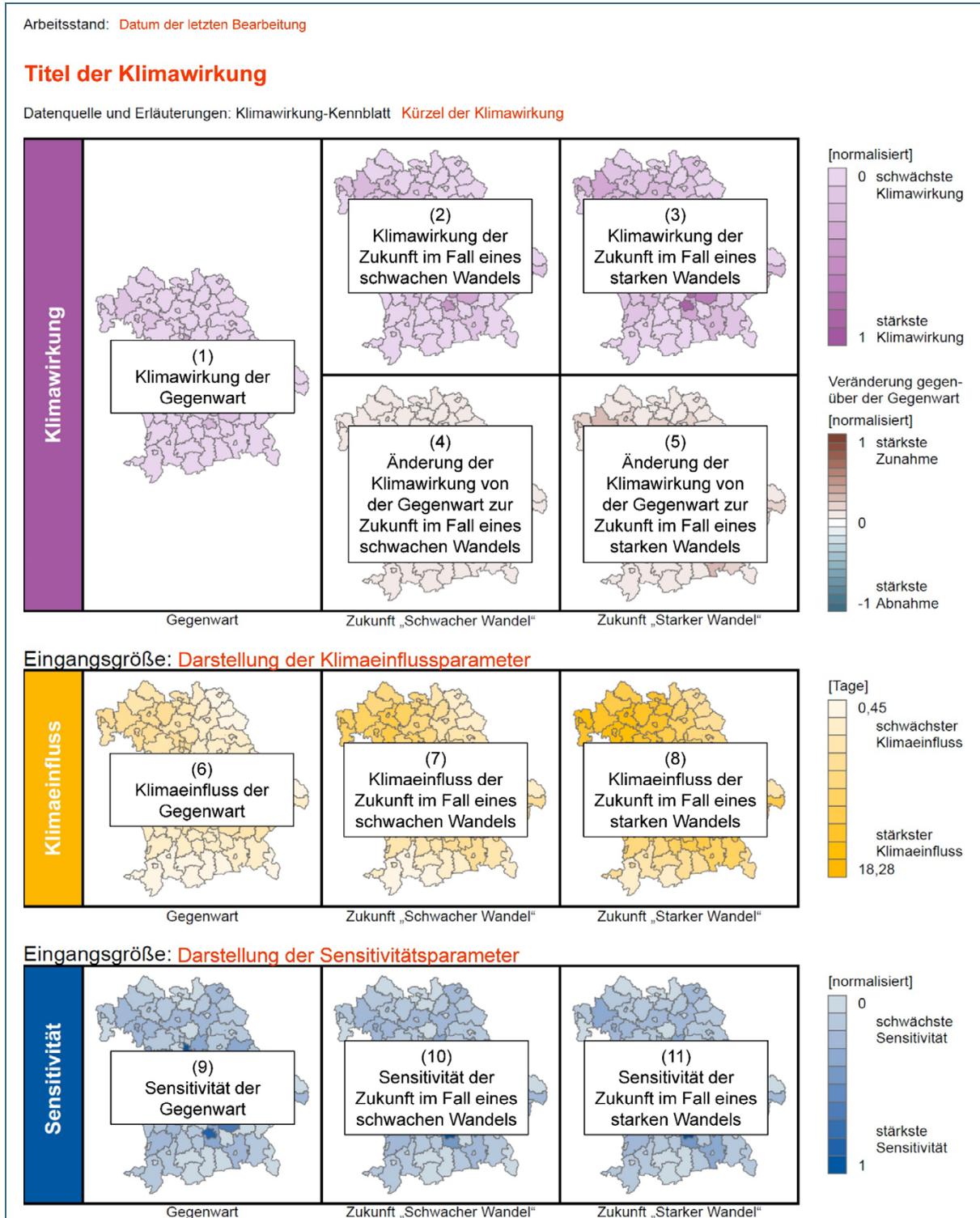


Abb. 3: Erläuterungen zu den Karten der Klimawirkungen

Die Klimawirkungskarten setzen sich aus den Ergebniskarten inklusive der Änderungskarten zu den Klimawirkungen sowie den Karten zu den Eingangsdaten (Klimaeinfluss und Sensitivität) zusammen. Das Kartenblatt ist mit dem Titel der jeweiligen Klimawirkung überschrieben. Zudem erfolgt ein Verweis auf das Klimawirkung-Kennblatt im Anhang sowie die Nennung des Kürzels der Klimawirkung zur eindeutigen Zuordnung der Klimawirkung in den Kapitelüberschriften, Daten-Kennblättern und Abbildungen.

Im oberen Teil des Kartenblatts ist die Klimawirkung dargestellt (Farbe: Lila). Die Karte auf der linken Seite (1) zeigt die Klimawirkung der Gegenwart. In der Mitte und rechts oben ist die Klimawirkung der Zukunft im Fall eines schwachen Wandels (2) und eines starken Wandels (3) abgebildet. Direkt darunter befinden sich Karten, die jeweils die Änderung der Klimawirkung von der Gegenwart zur Zukunft abbilden, auch hier getrennt nach schwachem (4) und starkem Wandel (5).

Die Karten im mittleren und unteren Teil des Kartenblatts stellen die Eingangsgrößen zur Berechnung der Klimawirkung dar. Zunächst wird im mittleren Teil der Klimaeinfluss dargestellt (Farbe: Gelb). Der Klimaeinfluss wird für die Gegenwart (6) und die Zukunft im Fall eines schwachen (7) und starken Wandels (8) abgebildet. Welche Klimaeinflusskarte in der Mitte oder rechts angeordnet ist, hängt davon ab, welcher Klimaeinfluss in der Berechnung der Klimawirkung dem Szenario des schwachen beziehungsweise starken Wandels zugehörig ist (siehe Abschnitt 2.2.4). Oder anders ausgedrückt: Alle untereinander angeordneten Karten gehören für die Berechnung der jeweiligen Klimawirkung zusammen.

Ähnlich verhält es sich mit der Sensitivität. Die Karten dazu sind im unteren Teil des Kartenblatts dargestellt (Farbe: Blau). Auch hier wird zwischen der Sensitivität der Gegenwart (9) und der Zukunft im Fall eines schwachen (10) oder starken Wandels (11) unterschieden.

Bei allen Karten zeigt die Klasse mit der dunkelsten Farbe die höchste Klimawirkung beziehungsweise den stärksten Klimaeinfluss oder die stärkste Sensitivität. Die Änderungskarten weisen Abnahmen und Zunahmen der Klimawirkung zwischen der Gegenwart und der Zukunft in verschiedenen Farben aus. Die Klassen sind immer in Schritten von 0,1 abgegrenzt (also 0; 0,1; 0,2; 0,3; ...; 1). Für die Interpretation der Karten ist daher zu beachten, dass Änderungen beim Klimaeinfluss, bei der Sensitivität oder der Klimawirkung nicht darstellbar sind, wenn nur innerhalb einer Klasse (der farblich abgestuften Darstellung) Veränderungen auftreten (z. B. Klimaeinfluss Gegenwart liegt bei 1, der für die Zukunft schwacher Wandel bei 0,99). Die Klimawirkung selbst wird natürlich mit den entsprechenden Werten berechnet. So kann sich beispielsweise die Klimawirkung eines Kreises verändern, obwohl Sensitivität und Klimaeinfluss rein optisch gleich zu bleiben scheinen.

Einige Klimawirkungen wurden so berechnet, dass zunächst eine geografische Verschneidung zwischen Klimaeinfluss- und Sensitivitätsdaten (beispielsweise zwischen Hochwasserflächen und Siedlungsflächen) vorgenommen wurde. In diesen Fällen sind in den Klimaeinfluss- und Sensitivitätskarten jedoch nicht die Ergebnisse dieser Verschneidung dargestellt, sondern die Eingangsgrößen für den Klimaeinfluss und die Sensitivität. Im genannten Beispiel werden in den Klimaeinflusskarten die Hochwasserflächen pro Kreis sowie in den Sensitivitätskarten die Siedlungsflächen pro Kreis dargestellt, unabhängig davon, ob es dabei zu einer Überlagerung dieser Flächenkulissen („potenziell überschwemmte Siedlungsbereiche“) kommt. In diesen Fällen entsprechen die Raummuster, die sich aus einer Überlagerung der Klimaeinfluss- und Sensitivitätskarten ergeben würden, nicht den Raummustern der Klimawirkungen, die aus der geografischen Verschneidung von Klimaeinfluss- und Sensitivitätsdaten erzeugt wurden.

3 Klima und Klimawandel in Bayern

3.1 Datengrundlagen

Als Datengrundlage für die Berechnung der Klimaeinflüsse und deren künftiger Veränderung dienen die Klimamodelldaten aus der EURO-CORDEX-Initiative (EUR-11 Ensemble) für das RCP8.5-Szenario. Diese haben eine Auflösung von 0.11° (entspricht etwa 12,5 km). Das verwendete Ensemble bestand ursprünglich aus 16 Modellläufen verschiedener regionaler Klimamodelle (EURO-CORDEX Simulations), welche auf der Regionalisierung (dynamical downscaling) von fünf verschiedenen globalen Klimamodellen beruhen (Tab. 1). Drei Modellläufe (Nummern 2, 14 und 16) wiesen abweichende Geometrien zum EURO-CORDEX-Standard – und damit zu den restlichen 13 Modellläufen – auf und wurden nicht in das Ensemble einbezogen. Der Vergleich der Änderungssignale der Temperatur und des Niederschlags zwischen dem Ensemble mit 13 und 16 Projektionen zeigt im Median keinen signifikanten Unterschied. Der starke Wandel fällt bei temperaturbasierten Klimaeinflüssen im 13er-Ensemble etwas stärker, bei niederschlagsbasierten Klimaeinflüssen hingegen geringfügig schwächer aus.

Tab. 1: Ensemble der 16 Modellläufe regionaler Klimamodelle für die Klimaperiode 1971 bis 2000 (Gegenwart, t_0) und 2021 bis 2050 (Zukunft, t_1). Für die Auswertung nicht verwendete Projektionen sind mit x markiert. Die im Nachgang der Projektbearbeitung vom DWD bzw. den Modellentwicklern zurückgezogenen Projektionen sind mit xx markiert. Projektionen, die nach einer internen Qualitätsprüfung ausgeschlossen wurden, sind mit xxx markiert.

Nummer	Globalmodell (GCM)	Regionalmodell (RCM)	Modelllauf (driving ensemble member)
1xx	CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17	r1i1p1
2x	CNRM-CM5	ALADIN53	r1i1p1
3xx	CNRM-CM5	RCA4	r1i1p1
4	EC-EARTH	RACMO22E	r1i1p1
5xx	EC-EARTH	HIRHAM5	r3i1p1
6	EC-EARTH	CCLM4-8-17	r12i1p1
7	EC-EARTH	RCA4	r12i1p1
8xx	IPSL-CM5A-MR	WRF331F	r1i1p1
9	IPSL-CM5A-MR	RCA4	r1i1p1
10xxx	HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	r1i1p1
11xxx	HadGEM2-ES	RACMO22E	r1i1p1
12	HadGEM2-ES	RCA4	r1i1p1
13	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	r1i1p1
14x	MPI-ESM-LR	REMO2009	r1i1p1
15	MPI-ESM-LR	RCA4	r1i1p1
16x	MPI-ESM-LR	REMO2009	r2i1p1

Im Laufe des Jahres 2018, nach Abschluss dieser Pilotstudie, wurden jedoch einige der hier verwendeten Projektionen vom DWD beziehungsweise den ursprünglichen Modellentwicklern aus unterschiedlichen Gründen zurückgezogen (Nummern 1, 3, 5 und 8). So sind einige der für die Regionalisierung durch regionale Klimamodelle bereitgestellten Daten der historischen Simulationen mit dem Globalmodell CNRM-CERFACS-CNRM-CM5(r1) nicht Teil der vorgegebenen Simulation, sondern stammen von einem anderen Modelllauf des CNRM-CM5. Dadurch sind die Regionalmodellsimulationen, die auf diesem Globalmodell aufbauen, fehlerbehaftet (Nummern 1 und 3). Im Falle der Modellläufe Nummer 5 und 8 wurde keine zeitliche Änderung der Treibhausgaskonzentration bei der Simulation berücksichtigt. Nähere Angaben finden sich auf der Website des DWD¹. Diese Informationen waren zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung nicht bekannt, da die Studie Ende 2017 abgeschlossen wurde. Dadurch konnten die Klimawirkungskarten nicht mit den verbleibenden, belastbaren Projektionen neu berechnet werden. Zudem wurde im Laufe des Jahres 2018 eine Methode zur Qualitätsprüfung von Klimaprojektionen am LfU entwickelt und angewendet. Mithilfe dieses Audits wurden gravierende Schwächen (z. B. inverse Jahresgänge des Niederschlags) der Projektionen 10 und 11 entdeckt. **Insofern wird von einer Verwendung der Klimawirkungskarten als Planungsgrundlage abgeraten. Vielmehr sollten die Karten als Anregung für vertiefende Untersuchungen und die Pilotstudie zur Erprobung und Bewertung der eingesetzten Methoden dienen.**

Bevor die Klimaeinflüsse berechnet werden konnten, wurde der Modellbias jeder Projektion mit dem single-variable-quantile-mapping-Verfahren unter Einsatz des bayerischen KliRef2014-Referenzdatensatzes korrigiert. Das LfU stellte auf den Freistaat Bayern zugeschnittene Klimamodell-daten bereit (Abb. 4). Der Beschnitt der Daten ermöglichte eine Ermittlung der Ergebnisse über die Grenzen Bayerns hinaus, so dass keine verfälschenden Randeffekte auftraten. Sämtliche Klimamodell-daten lagen in Form von NetCDF-Rasterdateien mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag vor.

Aus den 13 Modellläufen wurde für die Gegenwart (1971-2000) der Median als Klimaeinfluss verwendet. Für die Zukunft wurden aus den 13 Modellläufen die Werte für das 15. und 85. Perzentil ermittelt, um einen schwachen und einen starken klimatischen Wandel abzubilden.

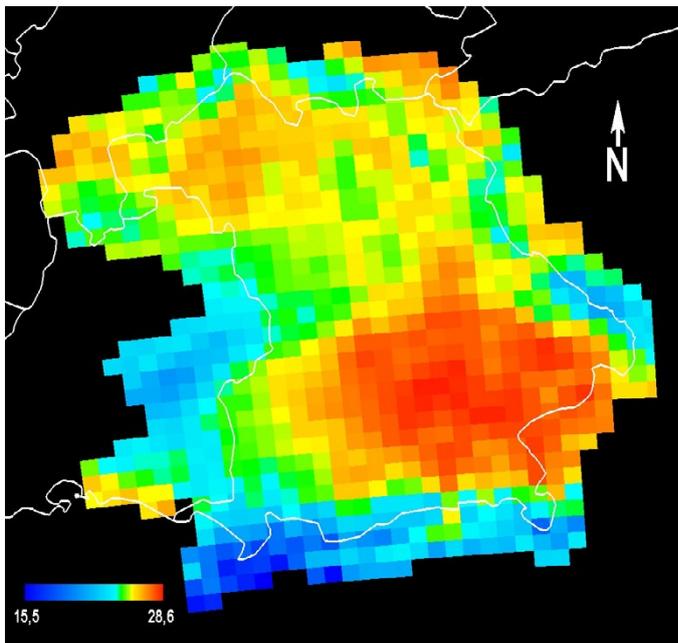


Abb. 4: Beispiel für einen, auf das Untersuchungsgebiet Bayern zugeschnittenen, NetCDF-Rasterdatensatz, mit der Verteilung der Tagesmaximaltemperatur am 01.08.1986

¹ https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/liste-klimaprojektionen.html?nn=541460 aufgerufen am 22.08.2018

Für die Berechnung der mittleren klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April–September) konnten keine bias-korrigierten Modellläufe durch das LfU zur Verfügung gestellt werden, da keine Referenzdaten für die potenzielle Evapotranspiration (ETP) vorlagen. Abweichend zum generellen Vorgehen wurde hier auf fünf verfügbare nicht-bias-korrigierte Modellläufe aus dem EURO-CORDEX-Ensemble zurückgegriffen (Tab. 2). Die klimatische Wasserbilanz wurde aus Konsistenzgründen zu den nicht bias-korrigierten Evapotranspirationsdaten anhand nicht bias-korrigierter Niederschlagsdaten exemplarisch ermittelt. Ergebnisse auf Basis nicht bias-korrigierter Daten wurden entsprechend gekennzeichnet (Karten, Klimawirkung-Kennblätter).

Tab. 2: Ensemble der nicht-bias-korrigierten Modellläufe regionaler Klimamodelle für die Klimaperiode 1971 bis 2000 (Gegenwart, t_0) und 2021 bis 2050 (Zukunft, t_1) zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode

Nummer	Globalmodell (GCM)	Regionalmodell (RCM)	Modelllauf (driving ensemble member)
1	MPI-ESM-LR	RCA4	r1i1p1
2	HadGEM2-ES	RCA4	r1i1p1
3	IPSL-CM5A-MR	RCA4	r1i1p1
4	EC-EARTH	RCA4	r12i1p1
5	CNRM-CM5	RCA4	r1i1p1

Aus den Tageswerten der Klimamodelldaten wurden aggregierte Klimagrößen (Klimaeinflüsse) als 30-jährige Mittel für die Gegenwart und die Zukunft berechnet (Tab. 3). Neben den genannten Klimaeinflüssen waren weitere Leitwerte für die Berechnung vorgesehen, die jedoch aus unterschiedlichen Gründen abgelehnt oder zurückgestellt wurden. Hier sind unter anderem folgende Klimaeinflüsse zu nennen: Länge der ackerbaulichen und forstlichen Vegetationsperiode, Anzahl an Trockenperioden in der forstlichen Vegetationszeit, mittlere Sommer- und Winterlufttemperaturen.

Des Weiteren wurde der berechnete Klimaeinfluss Starkwind nicht verwendet. Dieser sollte anhand der Projektionsdaten zu extremen Windgeschwindigkeiten abgebildet werden. Dabei sollte für die Gegenwart zunächst die Bestimmung des Wertes für das 98. Perzentil (absoluter Wert in m s^{-1}) für jede Zelle über den gesamten Zeitraum für jeden der 13 Modellläufe der Klimaprojektionen erfolgen, so dass anschließend der Median aus den 13 Modellläufen gebildet werden könnte. Für die Zukunft sollte die Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes aus dem Zeitraum 1971 bis 2000 für jede Zelle der einzelnen 13 Modellläufe berechnet werden, um abschließend das 15. und 85. Perzentil aus den 13 Modellläufen die Überschreitungshäufigkeit zu berechnen. Die entsprechenden Klimawirkungen entfielen (u. a. „Windwurf in der Forstwirtschaft“, „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind“) weil die zugrundeliegenden Klimamodelldaten für die Windgeschwindigkeiten nicht plausibel sind.

Tab. 3: Klimaeinflüsse, deren Definitionen und zur Berechnung verwendete Klimamodelldaten. T_{mean} : Mittlere Lufttemperatur in 2 m [°C], T_{max} : Maximaltemperatur in 2 m [°C], T_{min} : Minimaltemperatur in 2 m [°C], RR: Niederschlag [mm], ETP: potenzielle Evapotranspiration [mm], FF_{mean} : mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m [m s^{-1}].

Klimaeinfluss	Definition	Verwendete Tagesdaten der Klimamodelle
Jahresmitteltemperatur	Mittlere jährliche Lufttemperatur in 2 m	T_{mean}
Heiße Tage	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturmaximum ≥ 30 °C	T_{max}
Tropennächte	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturminimum > 20 °C	T_{min}
Tage mit Wechselfrost (0 °C)	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturmaximum > 0 °C und einem Lufttemperaturminimum < 0 °C	$T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$
Tage mit Wechselfrost (± 3 °C)	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturmaximum > 3 °C und einem Lufttemperaturminimum < -3 °C in den Monaten Februar bis April	$T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$
Tag des Vegetationsbeginns	Mittlerer jährlicher Tag, der die erste Periode von sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur ≥ 5 °C beginnt	T_{mean}
Heiztage	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturmittel < 15 °C	T_{mean}
Kühltage	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einem Lufttemperaturmittel $> 18,3$ °C	T_{mean}
Winterniederschlag	Mittlere jährliche Niederschlagssumme in den Monaten Oktober bis März in mm	RR
Sommerniederschlag	Mittlere jährliche Niederschlagssumme in den Monaten April bis September in mm	RR
Starkregentage	Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagssumme > 25 mm	RR
R-Faktor	Erosivität der Niederschläge in $\text{N h}^{-1} \text{a}^{-1}$	RR, T_{mean}
Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	Mittlere jährliche Differenz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration in den Monaten April bis September in mm	RR, ETP
<i>Starkwind</i> (Anmerkung: wurde zwar berechnet, aber aus Plausibilitätsgründen nicht weiter für die Erarbeitung von Klimawirkungskaten verwendet)	Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit des 98. Perzentils in m s^{-1}	FF_{mean}

3.2 Datenprozessierung

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Klimadaten mussten aufbereitet werden, um als Eingangsgrößen für die Klimawirkungsanalysen (Kap. 5) genutzt werden zu können. Hierzu wurden die Programme ESRI ArcGIS 10, Microsoft Excel 2010 und R 3.4 angewendet; auch andere Software mit vergleichbarem Funktionsumfang ist prinzipiell geeignet. Der Bearbeitungsablauf umfasste im Wesentlichen fünf Arbeitsschritte:

(1) Jede der 13 verwendeten Projektionen (siehe Tab. 1) lag ursprünglich in Form einer NetCDF-Datei vor. Zuerst wurden die originalen NetCDF-Rasterdateien als Punkt-Shapefiles in das Geoinformationssystem (GIS) importiert, die Rasterdateien also in Punktgitter überführt (Abb. 5). Dabei wurden die Punkte jeweils dem Zentrum einer ursprünglichen Rasterzelle zugeordnet. Jedes Shapefile enthält etwa elf Millionen Punkt-Datensätze (30 Jahre x 365 Tage x 1.000 Rasterpunkte), denen als Attribute die Lageinformation, z. B. 49,1945°N 11,6055°E, die zeitliche Information, z. B. 05/17/1971, und die Merkmalsausprägung, z. B. Tagesniederschlagssumme in Millimeter der ursprünglichen Rasterzellen beigelegt sind.

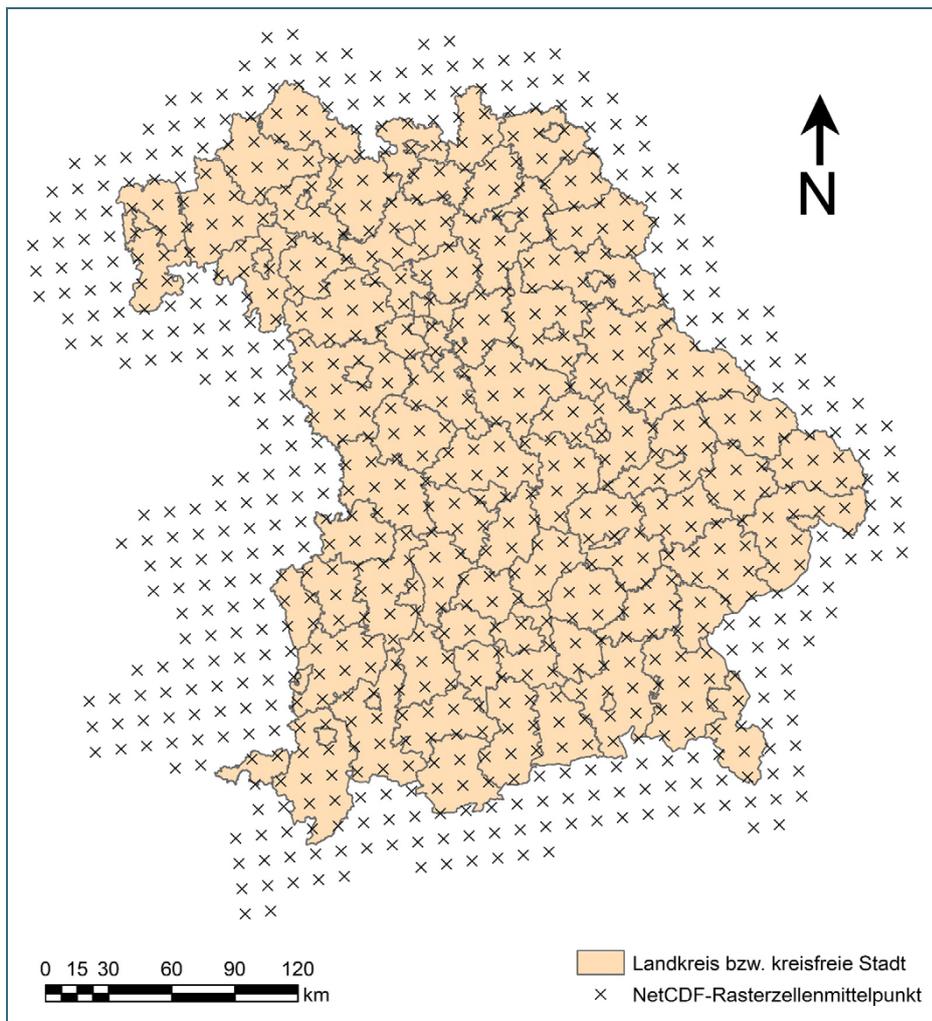


Abb. 5: In ein Punktgitter überführter NetCDF-Rasterdatensatz und räumliche Abdeckung des Untersuchungsgebietes

(2) Ausgehend von den importierten Punkt-Shapefiles wurde für jeden Gitterpunkt die Zielgröße für die jeweils 13 Modellläufe eines 30-jährigen Zeitraums (Zeitscheibe) berechnet. So wurde z. B. für die mittlere jährliche Auftrittshäufigkeit an Starkregentagen für jeden Gitterpunkt geprüft, wie oft der Schwellenwert von 25 mm Tagesniederschlag in den zwei betrachteten Zeiträumen (1971–2000,

2021–2050) jeweils überschritten wurde. Bei jeder Überschreitung wurde ein Index im jeweiligen Tagesdatensatz von 0 auf 1 gesetzt, so dass sich die mittlere jährliche Auftrittshäufigkeit an Starkregentagen je Gitterpunkt und Zeitraum durch die Aufsummierung des Index und die anschließende Division durch 30 ergab.

(3) Die 13 Punkt-Shapefiles je Zeitscheibe wurden anschließend im GIS zusammengeführt und die Attributtabelle des entstandenen Shapefiles in eine Tabellenkalkulationssoftware geladen. Dort wurden für die jeweils 13 Modellläufe je Gitterpunkt der Median der Auftrittshäufigkeiten für die Gegenwart (1971–2000) beziehungsweise das 15. und 85. Perzentil für die Zukunft (2021–2050) berechnet. Die Ergebniswerte wurden als Tabellenblatt exportiert, im GIS mit dem bestehenden Punktgitter verknüpft und als Punkt-Shapefile exportiert.

(4) Das exportierte Punkt-Shapefile mit dem Median (Gegenwart) beziehungsweise dem 15. und 85. Perzentil (Zukunft) dient als Basis für die Interpolation der (Vektor-) Punktdaten in die (Raster-) Fläche. Hierzu wurde im GIS die Interpolation mittels IDW (inverse distance weighting) gewählt. Die IDW-Interpolation errechnet Zellenwerte durch eine linear gewichtete Kombination umliegender Referenzpunkte, in diesem Fall der Werte des Punktgitters. Dieses deterministische Interpolationsverfahren beruht auf der Annahme, dass der Einfluss der Referenzpunkte auf den zu errechnenden Zellenwert mit ihrer Entfernung abnehmen. Referenzpunkte in räumlicher Nähe haben einen größeren Einfluss auf den zu errechnenden Zellenwert als weiter entfernt liegende Referenzpunkte. IDW ist ein exakter Interpolator, das heißt, die bekannten Referenzpunkte stimmen in ihren Werten mit den durch IDW interpolierten Werten überein. Als Zellengröße des Ergebnisrasters wurde 12,5 km x 12,5 km gewählt, was in etwa der ursprünglichen Auflösung des NetCDF-Rasters von 0,11° entspricht.

(5) Im letzten Schritt wurden aus den drei Ergebnisrastern je Klimaeinfluss des vorangegangenen Arbeitsschrittes (1971–2000: Median, 2021–2050: 15. und 85. Perzentil) Flächenmittel für die Kreise bestimmt. Hierzu wurden im GIS zonale Statistiken berechnet. Als Analyseauflösung für die zonale Statistik wurde 100 m x 100 m gewählt, um kleine Landkreise und insbesondere kreisfreie Städte besser zu berücksichtigen. Wäre die originale Auflösung von 12,5 km x 12,5 km verwendet worden, hätte für viele kreisfreie Städte kein Flächenmittel berechnet werden können.

Die weitere Verwendung der berechneten Klimaeinflüsse zur Erstellung der Klimawirkungskarten wird in Kapitel 5 ausgeführt.

3.3 Ausgewählte Klimaeinflüsse

Im Folgenden werden wichtige Klimaeinflüsse (vgl. Tab. 3) und deren projizierte Veränderung in der Zukunft vorgestellt, wobei zwischen einem schwachen und einem starken klimatischen Wandel unterschieden wird.

Jahresmitteltemperatur

Die Jahresmitteltemperatur ist der jährliche Durchschnitt der Tagesmitteltemperaturen. Für die Gegenwart zeigt die Jahresmitteltemperatur in Bayern einen Wertebereich zwischen 1,7 und 9,9 °C. Die niedrigsten Werte zeigen sich naturgemäß in den höchsten Lagen Bayerns, den Bayerischen Alpen, und hier besonders in den Allgäuer Alpen, dem Wettersteingebirge und dem Berchtesgadener Land (Abb. 6). Die höchsten Jahresmitteltemperaturen treten dagegen im äußersten Nordwesten des Freistaates auf, am räumlichen Übergang des Spessarts zum Rhein-Main-Gebiet, in den Kreisen Aschaffenburg und Miltenberg. Aber auch andere Kreise im Fränkischen (unter anderem Main-Spessart, Würzburg, Schweinfurt) sowie in Niederbayern (unter anderem Passau, Landshut, Dingolfing-Landau) und im nördlichen Oberbayern (unter anderem Pfaffenhofen a. d. Ilm, Neuburg-Schrobenhausen) sind im Jahresmittel überdurchschnittlich warm.

Zukünftig ist mit einer Erhöhung des Jahresmittels der Lufttemperatur zu rechnen. Diese wird für den schwachen Wandel mit 0,9 bis 1,2 °C projiziert, für den starken Wandel mit 1,8 bis 2,4 °C. Im Szenario „schwacher Wandel“ zeigen weite Teile Bayerns eine Erhöhung der Mitteltemperatur um bis zu 1 °C; der restliche Freistaat weist vor allem in den Alpen und dem Alpenvorland, dem Bayerischen Wald und dem Fichtelgebirge Erhöhungen bis zu 1,2 °C auf. Im Szenario „starker Wandel“ zeigt sich ein ähnliches Bild. Der Großteil Bayerns ist durch eine recht homogene Erwärmung um 1,8 bis 2,0 °C gekennzeichnet. Nur in den Randlagen des Freistaates werden geringere (südliches Unterfranken) oder stärkere Änderungen (Alpen und Alpenvorland, Bayerischer Wald, Fichtelgebirge) projiziert. Die künftige Erhöhung der Jahresmitteltemperatur würde demnach die höheren Lagen Bayerns stärker als die tieferen Lagen des Freistaates betreffen.

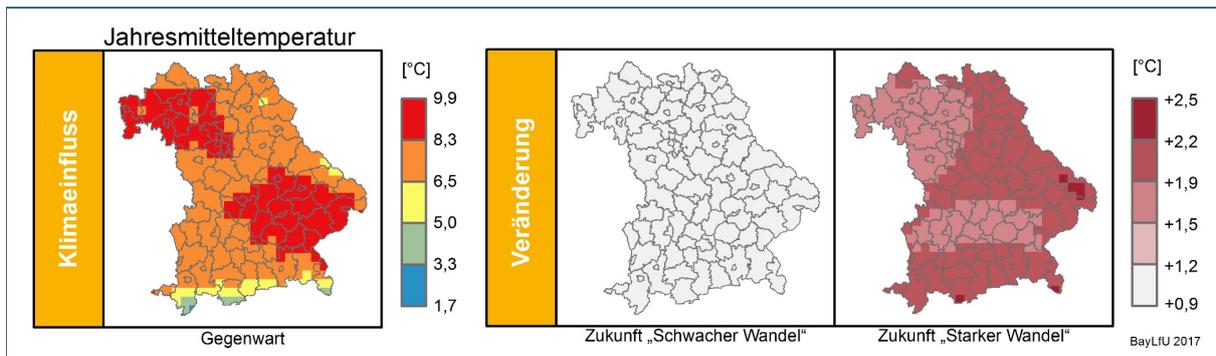


Abb. 6: Klimaeinfluss Jahresmitteltemperatur in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Heiße Tage

Bei einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C spricht man von Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$). Gegenwärtig zeigt sich eine Bandbreite von im Mittel null bis zehn Heißen Tagen in Bayern pro Jahr (Abb. 7). Die Verteilung der Heißen Tage weist naturgemäß Ähnlichkeiten zu der Verteilung der Hotspots der Jahresmitteltemperatur auf. Die höchste Anzahl wird auch hier im äußersten Nordwesten des Freistaates, im Kreis Aschaffenburg, erreicht. Aber auch im mittleren Unterfranken (Kreise Schweinfurt, Würzburg, Kitzingen) zeigt sich eine überdurchschnittliche hohe Anzahl Heißen Tage in der Gegenwart. Gleichzeitig gibt es Gebiete mit weniger als einem Heißen Tag pro Jahr; diese finden sich in den Alpen und dem Alpenvorland sowie dem Bayerischen Wald. Weite Teile Niederbayerns, des nördlichen Oberbayerns und Mittelfrankens weisen zwischen vier und sechs Heiße Tage auf.

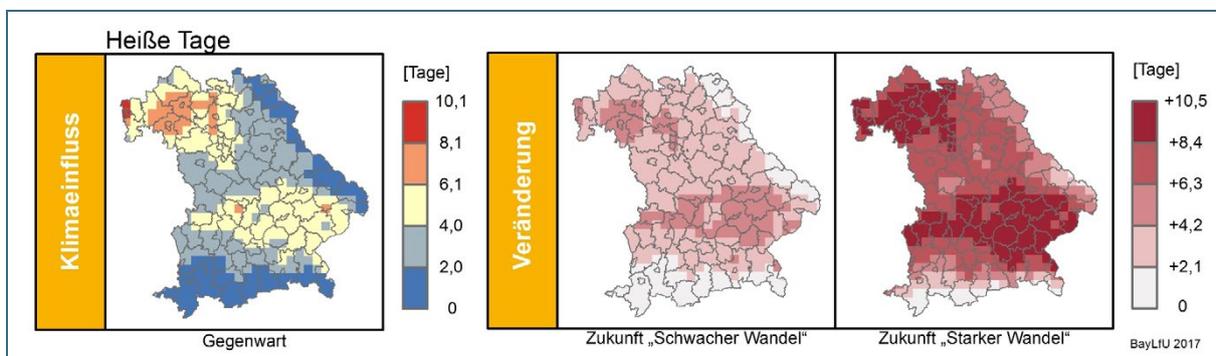


Abb. 7: Klimaeinfluss Heiße Tage in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Künftig wird eine Erhöhung der Anzahl Heißen Tage fast im gesamten Freistaat erwartet. Im Szenario „schwacher Wandel“ liegt die Veränderung zur Gegenwart bei null bis sechs Heißen Tagen je Jahr. Die geringsten Steigerungen werden in Hochgebirgs- und hohen Mittelgebirgslagen (Alpen, Bayerischer Wald) mit weniger als einem zusätzlichen Tag projiziert, die größten Zuwächse in Unterfranken

(Kreise Aschaffenburg, Würzburg, Kitzingen), Niederbayern (Kreise Deggendorf, Dingolfing-Landau) und dem nördlichen Oberbayern (Kreis Neuburg-Schrobenhausen) mit vier bis sechs zusätzlichen heißen Tagen. Für das Szenario „starker Wandel“ zeigt sich das gleiche Veränderungsmuster, mit Zunahmen von unter einem bis über zehn heißen Tagen, jedoch auf einem höheren Niveau. Die Gebiete geringster Zunahme finden sich auch hier in den Alpen und dem Bayerischen Wald (größer eins bis drei Tage). Dagegen werden die größten Anstiege mit acht bis über zehn heißen Tagen sowohl in den unterfränkischen Kreisen (unter anderem Aschaffenburg, Schweinfurt, Würzburg) als auch in einem breiten Band von Niederbayern (unter anderem Deggendorf, Landshut) über Oberbayern (unter anderem Altötting, Mühldorf a. Inn) bis nach Schwaben hinein (unter anderem Günzburg, Dillingen a. d. Donau) erwartet.

Tropennächte

In sogenannten Tropennächten sinkt das Temperaturminimum nicht bis auf 20 °C ab ($T_{\min} > 20\text{ °C}$). In Bayern ist die gegenwärtige mittlere Auftrittshäufigkeit von Tropennächten mit einer Anzahl von bis zu 0,2 pro Jahr sehr gering (Abb. 8).

Für die Zukunft werden Steigerungen in der Auftrittshäufigkeit der Tropennächte projiziert. Bei einem schwachen Wandel werden bereits Steigerungen von 0,3 bis 0,6 Tropennächten je Jahr erwartet. Bei einem starken Wandel wird eine deutliche Zunahme der Tropennächte für ganz Bayern projiziert. Vor allem in Unter-, Mittel- und Teilen Oberfrankens zeigen sich Zunahmen von ein bis zwei Tropennächten je Jahr. Ein Großteil der Flächen von Schwaben, Ober- und Niederbayern sowie der Oberpfalz zeigen eine Steigerung bis zu einer Tropennacht je Jahr. In den Mittel- und Hochgebirgen (unter anderem Böhmer, Bayerischer und Franken-Wald, Alpen) ist die Zunahme auch bei einem starken Wandel am geringsten.

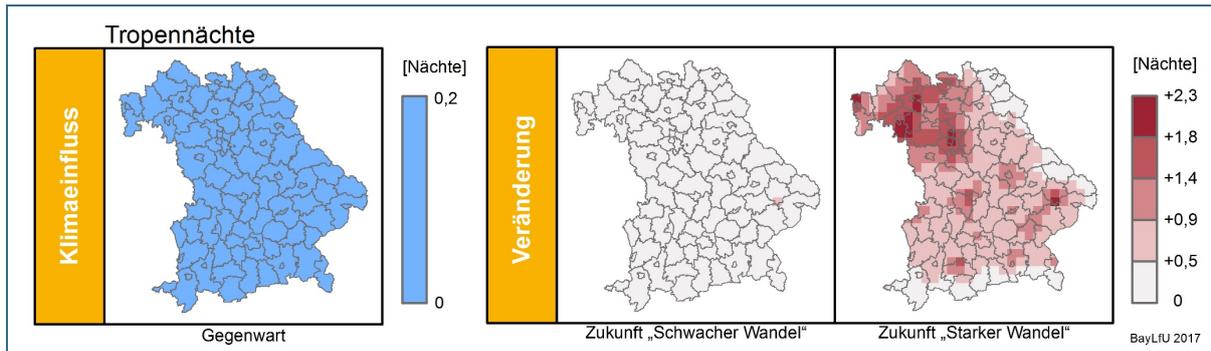


Abb. 8: Klimaeinfluss Tropennächte in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Wechselfrosttage ($\pm 3\text{ °C}$)

Wechselfrosttage sind für die Landwirtschaft relevant, wenn in den Monaten Februar bis April ein Frost- Tauwechsel mit einem täglichen Temperaturminimum unter -3 °C und Temperaturmaximum über 3 °C eintreten ($T_{\min} < -3\text{ °C}$ und $T_{\max} > 3\text{ °C}$). In der Gegenwart treten Wechselfrosttage mit $\pm 3\text{ °C}$ in ganz Bayern auf (Abb. 9), wobei die Werte im Mittel von drei bis 31 Tage pro Jahr reichen. Die meisten Wechselfrosttage treten in den Alpen und deren näherem Vorland auf (unter anderem Kreise Oberallgäu, Garmisch-Patenkirchen, Berchtesgadener Land). Hier finden sich sieben bis 31 Wechselfrosttage pro Jahr. Währenddessen werden im restlichen Freistaat jährlich nur drei bis sieben Wechselfrosttage beobachtet.

Künftig wird es aufgrund der zunehmenden Erwärmung eine Abnahme der Wechselfrosttage in ganz Bayern erwartet. Im Szenario „schwacher Wandel“ reicht das Veränderungssignal von null bis zu einer Abnahme von mehr als vier Wechselfrosttagen. Die stärksten Veränderungen, mit Abnahmen von

zwei und mehr Wechselfrosttagen, sind im Bereich der Alpen zu erwarten (unter anderem Kreise Berchtesgadener Land, Miesbach, Bad Tölz-Wolfratshausen). Für das Szenario „starker Wandel“ sind Abnahmen der Aufttrittshäufigkeit von zwei bis zehn Wechselfrosttagen projiziert. Für den Großteil Bayerns zeigen sich Abnahmen von zwei bis vier Wechselfrosttagen, während in den Alpen und deren Vorland stärkere Rückgänge zwischen vier und zehn Tagen möglich sind (Abb. 9).

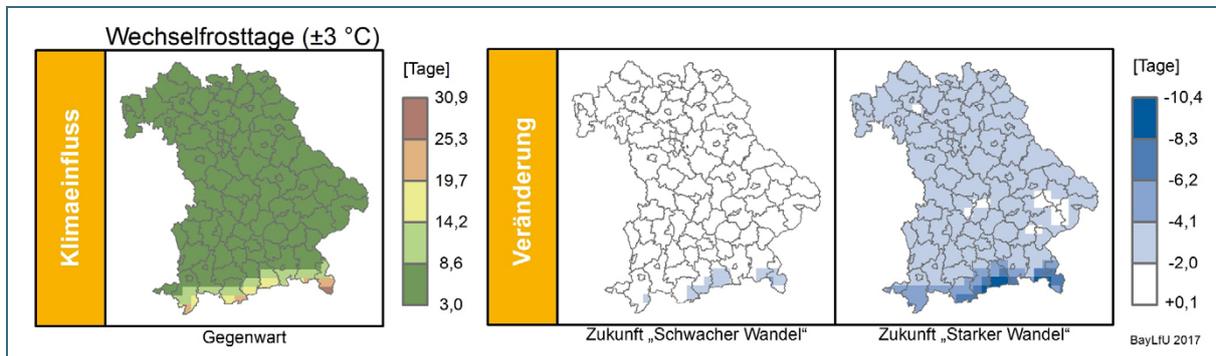


Abb. 9: Klimaeinfluss Wechselfrosttage (± 3 °C) in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Tag des Vegetationsbeginns

Der Kalendertag im Frühjahr, der als erster von sechs Tagen in Folge eine Mitteltemperatur von mindestens 5 °C erreicht ($T_{\text{mean}} \geq 5$ °C), wird als Vegetationsbeginn bezeichnet. Für die Gegenwart ist der Tag des Vegetationsbeginns im Mittel etwa zwischen Ende Februar (53. Tag) und Mitte Mai (138. Tag) zu beobachten (Abb. 10). Hierbei ist der früheste Vegetationsbeginn im Nordwesten Bayerns, im westlichen Unterfranken (Kreise Aschaffenburg, Miltenberg) zu verorten, welcher allgemein zu den wärmsten Gebieten des Freistaates zählt. Aber auch größere Gebiete Mittelfrankens (unter anderem Kreise Erlangen, Fürth) und Niederbayerns (unter anderem Kreise Passau, Straubing) zeigen mit Mitte März einen frühen Vegetationsbeginn. Der späteste Vegetationsbeginn tritt dagegen in den höheren, kühleren Lagen, vor allem in den Alpen (unter anderem Kreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen), auf.

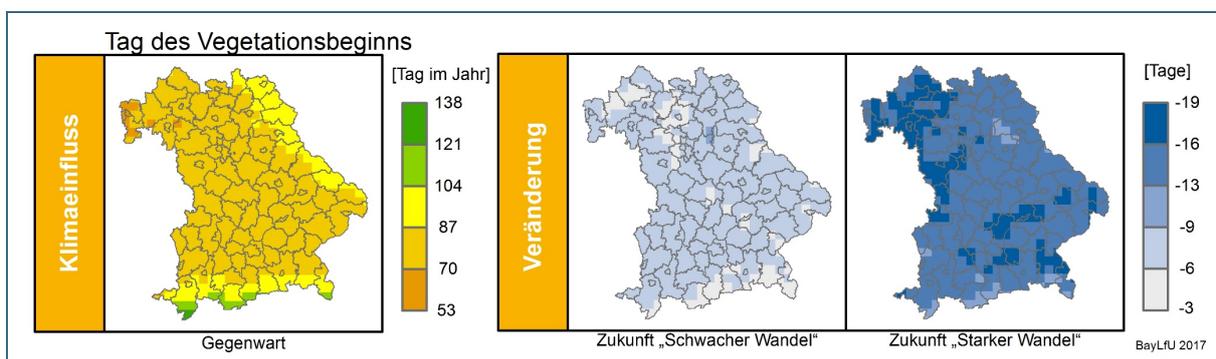


Abb. 10: Klimaeinfluss Tag des Vegetationsbeginns in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Im Zuge der projizierten Erwärmung wird es in ganz Bayern zu einem früheren Vegetationsbeginn kommen. Im Szenario „schwacher Wandel“ zeigt sich ein heterogenes Bild der Veränderung des Vegetationsbeginns, der etwa zwischen drei und neun Tagen früher projiziert wird. Die geringste zeitliche Verschiebung mit etwa drei bis fünf Tagen werden für die Alpen erwartet (unter anderem Allgäuer und Chiemgauer Alpen, Karwendelgebirge), aber auch in fränkischen Höhenzügen wie dem Spessart, dem Steigerwald und den Hassbergen. Demgegenüber fängt die Vegetationszeit im Grenzgebiet zwischen Ober-, Mittelfranken und Oberpfalz (unter anderem Kreise Bayreuth, Amberg-Sulzbach, Nürn-

berger Land, Neumarkt in der Oberpfalz) sowie um München herum rund acht bis neun Tagen früher an. Im Szenario „starker Wandel“ beginnt Vegetationszeit neun bis 19 Tagen früher. Die stärkste Verschiebung mit 17 bis 19 Tagen früher wird in Unterfranken (unter anderem Kreise Würzburg, Schweinfurt), aber auch in Teilen Mittelfrankens (unter anderem Kreis Ansbach), erwartet. Die geringsten Verschiebungen des Vegetationsbeginns mit minus neun bis zwölf Tagen sind in den Alpen (Allgäuer und Chiemgauer Alpen, Karwendelgebirge) und in der Oberpfalz (Kreise Neustadt an der Waldnaab, Amberg-Weizsach) zu erwarten.

Starkregentage

Starkregene**reignisse** zeichnen sich durch hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit (DWD-Definition Starkregen: $>25 \text{ mm h}^{-1}$) und auf begrenztem Raum aus. In dieser Studie wurden Starkregentage als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 mm definiert ($RR > 25 \text{ mm}$). Der Grund dafür ist, dass die Projektionsdaten für den Niederschlag nur tagesbezogen vorliegen. Die gegenwärtige mittlere jährliche Auftretshäufigkeit von Tagen mit Starkregen liegt in Bayern zwischen einem und 24 Tagen (Abb. 11). Große Teile Bayerns weisen nur Werte zwischen einem und sechs Starkregentagen pro Jahr auf, wobei die geringsten Auftretshäufigkeiten mit unter zwei Starkregentagen pro Jahr in Unterfranken (unter anderem Kreise Würzburg, Schweinfurt, Hassberge) sowie im Grenzgebiet zwischen Ober-, Niederbayern und Oberpfalz (unter anderem Kreise Regensburg, Kelheim, Eichstätt) zu finden sind. Dagegen tritt in den Alpen und deren Vorland eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Starkregentagen von zehn und mehr auf (unter anderem Kreise Oberallgäu, Bad Tölz-Wolfratshausen, Berchtesgadener Land).

Künftig wird überwiegend ein Anstieg an jährlichen Starkregentagen erwartet. Im Szenario „schwacher Wandel“ zeigt sich in größeren Teilen Bayerns noch keine Veränderung der Starkregentage im Vergleich zur Gegenwart. Überdurchschnittliche Zunahmen von bis zu einem Tag pro Jahr sind für Mittel- und Hochgebirgslagen in Ober- und Niederbayern (unter anderem Wettersteingebirge, Berchtesgadener Alpen, Bayerischer Wald) projiziert. Für das Szenario „starker Wandel“ sind hingegen in ganz Bayern Zunahmen für die Starkregentage zu erwarten, die von einem halben bis rund fünf Tage reichen. Die höchsten Werte mit Zunahmen von drei bis fünf Starkregentagen werden für das südliche Schwaben projiziert (Kreise Oberallgäu, Lindau/Bodensee). Auch die restlichen Alpen zeigen überdurchschnittlich hohe Zunahmen. Die geringsten Zuwächse finden sich mit bis zu einem Starkregentag in weiten Teilen Unter- und Mittelfrankens (unter anderem Kreise Schweinfurt, Neustadt a. d. Aisch-Bad Windsheim) sowie in der Oberpfalz (Tirschenreuth, Neustadt a. d. Waldnaab).

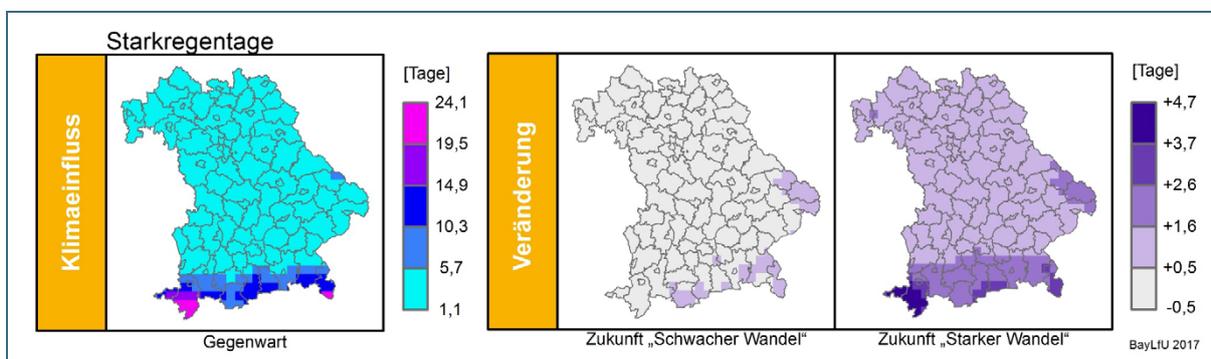


Abb. 11: Klimaeinfluss Starkregentage in der Gegenwart und projizierte künftige Veränderungen

Flusshochwasser (HQ₁₀₀)

Betrachtet wird einhundertjährliches Hochwasser (HQ₁₀₀), das im statistischen Mittel einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird. In Bayern waren zum Zeitpunkt der Datenbeschaffung auf bis zu 132 km² pro Kreis Überschwemmungsgebiete auf Grundlage der Hochwassergefahrenflächen eines (HQ₁₀₀) ermittelt (Abb. 12). Die größten Überschwemmungsbereiche finden sich in Kreisen entlang bedeutender Fließgewässer wie Donau (unter anderem Deggendorf, Straubing-Bogen, Dillingen a. d. Donau), Main (unter anderem Bamberg, Haßberge) oder Naab (Schwandorf).

Aufgrund noch fehlender Abflussprojektionen können im Projekt keine Aussagen über die Veränderung von Flusshochwassern und deren Überschwemmungsflächen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen beziehungsweise zukünftigen Anpassungsmaßnahmen getroffen werden.

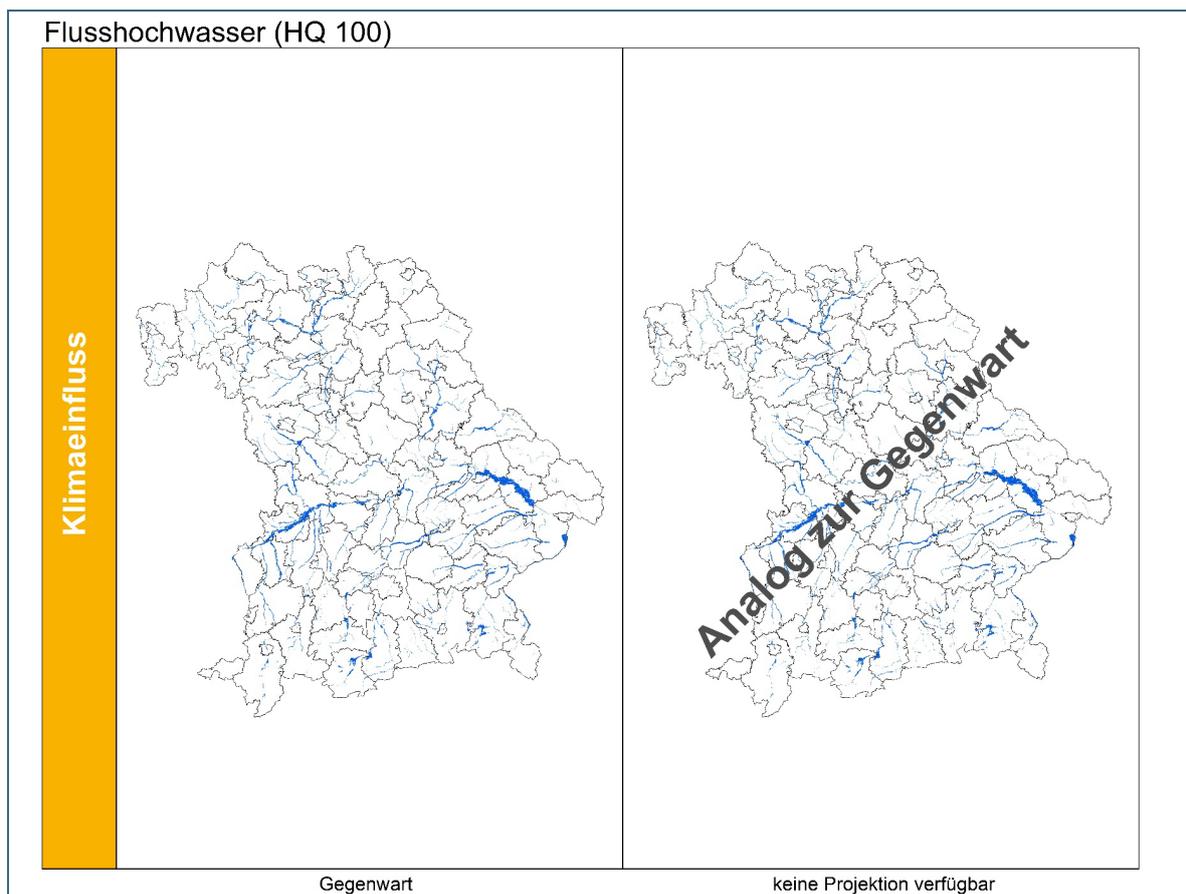


Abb. 12: Klimaeinfluss Flusshochwasser (HQ₁₀₀) in der Gegenwart, keine Projektion verfügbar

4 Ausgewählte Faktoren der Klimasensitivität in Bayern

4.1 Datengrundlagen

Als Datengrundlage für die Berechnung der Sensitivitäten wurden Daten verschiedener Quellen herangezogen. Tab. 4 gibt einen Überblick über die verwendeten Datensätze, Quellen und die Klimawirkungen, in die sie eingeflossen sind.

Im Rahmen der hier gewählten Methode war es der Anspruch, Klimawirkungen, die die Gegenwart abbilden, auch aus Sensitivitäts- und Klimaeinflussdaten der Gegenwart abzubilden, beziehungsweise Klimawirkungen, die die Zukunft abbilden, auch aus Sensitivitäts- und Klimaeinflussdaten für die Zukunft abzubilden. Es war stets das Ziel, möglichst zwei verschiedene Sensitivitätsdatensätze für die Zukunft zu erhalten, die dann für die Bildung der beiden Zukunftsszenarios verwendet werden. Ein grundlegendes Problem war die Datenbeschaffung zur Abbildung der Zukunft. Hier lag für den Großteil der Sensitivitätsdaten keine Datengrundlage für die Zukunft vor, sodass in diesen Fällen die Daten der Gegenwart auch für die Zukunft übernommen wurden. Dies hatte zur Folge, dass die Klimawirkung allein durch die Änderung des klimatischen Einflusses bestimmt wurde und sich die kartografischen Abbildungen von Gegenwart und Zukunft bei einer Vielzahl der Klimawirkungen kaum unterscheiden. Ebenso war teilweise die Verwendung nur eines (plausiblen) Zukunftsszenarios möglich.

Neben den in Tab. 4 aufgelisteten Datensätzen waren ursprünglich weitere Daten für die Berechnung anderer Klimawirkungen vorgesehen. Diese Klimawirkungen konnten jedoch aus unterschiedlichen Gründen nicht weiter vertieft werden. Zu nennen sind hier die Ausbreitung invasiver Arten, Georisiken, der Waldbestand beziehungsweise Waldfläche und der Bodenwassergehalt (Kap. 5.1, 5.2 und 5.3).

Tab. 4: Übersicht der verwendeten Datensätze zur Berechnung der Sensitivität. Für nähere Erläuterungen zu bestimmten Datensätzen und zur Datenprozessierung siehe Kap. 4.2. LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt, BBSR: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, LfStat: Bayerisches Landesamt für Statistik, GWS: Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH, LDBV: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, OBB: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, BMVI: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BNetzA: Bundesnetzagentur, StMi: Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr

Indikator	Datensatz und Stand bzw. Bezugsjahr (Projektionen)	Quelle	Klimawirkung
Flächen wasserabhängiger Biotope	2017; Flächen wasserabhängiger Biotope	LfU	NA-1-2017
	Keine Daten für die Zukunft		
Siedlungsfläche	2009; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'.	BBSR	BA-1-2017
	2030; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'; PANTA-RHEI-REGIO-Modell; nur Zukunftsszenario „Wachstum“		BA-2-2017 EW-1-2017
Bevölkerungsdichte	2009; Bevölkerungszahlen; (Einwohner pro km ²)	LfStat	BA-2-2017
	2030; Bevölkerungszahlen; (Einwohner pro km ²), nur ein Zukunftsszenario	GWS	EW-1-2017

Indikator	Datensatz und Stand bzw. Bezugsjahr (Projektionen)	Quelle	Klimawirkung
Versiegelte Fläche	2009; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen', 'Brachen'	BBSR	BA-3-2017
	2030; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen', 'Brachen'; PANTA-RHEI-REGIO-Modell; nur Zukunftsszenario „Wachstum“		BA-4-2017 GE-1-2017
Industrie und Gewerbeflächen	2009; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'	BBSR	IG-2-2017
	2030; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'; PANTA-RHEI-REGIO-Modell; nur Zukunftsszenario „Wachstum“		IG-3-2017
(Land-)verkehrsinfrastrukturflächen	2016; Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen	LDBV	IG-4-2017 IG-5-2017
	2020/2025; Staatsstraßenausbau (7. Ausbauplan)	OBB BMVI	VE-1-2017 VE-2-2017 VE-3-2017 VE-4-2017
	2030; Ausbauvorhaben der Bundesstraßen, Autobahnen und Schienenwege		
Kraftwerke	2016; Biomasse- und Windenergieanlagen sowie fossile Kraftwerke mit einer Netto-Nennleistung > 2 Megawatt	Energie-Atlas Bayern, BNetzA	EW-3-2017
	2019; Geplanter Zu- und Rückbau fossiler Kraftwerke, nur ein Zukunftsszenario	BNetzA	
Anteil der Bevölkerung > 60 Jahre	2009; Bevölkerungszahlen	LfStat	GE-1-2017
	2030; Raumordnungsprognose 2030, nur ein Zukunftsszenario	BBSR	
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	2009; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Ackerland'; 'Grünland'	BBSR	LW-1-2017 LW-2-2017
	2030; CC-LandStraD-Projekt; Layer 'Ackerland'; 'Grünland'; PANTA-RHEI-REGIO-Modell; nur Zukunftsszenario „Wachstum“		LW-3-2017

Indikator	Datensatz und Stand bzw. Bezugsjahr (Projektionen)	Quelle	Klimawirkung
Bevölkerungszahl	2009; Bevölkerungszahlen	LfStat	BA-2-2017
	2030; Bevölkerungszahlen, nur ein Zukunftsszenario	GWS	BA-3-2017 BA-4-2017 EW-1-2017 GE-1-2017
Hitzeempfindliche Einrichtungen	2014; 2015; 2016: betreute Kinder in Tageseinrichtungen (unter 3 Jahre und 3 bis unter 6 Jahre (2016); Schüler in allgemeinbildenden Schulen (2015/16); aufgestellte Betten in Krankenhäusern; aufgestellte Betten in Vorsorge- und Reha-Einrichtungen (2015); Plätze in Pflegeheime (2015); Plätze in Einrichtungen für ältere Menschen (2014)	LfStat	BA-4-2017
	Keine Daten für die Zukunft		
Kläranlagen	2016; Anzahl Kläranlagen	LDBV	IG-1-2017
	Keine Daten für die Zukunft		
Gästeübernachtungen	2016; Anzahl Gästeübernachtungen	LfStat	TO-1-2017
	Keine Daten für die Zukunft		TO-2-2017
Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte	Anzahl Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte	StMI	TO-3-2017
	Keine Daten für die Zukunft		

4.2 Datenprozessierung

Die in Tab. 4 aufgelisteten Daten mussten entsprechend aufbereitet werden, damit sie in die Berechnung der Klimawirkungen (Kap. 5) einfließen konnten. Sowohl zur Bearbeitung als auch zur Darstellung wurde das Programm ESRI ArcGIS 10 verwendet, wobei grundsätzlich auch eine andere Software mit vergleichbaren Funktionen für die Berechnung und Darstellung der Klimawirkungen geeignet wäre.

Die Eingangsdaten wurden in verschiedenen Formaten und auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen geliefert. Zum einen lagen standortgenaue Vektordaten, wie beispielsweise Shapefiles zu den Kraftwerken vor. Daten zu hitzeempfindlichen Einrichtungen oder Gästeübernachtungen waren hingegen als Werte in Tabellen im MS-Excel-Format vorhanden. Datensätze, die nicht auf Landkreisebene vorlagen, mussten auf diese Ebene aggregiert werden. Zudem wurden zum Beispiel die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben der Verkehrsinfrastruktur manuell georeferenziert und vektorisiert.

Aus Tab. 4 wird deutlich, dass einige Indikatoren (und somit die entsprechenden Datengrundlagen) deutlich häufiger in die Berechnung von Klimawirkungen eingeflossen sind, als andere. Da die Sensitivität bei mehreren Klimawirkungen direkt und indirekt von der Landnutzung (Art und Maß) und ihrer Verteilung abhängt, wurden vergleichsweise häufig Datensätze verwendet, die sich auf den gegenwärtigen Stand sowie die zukünftige Entwicklung der Landnutzung beziehen. Neben den Sensitivitätsdaten zur Siedlungsfläche gehen auch die in diesem Kapitel vorgestellten Daten zur versiegelten Fläche, zur landwirtschaftlichen Fläche sowie zur Industrie- und Gewerbefläche auf die Bestimmung der gegenwärtigen und zukünftigen Landnutzung zurück. Diese werden im Folgenden näher erläutert. Eine genauere Beschreibung des methodischen Vorgehens findet sich darüber hinaus bei Hoymann & Goetzke (2014) sowie Buth et al. (2015).

Bestimmung der gegenwärtigen Landnutzung

Die gegenwärtige Landnutzung wurde in insgesamt 13 Landnutzungskategorien dargestellt, die aus dem Teilprojekt „Landnutzungsszenarien“ des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Climate Change – Land Use Strategies (Strategien für eine nachhaltige Landnutzung im Zeichen des Klimawandels)“ (CC-LandStraD) (BBSR 2012) entnommen wurden. Für die Gegenwart bilden sie die Landnutzung im Jahr 2009 ab.

Zur Herleitung der aktuellen Landnutzung wurde im CC-LandStraD-Projekt eine Kombination aus zwei Datensätzen verwendet. Zum einen wurden Landnutzungsdaten aus dem Digitalen Landbedeckungsmodell für Deutschland (DLM-DE) verwendet, zum anderen wurde für große Stadtregionen der Urban Atlas verwendet, mit dem innerstädtische Nutzungsarten besser voneinander unterschieden werden können. Beide Datensätze wurden in einem Raster zusammengeführt, bei dem jede Rasterzelle genau eine Landnutzungs-kategorie repräsentiert (Zellengröße 1 ha), und das als Grundlage/Ausgangssituation für das Landnutzungsmodell dient (Buth et al. 2015).

Bestimmung zukünftiger Landnutzung

Für die Bestimmung der zukünftigen Landnutzung wurde ebenso auf die Landnutzungsmodellierung aus dem Teilprojekt „Landnutzungsszenarien“ im Rahmen von CC-LandStraD zurückgegriffen. Trotz der nicht mehr aktuellen Daten wurde entschieden, die Ergebnisse aus dem CC-LandStraD-Projekt für landnutzungsbezogene Sensitivitäten im Rahmen der Pilotstudie zu verwenden. Der Grund hierfür war, dass zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Pilotstudie diese Modellierungsdaten die einzige verfügbare Grundlage waren, die auch das gesamte Bundesland Bayern abdeckte und die zugleich über einen hohen Auflösungsgrad der Landnutzung verfügte.

Das methodische Vorgehen zur Erarbeitung der Landnutzungsszenarien im CC-LandStraD-Projekt umfasste als Basis die gegenwärtige (Stand 2009) Landnutzung. Zur Bestimmung der zukünftigen Landnutzung wurde zunächst die Eignung von Flächen für die zukünftige Landnutzungsart bestimmt. Danach wurden über die Abschätzung der Nachfrage nach den jeweiligen Landnutzungsarten rasterbasierte Karten der zukünftigen Landnutzung erstellt. Dabei wurden Projektionsdaten für Nutzungsarten/-änderungen erstellt, die das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) mit dem Simulationswerkzeug „LAND USE SCANNER“ für einzelne Rasterzellen (Größe 1 ha) berechnet hat. Der LAND USE SCANNER ist ein Simulationsmodell, welches auf einem Geoinformationssystem basiert und die Nachfrage nach Land auf die geeigneten Rasterzellen verteilt (Buth et al. 2015; Hilferink & Rietveld 1999; Koomen et al. 2007). Als Eingangsdaten wurden die regionalen Raumansprüche der Nachfrage nach Land auf Kreisflächenbasis für das Zieljahr 2030 verwendet. Diese wurden mit dem PANTA-RHEI-REGIO-Modell der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor-schung (GWS, Osnabrück) auf Grundlage vergangener demographischer, wirtschaftlicher und siedlungsstruktureller Trends ermittelt (GWS 2013). Die in den Modellverbund eingeflossenen Daten umfassen die aktuelle Landnutzung,

die physischen Gegebenheiten, die planerischen Festlegungen sowie die Infrastrukturausstattung (Buth et al. 2015).

Im Ergebnis entstanden für die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ zwei rasterbasierte Landnutzungskarten für Deutschland (Wachstumsszenario („Referenzszenario“) aus CC-LandStraD und ein neu berechnetes Stagnationsszenario, jeweils für 2030) mit einer Auflösung von einem Hektar. Die beiden verfügbaren Szenarien unterscheiden sich in der wirtschaftlichen und demographischen Entwicklung. Beim Vergleich der beiden Szenarioergebnisse und den dahinterliegenden Daten für die Bevölkerungsentwicklung mit den aktuellen für das Jahr 2016 vorliegenden Bevölkerungszahlen für Bayern zeigte sich, dass insbesondere in den dynamisch wachsenden Kreisen in Bayern die Projektionswerte der Bevölkerungsentwicklung aus dem Stagnationsszenario für das Jahr 2030 schon gegenwärtig erreicht worden sind, das Stagnationsszenario also ein von vornherein unrealistisches Szenario darstellen würde.

Daher wurde die Entscheidung getroffen, für die zukünftige Landnutzung lediglich das Wachstumsszenario („Referenzszenario“) aus CC-LandStraD zu verwenden und diesbezüglich nicht zwischen einem starken und schwachen Wandel zu unterscheiden.

Zur Wahrung der methodischen Konsistenz wurden auch die dem Wachstumsszenario zu Grunde liegenden Bevölkerungsdaten verwendet, sofern diese in die Klimawirkungsanalyse eingegangen sind. Auch hier zeigen sich teilweise erhebliche Abweichungen zur amtlichen bayerischen „Bevölkerungsprognose 2035“. Dennoch bleibt das räumliche Muster der „Gewinner- und Verliererregionen“ in der Regel gleich, mit dem Unterschied, dass nach der aktuellen „Bevölkerungsprognose 2035“ für Bayern (LfStat 2016) „Gewinner-Regionen“ in Zukunft wahrscheinlich deutlicher an Einwohnern gewinnen und „Verlierer-Regionen“ weniger Einwohner verlieren werden als dies in der vorliegenden Studie abgebildet wird. Auch geht das verwendete Szenario „Wachstum“ bei den Bevölkerungszahlen voraussichtlich von einem deutlich stärkeren Wachstum im Münchener Umland „zu Lasten“ der Stadt München aus, als dies in aktuelleren Bevölkerungsprognosen angenommen wird. Bezogen auf die Landnutzungsdaten sind aufgrund des geringer angenommenen Bevölkerungswachstums auch hier in Zukunft Abweichungen zu den verwendeten Landnutzungsprojektionen aus dem Wachstumsszenario zu erwarten. Unklar bleibt, ob dieses höhere Bevölkerungswachstum auch tatsächlich „auf die Fläche“ verteilt wird. Beispielsweise sinkt in München (im Gegensatz zum bundesdeutschen Trend) wieder die Pro-Kopf-Wohnfläche. Der Flächenverbrauch wird aufgrund der hohen Preise trotz starkem Bevölkerungszuwachs nur moderat sein (BBSR 2017).

Für die Abbildung des Anteils der Einwohner über 60 Jahre an der Gesamtbevölkerung wurde zur Konsistenzwahrung auf die Daten der Raumordnungsprognose 2030 zurückgegriffen, die den Bevölkerungsprojektionen des verwendeten Wachstums-Szenarios ähnelt.

4.3 Ausgewählte Sensitivitäten

Im Folgenden werden acht Faktoren der im Rahmen der Studie verwendeten Klimasensitivitäten in Bayern dargestellt, wovon einige auch mehrfach in Klimawirkungen eingegangen und somit von besonderer Bedeutung für die Studie sind.

Flächen wasserabhängiger Biotope

Die Flächen wasserabhängiger Biotope liegen für die Gegenwart vor (Abb. 13) und wurden aus der Biotopkartierung (Auspielung 2017) entnommen, die vom LfU bereitgestellt wurde. Betroffen sind Biotoptypen der Gewässer und Feuchtstandorte des Offenlandes sowie die Biotoptypen Feuchtgebüsche, Ufergehölze naturnaher Fließgewässer, alpine Hochstaudenfluren, Schneebodenvegetation und Gletscher / Firnfeld.

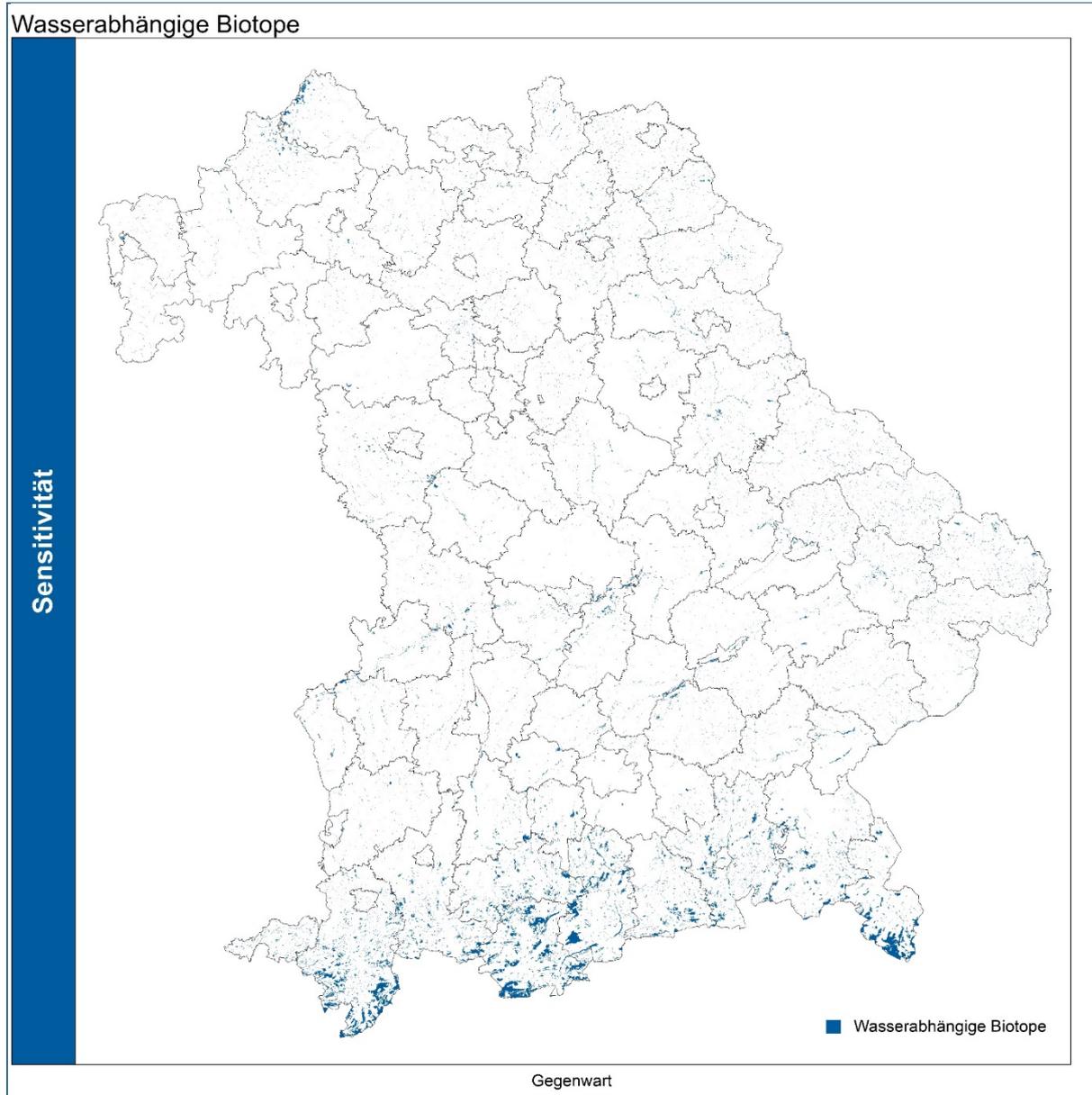


Abb. 13: Flächen wasserabhängiger Biotope (Ausspielung 2017)

Die Sensitivitätsdarstellung auf Basis der LfU-Biotopkartierung zeigt eine starke Konzentration wasserabhängiger Biotope im Süden Bayerns. Eine große Anzahl dieser Biotope findet sich insbesondere in den Landkreisen Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen, Weilheim, Bad Tölz und Berchtesgadener Land. Wasserabhängige Biotope sind darüber hinaus auch für alle anderen Landkreise kartiert worden, eher punktuell in der Landesmitte und in etwas stärkerer Ausprägung für die Landkreise an der nördlichen und östlichen Landesgrenze. Für die Zukunft liegen keine Projektionsdaten vor.

Siedlungsfläche

Die gegenwärtige Siedlungsfläche wurde durch die Kategorien 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' dargestellt, die aus dem Teilprojekt „Landnutzungsszenarien“ des BMBF-Projekts CC-LandStraD entnommen wurden und als Anteil an der Fläche des Landkreises bzw. kreisfreier Städte (im Folgenden als „Kreisfläche“ benannt) dargestellt sind (Abb. 14). Die Daten zur Siedlungsflächennutzung stammen aus dem Jahr 2009. Ebenso wurden die im CC-LandStraD-Projekt

erstellten Ergebnisse zur Siedlungsentwicklung bis 2030 verwendet (lediglich das Szenario „Wachstum“). Auf eine Differenzierung zwischen schwachem und starkem Wandel musste aufgrund nicht belastbarer Datensätze des Szenarios „Stagnation“ (siehe Abschnitt 4.2) verzichtet werden. Es wurden keine aktuellen ATKIS-Daten verwendet, um die Konsistenz zwischen den Daten zur Gegenwart und den Landnutzungsprojektionen bis 2030 zu erhalten.

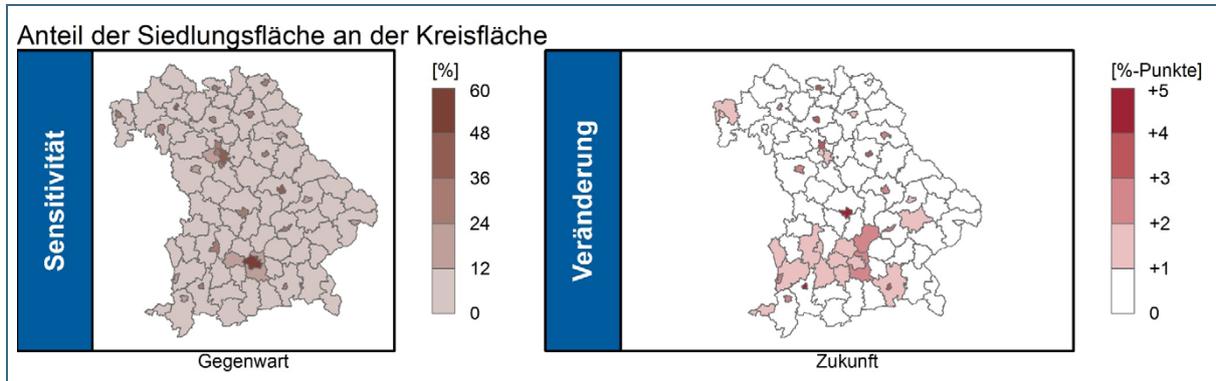


Abb. 14: Anteil der Siedlungsfläche an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)

Der gegenwärtige Anteil der Siedlungsfläche an der Kreisfläche variiert zwischen einer geringen Ausprägung mit einem prozentualen Siedlungsflächenanteil von bis zu 12 % im überwiegenden Teil des Landesgebietes und Spitzenwerten mit mehr als der Hälfte der Fläche (48–60 %) in den kreisfreien Städten München, Nürnberg und Schweinfurt. Ebenfalls hohe Werte mit ca. einem Drittel bis der Hälfte Siedlungsflächenanteil (24–48 %) werden etwa für die kreisfreien Städte Regensburg, Augsburg, Ingolstadt, Bayreuth und Würzburg abgebildet. Die einzigen Kreise mit einem Siedlungsflächenanteil über 12 % der Kreisfläche (12–24 %) sind die Landkreise München, Fürstenfeldbruck und Fürth.

Die Darstellung der projizierten zukünftigen Veränderung des Siedlungsflächenanteils zeigt eine Zunahme sowohl in kreisfreien Städten als auch in Landkreisen insbesondere in Südbayern auf. Die höchste Zunahme von 4 bis 5 %-Punkten zeigt sich in den kreisfreien Städten Ingolstadt und Kaufbeuren, gefolgt von den kreisfreien Städten Erlangen, Bamberg, Coburg, Amberg und Rosenheim mit einer erwarteten Ausweitung des Siedlungsflächenanteils von 3 bis 4 %-Punkten. Neben den von einem erwarteten Siedlungsflächenzuwachs von 2 bis 3 %-Punkten geprägten Landkreisen München und Freising werden auch für die Landkreise Lindau, Unterallgäu, Neu-Ulm, Augsburg, Landsberg am Lech, Fürstenfeldbruck, Dachau, Starnberg, Rosenheim und Dingolfing-Landau Vergrößerungen des Siedlungsflächenanteils (1–2 %-Punkte) abgebildet. Der einzige Kreis in Nordbayern, der ebenfalls zukünftig mit einer Ausweitung seines Siedlungsflächenanteils von mehr als 1 % dargestellt wird, ist der unterfränkische Landkreis Aschaffenburg (1–2 %-Punkte).

Bevölkerungsdichte

Die Bevölkerungsdichte (Einwohner pro km²) wird aus dem Verhältnis der Einwohnerzahlen zur Fläche des Kreises berechnet (Abb. 15). Zur Abbildung der gegenwärtigen Situation wurden die Bevölkerungszahlen aus dem Jahr 2009 vom Bayerischen Landesamt für Statistik (LfStat) bereitgestellt. Zwar hätten auch die Bevölkerungszahlen aus dem Jahr 2016 vorgelegen, jedoch sollten die verwendeten Daten aufgrund der Vergleichbarkeit, aus dem gleichen Jahr wie die Daten zur Landnutzung stammen. Die verwendeten Bevölkerungszahlen aus dem Jahr 2009 entsprachen den Bevölkerungszahlen, die mit dem Basisjahr 2009 in die Modellierung der Landnutzung eingegangen sind. Zur Abbildung der Zukunft wurden die Zahlen der Bevölkerungsprojektion bis 2030 der GWS verwendet (Distelkamp et al. 2009). Auf eine Differenzierung zwischen schwachem und starkem Wandel musste aufgrund fehlender belastbarer Datensätze verzichtet werden. Zwar hätten auch Daten aus dem Szenario

„Stagnation“ verwendet werden können, dieses Szenario ist von Realität aber bereits „überholt“ worden.

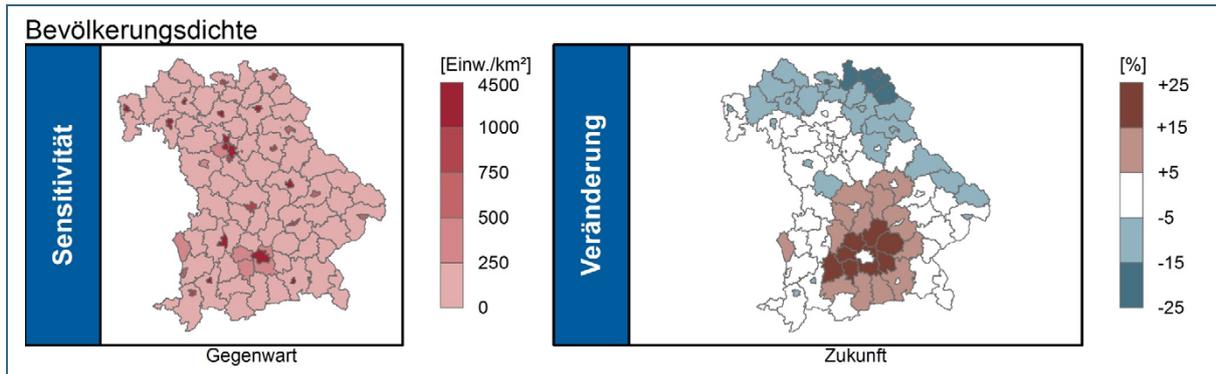


Abb. 15: Bevölkerungsdichte in den Landkreisen und kreisfreien Städten (2009 und Veränderung bis 2030)

Die gegenwärtige Bevölkerungsdichte (Bezugsjahr 2009) ist in den kreisfreien Städten Augsburg, Bamberg, Erlangen, Fürth, Kaufbeuren, München, Nürnberg, Regensburg, Rosenheim, Bayreuth und Schweinfurt am höchsten. Sie erreicht dort jeweils mehr als 1.000 Einwohner pro km². Die weiteren kreisfreien Städte Bayerns weisen eine Bevölkerungsdichte zwischen 500 und 1.000 Einwohnern pro km² auf. Im Großteil der bayerischen Landkreise beträgt die Bevölkerungsdichte bis zu 250 Einwohner pro km². Ausnahmen bilden die an die Landeshauptstadt München angrenzenden Landkreise Fürstentumbruck, Starnberg sowie München, der Landkreis Fürth sowie der Landkreis Neu-Ulm, die über eine Bevölkerungsdichte zwischen 250 und 500 Einwohnern pro km² verfügen.

Die projizierte Veränderung der Bevölkerungsdichte bis zum Jahr 2030 zeigt in allen Landkreisen des Münchner Umlands Zunahmen der Bevölkerungsdichte zwischen 15 und 25 %. Auch für die übrigen Landkreise Oberbayerns – mit Ausnahme der Landkreise Altötting, Traunstein und Berchtesgadener Land – wird eine Zunahme der Bevölkerungsdichte zwischen 5 und 15 % erwartet. Diese Veränderungen werden auch von den Landkreisen Neu-Ulm (Schwaben), Regensburg (Oberpfalz) sowie Kelheim und Landshut (Niederbayern) erreicht. Demgegenüber weisen die in diesen sich dynamisch entwickelnden Landkreisen liegenden kreisfreien Städte Augsburg, Ingolstadt, Landshut, München, Regensburg sowie Rosenheim keine wesentliche Veränderung auf, das heißt die Veränderungen liegen zwischen 5 % Zunahme und 5 % Abnahme. Das Gleiche gilt für Teile Niederbayerns, Schwabens und die drei Regierungsbezirke Frankens. Bei der Veränderung der Bevölkerungsdichte, die ja letztlich ein Abbild der Bevölkerungsentwicklung ist, zeigt sich ein deutliches Süd-Nord- beziehungsweise Zentrum-Peripherie-Gefälle. So weisen die Landkreise in den peripheren Lagen Unter- und Oberfrankens sowie der Oberpfalz und Niederbayerns fast durchweg eine projizierte Abnahme der Bevölkerungsdichte von 5 bis 25 % auf. In Mittelfranken gilt das für den Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen. Der stärkste Rückgang der Bevölkerungsdichte wird in Oberfranken für die beiden kreisfreien Städte Coburg und Hof sowie die Landkreise Kronach, Hof und Wunsiedel im Fichtelgebirge erwartet, wo eine Abnahme zwischen 15 und 25 % projiziert wird. Den verwendeten Projektionen zufolge werden zudem Rückgänge in der Bevölkerungsdichte zwischen 5 und 15 % für einzelne kreisfreie Städte erwartet, die außerhalb der peripheren Regionen liegen (Ansbach, Aschaffenburg, Kaufbeuren, Kempten, Passau und Würzburg).

Versiegelte Fläche

Zur Abbildung der versiegelten Fläche wurde auf die Daten des BMBF-Projekts CC-LandStraD zurückgegriffen. Es wurden keine aktuellen ATKIS-Daten verwendet, um die Konsistenz zwischen den Daten zur Gegenwart und den Landnutzungsprojektionen bis 2030 zu erhalten. Als „versiegelte Flä-

che“ wurden die Kategorien 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen' angenommen. Da im CC-LandStraD-Projekt auch Aussagen über die Landnutzungsentwicklung bis 2030 getroffen wurden, konnte auch die auf Grundlage des Wachstumsszenarios künftig versiegelte Fläche für Bayern zurückgegriffen werden. Auf eine Differenzierung zwischen schwachem und starkem Wandel musste auch hier aufgrund nicht belastbarer Datensätze (siehe Abschnitt 4.2) beziehungsweise fehlender Alternativen verzichtet werden (Abb. 16).

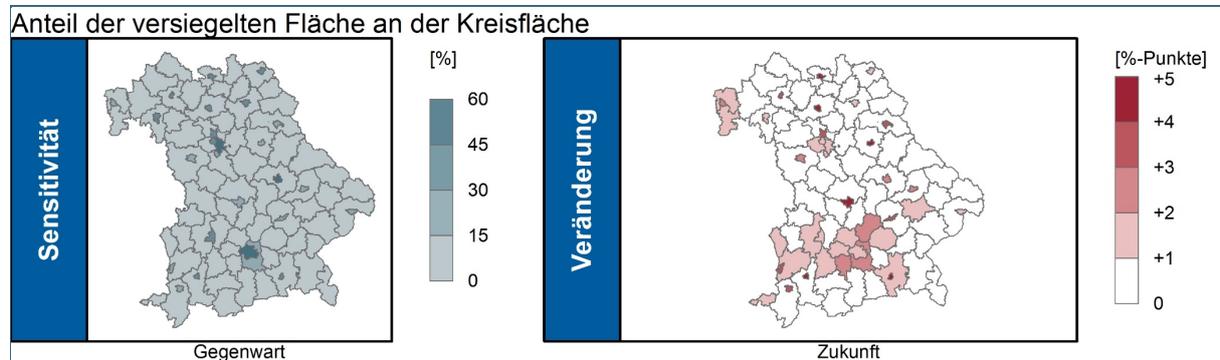


Abb. 16: Anteil der versiegelten Fläche an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)

Der gegenwärtige Anteil der versiegelten Fläche an der Kreisfläche Bayerns variiert zwischen einer relativ geringen Ausprägung (bis 15 %) im überwiegenden Teil des Landesgebietes und Spitzenwerten, die mehr als die Hälfte der Fläche (45–60 %) der kreisfreien Städte München, Nürnberg und Regensburg betreffen. Ebenfalls hohe Anteile versiegelter Fläche (30–45 %) weisen die kreisfreien Städte Augsburg, Kaufbeuren, Rosenheim, Erlangen, Fürth, Bayreuth, Hof, Bamberg, Coburg, Schweinfurt und Würzburg auf. Mittlere prozentuale Anteile der versiegelten Fläche an der Kreisfläche (15–30 %) zeigen sich gegenwärtig beispielsweise in den kreisfreien Städten Memmingen, Ingolstadt, Ansbach und Weiden in der Oberpfalz sowie unter den Landkreisen einzig im Landkreis München.

Für die Zukunft wird für alle kreisfreien Städte eine Zunahme des versiegelten Flächenanteils um bis zu maximal 5 %-Punkte projiziert, ebenso in zahlreichen Landkreisen Schwabens und Oberbayerns. Die maximalen Zuwächse (4–5 %-Punkte) werden dabei in den kreisfreien Städten Coburg, Bamberg, Amberg, Ingolstadt, Kaufbeuren und Rosenheim erwartet, gefolgt von Zuwächsen zwischen 3 und 4 %-Punkten in den kreisfreien Städten Kempten (Allgäu), Memmingen, Landshut, Erlangen, Schweinfurt und Weiden in der Oberpfalz. In Oberbayern und Schwaben wird ein zukünftiger Zuwachs des Anteils versiegelter Fläche an der Kreisfläche um 2 bis 3 %-Punkten in den Kreisen Freising, München und Straubing erwartet. Für die Landkreise Rosenheim, Erding, Dachau, Fürstenfeldbruck, Landsberg am Lech, Augsburg, Unterallgäu und Neu-Ulm wird eine erwartete Zunahme von 1 bis 2 %-Punkten projiziert. Ebenfalls Zuwächse zwischen 1 und 2 %-Punkten werden für Deggendorf und Fürth sowie auch für die unterfränkischen Landkreise Aschaffenburg und Miltenberg projiziert.

Industrie- und Gewerbeflächen

Im Rahmen des CC-LandStraD-Projekts wurden auch Ergebnisse zu den gegenwärtigen und künftigen Industrie- und Gewerbeflächen erarbeitet. Wie bei den anderen Landnutzungsinformationen, wurden auch hier keine aktuellen ATKIS-Daten verwendet, um die Konsistenz zwischen den Daten zur Gegenwart und den Landnutzungsprojektionen bis 2030 zu erhalten. Die bayerischen Industrie- und Gewerbeflächen für die Gegenwart (Stand 2009) und für die Zukunft (2030) konnten über die dort bereitgestellten GIS-Layer 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' dargestellt werden. Auch hier wurde für die Studie auf die Ergebnisse aus dem Wachstumsszenario zurückgegriffen. Auf eine Diffe-

renzierung zwischen schwachem und starkem Wandel musste wiederum aufgrund nicht belastbarer beziehungsweise fehlender Datensätze verzichtet werden (siehe Abschnitt 4.2) (Abb. 17).

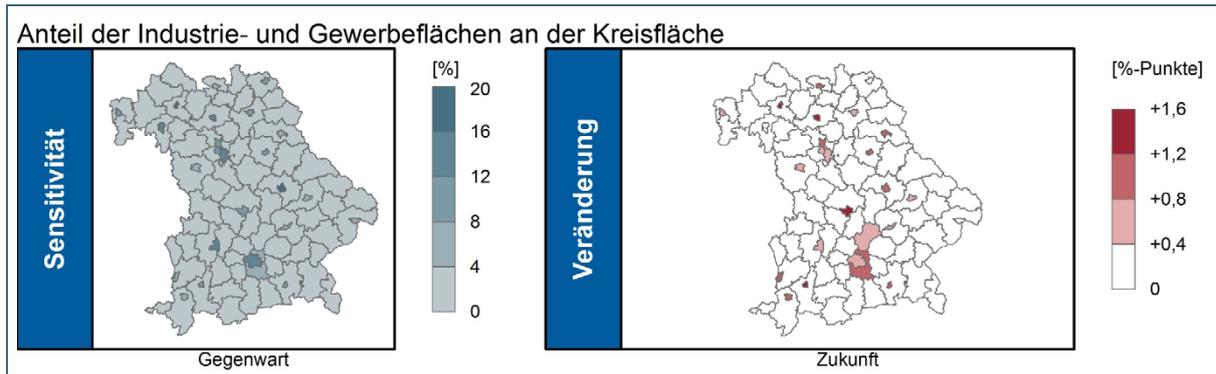


Abb. 17: Anteil der Industrie- und Gewerbeflächen an der Kreisfläche (2009 und Veränderung bis 2030)

Der gegenwärtige Anteil der Industrie- und Gewerbeflächen an der Kreisfläche Bayerns weist eine Bandbreite von 0 bis 20 % auf. Die höchsten Anteile mit bis zu 20 % finden sich in den kreisfreien Städten Schweinfurt und Regensburg, gefolgt von Anteilen zwischen 12 und 16 % in München, Augsburg, Nürnberg, Würzburg und Bamberg sowie Anteilen zwischen 8 und 12 % in Ingolstadt, Bayreuth und Hof. Der ländlich geprägte überwiegende Teil der Kreise Bayerns weist allerdings einen Anteil von lediglich 4 % Industrie- und Gewerbeflächen im Maximum auf.

Ein Wachstum des Anteils der Industrie- und Gewerbeflächen an den Gesamtflächen der Kreise Bayerns sind zukünftig überwiegend wieder in den kreisfreien Städten zu erwarten. Die größten projizierten Zuwächse zwischen 0,8 und 1,6 %-Punkten werden in Ingolstadt, Bamberg, Coburg und Schweinfurt sowie in Kempten, Kaufbeuren und Memmingen sowie in den schwäbischen Landkreisen Oberallgäu, Ostallgäu und Unterallgäu angezeigt. Daneben werden ebenso für den Landkreis München Zuwächse zwischen 0,8 und 1,2 %-Punkten und für den Landkreis Freising Zuwächse zwischen 0,4 und 0,8 %-Punkten erwartet. Die übrigen Landkreise weisen ein projiziertes zukünftiges Wachstum im untersten Segment von bis zu 0,4 %-Punkten auf.

Landverkehrsinfrastrukturflächen

Die Landverkehrsinfrastrukturflächen wurden über die gegenwärtigen Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen des Jahres 2016 abgebildet, die vom Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern (LDBV) zur Verfügung gestellt wurden. Einige der Daten lagen nur linienhaft vor, sodass eine realitätsnahe Breite der entsprechenden Infrastruktur angenommen werden musste. Für die Gegenwart lagen die Fahrbahnbreiten der Straßen vor, für die Eisenbahnlinien wurde für eingleisige Strecken eine Breite von 10 m und für zweigleisige Strecken eine Breite von 20 m angenommen.

Zur Abbildung der zukünftigen Landverkehrsinfrastrukturflächen wurden die Trassenverläufe geplanter Straßen- und Schieneninfrastrukturen nach dem 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen Bayerns sowie dem Bundesverkehrswegeplan 2030 herangezogen. Diese Ausbaupläne ordnen den aufgeführten Projekten jeweils einen Fertigstellungszeitraum und eine Dringlichkeitsstufe zu. Es konnte somit zwischen einem schwachen und starken Wandel differenziert werden. Zur Darstellung des schwachen Wandels wurden zum gegenwärtigen Bestand die Ausbauprojekte der Staatsstraßen bis ca. 2020 sowie die Planung von Bundesstraßen, -autobahnen und Schienen (in der Regel deutlich vor 2030) hinzugezählt. Für das Szenario des starken Wandels wurden die Ausbauprojekte von Staatsstraßen

bis ca. 2025 sowie Bundesstraßen und -autobahnen und die Schieneninfrastruktur bis ca. 2030 in die Berechnung einbezogen und zur gegenwärtigen Infrastrukturausstattung hinzugezählt.

Die für das Zukunftsszenario „schwacher Wandel“ abgebildete Landinfrastrukturfläche bezieht unter der Annahme, dass nicht alle vorgesehenen Projekte realisiert werden, die fest disponierten Projekte (FD) und die Projekte des vordringlichen Bedarfs zur Engpassbeseitigung (VB-E) des Bundesverkehrswegeplans sowie die Projekte Überhang Priorität 1 (1UEB) und Priorität 1 (1) des 7. Ausbauplans Staatsstraßen Bayerns in die Sensitivitätsdarstellung ein.

Die Sensitivitätskarte für die Zukunft „starker Wandel“ bildet unter der Annahme, dass alle vorgesehenen Projekte realisiert werden, zusätzlich noch die Projekte des vordringlichen Bedarfs (VB) des Bundesverkehrswegeplans (insgesamt FD, VB-E, VB) sowie zusätzlich die Reserveprojekte Priorität 1 (1R) des 7. Ausbauplans Staatsstraßen Bayerns (insgesamt 1UEB, 1, 1R) in der Darstellung ab.

Die Breiten der jeweiligen Linien wurden wie folgt ermittelt: Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (OBB) für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen (zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw.). Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise den einzelnen Projektbeschreibungen aus dem Bundesverkehrswegeplan des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) entnommen, wobei für einleisige Strecken eine Breite von 10 m, für zweigleisige von 20 m usw. angenommen wurde. Zu beachten ist, dass sich die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben und somit deren Flächen im weiteren Planungsverlauf noch verändern können.

Wie weiter oben bereits erwähnt wird die für die Landverkehrsinfrastruktur in Anspruch genommene Fläche in den Landkreisen Bayerns in der Gegenwart durch die Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen (über 40 ha) im Jahr 2016 abgebildet. Eine besonders starke Flächeninanspruchnahme für Landverkehrsinfrastruktur zeigt sich im Raum München wie auch generell in den kreisfreien Städten. Die Landkreise weisen eine in etwa untereinander vergleichbare Flächeninanspruchnahme auf, mit der geographisch bedingten Ausnahme der südbayerischen Landkreise an der Grenze zu Österreich mit einer geringeren Landverkehrsinfrastrukturfläche (Abb. 18).

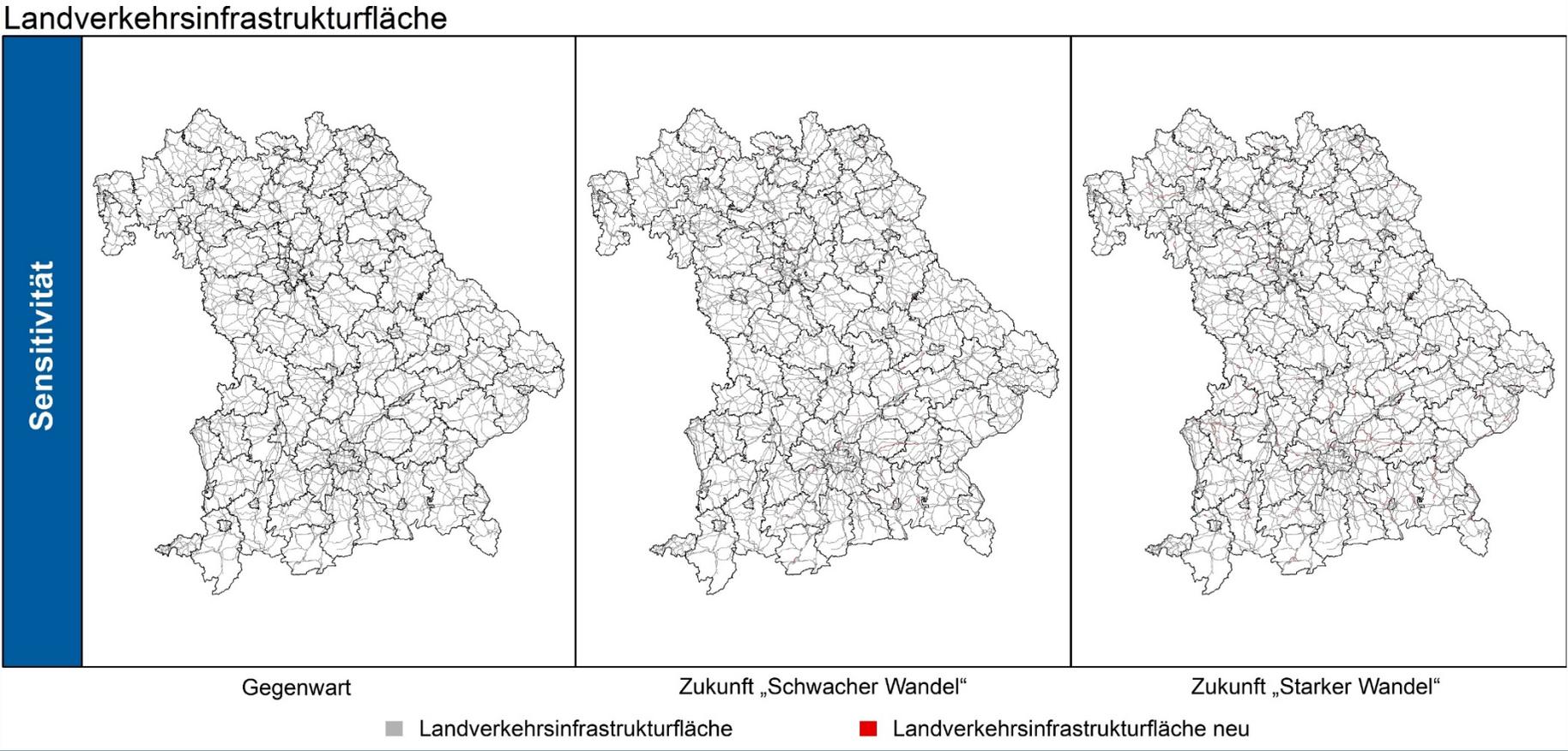


Abb. 18: Landverkehrsinfrastrukturfläche in den Landkreisen und kreisfreien Städten (2009 und Veränderung bis 2020–2030)

Kraftwerke

Für die Betrachtung der bayerischen Kraftwerke wurden sowohl Daten zu Biomasse- und Windenergieanlagen aus dem Energie-Atlas Bayern (Stand: 2016) als auch Daten zu den konventionellen Kraftwerken, die von der Bundesnetzagentur zum Termin 16.11.2016 bereitgestellt wurden, berücksichtigt. Dargestellt in Abb. 19 wurden jedoch lediglich die 2016 bestehenden Biomasse- und Windenergieanlagen mit einer Netto-Nennleistung von über zwei MW sowie konventionelle Kraftwerke (fossile Kraftstoffe und Atomkraft) mit einer Netto-Nennleistung über 10 MW. Derzeit befinden sich 40 konventionelle Kraftwerke, 628 Windenergie- und 38 Biomasseanlagen mit einer Netto-Nennleistung von über zwei Megawatt in Bayern (Tab. 5). Um die Zukunft abzubilden, wurden die Änderungen bis 2019 bei den konventionellen Kraftwerken in die Analyse einbezogen. Drei konventionelle Kraftwerke werden künftig zurückgebaut. Informationen über den Zu- und Rückbau von Biomasse- und Windenergieanlagen standen nicht zur Verfügung und wurden somit bei der Abbildung der Zukunft nicht berücksichtigt. Auch auf eine Differenzierung zwischen schwachem und starkem Wandel musste aufgrund fehlender Datensätze verzichtet werden. Zur Verbesserung der Lesbarkeit wurde eine vergrößerte Darstellung der Abbildung der Kraftwerkstandorte gewählt, die von der üblichen Darstellungsweise abweicht.

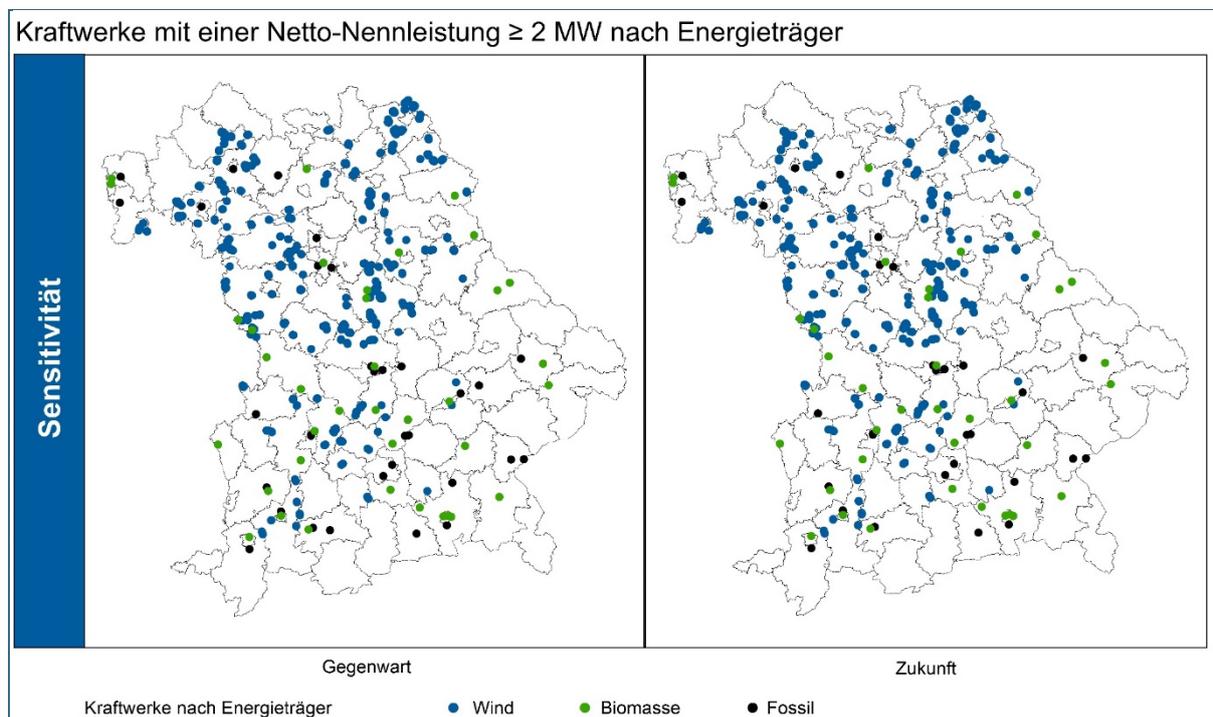


Abb. 19: Standorte der Kraftwerke mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW nach Energieträger in Bayern für die Gegenwart (2016) und unter Berücksichtigung des Rückbaus von konventionellen Kraftwerken für die Zukunft (ab 2019)

Tab. 5: Anzahl der Kraftwerke mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW nach Energieträger in Bayern in der Gegenwart und Zukunft

Art des Kraftwerks	Anzahl in der Gegenwart (2016)	Anzahl in der Zukunft (nach 2019)	Rückbau	Zubau
Konventionell (>10 MW)	40	38	3	0
Wind (>2 MW)	628	628	Keine Daten	Keine Daten
Biomasse (>2 MW)	38	38	Keine Daten	Keine Daten

Die gegenwärtige Verteilung der Kraftwerke nach Energieträger zeigt für den Energieträger Wind eine Standortkonzentration von Windenergieanlagen mit einer Netto-Nennleistung von mindestens zwei Megawatt in der nördlichen Landeshälfte Bayerns in der Oberpfalz und in Franken. Die Landkreise Hof, Würzburg, Neumarkt in der Oberpfalz oder Ansbach weisen hier beispielhaft eine besonders hohe Anlagendichte auf. Mehrere Anlagen pro Kreisgebiet finden sich im südlichen Landesteil insgesamt betrachtet jedoch deutlich weniger. Ausnahmen sind hier beispielsweise die Landkreise Ostallgäu und Pfaffenhofen a. d. Ilm. Bei der Darstellung in der Karte ist zu beachten, dass zwar alle Anlagen mit einer Netto-Nennleistung von zwei Megawatt als Punkte dargestellt sind, bei unmittelbar benachbarten Anlagen überlagern sich jedoch aus Maßstabsgründen die Punktsymbole in der Karte und erscheinen nur als ein Punkt. Kraftwerksstandorte auf Basis des Energieträgers Biomasse sind tendenziell häufiger im Süden des Landes vertreten, mit mehreren Standorten etwa in den Landkreisen Freising und Rosenheim. Kraftwerke auf Basis fossiler Energieträger sind mit Ausnahme des Nordostens Bayerns und einiger Landkreise an der Landesgrenze im Süden und Osten in allen Teilen des Landes anzutreffen.

Bevölkerung über 60 Jahre

Zur Darstellung der Bevölkerung über 60 Jahre wurden die Bevölkerungszahlen des Jahres 2009 des Bayerischen Landesamtes für Statistik herangezogen und die Anzahl der über 60-Jährigen aus dem Datensatz extrahiert. Zur Abbildung der Zukunft wurden die entsprechenden Daten aus der Raumordnungsprognose 2030 des BBSR entnommen, die der Bevölkerungsprognose aus dem Wachstumsszenario (CC-LandStraD-Projekt) ähnelt, welche der Klimawirkungsanalyse zugrunde liegt (Abb. 20).

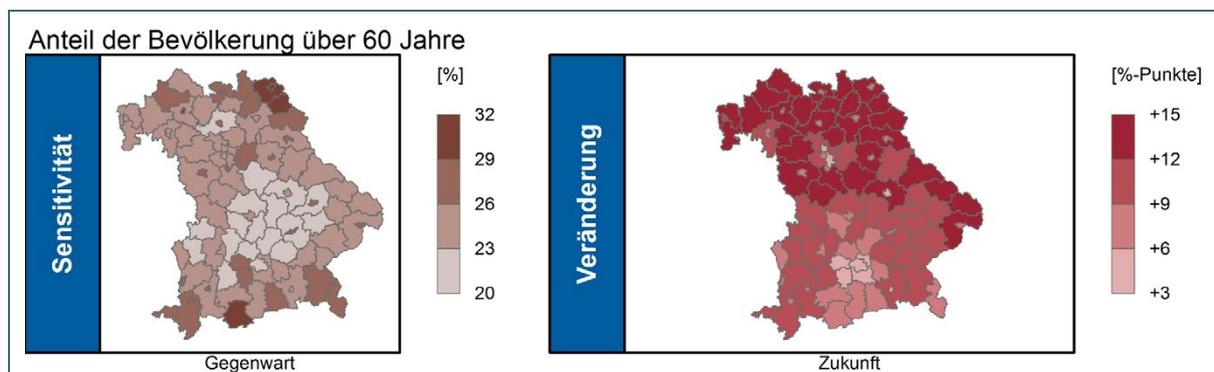


Abb. 20: Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre (2009 und 2030)

Die Ergebnisse für die Gegenwart zeigen, dass der Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre im Vergleich zur Zukunft relativ gering ist. Gegenwärtig weisen die Kreise in Bayern eine geringe Spanne des An-

teils der Bevölkerung über 60 Jahre, von 20 bis 32%, auf. Die höchsten prozentualen Anteile (29–32%) befinden sich in den kreisfreien Städten Schweinfurt und Hof sowie in den Landkreisen Hof, Wunsiedel im Fichtelgebirge und Garmisch-Partenkirchen. Diese werden dicht gefolgt von den Landkreisen im Alpenland (Lindau, Oberallgäu, Miesbach, Traunstein und Berchtesgadener Land), den nördlichen Landkreisen Oberfrankens (Coburg, Kronach, Kulmbach) und den Landkreisen Tirschenreuth, Nürnberger Land und Bad Kissingen mit einem Anteil zwischen 26 und 29%. Im Unterbayerischen Hügelland, um die kreisfreien Städte München, Ingolstadt, Regensburg, Straubing und Landshut herum, zeigen sich die geringsten Werte um die 20%.

Bei der Projektion der Veränderung des Anteils der Bevölkerung über 60 Jahre in der Zukunft wird deutlich, dass sich der bisherige Trend der Bevölkerungsalterung fortsetzt. Danach werden im Jahre 2030 die über 60-Jährigen in Bayern zahlenmäßig den größten Anteil ausmachen. Die Landkreise der Regierungsbezirke Unterfranken, Oberfranken, Mittelfranken und Oberpfalz verzeichnen den größten projizierten Zuwachs von bis zu 15 %-Punkten. Aber auch in Schwaben und Niederbayern werden deutlich steigende Bevölkerungsanteile von über 60-Jährigen (bis zu 38%) erwartet. Die kreisfreien Städte Erlangen, Nürnberg, Regensburg und München verzeichnen ebenfalls einen zu erwartenden Anstieg des Anteils der Bevölkerung über 60, jedoch fällt dieser mit 3 %-Punkten nur sehr gering aus.

5 Klimawirkungen in den Handlungsfeldern

Die in der Pilotstudie für Bayern berechneten und in diesem Kapitel detailliert beschriebenen Klimawirkungen spiegeln im Wesentlichen die im Rahmen der 2015 veröffentlichten Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ des Umweltbundesamtes untersuchten Klimawirkungen wieder. Viele der dort berechneten Klimawirkungen wurden in dem vorliegenden Projekt aufgegriffen und für Bayern nochmals gesondert berechnet. Vor der Beschreibung der Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse in den entsprechenden Unterkapiteln werden für jede Klimawirkung Anmerkungen zum Stand der Forschung gemacht. Neben dem Verweis auf Forschungsergebnisse aus Bayern werden in diesen Abschnitten teilweise auch Aussagen aus der Vulnerabilitätsstudie Deutschlands aufgegriffen, sofern daraus Aussagen für Bayern abzuleiten sind.

Während der knapp einjährigen Projektlaufzeit standen die behördlichen und wissenschaftlichen Akteure in einem ständigen Informationsaustausch, sodass die Operationalisierung der Klimawirkungen in der Regel in enger Abstimmung mit den jeweils zuständigen Landesfachbehörden geschah. Anders als in der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes sind zur Neuberechnung der Klimawirkungen zum einen aktuelle, auf dem RCP8.5-Szenario basierende Klimaprojektionsdaten in die Berechnung eingeflossen, zum anderen wurden viele der in der 2015 veröffentlichten Studie verwendeten Proxyindikatoren zur Abbildung der Sensitivität weiterentwickelt, sodass die Qualität der Ergebnisaussagen zum Teil erheblich verbessert werden konnte. Außerdem konnten die Ergebnisse der in der bundesweiten Vulnerabilitätsstudie verwendeten Wirkmodelle nicht für die Berechnung der Klimawirkungen in Bayern herangezogen werden. Gründe dafür waren die Verwendung der SRES-Szenarien in der UBA-Studie (hier: RCP8.5) und dass die Ergebnisse in einer zu groben Auflösung für die Analyse auf der Maßstabsebene Bayerns vorliegen.

Im Laufe der Bearbeitung stellte sich heraus, dass einige Klimawirkungen aufgrund unvollständiger oder invalider Datensätze nicht zu berechnen waren. Da die Arbeiten an diesen Klimawirkungen teilweise bereits sehr weit fortgeschritten waren, werden die methodischen Ansätze trotz fehlender Berechnungen in den jeweiligen Kapiteln aufgeführt.

Dieses Kapitel ist inhaltlich so aufbereitet, dass jedes Unterkapitel gesondert für sich stehen kann und somit für das Verstehen der Klimawirkungsberechnung keine Informationen aus den vorangegangenen Unterkapiteln benötigt werden. Infolgedessen kommt es an verschiedenen Stellen des Berichts

zur Wiederholung einzelner Inhalte, insbesondere bei der Aufbereitung des Stands der Forschung oder bei der Beschreibung der Operationalisierung der Klimawirkungen.

5.1 Naturschutz

Die Landschaft Bayerns ist durch eine hohe Vielfalt von Natur- und Lebensräumen geprägt, die Heimat für eine artenreiche Tier- und Pflanzenwelt ist. Dies spiegelt sich unter anderem in der Zahl ausgewiesener Schutzgebiete (zwei Nationalparke, zwei Biosphärenreservate, 18 Naturparke, über 600 Naturschutzgebiete, über 700 Landschaftsschutzgebiete usw.) wider (LfU 2017a). Neben den Beeinträchtigungen für die Natur, wie z. B. durch Zerschneidung der Landschaft oder die Eutrophierung von Gewässern, birgt der Klimawandel ein zusätzliches Gefahrenpotenzial für die Diversität auf Art- und Ökosystemebene. Die Auswirkungen regionaler klimatischer Veränderungen sind dabei sehr komplex. Am unmittelbarsten jedoch wirken sich Veränderungen im Temperatur- und Niederschlagsregime und damit auch in der Wasserverfügbarkeit auf die Arten und Lebensräume aus, woraus sich je nach Kontext vielfältige indirekte Veränderungen ergeben, beispielsweise bezüglich Phänologie, Habitatstruktur, Nährstoff-/Nahrungsangebot, Konkurrenzverhältnissen und vielem mehr.

Einige klimawandelbedingte Veränderungen lassen sich auch in Bayern bereits beobachten. So ist bei zahlreichen Pflanzenarten eine Verlängerung der Vegetationsperiode zu beobachten (LfU 2014a). Auch bei der Fauna sind Verhaltensänderungen feststellbar. Einige Insektenarten schlüpfen deutlich früher und zum Teil auch häufiger im Jahr, Brutzeiten von Vögeln verschieben, Zug- und Überwinterungsgewohnheiten verändern sich (StMUV 2016).

Aufgrund der klimatischen Veränderungen verlagern sich sukzessive die Arealgrenzen der in Bayern beheimateten Tier- und Pflanzenarten. Wärme- und trockenheitsliebende Arten werden durch die höheren Temperaturen, milderen Winter und zunehmenden Trockenphasen bevorteilt, während die eher kältetoleranten Arten vor allem des Alpenraums und der Hochlagen der Mittelgebirge in höhere beziehungsweise nördlichere Lagen ausweichen müssen, sofern sie die Möglichkeit dazu haben. Es ist zu befürchten, dass bei einer Vielzahl der Tier- und Pflanzenarten das Ausbreitungsvermögen in klimatisch günstigere Habitate zu gering ist, um mit den derzeitigen klimatischen Veränderungen Schritt halten zu können. Dies gilt insbesondere für Arten, die auf bestimmte Lebensräume oder Nahrungsquellen angewiesen sind, sich nur über geringe Distanzen verbreiten und eine vergleichsweise geringe Reproduktionsleistung aufweisen. Im Besonderen verstärkt sich der Konkurrenzdruck auf die einheimischen Tier- und Pflanzenarten durch die Ausbreitung von Neophyten und Neozoen, denen die sich ändernden Rahmenbedingungen, insbesondere die Häufung und Intensivierung von Hitze- und Trockenperioden, entgegenkommen (StMUV 2016) und Lücken ausfallender Arten besetzen können. Im Themenfeld Naturschutz wurde daher zusätzlich die Untersuchung der Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“ vorgeschlagen. Nach Abstimmung mit den entsprechenden Experten wurde von einer Betrachtung der Klimawirkung in der Studie abgesehen. Einerseits ist die Datengrundlage zur Verbreitung von Neophyten in Bayern unzureichend. Zum anderen wurde eine proxybasierte Umsetzung im Vergleich zu Ausbreitungs- beziehungsweise Habitatmodellen als nicht belastbar genug eingeschätzt, um künftige Schwerpunkte im Auftreten invasiver Neophyten zu beschreiben.

5.1.1 NA-1-2017, Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit

Hintergrund

Wasserabhängige Biotope, wie Fließ- und Stillgewässer, Feuchtgebiete und Moore zählen zu den schutzwürdigsten Lebensräumen des Freistaats. Aufgrund ihrer besonderen Lebensbedingungen beherbergen diese häufig eine Vielzahl an spezialisierten Tier- und Pflanzenarten, die vergleichsweise selten und vielfach zudem mit einem gesetzlichen Schutzstatus belegt sind. Darüber hinaus sind viel-

zählige und vielschichtige Funktionsbeziehungen an wasserabhängige Biotope gekoppelt, die häufig über deren räumliche Grenzen hinausgehen. Dies betrifft insbesondere Räuber-Beute- sowie Pflanze-Bestäuber-Beziehungen. Feuchtgebiete und Moore leisten durch ihr großes Wasserrückhaltevermögen einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz. Moore speichern zudem erhebliche Mengen Kohlenstoff und leisten damit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz.

Im Zuge der projizierten Zunahme und Intensivierung von Trockenperioden wird sich das Wasserdargebot entsprechend verringern, was sich, in Abhängigkeit von der Dimension des jeweiligen wasserführenden Biotops, in Form einer Verringerung des Wasserstands bis hin zu periodischem Trockenfallen auswirken kann. Für die wasserabhängigen und die durch funktionale Beziehungen assoziierten Arten ergeben sich entsprechend erhebliche negative Konsequenzen, wie der Verlust von Lebensraum und Nahrungsgrundlagen. Auch Feuchtgebiete und Moore werden sich bei anhaltender und wiederkehrender Trockenheit verkleinern und mittelfristig ihre Funktionalität hinsichtlich Wasserrückhalt und CO₂-Senke einbüßen.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Global Observation Research Initiative in Alpine environments (GLORIA)“ wurden seit 2004 die Auswirkungen des Klimawandels auf Flora und Fauna der Alpenregion untersucht (GLORIA 2017). Partner des internationalen Forschungsnetzwerks ist der Nationalpark Berchtesgaden. Mit KLIP 2020 wurde ein Sonderprogramm zur Moorrenaturierung initiiert, in dem neben konkreten Moorschutz- und Anpassungsmaßnahmen auch Forschungsaktivitäten durchgeführt werden, die insbesondere den Einfluss des Klimawandels auf das Ökosystem Moor thematisieren (LfU 2013). Darüber hinaus existieren im Freistaat Bayern eine Vielzahl an Programmen (z. B. Auenprogramm, Aktionsprogramm Quellen in Bayern), die sich speziell mit wasserabhängigen Biotopen und dem Einfluss klimatischer Veränderungen befassen.

Umsetzung

Die künftig wärmer und trockener werdenden Sommer stellen vor allem für feuchteliebende Arten beziehungsweise wasserabhängige Biotope ein Problem dar, in dessen Folge es zu Arealveränderungen der Arten kommen wird. In der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) wurde die Klimawirkung „Areale von Arten“, die vergleichbar zur vorliegenden Klimawirkung „Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit“ (NA-1-2017) gesehen werden kann, mittels Habitatmodellen und Kartierungsauswertungen untersucht (Pompe et al. 2011). Die Ergebnisse sind für die vorliegende Studie nicht verwendbar, da sie auf Basis von SRES-Emissionsszenarien erstellt wurden. Eine neue Modellierung unter Verwendung des RCP8.5-Szenarios war innerhalb des Projektes aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Klimawirkung über Proxyindikatoren operationalisiert. Es bleibt festzuhalten, dass dieser Ansatz auf der Ebene von Kreisen zu grob ist und nur als erste „Hotspot-Bestimmung“ für weiter folgende Detailuntersuchungen dienen sollte.

Für den verwendeten Ansatz wurde die klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (KWB_{VP} , April–September) als Klimaeinfluss genutzt. Die KWB , als Differenz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration, stellt die wichtigste klimatische Einflussgröße für Arten und Biotope dar. Sie verknüpft als komplexe Größe den Niederschlagshaushalt und – über die Verdunstung – das Temperaturregime. Die Berechnung der KWB_{VP} erfolgte, im Gegensatz zu den anderen Klimaeinflüssen (13 bias-korrigierte Modellläufe), auf Basis von fünf verfügbaren, nicht-bias-korrigierten Modellläufen für Niederschlag und Evapotranspiration jeweils für Gegenwart und Zukunft (vgl. Kap. 3.1). Hierzu wurde die Differenz aus Niederschlag und Evapotranspiration für jeden Modelllauf gebildet. Für die Gegenwart wird der Klimaeinfluss durch den Median der fünf Differenzbeträge repräsentiert. Für die Zukunftsbetrachtung diente das 85. Perzentil der fünf Differenzbeträge als Klimaeinfluss eines schwachen klimatischen Wandels und das 15. Perzentil als Indikator für einen starken klimatischen Wandel. Hier stellt das 15. Perzentil den starken Wandel dar, da sich hier die Veränderung stärker von den

Werten der Gegenwart unterscheidet als beim 85. Perzentil. Die Klimaeinflüsse wurden für die Darstellung und die Verknüpfung zur Klimawirkung jeweils normalisiert.

Die Sensitivität wird im vorliegenden Ansatz durch die wasserabhängigen Biotope repräsentiert. Hierzu wurde durch das LfU eine Liste mit Biotoptypen aus dem Biotoptypenkatalog erstellt, die von Grund- beziehungsweise Oberflächenwasser abhängig sind und somit sensibel auf künftige Änderungen des Wasserhaushaltes reagieren könnten. Nachfolgend wurden aus der Biotopkartierung im GIS alle Flächen mit wasserabhängigen Biotoptypen ausgewählt und exportiert. Für diese Biotopflächen wurde die Flächengröße berechnet und diese pro Landkreis aufsummiert. Weiterhin wurde der Flächenanteil der wasserabhängigen Biotope an der Landkreisfläche ermittelt. Die absolute Fläche und der relative Flächenanteil wurden normalisiert, miteinander additiv zu einem Indikator verknüpft und abermals normalisiert. Die ursprünglich angedachte Verwendung eines zusätzlichen Indikators zur Bewertung der Biotoptypen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel (Expertenbewertung), wie sie von Behrens et al. (2009) für Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurde, konnte nicht realisiert werden, da die nordrheinwestfälische Studie nur etwa 15 % der für Bayern benannten wasserabhängigen Biotoptypen berücksichtigt.

Die Klimawirkung ergab sich abschließend durch die multiplikative Verknüpfung von normalisiertem Klimaeinfluss und normalisierter Sensitivität. Für die flächenhafte Biotoptypenverteilung liegen keine Projektionen zur künftigen Entwicklung vor. Aus diesem Grund wurde die gegenwärtige Sensitivität mit den Klimaeinflüssen des künftigen starken (15. Perzentil) beziehungsweise schwachen (85. Perzentil) klimatischen Wandels verschnitten.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse für die Gegenwart (Abb. 21) zeigen die stärkste Klimawirkung im südlichen Oberbayern und Schwaben, in den Alpen und deren Vorland (unter anderem Kreise Rosenheim, Bad Tölz-Wolfratshausen, Weilheim-Schongau). Das restliche Bayern zeigt ein heterogenes Verteilungsmuster der Klimawirkung. Die starke Klimawirkung im südlichen Bayern erklärt sich, trotz der vergleichsweise guten klimatischen Wasserbilanz, durch die dortige Häufung von wasserabhängigen Biotopen.

Auch in den Szenarien „starker Wandel“ und „schwacher Wandel“ bleibt das beschriebene Verteilungsmuster der Klimawirkung erhalten. Hierbei unterscheidet sich die Klimawirkung im Zuge eines schwachen Wandels nur unwesentlich von der gegenwärtigen Situation. Dies ist in der verwendeten – gegenwärtigen – Sensitivität und den nur leichten klimatischen Veränderungen begründet. Für den starken Wandel sind allerdings stärkere Zunahmen der Klimawirkung in den bereits in der Gegenwart am stärksten betroffenen Regionen – südliches Oberbayern und Schwaben – projiziert. Diese ergeben sich – bei gleichbleibender Sensitivität – aus der Abnahme der klimatischen Wasserbilanz in den Alpen und dem Alpenvorland.

Kernaussage

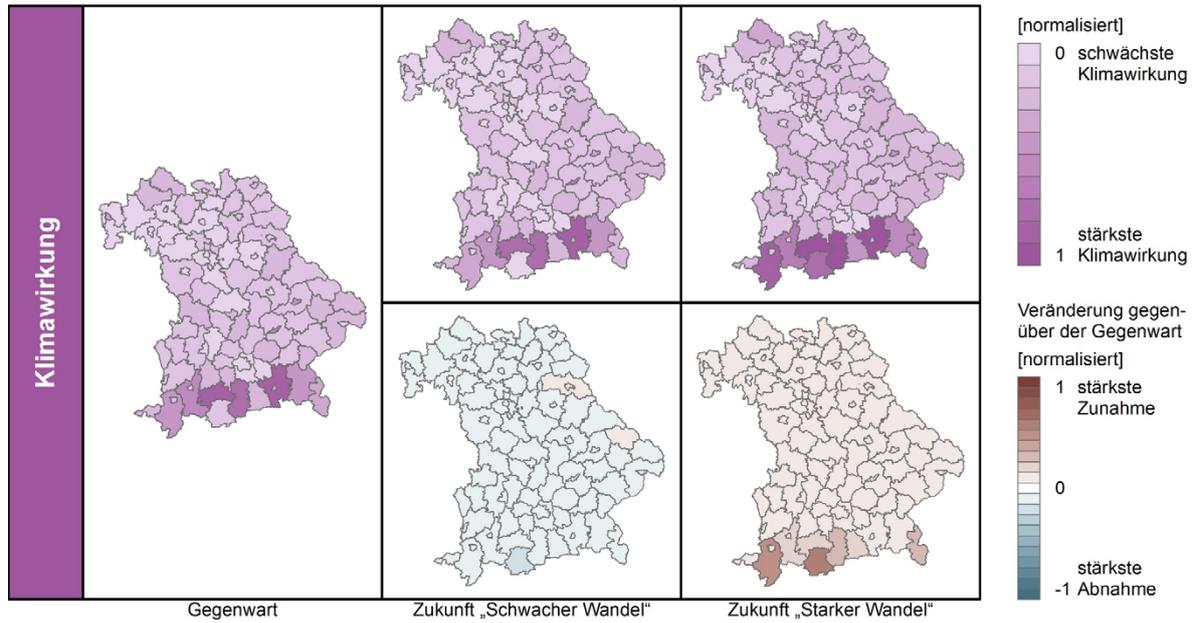
- Die künftig wärmer und trockener werdenden Sommer stellen vor allem für feuchteliebende Arten beziehungsweise wasserabhängige Biotope ein Problem dar, in dessen Folge es zu Arealveränderungen der Arten kommen wird.
- Die Klimawirkung „Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit“ wurde mittels Proxyindikatoren operationalisiert. Dieser Ansatz auf der Ebene von Kreisen ist sehr grob und sollte nur als erste „Hotspot-Bestimmung“ für weiter folgende Detailuntersuchungen dienen. Verbesserungen in der Berechnung der Klimawirkung wären durch den Einsatz von Habitatmodellen möglich, vergleichbar zur Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes.
- Die Klimawirkung ergab sich aus der multiplikativen Verknüpfung der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode als Klimaeinfluss mit der absoluten und relativen Fläche der wasserabhängigen Biotoptypen in den Kreisen als Sensitivität. Für die Sensitivität standen keine Projektionen zu einer möglichen künftigen Entwicklung zur Verfügung. Deshalb wurde für die Zukunftsbetrachtung die gegenwärtige Verteilung der wasserabhängigen Biotope einem schwachen und starken klimatischen Wandel ausgesetzt.
- Gegenwärtig zeigt sich die stärkste Klimawirkung im südlichen Oberbayern und Schwaben, in den Alpen und deren Vorland. Ein „schwacher Wandel“ würde hieran nur wenig ändern, wohingegen ein „starker Wandel“ zur Verstärkung der Klimawirkung in den genannten Regionen führen würde. Das restliche Bayern zeigt in beiden Szenarien keine relevante Veränderung der Klimawirkung.

Karten

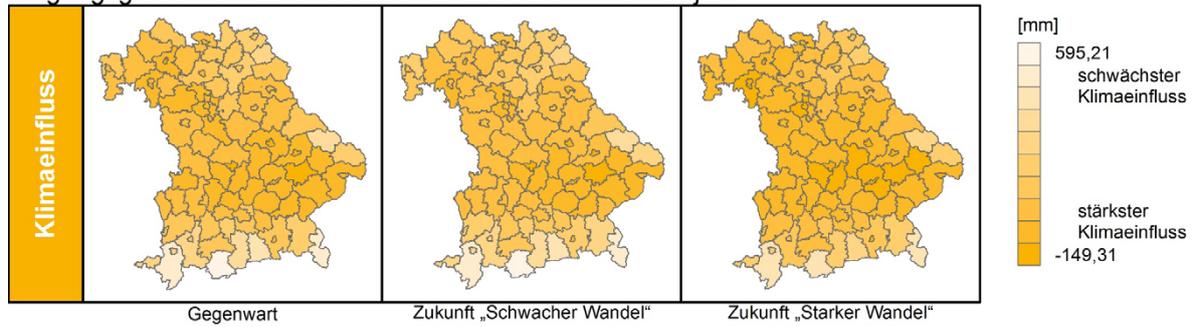
Arbeitsstand: 28.09.2017

Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt NA-1-2017



Eingangsgröße: Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr



Eingangsgröße: Fläche wasserabhängiger Biotope

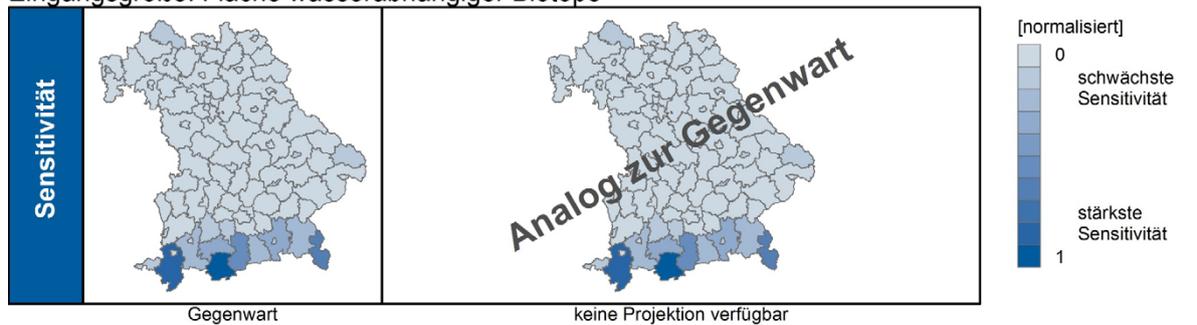


Abb. 21: Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit

5.2 Bodenschutz und Georisiken

Der Boden ist Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere und Pflanzen und erfüllt zentrale Funktionen im Öko- und Wirtschaftssystem Bayerns. Er ist ein wichtiger Bestandteil von Landökosystemen und komplexen Wasser- und Nährstoffkreisläufen. Zugleich hat der Bodenzustand maßgeblichen Einfluss auf die land- und forstwirtschaftliche Produktion sowie die biologische Vielfalt. Somit existieren weitreichende Querverbindungen zu den Handlungsfeldern Landwirtschaft, Wald und Forstwirtschaft sowie Naturschutz. Böden spielen eine essenzielle Rolle im Klimageschehen. Zwischen ihnen und der Atmosphäre werden klimarelevante Gase wie Kohlendioxid, Distickstoffoxid und Methan ausgetauscht. Gleichzeitig stellen Böden wichtige Kohlenstoffsinken dar. Die Veränderung der klimatischen Verhältnisse hat einen direkten Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Böden, da viele im Boden ablaufende physikalische, chemische und biologische Prozesse temperatur- und feuchteabhängig sind (Buth et al. 2015).

Der projizierte Klimawandel wird Veränderungen der Temperaturen, der Niederschläge sowie als Folge davon auch das häufigere Auftreten von intensiveren Wetterextremen mit sich bringen. Diese Entwicklungen können zur Veränderung bestehender Klimawirkungen im Handlungsfeld Bodenschutz und Georisiken führen.

Mit der möglichen Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen kann es zu einer Zunahme der wasserbedingten Bodenerosion in Bayern kommen. Durch sie werden Nährstoffe verlagert, Oberboden abgetragen, Gewässer eutrophiert sowie Siedlungen und Infrastrukturen verschmutzt oder beschädigt. Die Winderosion spielt dagegen im Freistaat eine untergeordnete Rolle (StMUV 2016). Die Berücksichtigung der Bodenerosion erfolgt über die Betrachtung des R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG), die für die Pilotstudie im Rahmen einer externen Bearbeitung durch die TU München erfolgte (siehe. Kap. 5.2.1). Des Weiteren führen zunehmende Niederschläge und höhere Temperaturen im Winterhalbjahr zu einer Erhöhung der Gefahr für Bodenverdichtung, insbesondere im Landwirtschaftsbereich und bei Forstarbeiten auf nicht (mehr) gefrorenen Waldböden. Steigende Temperaturen beschleunigen zudem den Abbau von Torf und Humus im Oberboden, was zu einer Destabilisierung des Bodengefüges und einer herabgesetzten Wasserspeicher- und Infiltrationskapazität beiträgt (StMUV 2016).

Der Bodenwasserhaushalt ist von den möglichen Auswirkungen des Klimawandels ebenso betroffen. Die infolge höherer sommerlicher Temperaturen steigende Verdunstung kann zu einer verstärkten Austrocknung der Böden und somit zu Trockenstress und -schäden von Ackerkulturen, aber auch Forstbeständen führen. Mit der Veränderung des Bodenwasser- und Bodenwärmehaushaltes gehen aufgrund geänderter physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse auch Veränderungen der Filter-, Puffer- und CO₂-Speicherfunktionen im Boden einher (StMUV 2016). Das Thema Trockenstress sollte mit der Klimawirkung „Pflanzenverfügbares Wasser auf Ackerflächen“ näher betrachtet werden. Allerdings wäre hier die aufwändige Erarbeitung von Grundlagendaten erforderlich gewesen, die im Projekt zeitlich nicht realisierbar war. Zugleich bestehen große Unsicherheiten in Bezug auf die Grundwasserstände und damit zum kapillaren Aufstieg für den betrachteten Zukunftszeitraum (2021-2050), was den Nutzwert der Karten herabsetzen würde. Aus diesen Gründen wurde die Klimawirkung „Pflanzenverfügbares Wasser auf Ackerflächen“ in der Pilotstudie nicht weiter betrachtet.

Im Zuge der erwarteten Zunahme von Wetterextremen wie Starkniederschlägen, aber auch durch zunehmende Temperaturen, steigt die Gefahr von geologischen Risiken wie Hangbewegungen, Rutschungen oder Fels- und Bergstürzen. Wegen der großen Reliefenergie und der hohen Niederschlagssummen im Bergland, sind besonders der Alpenraum, aber auch das Alpenvorland und das Hügel- und Schichtstufenland für Georisiken infolge des Klimawandels prädestiniert. In Karstgebieten bilden zusätzlich Erdfälle eine Gefahr für Siedlungsbereiche (StMUV 2016). Für die Thematik der

Georisiken sollte die Klimawirkung „Massenbewegungen“ untersucht werden. Diese wurde jedoch aufgrund von fehlenden methodischen Ansätzen zur Berücksichtigung von Klimafaktoren bei der Entstehung von Massenbewegungen nicht weiter betrachtet.

5.2.1 R-Faktor – Regenerosivität

Autoren: Karl Auerswald², Franziska K. Fischer^{2,3}, Tanja Winterrath⁴

Hintergrund

Als Erosivität von Regen, d.h. ihre Fähigkeit, Bodenabtrag auszulösen, wird hier die Definition der Universal Soil Loss Equation USLE (Wischmeier & Smith 1978) bzw. ihres deutschen Äquivalents, der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung ABAG (Schwertmann et al. 1990; DIN-NAW 2017) zugrunde gelegt, und die Auswirkung des Klimawandels darauf untersucht. Die USLE/ABAG berechnet den Bodenabtrag A [$t\ ha^{-1}\ a^{-1}$] als Produkt von sechs Faktoren:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Dabei ist R die Regenerosivität (in [$N\ h^{-1}$] für Einzelregen bzw. in [$N\ h^{-1}\ a^{-1}$] für die Jahressumme), während die anderen Faktoren den Einfluss von Bodenerodierbarkeit (K) [$(t\ ha^{-1}) / (N\ h^{-1})$], Hanglänge (L), Hangneigung (S), Bewirtschaftung (C) und langfristigen Erosionsschutzmaßnahmen (P) abbilden. Wichtig hinsichtlich der Klimawirkung ist, dass – wegen der multiplikativen Verknüpfung der Faktoren dieser Gleichung – eine Erhöhung der Regenerosivität eine Zunahme des Bodenabtrags im gleichen Maß bewirkt. Nimmt also die Regenerosivität um den Faktor 2 zu, wird sich auch der Bodenabtrag verdoppeln, sofern nicht noch weitere Änderungen bei anderen Faktoren einsetzen.

Da zwischen verschiedenen Jahren enorme Unterschiede im R -Faktor der Einzeljahre auftreten können, wird in der planerischen Anwendung ein R -Faktor verwendet, der über einen langen Zeitraum (z. B. 20 Jahre) gemittelt wurde. Tritt jedoch ein Trend in den Daten auf, was durch den Klimawandel zu erwarten ist, dann gilt der Mittelwert nicht mehr über den gesamten in die Mittelung eingegangenen Zeitraum, sondern nur noch für das mittlere Jahr des Zeitraums. Dieses Jahr wird im Folgenden Zentraljahr genannt.

In dieser Studie werden alle anderen Faktoren der ABAG nicht betrachtet bzw. als konstant angenommen. Dies bedeutet, dass auch der relative Jahresgang der Regenerosivität, welcher normalerweise in die Bestimmung des C -Faktors eingeht, nicht in die Berechnung der Klimawirkung einbezogen wird. Es gibt deutliche Hinweise, dass auch der Jahresgang der Regenerosivität in Folge des Klimawandels sich ändert und mehr erosive Ereignisse im Winterhalbjahr fallen (AUERSWALD ET AL. 2019a, b). Dieser Jahresgang wirkt sich nicht direkt auf den Abtrag aus, er bestimmt die relative Erosionsgefährdung verschiedener Kulturen mit. Zusätzlich müsste aber auch der Einfluss des Klimawandels auf die phänologische Entwicklung der Kulturen einbezogen werden. Beides wird in dieser Studie nicht betrachtet.

Der R -Faktor selbst berechnet sich aus dem Produkt der kinetischen Energie eines Regens und der maximalen 30-minütigen Regenintensität. Die Gleichung zur Berechnung der kinetischen Energie kann der DIN 19708 (DIN-NAW 2017) Sie benötigt ebenso wie die Bestimmung der maximalen 30-minütigen Intensität zeitlich hoch aufgelöste Regenintensitäten. Diese stand für die hier ausgewerteten 16 Klimaprojektionen nicht zur Verfügung. Daher musste ein Verfahren entwickelt werden, um die

² Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünlandlehre, Alte Akademie 12, 85354 Freising

³ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Lange Point 6, 85354 Freising

⁴ Deutscher Wetterdienst Offenbach, Hydrometeorologie, Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach/M.

Regenerosivität auch aus Tagesniederschlägen berechnen zu können. Dabei waren weitere Schwierigkeiten zu beachten. Nach WISCHMEIER UND SMITH (1978) gilt ein Regen nur dann als erosiv, wenn er mindestens 12,7 mm erbringt oder wenn die maximale 30-minütige Intensität mindestens $12,7 \text{ mm h}^{-1}$ beträgt. Noch problematischer ist allerdings, dass ein erosiver Regen nicht durch den Tageswechsel, sondern durch Regenspauzen begrenzt ist, die mindestens sechs Stunden dauern. Ein Tag kann daher bis zu drei Regenereignisse haben, von denen einer oder mehrere erosiv sein können, sodass der erosive Niederschlag kleiner als der Tagesniederschlag sein kann. Selbst ein Tagesniederschlag von 27 mm d^{-1} muss nicht die Kriterien eines erosiven Regens erfüllen, wenn er sich aus drei 9-mm-Regen zusammensetzt, deren maximale 30-minütige Intensitäten jeweils geringer als $12,7 \text{ mm h}^{-1}$ sind. Ein erosiver Regen kann sich aber auch über mehrere Tage erstrecken und daher mehr als den Tagesniederschlag umfassen, so dass auch ein Tagesniederschlag von 1 mm d^{-1} bereits Teil eines erosiven Niederschlags sein kann. All dies ist aus Klimaprojektionen mit Tageswerten nicht ablesbar.

In der Vergangenheit wurde in Deutschland bzw. in Bayern das langjährige Mittel des standortsspezifischen R-Faktors aus einer Regression zwischen dem langjährig mittleren Sommerniederschlag und dem langjährig mittleren R-Faktor ausgewählter meteorologischer Stationen geschätzt. Diese Regression gilt nur unter den Rahmenbedingungen, unter denen sie erstellt wurde. Ein verändertes Klima kann damit nicht abgebildet werden, weil beispielsweise eine Zunahme von (erosiven) Winterniederschlägen oder auch eine Zunahme erosiver Regen im Sommer nicht abgebildet werden, denn durch beide Änderungen muss sich die Summe der Sommerniederschläge nicht ändern. Daher war es notwendig, ein neues, auch unter sich ändernden Klimabedingungen anwendbares Verfahren zu entwickeln.

Umsetzung

Die Regenerosivität wurde auf Basis von Tageswerten für ein Ensemble von 16 Klimaprojektionen für die Periode 1971 bis 2050 mit Hilfe einer Transferfunktion berechnet. Die Projektionen sind in Tab. 6 zusammengestellt und wurden vom LfU zur Verfügung gestellt. Alle Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario. Seit Fertigstellung dieser Analyse hat der DWD neue Erkenntnisse zur Qualität einzelner Projektionen sowie ihrer Verwendung in Projektionsensembles publiziert. Diese könnten die Belastbarkeit der Ergebnisse in quantitativer Hinsicht etwas einschränken (siehe Kap. 3.1). Da jedoch die Trends bei den Projektionen mit hoher Qualität und denen mit eingeschränkter Qualität gleich waren, ist der Einfluss auf die Regenerosivität offenbar gering. Da wegen der enormen Variabilität der Erosivität zwischen einzelnen Jahren mindestens 20 Jahre, besser 50 Jahre gemittelt werden sollten (Wischmeier & Smith 1978; Auerswald et al. 2019a), wurde der Verwendung aller Projektionen der Vorzug gegeben, um so den Einfluss zufälliger Extremereignisse auf die Raum- und Zeitmuster klein zu halten. Zudem wurden aber alle Aussagen hinsichtlich der Höhe des R-Faktors, seiner räumlichen Variation und seiner zeitlichen Änderung über 60 Jahre anhand eines großen Datensatzes aus Niederschlagsmessungen abgeleiteter R-Faktoren überprüft. Dies waren zum einen aus Radarmessungen für jeden Quadratkilometer in Deutschland (452503 Pixel) bestimmte Jahres-R-Faktoren der Jahre 2001 bis 2018 (in der Summe über 8 Millionen Jahres-R-Faktoren). Zum anderen waren dies aus Ombrometermessungen bestimmte R-Faktoren. Dabei wurden mindestens 50 Stationen pro Jahresmittelwert verwendet. Insgesamt standen 5515 Stationsjahre zur Verfügung.

Tab. 6: Ensemble der Klimaprojektionen, für die der R-Faktor für die Periode 1971 bis 2050 berechnet wurde. Alle Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario. Die Koordinaten der oberen Gruppe von Projektionen beruht auf dem EUR-11-Gitter, die mittlere Gruppe aus 2 Projektionen verwendet das Remo-Gitter und die letzte Projektion verwendet das Aladin-Gitter. Abkürzungen siehe Hübener et al. (2017)

General Circulation Model	Member	Institute	Regional Climate Model	Version
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI	RACMO22E	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r3i1p1	DMI	HIRHAM5	DT-KLIREF2014
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	IPSL-INERIS	WRF331F	DT-KLIREF2014
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	KNMI	RACMO22E	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	MPI-CSC	REMO2009	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2i1p1	MPI-CSC	REMO2009	DT-KLIREF2014
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	CNRM	ALADIN53	DT-KLIREF2014

Als Datenbasis für eine Transferfunktion zur Berechnung der Einzelregenerosivität aus Daten der Klimaprojektionen standen R-Faktoren von mehr als 600000 erosiven Regen aus Fischer et al. (2016) zur Verfügung. Diese Einzelregenerosivitäten waren aus Radarniederschlagsmessungen (Winterrath 2016; Winterrath et al. 2017) mit einer räumlichen Auflösung von 1 km² und einer zeitlichen Auflösung von 5 min abgeleitet worden. Die Gleichung des R-Faktors der ABAG gilt für zeitlich hochauflösende Niederschlagsmessungen mit Ombrometern, die in Deutschland eine Öffnung von 200 cm² aufweisen. Durch die Messmethode der Radarniederschlagsmessung einschließlich aller Nachbereitungsschritte werden Intensitätsspitzen weniger gut aufgelöst als bei Ombrometern. Gerade die Intensitätsspitzen sind aber für die Berechnung des R-Faktors ausschlaggebend. Diese „Glättung“ durch die Radarmessung, muss durch Skalierungsfaktoren ausgeglichen werden, die von der Messmethode, der räumlichen und der zeitlichen Auflösung abhängen. Für die verwendeten 5-min-Radolan-Daten beträgt der kombinierte Skalierungsfaktor im Vergleich zu zeitlich hochauflösenden Ombrometermessungen 1,554 (Fischer et al. 2018). Er setzt sich zusammen ($1,554 = (0,35 + 1,13) \times 1,05$) aus dem Skalierungsfaktor für die Radarmessung (0,35), dem für die räumliche Auflösung von 1 km² (1,13) und dem

für die zeitliche Auflösung von 5 min (1,05). Dieser kombinierte Skalierungsfaktor wurde für die 600.000 erosiven Regen zur Entwicklung der Transferfunktion verwendet. Die Erosionsschäden dieser Regen waren für mehr als 8000 Felder an Hand von Luftbildern überprüft worden, um u.a. die Verwendbarkeit von Radarniederschlagsdaten für die Erosionsprognose zu prüfen (Fischer et al. 2017; Auerswald et al. 2018). Dabei konnten keine Konflikte identifiziert werden.

Die kinetische Energie korreliert eng mit der Niederschlagsmenge, während die mögliche Intensität stark vom Wassergehalt der Luft und damit von der Temperatur abhängt. Daher sollten sich der Tagesniederschlag und die Tagesmitteltemperatur als Proxy für die kinetische Energie und für die 30-minütige Maximalintensität eignen. Gleichzeitig sind beide Proxys sehr nahe am physikalisch korrekten Zusammenhang. Eine auf sie aufbauende Transferfunktion sollte daher auch bei einer Klimaänderung noch gültig bleiben. Dies gilt besonders, da die Spanne möglicher Tagestemperaturen und möglicher Tagesniederschläge im Jahresverlauf groß ist und diese Spanne durch eine Klimaänderung vergleichsweise wenig verschoben wird. Damit bleiben auch bei geändertem Klima die meisten Tage innerhalb der Spanne, die für die Entwicklung der Transferfunktion zur Verfügung steht. Deswegen wurde für den Entwicklungsdatensatz der R-Faktor einzelner Tage R_e [$N h^{-1}$] mit dem Tagesniederschlag P_d [$mm d^{-1}$] aus eben diesen Radarniederschlagsmessungen und mit der mittleren täglichen Lufttemperatur T_a [$^{\circ}C$] von benachbarten meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes korreliert. Es wurde dabei nicht der erosive Niederschlag verwendet, sondern der größte Tagesniederschlag, wenn das erosive Ereignis über mehrere Tage ging. Regentage ohne erosives Ereignis gingen nur dann ein (mit $R = 0 N h^{-1}$), wenn mehr als 5 $mm d^{-1}$ Niederschlag fiel und die Tagestemperatur über $0^{\circ}C$ (kein Schnee) lag. Folgende Transfergleichung erwies sich am besten:

$$R_e = 1,57 \times 10^{-6} \times P_d^{2,63} \times T_a^{2,52}$$

Der RMSE (root mean squared error, Wurzel des mittleren quadrierten Fehlers) der mit der Transferfunktion abgeleiteten Erosivität von Einzelregen betrug im Entwicklungsdatensatz $6 N h^{-1}$, wobei Erosivitäten bis $1000 N h^{-1}$ vorkamen (Abb. 22).

Die Prognose dieser Gleichung wurde mit 15 133 R-Faktoren verglichen, welche aus Regenschreiberaufzeichnungen an 37 Stationen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft der Jahre 2005 bis 2015 berechneten wurden. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung (Abb. 22). Der RMSE für den Validierungsdatensatz ($3 N h^{-1}$) war sogar noch etwas geringer als beim Entwicklungsdatensatz, weil beim Validierungsdatensatz die höchsten R_e , bei denen dann auch die Fehler größer sind, nur etwa $200 N h^{-1}$ betragen. Diese geringeren Werte beruhten darauf, dass trotz der großen Zahl an erosiven Ereignissen der Validierungsdatensatz viel kleiner war als der Entwicklungsdatensatz (nur ein Vierzigstel).

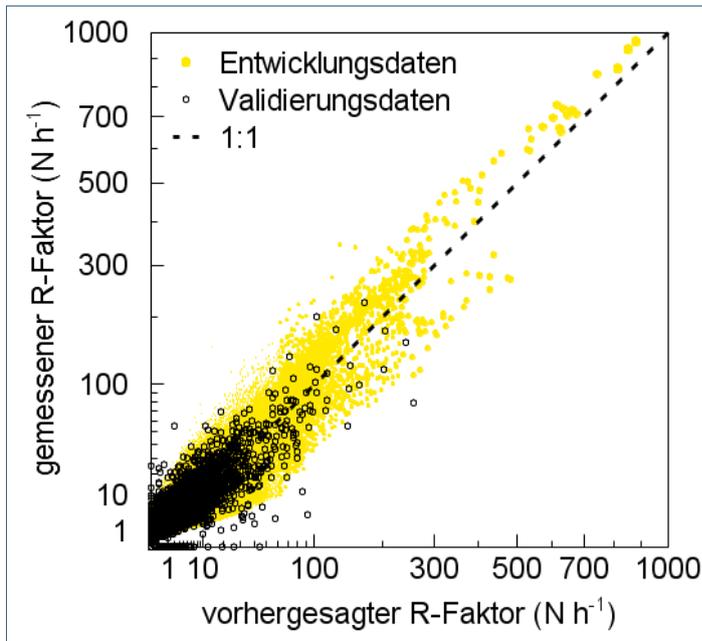


Abb. 22:
Vergleich der mit der Transferfunktion berechneten Regenerosivität mit der aus Radardaten in 5-minütiger Auflösung abgeleiteten Regenerosivität ($n = 605.738$, Entwicklungsdatensatz) und mit Regenerosivitäten aus Ombrometermessungen ($n = 15.133$, Validierungsdatensatz).

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die regionale Variation des aus Radar-Niederschlagsmessungen ermittelten R-Faktors für das Zentraljahr 2010,5 ist in der linken Tafel von Abb. 23 dargestellt. Der R-Faktor aus Klimaprojektionen für die Gegenwart (2001 bis 2020; Zentraljahr 2010,5) ist in der rechten Tafel von Abb. 23 dargestellt. Beide Karten gelten also für ein identisches Zentraljahr und sind daher direkt vergleichbar. Die räumlichen Muster der beiden Karten stimmen weitgehend überein, wenn man davon absieht, dass mit der Auflösung der Radarmessungen von 1 km^2 eine sehr viel größere Detailliertheit erreicht werden kann als mit der Auflösung der Klimaprojektionen. Auch der Wertebereich (siehe Legende) ist in beiden Fällen identisch trotz der völlig unterschiedlichen Weise, auf die die Daten erzeugt worden sind. Nur in Nordbayern sind die aus Klimaprojektionen berechneten R-Faktoren geringfügig geringer als die aus Radarmessungen abgeleiteten R-Faktoren. Durch einen geringfügigen zusätzlichen Skalierungsfaktor hätte sicher noch eine bessere Übereinstimmung erzielt werden können, wodurch aber die Unabhängigkeit der beiden Karten verloren gegangen wäre. Daher wurde darauf verzichtet. Dagegen sprach auch, dass selbst die aus Radarmessungen abgeleitete Karte trotz der außerordentlich hohen Zahl an eingegangenen Messungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, die vor allem auf der mehr als drei Zehnerpotenzen umfassenden Variabilität der Einzelregenerosivitäten beruht. Selbst für die deutschlandweiten Mittelwerte der aus Niederschlagsmessungen berechneten R-Faktoren war daher die Variation zwischen verschiedenen Jahren groß (Abb. 24). Für das einzelne Pixel betrug das mittlere 95%-Vertrauensintervall vor der geostatistischen Glättung $34 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Daraus ergibt sich eine statistische Unsicherheit der R-Karte, die etwa einer Klassenbreite entspricht. Das heißt, dass die in der linken Karte von Abb. 23 gezeigten Klassen auch um eine Klasse höher oder niedriger sein könnten. Gleiches gilt für die aus Klimaprojektionen abgeleitete rechte Karte. Trotz der Verwendung von 16 Klimaprojektionen ist der Mittelwert wegen der enormen Streuung zwischen den Jahren (nicht zwischen den Klimaprojektionen!) ebenfalls relativ unsicher (vgl. dazu auch Abb. 23 und die Erläuterungen dazu). Es ist wichtig festzuhalten, dass diese Unsicherheit nicht methodisch bedingt ist, sondern auf der natürlichen Variabilität beruht und nur durch sehr viel mehr ausgewertete Jahre verringert werden kann. Dennoch kann sehr zuverlässig geschlussfolgert werden, dass das gewählte Verfahren, beginnend mit den Klimaprojektionen bis hin zur Ableitung der R-Faktoren aus Tagesniederschlägen und Tagestemperaturen ein hinreichend genaues Verfahren darstellt, um die Auswirkung von Klima-

änderungen beurteilen zu können. Außerdem sind Projektionsläufe von Klimamodellen nicht darauf ausgerichtet, Absolutwerte korrekt wiederzugeben, sondern dienen zur Bestimmung von Trends.

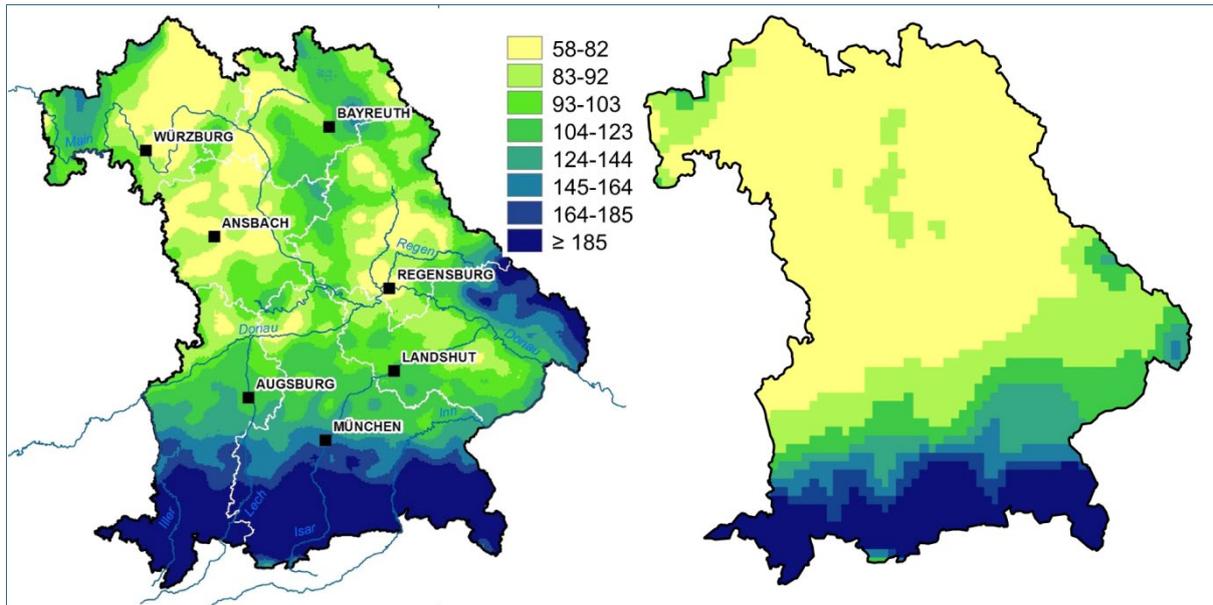


Abb. 23: Linke Karte: Aus Radardaten (2001 bis 2017; Zentraljahr 2009) ermittelter R-Faktor mit einer Auflösung von 1 km² (aus(Auerswald et al. 2019a) der nach (Auerswald et al. 2019b) für das Zentraljahr 2010,5 angepasst wurde (Anpassungsfaktor: 1,026). Rechte Karte: Aus 16 Klimaprojektionen berechnete Regenerosivität im Mittel der Jahre 2001 bis 2020 (Zentraljahr 2010,5). Die in drei verschiedenen Klimaprojektionsrastern vorliegenden Daten wurden geostatistisch auf ein gemeinsames Raster interpoliert und anschließend gemittelt.

Für die Darstellung der Änderung über die Zeit wurden die R-Faktoren relativ zum Mittelwert der Gegenwart (Zentraljahr 2010,5) angegeben, was die Änderungen deutlicher macht. Dabei zeigt sich, dass der R-Faktor deutlich über den Projektionszeitraum zunimmt (Abb. 24). Mit der Zeit wird die Zunahme immer stärker. Am Ende des Projektionszeitraums (2050) liegt die Regenerosivität 2,3-fach so hoch wie zu Beginn des Referenzzeitraums (1971). Damit werden sich, unter sonst gleichen Verhältnissen, auch die Bodenabträge gegenüber der Vergangenheit etwa verdoppeln.

Der gleiche Anstieg zeigt sich auch bei den aus Niederschlagsmessungen bestimmten R-Faktoren (schwarze Punkte in Abb. 24). Gegenüber 1950 bis 1970, dem Zeitraum aus dem die meisten von ROGLER UND SCHWERTMANN (1981) verwendeten Daten der bis 2018 eingesetzten R-Faktorenkarte von Bayern stammen, hat sich der R-Faktor etwa verdoppelt. Bemerkenswerterweise beschreibt die Regression der aus Klimadaten bestimmten R-Faktoren (braune Linie in Abb. 24), selbst wenn man sie über 30 Jahre in die Vergangenheit extrapoliert, auch die aus Messungen abgeleiteten R-Faktoren vor 1970. Dies zeigt zum einen, dass die Regression robust ist, und es zeigt noch stärker als der Vergleich der beiden Karten in Abb. 23, dass die Kombination der Klimaprojektionen mit der hier verwendeten Transferfunktion zu quantitativ plausiblen Ergebnissen führt.

Die einzelnen Jahreswerte der Regenerosivität einzelner Projektionen streuen relativ stark (Abb. 24). Dies ist aber keine Unsicherheit der Projektion, sondern spiegelt die natürliche Variabilität zwischen Jahren wieder, die sich auch in Messdaten findet. So variieren die Messwerte (schwarze Punkte in Abb. 24) praktisch ähnlich stark, obwohl sie die Mittelwerte aus mindestens 50 Stationsjahren darstellen. Soweit sie aus Radarmessungen ermittelt sind, wurden sogar 452503 Pixeljahre pro Punkt gemittelt. Diese große natürliche Variabilität zwischen den Jahren, kann leicht zu Fehlbeurteilungen führen,

weil immer wieder „normale“ Jahre vorkommen, die dann von Extremjahren gefolgt werden. Solche Extremjahre sollten nicht als „Ausreißer“ missinterpretiert werden.

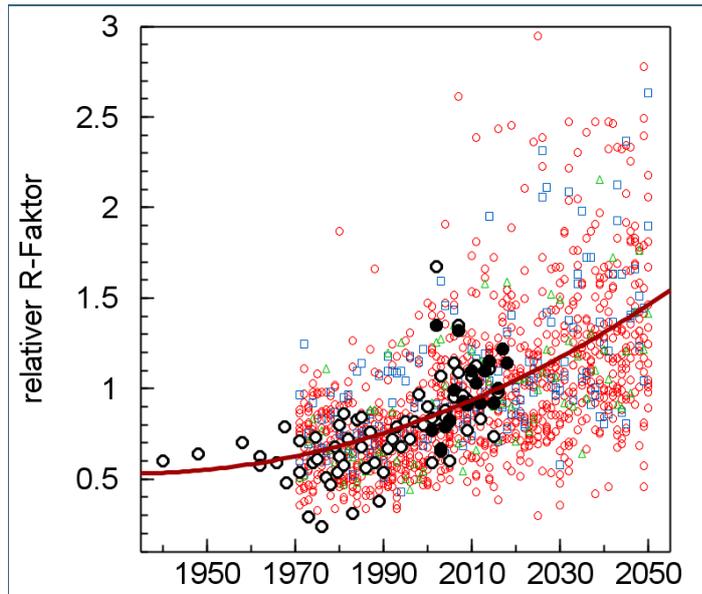


Abb. 24: Veränderung des relativen R-Faktors zwischen 1971 und 2050 für 13 Projektionen basierend auf dem EUR-11-Gitter (rote Kreise). Zum Vergleich sind die Projektionen, die das Remo-Gitter (blaue Quadrate, 2 Projektionen) und die Projektion, die das Aladin-Gitter verwenden (grüne Dreiecke) mit eingezeichnet. Die braune Linie ist eine quadratische Regression. Die schwarzen Kreise sind aus Niederschlagsmessungen bestimmt (aus AUERSWALD ET AL. 2019b). Jedem Punkt liegen bei Ombrometermessungen (weiß gefüllte Kreise) mindestens 50 Stationsmessjahre (insgesamt 5515 Stationsjahre) und bei Radarmessungen (schwarze gefüllte Kreise) 452503 Pixeljahre (insgesamt 8,2 Millionen Pixeljahre) zugrunde. Diese Werte gingen nicht mit in die Regression (braune Linie) ein.

Die Regression in Abb. 24 zeigt, dass die Erosivität gegenwärtig um etwa 10 % in sechs Jahren ansteigt. Um dies zu kompensieren, müssten die Felder alle sechs Jahre um 20 % verkleinert werden, was kaum umsetzbar erscheint. Auch durch Bewirtschaftungsmaßnahmen ist eine Kompensation des klimabedingten Anstiegs nur mit erheblichen Anstrengungen zu erzielen, da nicht eine einzelne Kultur betroffen ist, sondern auf allen Flächen, ganz unabhängig von der Kultur, sei es Wald, Wein oder Weizen, der Bodenabtrag um den gleichen Faktor zunimmt und die Bewirtschaftung erosionsmindernder gestaltet werden müsste. Bei den Problemkulturen, wie dem beispielhaft genannten Wein, geht dies meist noch deutlich leichter als beim Weizen oder gar beim Wald, denn je besser ein Boden bereits bedeckt ist, umso schwieriger wird es, zusätzliche Bedeckung zu schaffen, und umso weniger kann man mit zusätzlicher Bedeckung erreichen.

Das räumliche Muster der Regenerosivität ändert sich über den Projektionszeitraum nicht. Korreliert man nämlich die R-Faktoren der einzelnen Rasterzellen im Referenzzeitraum mit den R-Faktoren der nahen Zukunft, so ergibt sich über alle Projektionen eine bemerkenswert enge, lineare Korrelation (Abb. 25), die nur durch Extremjahre geschwächt wird. Diese Extremjahre führen aber nicht zu einem veränderten Raummuster, sondern sie treten nur zufällig im irgendwo im Projektionsgebiet auf. Die gleiche Erkenntnis ergibt sich auch aus R-Faktoren, die aus Niederschlagsmessungen bestimmt worden waren (Auerswald et al. 2019b). Auch da gab es zwischen den aus den 1960-er bis 1980-er Jahren bestimmten Mustern und den aktuellen Mustern keine über die Streuung hinausgehende Veränderung.

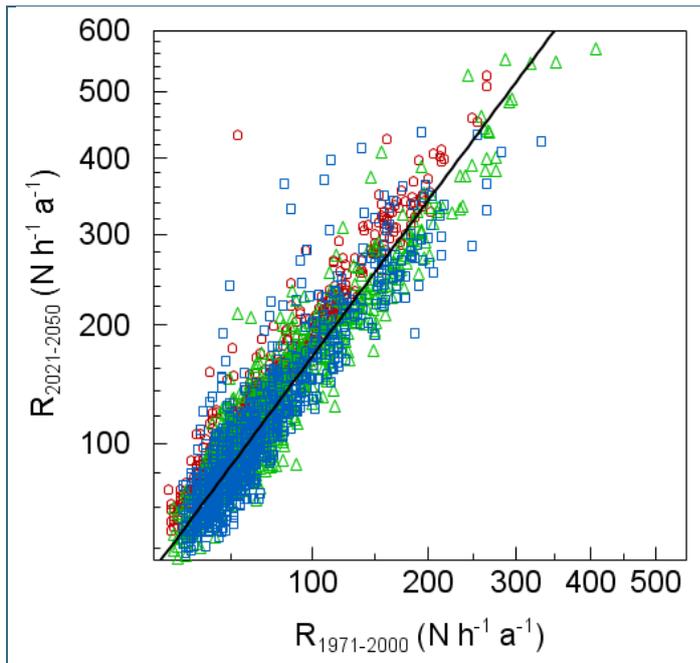


Abb. 25:
Veränderung der projizierten Regenerosivität zwischen dem Zeitraum 1971 bis 2000 und dem Zeitraum 2021 bis 2050; rote Kreise zeigen alle Rasterzellen des EUR-11-Gitters (jeweils Mittelwert aus 13 Projektionen), blaue Quadrate alle Rasterzellen des Remo-Gitters (jeweils Mittelwert aus 2 Projektionen) und grüne Dreiecke alle Rasterzellen des Aladin-Gitters (eine Projektion). Die Linie ist eine lineare Regression über alle Punkte ($y = 1,72 x$; $r^2 = 0,7827$).

Die Regenerosivität wird sich bis 2050 gegenüber dem Referenzzeitraum etwa verdoppeln. Gegenüber dem Zeitraum vor 1970 verdreifacht sie sich sogar (Abb. 25). Damit werden sich auch die Bodenabträge verdoppeln bzw. verdreifachen, sofern keine wesentlichen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Es ist nicht zu erwarten, dass solche Gegenmaßnahmen freiwillig implementiert werden, da die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass Landwirte Bodenerosion in ihren Bewirtschaftungsentscheidungen nicht berücksichtigen (LABO 2017; Auerswald et al. 2018). Dies zeigt sich auch daran, dass die Landschaft durch Zunahme der Feldgrößen und Zunahme besonders erosionsfördernder Reihenkulturen (besonders Mais und Soja) in den vergangenen Jahrzehnten immer erosionsanfälliger bewirtschaftet wurde, obwohl gleichzeitig die Regenerosivität sich bereits verdoppelt hat gegenüber der Zeit vor 1970. Allerdings sind die Zunahmen der Regenerosivität schleichend, so dass sie im Grunde nicht wahrgenommen werden können. Es kommt daher den staatlichen Stellen eine besondere Verantwortung hinsichtlich Aufklärung, Entwicklung von erosionsmindernden Bewirtschaftungsstrategien und letztlich Anwendung des Ordnungsrechts zu.

Die Auswertung historischer Daten wie auch der Klimaprojektionen zeigte, dass die Zunahme der Regenerosivität kein plötzliches, in der Zukunft zu erwartendes Ereignis ist. Vielmehr hat die Zunahme bereits in der Vergangenheit begonnen. Allerdings wird sich unter dem angenommenen Klimaszenario die Geschwindigkeit dieser Zunahme noch weiter beschleunigen.

Kernaussage

- Eine Erhöhung der Regenerosivität bedingt eine Zunahme des Bodenabtrags im gleichen Maß.
- Die Regenerosivität wird auf Tagesbasis für ein Ensemble von 16 Klimaprojektionen für die Periode 1971 bis 2050 mit Hilfe einer Transferfunktion berechnet. Als Datenbasis für die Transferfunktion zur Berechnung der Einzelregenerosivität aus Daten der Klimaprojektionen standen R-Faktoren von mehr als 600 000 erosiven Regen (aus Radarniederschlagsmessungen) zur Verfügung.
- Das räumliche Muster der Regenerosivität ändert sich über den betrachteten Zeitraum nicht.
- Die Regenerosivität hat sich gegenüber den bis 2018 verwendeten Planungsgrundlagen aus der Zeit vor 1970 bereits verdoppelt (ca. 8 Mio. gemessene Jahresmittelwerte) und wird weiter stark ansteigen (16 Klimaprojektionen).
- Die aus Klimaprojektionen berechneten Werte, räumlichen Muster und Trends stimmen mit den aus Messungen abgeleiteten Werten, räumlichen Mustern und Trends überein.

5.3 Wald- und Forstwirtschaft

Wald- und Forstwirtschaft sind insbesondere aufgrund der langen Wachstums- beziehungsweise Produktionszeiten stark vom Klimawandel betroffen. Da Bäume selbst in intensiv bewirtschafteten Wäldern mindestens 80 Jahre alt werden, existiert ein nicht zu unterschätzendes Anpassungsproblem. Gleichzeitig trägt die Forstwirtschaft kaum zu den Ursachen des Klimawandels bei, sondern leistet durch die Speicherung von Kohlenstoff in Wäldern und Holzprodukten einen großen Beitrag zum Klimaschutz. Besonders dort, wo sich Wälder bereits heute an ihrer Wärme- oder Trockenheitsgrenze befinden, sind starke Auswirkungen zu erwarten. Dies betrifft vor allem die in Mitteleuropa weit verbreiteten Baumarten nordischer oder alpiner Herkunft, da sie anfällig für erhöhte Temperaturen und veränderte Niederschläge sind. Die Forstwirtschaft begegnet dem Klimawandel vor allem mit Maßnahmen des Waldumbaus, bei dem gefährdete Baumarten durch besser angepasste Arten ersetzt werden. Im Zuge des Waldumbaus können die Wälder an einen Temperaturanstieg bis zu 2 °C in den nächsten 100 Jahren angepasst werden. Ein höheres Ausmaß und Tempo des Klimawandels würde die Anpassungsfähigkeit der Wälder auch bei erheblichen Anstrengungen zum klimagerechten Waldumbau übersteigen (StMUV 2015).

Wälder sind multifunktionale Ökosysteme. Neben ihrem wirtschaftlichen Nutzen schützen sie vor Erosion, Lawinen, Immissionen und Lärm (Schutzfunktion), haben einen positiven Einfluss auf den Wasserhaushalt und das Lokalklima (Regulationsfunktion) und dienen der Bevölkerung als Rückzugs- und Erholungsort (Erholungsfunktion). Vor allem Mischwälder sind eines der artenreichsten Ökosysteme Mitteleuropas und haben damit eine zentrale Bedeutung für die Biodiversität und den Naturschutz (Buth et al. 2015).

Die Forstwirtschaft ist eng mit dem Klima und den Standortbedingungen verbunden. Dementsprechend tiefgreifend sind die Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld. Höhere Temperaturen bewirken zuerst eine verlängerte Vegetationszeit, was im Zusammenhang mit einem CO₂-Düngeeffekt einen potenziellen jährlichen Holzzuwachs bedeuten kann. Limitierend wirkt hier das Wasserangebot, was sich durch die erhöhte Evapotranspiration im Sommer verringern kann. Höhere Temperaturen in Verbindung mit Sommertrockenheit, wie sie auch für Bayern projiziert werden, erhöhen das Risiko von Hitze- und Trockenstressschäden. Letztere sollten mit der Klimawirkung „Trockenheit auf Waldflächen“ (Kap. 5.3.1) thematisiert werden. Zugleich steigt bei trocken-heißen Randbedingungen die Waldbrandgefahr, die mit der entsprechenden Klimawirkung untersucht werden sollte (Kap. 5.3.2).

Die mögliche Zunahme von Wetterextremen im Zuge des Klimawandels beinhaltet auch eine Veränderung der Häufigkeit des Auftretens und der Intensität von Stürmen. Im Unterschied zu schleichenen Klimaveränderungen wie einer Temperaturerhöhung verursachen Stürme häufig große Schäden in kurzer Zeit, die gravierende Folgen haben können (UBA 2013). Die Klimawirkung Windwurf war deshalb zur Bearbeitung vorgesehen. Eine Prüfung der zugrundeliegenden und für die Bearbeitung benötigten Projektionsdaten zur Windgeschwindigkeit ergab jedoch, dass diese Daten häufig unplausibel und damit nicht belastbar sind. Daher konnte die Klimawirkung „Windwurf“ nicht bearbeitet werden.

Die allmähliche Erhöhung der Temperaturen in Mitteleuropa und Bayern bereitet den Weg für neue, einwandernde Schadorganismen auch in Forstökosystemen und ermöglicht die bessere Überdauerung heimischer Schädlinge (unter anderem Borkenkäfer, Eichenprozessionsspinner). Trocken- und Hitzestress schwächen den Wald und begünstigen so indirekt auch den Befall durch Schadorganismen und die Ausbreitung von Baumkrankheiten (unter anderem Eschentriebsterben, Eichenmehltau). Der prominenteste Schädlingsvertreter – der Borkenkäfer – wird in der entsprechenden Klimawirkung (Kap. 5.3.3) thematisiert.

Das gemeinsame Interesse der Landesanstalt für Forst- und Waldwirtschaft (LWF) und des LfU, Klimawirkungen auf die Forstwirtschaft abzubilden, konnte aufgrund des engen zeitlichen Rahmens und der z. T. sehr komplexen Umsetzungsmethoden im Rahmen des Vorhabens nicht realisiert werden. Wichtige Fragestellungen und thematische Schwerpunkte für eine Kooperation zwischen dem LfU und der LWF zu Klimawirkungen in der Forstwirtschaft und damit für eine bayernweit konsistente, praxisrelevante Anwendung von Klimaprojektionen wurden vor allem in den Bereichen Schädlingsbefallrisiko, Waldbrandgefährdung und Trockenstress identifiziert. Diese Fragestellungen sind für die Waldwirtschaft im Hinblick auf die möglichen Folgen eines Klimawandels hochaktuell. Für ihre sachgerechte Bearbeitung und Interpretation der erzielten Ergebnisse sind neben komplexen Klimaprojektionsdaten eine Anpassung und Weiterentwicklung bestehender forstlicher Impactmodelle und damit die Zusammenführung unterschiedlichen Expertenwissens erforderlich. Eine enge Kooperation der betroffenen Landesbehörden ist daher angezeigt, um Synergien zu nutzen.

5.3.1 Trockenheit auf Waldflächen

Hintergrund

Künftig ist mit allgemein steigenden Temperaturen und zunehmender sommerlicher Trockenheit zu rechnen. Trockenstress und Hitze verringern die Wuchsleistung, Zuwachsraten, Stabilität und Vitalität der Bäume und begünstigen indirekt einen Schädlings- beziehungsweise Krankheitsbefall. Die Fichte, mit 42 % die häufigste Waldbaumart Bayerns, ist besonders anfällig gegenüber Trockenheit und Borkenkäferbefall. Bereits gegenwärtig lassen sich Verschiebungen der Baumartenverteilung und Waldstruktur infolge klimatischer Veränderungen beobachten. Betroffen sind insbesondere an kühl-feuchte Standorte angepasste Arten, die mehr und mehr durch wärmeliebende und trockenheitstolerante Arten verdrängt werden. Im Gegensatz zu Fichte und Kiefer werden für die Buche potenzielle Flächenzuwächse in den Mittelgebirgslagen gesehen, für die Eiche ein Anstieg der Wachstumsleistung in den wärmeren Hügelländern (StMUV 2016).

Mit sich ändernden Umweltbedingungen und der Anpassung daran haben sich die Akteure vorwiegend naturzentrierter Handlungsfelder wie Land- und Forstwirtschaft oder auch der Naturschutz seit jeher beschäftigt. Es verwundert demnach nicht, dass die Forstwirtschaft seit langem an forstlichen Anpassungsstrategien arbeitet, entsprechende Werkzeuge für die Waldbesitzer bereitstellt und fortlaufende Forschung betreibt. Um tragfähige Planungsentscheidungen treffen zu können, wurde an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) im Rahmen mehrerer Forschungspro-

jekte des Klimaprogramms 2020 das Bayerische Standortinformationssystem (BaSIS) entwickelt (StMUV 2015). Ein zentrales Element dieses Systems sind die Anbaurisikokarten, die für 21 Baumarten und zwei Zeiträume (1971–2000, 2071–2100) räumlich detaillierte Informationen zum Klimarisiko bieten (Kölling 2007, Kölling et al. 2009, Falk et al. 2013). Ferner wurde an der LWF ein Forschungsprojekt zu seltenen heimischen und nicht-heimischen Baumarten im Klimawandel (2016-2018) durchgeführt (LWF 2017a). Hierbei wurden für insgesamt 11 seltene heimische und fremdländische, trockenheitstolerante Baumarten Anbaurisikokarten erarbeitet. Diese stehen den Forstlichen Praktikern seit Juni 2019 über das Bayerische Standortinformationssystem BaSIS zur Verfügung. In einem anderen, bundesweiten Verbundprojekt (2016-2019) werden die Mortalitätsrisiken und das Wachstum der Waldbestände bei steigenden Temperaturen und geringeren Niederschlägen allgemein quantifiziert und monetär bewertet (LWF 2017b).

Vorschlag für die Umsetzung

Besonders empfindlich für Trockenstress sind allgemein Standorte, die bereits heute zu trocken sind und für die kritische Zukunftsprojektionen vorliegen sowie jene mit wenig angepassten Beständen (StMUV 2016). Aus dieser Aussage leiten sich bereits die relevanten Indikatoren zur Berechnung der Klimawirkung ab: das derzeitige beziehungsweise künftige Klima, die Standortverhältnisse und der Waldbestand beziehungsweise dessen Baumarten am Standort.

In der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes wurde als Indikator für die Nutzfunktion ein vom Thünen-Institut entwickelter Indikator verwendet, der die für die Holzproduktion notwendige Wasserversorgung an einem Standort anhand der effektiven Wasserbilanz und der Verbreitung der Baumarten bewertet (Buth et al. 2015). Der für die UBA-Studie aufgrund der alten SRES-Szenarien ermittelte Indikator konnte im Rahmen der vorliegenden Pilotstudie nicht für das hier verwendete aktuelle RCP8.5-Szenario neu berechnet werden.

Die oben bereits erwähnten Anbaurisikokarten der LWF stellen einen weiteren Ansatz der Darstellung dar. Diese beruhen auf Artverbreitungsmodellen für Waldbaumarten, die die heutigen und künftigen Verbreitungsgebiete der Baumart anhand der Durchschnittstemperatur in der Vegetationszeit, mittleren Niederschläge in der Vegetationszeit sowie der minimalen Durchschnittstemperatur im Winter charakterisieren. Daraus wird ersichtlich, welche Baumart unter veränderten Klimabedingungen an ihre klimatischen Grenzen stößt. In der aktuellen Version wurde der Ansatz um Boden- und Reliefparameter erweitert und Anbaurisikokarten für 21 Baumarten vorgelegt. Die Karten sind operationell und werden im Standortinformationssystem BaSIS vorgehalten. Da die für die Karten verwendeten Klimainformationen jedoch auf Modellierungen mit SRES-Szenarien beruhen und eine Aktualisierung mit RCP-Szenarien zum Zeitpunkt des Vorhabens noch nicht umgesetzt war, konnten sie im Projekt nicht genutzt werden.

Ein alternativer, proxybasierter Berechnungsansatz könnte wie folgt gestaltet werden. Der Klimaeinfluss wird durch die klimatische Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Mai–September) dargestellt. Hier können die neuesten, vom LfU bereitgestellten Projektionen auf Basis der RCP-Szenarien genutzt werden. Auf Seite der Sensitivität finden sich einerseits die Standorteigenschaften. Hierbei ist für die Klimawirkung die Wasserversorgung des Standortes zentral. Diese Information kann dem BaSIS in Form des Attributs „Terrestrisches Bodenwasser“ entnommen werden. Andererseits muss der Bestand aufgrund seiner Langlebigkeit in die Sensitivität einbezogen werden. Hierfür kann auf die Klima-Arten-Matrix für Waldbäume (KLAM-Wald) von Roloff & Grundmann (2008) zurückgegriffen werden. Das Bewertungssystem liefert eine Einschätzung für 47 Waldbaumarten zur Verwendung unter Bedingungen des Klimawandels. Dabei liegt das Augenmerk auf der Trockenstresstoleranz und der Frostresistenz. Eine vierstufige Benotung erfolgt für jede Baumart für vier Standortbereiche unterschiedlicher Wasserversorgung. Die beiden Sensitivitätsindikatoren Standort und Baumart-

teneignung werden additiv verknüpft und nachfolgend mit dem Klimaeinfluss multiplikativ zur Klimawirkung kombiniert.

Nach Abstimmungen zwischen LfU und LWF wurde die Klimawirkung im Rahmen der Pilotstudie nicht weiter betrachtet. Der lange Planungshorizont in der Forstwirtschaft verlangt nach stabilen Datengrundlagen über längere Zeiträume, die mit den Anbauriskokarten der LWF sichergestellt werden. Zudem wurde diese Kartengrundlage erst 2013/14 aktualisiert. Von den beiden Behörden wird jedoch für ein Folgeprojekt in Erwägung gezogen, das Bodenwasserhaushaltmodell der LWF mit RCP-Projektionsdaten zu betreiben, um eine aktualisierte Arbeitsgrundlage zu erstellen. Hierzu müssen die anwendbaren Klimaparameter sowie die zeitliche Auflösung der Projektionsdaten abgestimmt werden. Es wird die Berücksichtigung eines möglichst großen Ensembles aus Klimaprojektionen angestrebt.

5.3.2 Waldbrandgefahr (nicht bearbeitet/Projektidee)

Hintergrund

Zunehmende und langanhaltende Trockenphasen bei gleichzeitig hohen sommerlichen Temperaturen erhöhen das Waldbrandrisiko. Waldbrand befördernde Klimabedingungen werden nach aktuellen Projektionen auch im Freistaat künftig zunehmen. Zwar gilt in Bayern menschliches Handeln als Hauptursache für Waldbrände, jedoch begünstigen entsprechende klimatische Verhältnisse das Waldbrandrisiko. Im Bergland verstärkt die geringere Zugänglichkeit zudem die Ausbreitungstendenz von Waldbränden (StMUV 2016).

Waldbrände sind gegenwärtig in Bayern im Vergleich zu anderen Bundesländern relativ selten. Besonders anfällig für Waldbrände sind junge Monokulturen von Kiefer und Fichte auf trockenen Standorten mit starker Vergrasung. Waldbrände entstehen in aller Regel als Bodenfeuer und greifen über den Stamm auf die Kronen über. Die entstehenden Schäden fallen je nach Intensität, Art und Dauer des Feuers unterschiedlich stark aus. Kann der Brand schnell eingedämmt und ein Übergreifen auf die Kronen verhindert werden, können sich die Bäume regenerieren und die wirtschaftlichen Schäden bleiben gering. In jungen und dichten Beständen sind dagegen schnell existenzgefährdende Waldbrandschäden am Bestand möglich. Da vor allem reine Nadelholzbestände gefährdet sind, bieten standortangepasste Mischbestände den besten Schutz vor Waldbrand. Weiterhin bieten sich Laubholzriegel an, um das Übergreifen des Feuers zu verzögern. Ebenso helfen Brandschutzstreifen, Wege oder Linien, die von Bewuchs freigehalten werden, bei der räumlichen Begrenzung von Waldbränden (StMELF 2017).

Ein jüngeres Forschungsprojekt führte die TU München mit 14 weiteren Forschungseinrichtungen unter dem Titel ALP FFIRS (Alpine Forest Fire Warning System) in der Alpenregion durch. Im Projekt wurde die rezente und zukünftige Waldbrandgefahr unter Klimawandelbedingungen analysiert, ein gemeinsames Warnsystem installiert und die länderübergreifende Zusammenarbeit in der Brandbekämpfung vorangetrieben. Dabei konnte unter anderem ein Anstieg der Tage mit besonders hoher Waldbrandgefahr in den Nordalpen um acht Tage infolge des rezenten Klimawandels im Zeitraum 1951 bis 2010 nachgewiesen werden. Für die Zukunft konnte jedoch nördlich der Alpen kein eindeutiger Trend identifiziert werden (StMUV 2015). Darüber hinaus wurde an der TU München das Projekt KLIP 8 durchgeführt, welches eine Abschätzung der bisherigen und zukünftigen Waldbrandgefährdung im gesamten Freistaat zum Ziel hatte. Die Untersuchung konnte zeigen, dass der rezente Klimawandel einen signifikanten Einfluss auf die Waldbrandgefährdung hat, wobei auch hier die Trends in den Südalpen stärker ausgeprägt sind als die in den nördlichen Alpen (Schunk et al. 2009; Schunk 2016).

Vorschlag für die Umsetzung

Da die Ergebnisse des KLIP 8-Projektes zur Abschätzung der bisherigen und zukünftigen Waldbrandgefährdung in Bayern mittels des M68-Waldbrandindex noch auf den alten SRES-Szenarien beruhen, konnten sie in der Pilotstudie nicht verwendet werden. In der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes wurde für die Darstellung der Klimawirkung Waldbrandrisiko der Waldbrandgefährdungsindex (WBI) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Der WBI orientiert sich am kanadischen Fire Weather Index (FWI) und integriert zusätzlich Elemente der deutschen Baumgartner- und M68-Indizes. Der WBI berücksichtigt den Wassergehalt der Streuauflage, die Laufgeschwindigkeit der Feuerfront und den Bodenwassergehalt (Buth et al. 2015).

Die Ergebnisse des WBI-Wirkmodells standen für die Pilotstudie nicht zur Verfügung, daher wurde eine Berechnung über Proxyindikatoren angestrebt. Da Waldbrände klimaseitig vor allem durch Trockenperioden bei gleichzeitig hohen Lufttemperaturen begünstigt werden, wurden zwei Indikatoren für den Klimaeinfluss vorgeschlagen. Der erste Indikator wird durch die mittlere jährliche Anzahl Heißer Tage verkörpert, der zweite Indikator durch die mittlere jährliche Anzahl an Trockenperioden in der forstlichen Vegetationszeit (Mai–September). Für die Sensitivität wurden ebenfalls zwei Indikatoren in Betracht gezogen. Einerseits kann der Indikator „Terrestrisches Bodenwasser“ aus dem Standortinformationssystem BaSIS die Wasserversorgung des Standortes charakterisieren. Der Bodenwassergehalt dient als Proxy für das zur Verfügung stehende Brennmaterialangebot: unter Wasserstressbedingungen ist anzunehmen, dass mehr zündanfällige Vegetation vorhanden ist als bei ausreichender Wasserversorgung (DWD 2017a). Als zweiter Indikator kann die Kombination aus absoluter und relativer Waldfläche die Sensitivität eines Landkreises oder einer kreisfreien Stadt zusätzlich charakterisieren. Die zwei Indikatoren des Klimaeinflusses und der Sensitivität würden jeweils additiv verknüpft und nachfolgend wie gewohnt Klimaeinfluss und Sensitivität miteinander multipliziert werden, um die Klimawirkung darzustellen.

Die LWF behandelt das Thema Waldbrandrisiko derzeit rein gutachterlich. Deshalb wurde in Abstimmung mit dem LfU auf die weitere Betrachtung der Klimawirkung im Rahmen dieses Projektes verzichtet. Für die Zukunft ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem LfU und der LWF angedacht, welches im Ergebnis eine rasterbasierte Darstellung der Häufigkeit der beiden höchsten Waldbrandgefährdungsstufen für die nahe Zukunft (Auszählen der Aufttrittshäufigkeit für jede Zelle) mit einer Auflösung von 1 km x 1 km unter Einbeziehung des Alters von Waldbeständen (< 40a) anstrebt. Dazu soll der kanadische WBI für die Anwendung von Tageswerten modifiziert werden.

5.3.3 Borkenkäferbefallsrisiko (Projektidee)

Für die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Befall von Bäumen durch Borkenkäfer wurde im Rahmen der Zusammenarbeit von LWF und LfU zu den Klimawirkungskarten folgende Projektidee entwickelt.

Die LWF betreibt ein Borkenkäfermonitoring und erstellt auf dieser Grundlage bayernweite Befallsprognosen⁵. Diese Lageeinschätzungen berücksichtigen den kurzfristigen Witterungsverlauf und beziehen sich somit auf die unmittelbare Zukunft, sodass eine Aussage zur klimawandelbeeinflussten Betroffenheit auf einer größeren zeitlichen Skala aktuell nicht möglich ist.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Schädlingsgefährdung könnten durch die Erweiterung des Waldwachstumsmodells WEHAM⁶ (Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung) einge-

⁵ Siehe <http://www.fovqis.bayern.de/borki/>; zuletzt am 02.11.2017 aufgerufen

⁶ Ergebnisse auf <http://www.bwi.info/> veröffentlicht, zuletzt am 02.11.2017 aufgerufen

schätzt werden. Mithilfe des Modells wurde 2012 eine bundesweite Waldentwicklungsprojektion bis 2050 in einer Auflösung von 4 km x 4 km erarbeitet. Allerdings berücksichtigt das Modell in seiner aktuellen Version keine biotischen Einflussfaktoren der Bestandsentwicklung. Es bestehen jedoch Möglichkeiten, das Modell in dieser Hinsicht mithilfe von Klimaprojektionsdaten auszubauen. Als mögliche klimatische Leitwerte für ein erhöhtes Befallsrisiko Borkenkäfer kommen die Anzahl der Tage mit $T_{max} > 16,5^{\circ}\text{C}$ zwischen Mai und September oder Perioden wie z. B. Häufigkeit von mind. 3 aufeinanderfolgenden Tagen mit $T_{max} > 16,5^{\circ}\text{C}$ in Betracht. Diese Weiterentwicklungen könnte durch eine Kooperation von LWF und LfU angegangen werden.

5.4 Landwirtschaft

In Deutschland wird eine Fläche von 16,658 Millionen Hektar (Stand 2016) landwirtschaftlich genutzt. 70,6 % werden als Ackerland, 28,2 % als Dauergrünland und 1,2 % für Dauerkulturen genutzt (Destatis 2017). In Bayern beläuft sich die landwirtschaftlich genutzte Fläche laut der Agrarstrukturerhebung 2016 auf 3,125 Millionen Hektar, davon werden rund zwei Drittel (etwa 2,048 Mio. ha) als Ackerland genutzt und etwa ein Drittel entfällt auf Grünland. Den höchsten Anteil von landwirtschaftlich genutzter Fläche weisen Schwaben (53,6 %) und Niederbayern (51,5 %) auf, gefolgt von Mittelfranken und Oberbayern (StMELF 2018).

Deutschland deckt einen hohen Anteil seines Bedarfs an Lebensmitteln selbst durch heimische Erzeugung ab. Auch ist Deutschland hinter den USA und den Niederlanden der drittgrößte Agrarexporteur weltweit (BMEL 2016). Obwohl die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe kontinuierlich sinkt, steigt die Ertragsfähigkeit weiterhin an. Der Hektarertrag von Weizen ist beispielsweise in den letzten 60 Jahren von 32,7 Dezitonnen auf 76,4 Dezitonnen gestiegen (Statistica 2017). Der Ertragszuwachs lässt sich vor allem durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion (Düngereinsatz) und die verbesserten Anbaumethoden begründen (Schaller et al. 2007).

Latente Klimaveränderungen lassen sich durch angepasste Produktionsmaßnahmen gut bewältigen. In den letzten Jahren haben allerdings immer wieder Extremereignisse zu Ernterückgängen beziehungsweise Ernteaussfällen geführt. Trockenperioden und Hitzewellen sowie Hochwasser und Starkregen tragen insbesondere zu dieser Beeinträchtigung bei. Die erwartete Veränderung der Witterungsverhältnisse durch den Klimawandel beeinflusst die Wachstumsbedingungen und wirkt sich somit auf die Erträge des landwirtschaftlichen Ackerbaus aus. Ein projizierter Temperaturanstieg kann für das Pflanzenwachstum bei einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit förderlich sein und zu steigenden Ernteerträgen führen (StMUV 2015).

Verlängerte Vegetationsperioden sind insbesondere für den Pflanzenanbau und den Weinanbau von Vorteil. Für den Obstanbau kann hingegen durch einen frühzeitigen Vegetationsbeginn vor allem der Spätfrost eine potenzielle Gefahr darstellen. Hitzeperioden können Trockenschäden in den Wachstumsperioden sowie bei Feldfrüchten mit einem hohen Wasserbedarf verursachen. Bei einer Zunahme von Starkregenereignissen tritt vermehrt Bodenerosion auf, diese können sogar durch vorausgegangene Trockenperioden verstärkt werden (StMUV 2016). Im Folgenden werden die Klimawirkungen „Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn“ (LW-1-2017), „Landwirtschaftliche Schäden durch Trockenheit“ (LW-2-2017) und „Landwirtschaftliche Schäden durch Wechselfrost“ (LW-3-2017) für Bayern differenzierter dargestellt.

Hinweis:

Die im Folgenden vorgestellten Klimawirkungen im Bereich der Landwirtschaft wurden seitens LfU und des beauftragten Büros entwickelt und ausgearbeitet. Eine Abstimmung mit den Fachleuten aus der Landwirtschaft konnte nicht durchgeführt werden. Insofern haben die hier vorgelegten Ergebnisse

rein informativen Charakter. Sie zeigen aber auch das Potenzial für die Ableitung von Klimawirkungen in der Landwirtschaft auf.

5.4.1 LW-1-2017, Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn

Hintergrund

Der Verschiebung agrophänologischer Phasen infolge des Klimawandels wird im Handlungsfeld Landwirtschaft allgemein eine hohe Bedeutung – mit überwiegend positiven Effekten – eingeräumt (Buth et al. 2015; StMUV 2016).

Im bundesweiten Vergleich könnte zukünftig auch Bayern von einer deutlichen Verschiebung des Vegetationsbeginns betroffen sein, da sich die betroffenen Gebiete insbesondere in der Zukunft (Klimaperiode 2021–2050) bei einem starken Wandel auch auf Teile Bayerns erstrecken (Buth et al. 2015). Dies würde den Trend aus der Vergangenheit fortsetzen. Die signifikanten Trendverläufe über den Zeitraum 1961 bis 2010 zeigen für Bayern, dass der Frühling im Laufe dieser Zeitspanne um etwa drei Wochen, Sommer und Herbst um etwa zweieinhalb Wochen früher eingetreten sind. Da der Eintritt des Spätherbstes bzw. der Vegetationsruhe keine signifikante Veränderung zeigt, bedeuten diese Beobachtungen eine Verlängerung der Vegetationszeit. (LfU 2014; StMUV 2015).

Die Folgen einer zukünftig weiter verlängerten Vegetationsperiode sind ambivalent. Einerseits kann bei einzelnen Pflanzenarten sowohl mit höheren Erträgen als auch mit einer Ausweitung der Anbaugebiete gerechnet werden. Zum anderen wird für den Futteranbau und die Grünlandbewirtschaftung eine Anpassung der Beweidung erforderlich. Darüber hinaus muss auch zukünftig weiterhin mit Spätfrösten gerechnet werden, die aufgrund des früheren Vegetationsbeginns in Zukunft zu einer noch größeren Gefahr werden können (StMUV 2016).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch einen früheren Vegetationsbeginn. Dabei wird der Tag des Vegetationsbeginns mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche pro Kreis verknüpft.

Der klimatische Einfluss wurde durch den Tag des Vegetationsbeginns abgebildet, der den Jahrestag (Tag nach Jahresbeginn, Kalendertag) anzeigt, an dem die mittlere Lufttemperatur an sechs aufeinanderfolgenden Tagen ≥ 5 °C beträgt. Der Eingangsdatensatz wurde aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen gebildet und berücksichtigt für die Gegenwart den Zeitraum 1971 bis 2000 und für die Zukunft den Zeitraum 2021 bis 2050. Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.

In die Berechnung der Sensitivität floss der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche am Kreis (Acker- und Grünland) ein. Für die Gegenwart wurden die Werte aus dem Jahr 2009 verwendet, die auch Grundlage für die Modellierung der künftigen Siedlungsentwicklung im Rahmen des CC-LandStraD-Projekts waren. Aus den Modellergebnissen von CC-LandStraD wurde das Wachstumsszenario („Referenzszenario“) für das Jahr 2030 zur Abbildung der zukünftigen landwirtschaftlich genutzten Fläche herangezogen. Für die Zukunft wurde nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet, da das bei CC-LandStraD verwendete Stagnationsszenario bereits gegenwärtig von der tatsächlichen Entwicklung überholt worden ist und somit keine realistische Zukunftsprojektion mehr darstellte. Um die landwirtschaftlich genutzte Fläche abzubilden, wurden aus den CC-LandStraD-Daten die Layer Ackerland und Grünland verwendet.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die in dieser Klimawirkung abgebildete Verschiebung agrophänologischer Phasen und Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn zeigt für die Gegenwart noch keine größeren Differenzierungen zwischen den Landkreisen beziehungsweise kreisfreien Städten in Bayern. Zwar treten aufseiten der Sensitivität einige Landkreise deutlich gegenüber anderen hervor, durch die in ganz Bayern aber noch relativ spät auftretenden Tage des Vegetationsbeginns bleibt der Klimaeinfluss bei der Berechnung der Klimawirkung für die Gegenwart relativ gering (Abb. 26).

Für die Zukunft ähnelt das Szenario des schwachen Wandels dem Bild der Situation für die Gegenwart, was auch anhand der Veränderungskarte von der Gegenwart zur Zukunft abzulesen ist. Dort zeichnen sich nur geringe Veränderungen ab. Anders ist das Bild im Falle eines zukünftigen starken Wandels. Aufgrund des in ganz Bayern erheblich früher eintretenden Vegetationsbeginns und der somit höheren Spätfrostgefahr kommt es hier zu einer sehr deutlichen Zunahme der Klimawirkung. Die Klimawirkungskarte spiegelt im Wesentlichen das Bild der Sensitivitätskarte wider. Die stärkste Ausprägung der Klimawirkung zeigt sich im Bereich des Unterbayerischen Hügellands und der Isar-Inn-Schotterplatten. In diesen Bereichen sind schließlich auch die deutlichsten Veränderungen im Vergleich zur Gegenwart zu verzeichnen. Aber auch in den von Landwirtschaft stark geprägten Kreisen in Schwaben und Mittelfranken sind starke Auswirkungen des Klimawandels zu verzeichnen.

Dass der berechnete Vegetationsbeginn im Szenario des starken Wandels bereits im Januar auftritt, ist im Wesentlichen der Berechnungsvorschrift geschuldet. Diese verwendet keine zeitlichen Ausschlusskriterien für ein Vegetationsbeginn im Winter (z. B. Berücksichtigung von Werten erst ab dem Monat März) oder andere Parameter wie Wärmesummen (DWD 2017b). Die Analyse kann in dieser Hinsicht noch verfeinert werden. Allerdings verdeutlichen die Ergebnisse nach der hier verwendeten Definition des Vegetationsbeginns besonders die Spätfrostgefahr.

Kernaussage

- Der frühere Vegetationsbeginn führt zu einer Verschiebung der agrophänologischen Phasen und Wachstumsphasen, wodurch beispielsweise Obstbäume früher blühen als in der Vergangenheit und auch in der Zukunft noch deutlich früher blühen werden.
- Die Klimawirkung „Verschiebung agrophänologischer Phasen und Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren berechnet.
- Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung des Tages des Vegetationsbeginns als Klimaeinfluss mit dem Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) pro Kreis als Sensitivität.
- Da der Tag des Vegetationsbeginns in der Zukunft insbesondere beim starken Wandel in ganz Bayern deutlich früher im Jahr eintritt, sind die Bereiche mit den stärksten Klimawirkungen diejenigen mit ausgeprägter landwirtschaftlicher Nutzung auf der Linie Unterfranken – Schwaben sowie im Unterbayerischen Hügelland und den Isar-Inn-Schotterplatten.

Karten

Arbeitsstand: 13.10.2017

Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt LW-1-2017. Die Klimawirkung wurde nicht mit der LfL abgestimmt.

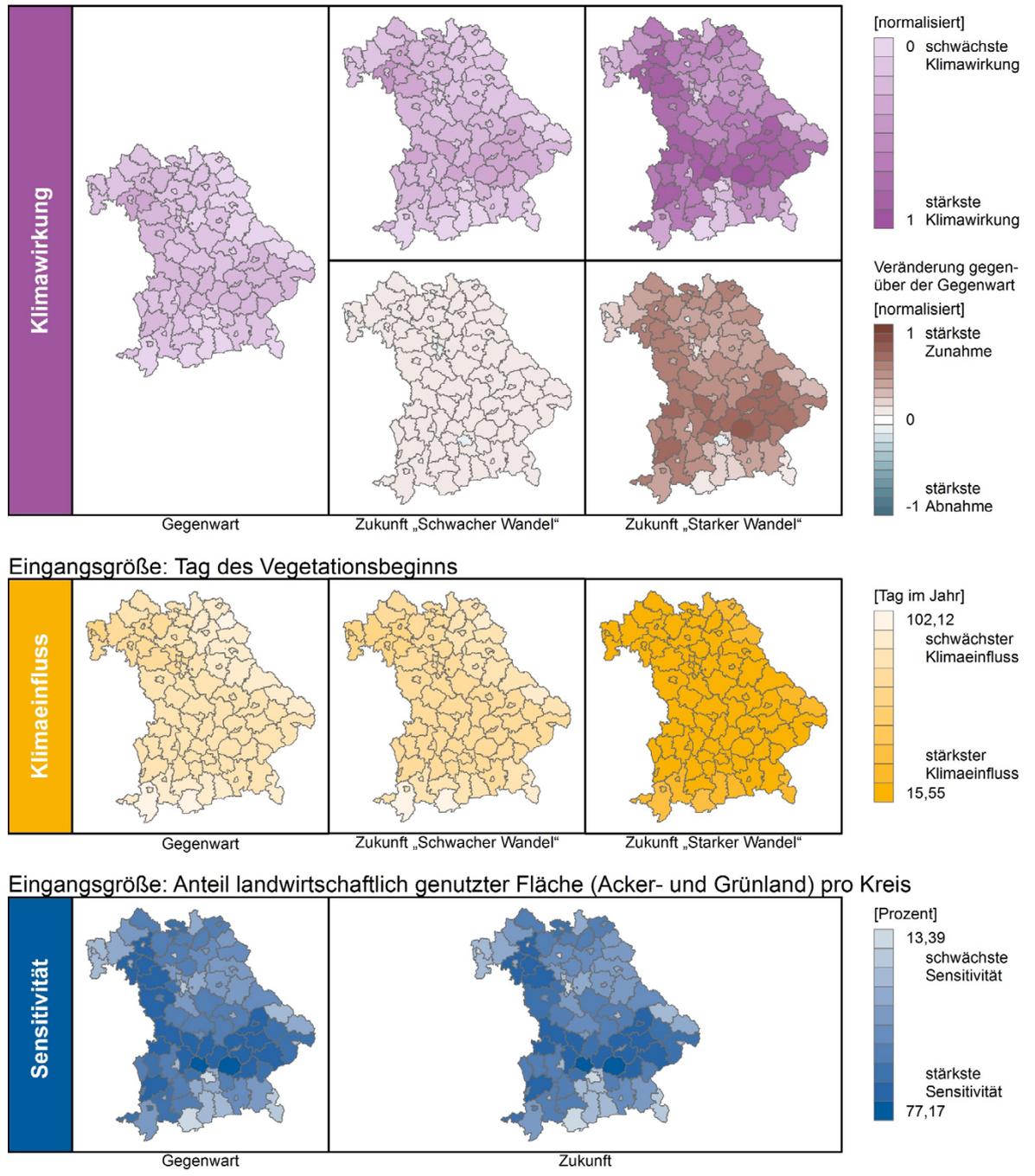


Abb. 26: Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn

5.4.2 LW-2-2017, Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit

Hintergrund

Der Grad der landwirtschaftlichen Schäden durch Trockenheit und Hitze hängt im Wesentlichen von den Anbauprodukten ab, solange man nicht durch Bewässerung gegensteuert. Bei einem zukünftigen Zunehmen von Hitzestress und Trockenschäden werden vor allem nicht bewässerte Sommerkulturen mit niedriger Hitzetoleranz (Sommergetreide, Zuckerrübe) betroffen sein, insbesondere, wenn sie auf leichten Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität angebaut werden. Dagegen können Sommerkulturen wie Mais, Sojabohne oder Sonnenblume, die höhere Temperaturen tolerieren, durch die zunehmenden Temperaturen ein höheres Ertragspotenzial bei ausreichender Wasserversorgung erzielen (Buth et al. 2015). Hitze- und Trockenstress sind besonders in den pflanzenempfindlichen Wachstumsphasen gefährlich, wie etwa bei der Blatt- und Blütenbildung, bei der Fruchtbildung oder Abreife (StMUV 2015). Während Hitze- und Trockenschäden ihre räumlichen Schwerpunkte im deutschlandweiten Vergleich gegenwärtig im Rheintal sowie in Ostdeutschland haben, könnte diese Klimawirkung in der nahen Zukunft beim Szenario des starken Wandels vor allem im Süden Deutschlands, und somit auch in Bayern, zunehmen (Buth et al. 2015).

In Phasen langanhaltender Trockenheit ist in Bayern vor allem auf sandigen und tonigen Böden (z. B. Nürnberger Sandachse, Steigerwaldvorland), die nur geringe Wasserspeicherkapazitäten besitzen, mit Ertragseinbußen zu rechnen (StMUV 2016). Auch Hitzestress durch hohe Temperaturen wird in Bayern aufgrund des Klimawandels zukünftig häufiger auftreten. Dieser Trend konnte bereits in den letzten Jahrzehnten eindeutig beobachtet werden. Bei den für Bayern bedeutenden Arten – Weizen, Mais, Gerste, Raps – finden sich angepasste Sorten, die auch extreme Hitze deutlich jenseits von 30 °C gut überstehen. Sorten wie der deutsche Winterweizen, der das hohe Ertragspotenzial des gemäßigten Klimas ausnutzen kann, sind oft wesentlich empfindlicher als entsprechende Sorten aus wärmeren Klimazonen, da sie bei Temperaturen jenseits der 30 °C während der Kornfüllungsphase vorzeitig reifen und es dann zu deutlichen Ertrags- und Qualitätseinbußen kommen kann (StMUV 2015). Trocken- und Hitzestress, die auch gleichzeitig auftreten können, führen bei besonders sensiblen Pflanzen zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber bestimmten Krankheiten und Schädlingen, darüber hinaus werden unter den Wildkräutern und Wildgräsern besonders die wärmeliebenden und trockenstresstoleranten Arten vom Klimawandel profitieren (StMUV 2015).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die räumliche Verteilung des Schadenpotenzials durch Trockenheit in der Landwirtschaft. Dabei wird die Anzahl der Heißen Tage mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche (Ackerland) pro Kreis verknüpft.

Als Klimaeinfluss zur Berechnung der Trockenschäden wurde die Anzahl Heißer Tage pro Jahr herangezogen. Dabei handelt es sich um die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 °C. Die Eingangsdaten für den Klimaeinfluss wurden aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen gebildet und berücksichtigen für die Gegenwart den Zeitraum 1971 bis 2000 und für die Zukunft den Zeitraum 2021 bis 2050. Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.

Auf Seite der Sensitivität fließt der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche (Ackerland) am Landkreis in die Berechnung der Klimawirkung ein. Auch hier wurden die Ergebnisse aus dem CC-LandStraD-Projekt verwendet, und zwar für die Gegenwart Werte aus dem Jahr 2009, die auch Grundlage für die Modellierung der künftigen Landnutzungsentwicklung waren. Für das Jahr 2030 wurde zur Abbildung der zukünftigen landwirtschaftlich genutzten Fläche aus den Modellergebnissen das Wachstumsszenario („Referenzszenario“) aus dem CC-LandStraD-Projekt herangezogen. Für die

Zukunft wurde auch bei dieser Klimawirkung nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet. Um die landwirtschaftlich genutzte Fläche abzubilden, wurde aus den CC-LandStraD-Daten der Layer Ackerland verwendet. Verbesserungen bei der Berechnung wären insbesondere durch eine Berücksichtigung bodenbezogener Daten (z. B. Bodenart, nutzbare Feldkapazität) zu erzielen.

Die normalisierten Werte der Sensitivität sowie des klimatischen Einflusses wurden multiplikativ miteinander verknüpft und anschließend nochmals normalisiert.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Klimawirkung zeigt bereits für die Gegenwart im Bereich der Gäuplatten zwischen Steigerwald und Spessart eine deutliche Ausprägung für landwirtschaftliche Schäden durch Trockenheit. Dies wird einerseits durch eine hohe Sensitivität in diesen Bereichen verursacht, zum anderen ist jedoch auch die Anzahl Heißer Tage in Unter- und Mittelfranken schon in der Gegenwart deutlich höher als in anderen Teilen Bayerns (Abb. 27).

In der Zukunft treten beim schwachen Wandel allmählich auch die Landschaften des Unterbayerischen Hügellands und der Isar-Inn Schotterplatten als Teilbereiche mit einer stärkeren Klimawirkung hinzu. Beim Szenario des starken Wandels treten alle stark landwirtschaftlich genutzten Teilregionen deutlich hervor, sodass auf der Linie von Unter- über Mittelfranken bis ins nördliche Schwaben sowie im Unterbayerischen Hügelland und den Isar-Inn Schotterplatten die größten Klimawirkungen auftreten. Während der Bereich Unter-/Mittelfranken hier am deutlichsten hervortritt, sind die Kreise im Bereich der Mittelgebirge (Schwäbische Alb, Oberpfälzer und Bayerischer Wald) und der Alpen aufgrund des geringeren Anteils landwirtschaftlicher Flächen und der geringeren Anzahl Heißer Tage im Vergleich zu den anderen Kreisen weniger stark betroffen.

Kernaussage

- Durch eine hohe Anzahl Heißer Tage pro Jahr kann es für einige Kulturen zu einer erhöhten Belastung durch Hitze und Trockenheit kommen.
- Die Klimawirkung „Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert. Verbesserungen bei der Berechnung wären insbesondere durch eine Berücksichtigung bodenbezogener Daten (z. B. Bodenart, nutzbare Feldkapazität) zu erzielen.
- Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung der Anzahl Heißer Tage pro Jahr als Klimaeinfluss mit dem Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Ackerland) pro Kreis als Sensitivität.
- Da die Anzahl der Heißen Tage in der Zukunft insbesondere in den Niederungen zwischen den Mittelgebirgen zunimmt und diese Bereiche auch diejenigen mit der intensivsten landwirtschaftlichen Nutzung sind, treten die stärksten Klimawirkungen dort, das heißt in Unter- und Mittelfranken sowie im Unterbayerischen Hügelland und den Isar-Inn-Schotterplatten, auf.

Karten

Arbeitsstand: 13.10.2017

Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt LW-2-2017. Die Klimawirkung wurde nicht mit der LfL abgestimmt.

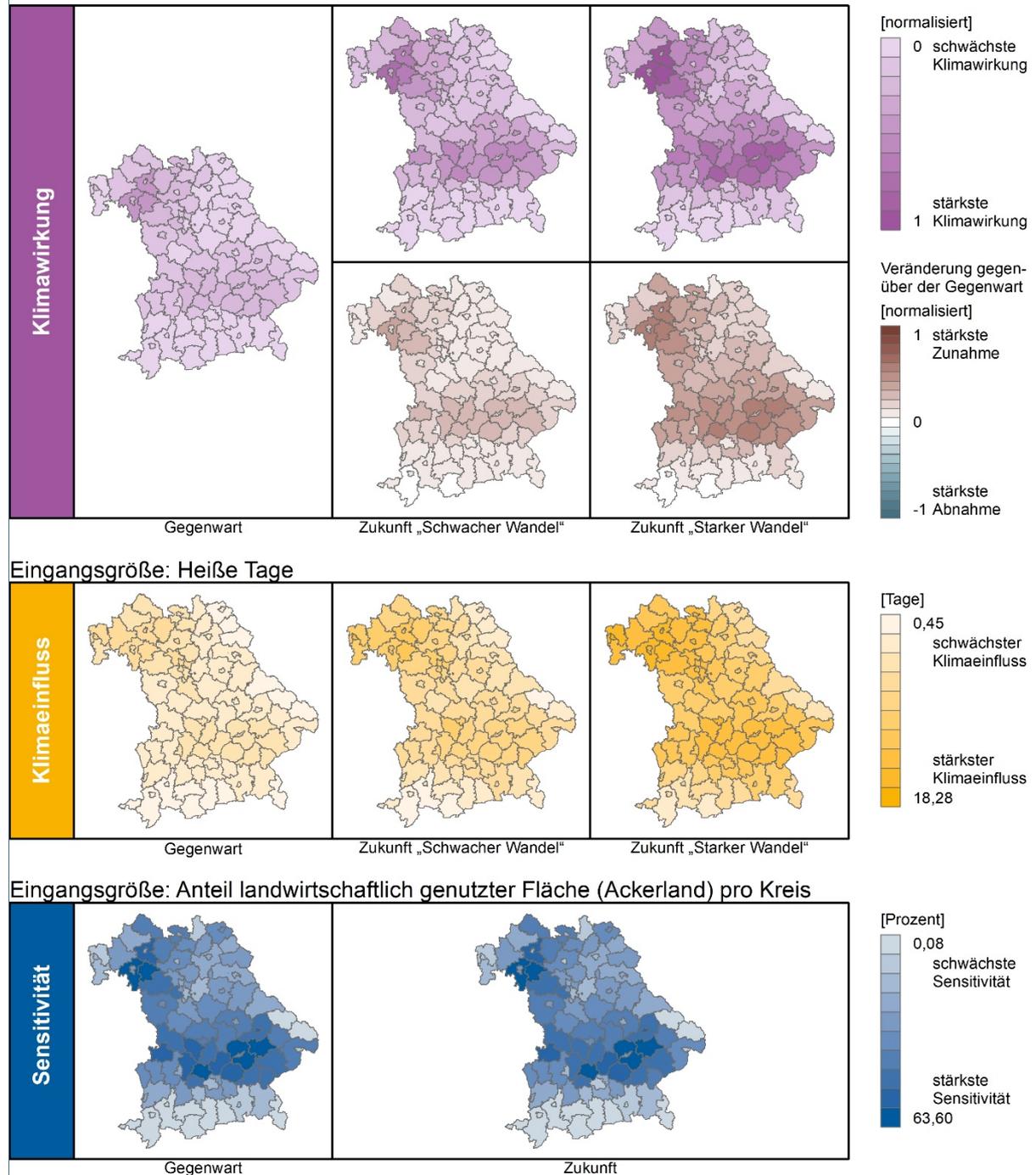


Abb. 27: Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Trockenheit

5.4.3 LW-3-2017, Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost

Hintergrund

Tage mit Wechselfrost sind dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturen nachts deutlich unter dem Gefrierpunkt und tagsüber deutlich darüber liegen, mit der Folge des täglichen Wechsels zwischen dem Tauen und Gefrieren der obersten Bodenschicht. Dadurch kommt es zu einer Volumenänderung des Bodens, wodurch die Wurzeln geschädigt und im schlimmsten Fall sogar abgerissen werden können. Besonders betroffen sind dabei über den Winter angebaute Arten wie Wintergetreide, Raps oder Triticale (Buth et al. 2015).

Grundsätzlich werden in Bayern bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Mittel eine Abnahme kalter und die Zunahme warmer Tage erwartet. Dementsprechend wird auch eine Abnahme der Frosttage in der nahen Zukunft (2021–2050) zwischen zwölf und 36 Tagen und in der fernen Zukunft (2071–2100) zwischen 36 und 60 Tagen projiziert. In den Höhenlagen der Mittelgebirge und im Alpenraum werden sogar bis zu 68 Tage projiziert (StMUV 2016). Dennoch bleibt die Gefahr des Auftretens von Wechselfrost bestehen. Im deutschlandweiten Vergleich werden räumliche Schwerpunkte der Schäden durch Wechselfrost in der Gegenwart und in der nahen Zukunft bei schwachem Wandel im Alpenvorland und in Süddeutschland erwartet (Buth et al. 2015).

Umsetzung

Für die Berechnung dieser Klimawirkung wurde die Anzahl der Tage mit Wechselfrost verwendet. Tage mit Wechselfrost sind als mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmaximaltemperatur über 3 °C und gleichzeitiger Tagesminimaltemperatur von kleiner als –3 °C gekennzeichnet. Die Eingangsdaten für die Tage mit Wechselfrost wurden aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen für die Gegenwart (Zeitraum 1971–2000) und für die Zukunft (Zeitraum 2021–2050) gebildet. Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.

Die Sensitivität wurde über den Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche (Acker- und Grünland) je Kreis berechnet (siehe Kapitel 5.4.1).

Die Klimawirkung beschreibt die räumliche Verteilung des Schadenspotenzials in der Landwirtschaft durch Wechselfrost durch die Verknüpfung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche pro Kreis. Beide normalisierten Komponenten wurden multiplikativ verknüpft und anschließend normalisiert.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für diese Klimawirkung zeigen sich in der Gegenwart die stärksten Ausprägungen im westlichen Teil Bayerns zwischen Unterfranken, Mittelfranken und Schwaben. Darüber hinaus treten einige Landkreise am Alpenrand hervor, in denen gegenwärtig eine hohe Anzahl von Wechselfrosttagen auftritt. Auch bei dieser Klimawirkung prägt sich die Sensitivität, das heißt der hohe Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche pro Kreis, deutlich durch (Abb. 28).

Das Bild eines zukünftigen schwachen Wandels ähnelt dem der Gegenwart. Insgesamt ist aufgrund eines leichten Rückgangs der landwirtschaftlichen Fläche und der Tage mit Wechselfrost in vielen Teilen Bayerns eine leichte Abnahme der Klimawirkung zu verzeichnen. Beim Szenario des starken Wandels zeigt sich für ganz Bayern eine zum Teil deutliche Abnahme der Klimawirkung, was in erster Linie am deutlichen Rückgang der Anzahl der Wechselfrosttage liegt.

Kernaussage

- An Wechselfrosttagen kann es für einige Kulturen zu einer erhöhten Belastung durch das wiederholte Gefrieren und Auftauen des Bodens kommen.
- Die Klimawirkung „Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert.
- Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung der Anzahl der Wechselfrosttage pro Jahr als Klimaeinfluss mit dem Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) pro Kreis als Sensitivität.
- Die stärksten Klimawirkungen treten in der Gegenwart auf der Linie Unterfranken – Mittelfranken und Schwaben sowie in einigen Kreisen am Alpenrand auf. Im Hinblick auf die Zukunft wird eine rückläufige Tendenz aufgrund der projizierten deutlichen Abnahme der Wechselfrosttage erwartet.

Karten

Arbeitsstand: 12.10.2017

Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt LW-3-2017. Die Klimawirkung wurde nicht mit der LfL abgestimmt.

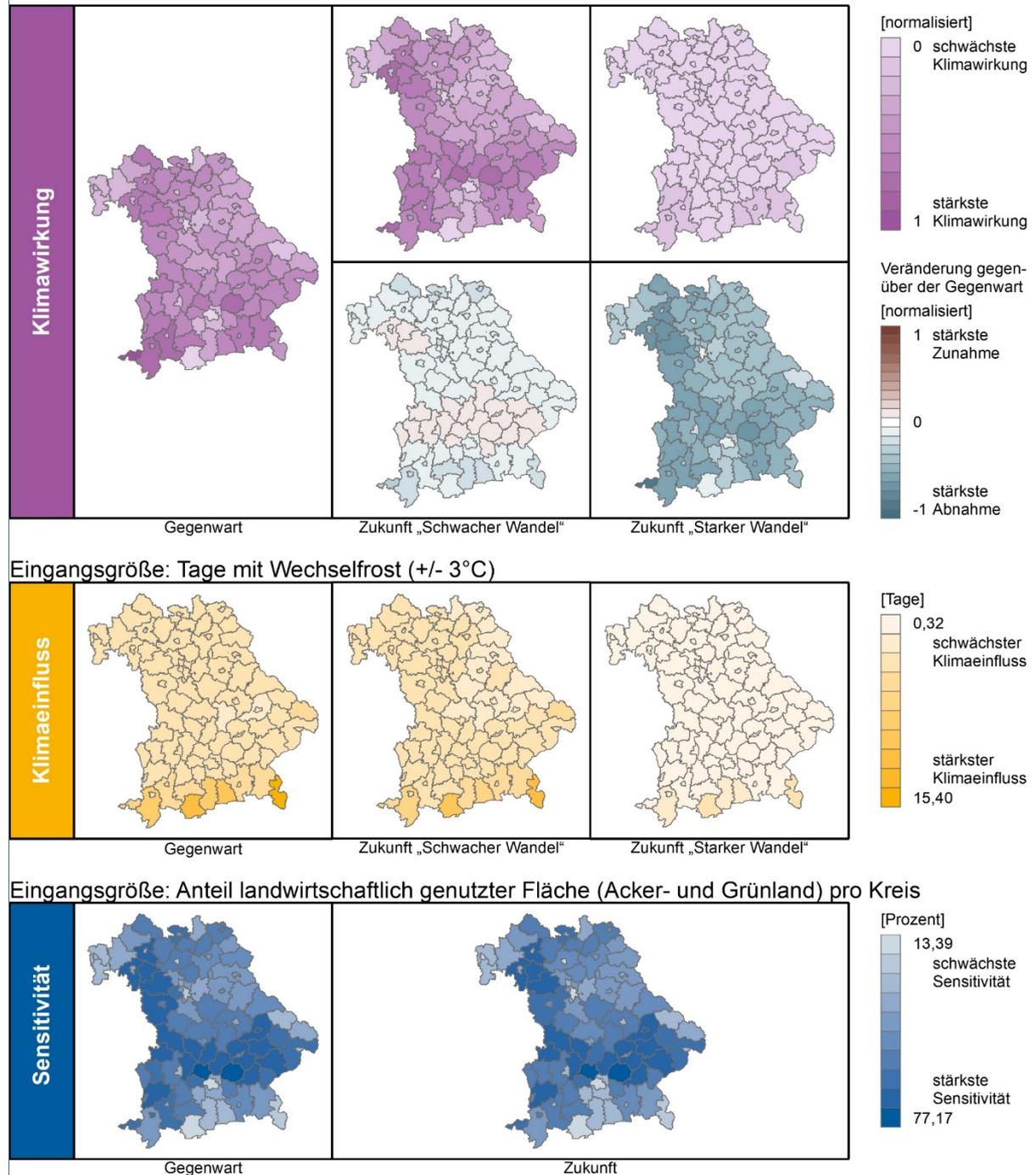


Abb. 28: Landwirtschaftliches Schadenspotenzial durch Wechselfrost

5.5 Wasserwirtschaft

Die Wasserwirtschaft beschäftigt sich bereits seit vielen Jahren mit den Folgen des Klimawandels (UBA 2015a). So haben die Länder Bayern und Baden-Württemberg bereits 1999 gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst sowie ab 2007 auch mit dem Land Rheinland-Pfalz eine längerfristige und bis heute andauernde gebiets- und fachübergreifende Zusammenarbeit zum Thema „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) vereinbart (KLIWA 2015). Für die Wasserwirtschaft sind der Schutz und die Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels ein zentrales Aufgabenfeld.

Veränderungen im Niederschlagsmuster und der Temperatur können enormen Einfluss auf den Wasserhaushalt und damit auf die Wasserwirtschaft ausüben. Die mittlere Niederschlagsmenge in Deutschland ist im Vergleich zu Beginn des 20. Jahrhunderts um mehr als 10 % gestiegen, wobei sich deutliche Unterschiede in dem räumlichen und jahreszeitlichen Auftreten zeigen (UBA 2015a). Die Niederschläge treten immer häufiger im Winter auf, im Sommer hingegen nehmen die Niederschläge tendenziell ab. Gleichzeitig steigt die Niederschlagsintensität, was zu Sturzfluten und Hochwassern und folglich auch zu Schäden an Gebäuden, Straßen, Infrastrukturen, usw. führen kann (StMUV 2016; Buth et al. 2015).

Hochwasser an großen Flüssen entstehen vorrangig durch lang andauernde Niederschläge im Einzugsgebiet, wobei auch die vorherrschende Bodenfeuchte eine Rolle spielt. Eine Begradigung von Flüssen und Bächen sowie die Bebauung der natürlichen Überschwemmungsgebiete beschleunigen den Abfluss und reduzieren das Retentionsvolumen. Überflutungen an kleinen Gewässern und Bächen sowie Oberflächenabfluss jenseits der Vorfluter können zudem nach lokalen Starkregenniederschlägen auftreten, die überwiegend durch konvektive Ereignisse entstehen. Durch die zunehmende Bebauung in Siedlungsbereichen und die damit einhergehende Versiegelung des Bodens kann bei Regen das Wasser nicht im Boden versickern und fließt daher oberirdisch ab. Hinzu kommt, dass bei Starkregenereignissen die Kapazität des Kanalnetzes überschritten werden und es infolgedessen zu einem Überstau kommen kann (StMUV 2015).

Eine funktionierende Wasserver- und Abwasserentsorgung, erfolgreicher Hochwasserschutz und Niedrigwassermanagement sowie funktionierende Infrastrukturen sind für Wirtschaft und Gesellschaft von elementarer Bedeutung. Aufgrund vielfältiger Wechselwirkungen zu anderen Handlungsfeldern wird diesem Handlungsfeld eine hohe Bedeutung zugeschrieben (Buth et al. 2015).

Die Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre haben die bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung veranlasst, ein umfassendes Hochwasserrisikomanagement zu etablieren. Zu einem effektiven Hochwasserschutz zählen neben Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes auch der natürliche Rückhalt und die Hochwasservorsorge. Dazu zählt beispielsweise die Sicherung vorhandener Überschwemmungsgebiete als Retentionsraum, einhergehend mit einer Einschränkung der baulichen Entwicklung in überschwemmungsgefährdeten Gebieten. Aber auch die Rückgewinnung von Retentionsräumen, die Verbesserung des Wasserrückhalts und die Risikovorsorge in deichgeschützten Gebieten sowie die Sicherung potenzieller Standorte für technische und natürliche Hochwasserschutzmaßnahmen ergänzen den technischen Hochwasserschutz (MKRO 2013).

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Berechnung der beiden Klimawirkungen „Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ₁₀₀“ (WW-1-2017) und „Sturzflutpotenzial“ (WW-2-2017) dargestellt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf Kanalnetz und Kläranlagen konnten nicht betrachtet werden. Zwar war zunächst geprüft worden, diese Klimawirkung näherungsweise über den Indikator „Starkregen auf versiegelte Flächen“ abzubilden. Bei näherer Betrachtung und in Abstimmung mit den zuständigen LfU-Fachreferaten stellte sich jedoch heraus, dass die Anzahl der Starkregentage als Maß für eine Beurteilung der Auswirkungen auf Kanalnetz und Kläranlagen nicht

ausreicht. Notwendig wären hierfür Niederschlagswerte auf Stundenbasis, die jedoch nicht zur Verfügung standen.

5.5.1 WW-1-2017, Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ₁₀₀

Hintergrund

Flusshochwasser sind Teil des natürlichen Wasserkreislaufes und können je nach räumlichen Gegebenheiten Überschwemmungen verursachen. Eine Überschwemmung ist ein Zustand, bei dem eine normalerweise trockenliegende Bodenfläche vollständig von Wasser bedeckt ist. Zumeist entstehen Hochwasser durch großräumige Niederschlagsereignisse (auch in Verbindung mit Schneeschmelze) sowie durch kurze, heftige Starkregen, die dann meist kleinere Einzugsgebiete betreffen. Hohe Schäden treten dann auf, wenn Überschwemmungen auf Siedlungsbereiche treffen. Neben der Gefahr für Leib und Leben kann es zu Erosionsschäden, Schäden am Baubestand, Einschränkungen in der wirtschaftlichen Produktion sowie Umweltschäden (Heizöl, chemische Austräge etc.) durch Überflutung von Gewerbe- und Industriegebieten kommen (Runhaar et al. 2012). Insbesondere wenn das Mischwasserkanalnetz überlastet ist und die zusätzlichen Wassermengen nicht mehr aufnehmen kann, kann es infolge Kläranlagenüberlauf auch zu hygienischen Belastungen kommen.

Im Zeitraum von 1932 bis 2010 nahmen in Bayern die Hochwasserabflüsse im Gesamtjahr und im Winterhalbjahr zu. Im Sommerhalbjahr nahmen die Abflüsse an etwa einem Drittel der Pegelmessstellen ab. Jedoch sind zumindest die Daten zu den sommerlichen Abnahmen statistisch nur begrenzt belastbar (StMUV 2015). Im Nachgang des Hochwasserereignisses 2013 wurde 2014 das „Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus“ veröffentlicht, das zum einen auf die Erneuerung und Erweiterung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen, aber auch auf eine Rückgewinnung von Retentionsräumen sowie die Verbesserung des Wasserrückhalts abzielt (StMUV 2014). Im Zuge der Umsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie wurde eine Risikobewertung in den Flusseinzugsgebieten Main, Donau, Elbe und am Bodensee durchgeführt und hochwasserrisikominimierende Maßnahmen ergriffen.

Umsetzung

Die potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei einem 100-jährlichen Hochwasser (HQ₁₀₀) sind nicht als eigenständige Klimawirkung zu betrachten, da sie keine Sensitivität betrachten. Sie fließen als indirekter Klimaeinfluss, der durch georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ₁₀₀ abgebildet wird (Stand 2016), in andere Klimawirkungen ein.

Für die Gegenwart wurden die Überschwemmungsflächen aus den Hochwassergefahrenkarten übernommen und um die (gewöhnlichen) Wasserflächen aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM250) reduziert. Es flossen sowohl die normalisierten Überschwemmungsflächen in absoluten Werten (in km²) als auch anteilig pro Landkreis ein und wurden additiv miteinander verknüpft. Zwar liegen nicht für alle Flüsse Informationen über Überschwemmungsflächen vor, jedoch sind Daten zu den Flüssen mit „besonderem Hochwasserrisiko“ einbezogen worden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass mit den verwendeten Daten der (indirekte) Klimaeinfluss hinreichend gut abgebildet werden kann. Bei der Berechnung wären als zukünftige Verbesserungen insbesondere das Einbeziehen von Wassertiefen oder Fließgeschwindigkeiten möglich. Da Projektionsdaten zu zukünftigen Hochwassergefahrenflächen noch nicht zur Verfügung standen, konnte der Klimaeinfluss nicht für die Zukunft berechnet werden. Eine Abbildung der Hochwasserflächen durch die in der Studie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) verwendete LISFLOOD-Daten wurde aufgrund der geringen Belastbarkeit (z. B. keine Berücksichtigung von Deichen in LISFLOOD) sowie der groben räumlichen Auflösung vom 100 m x 100 m aus fachlicher Sicht für Bayern nicht akzeptiert.

Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird. Dies wird zu Änderungen des Abflussverhaltens führen, was sich auch auf das Ausmaß und die Häufigkeit von Überschwemmungen auswirken wird. Von einem derzeitigen HQ₁₀₀ ausgehende Überschwemmungen könnten also in Zukunft mit größerer Häufigkeit auftreten. Aus diesem Grund flossen Überschwemmungsflächen in dieser Studie bei der Berechnung der verschiedenen Klimawirkungen (beispielsweise bei der Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser“ (BA-1-2017) als Klimaeinfluss ein. Allerdings wird ein statistisch 100-jährliches Hochwasser in Zukunft wahrscheinlich einen höheren Abflusswert haben als heute. Bei unzureichenden Anpassungen im Hochwassermanagement könnte das zu einem Versagen der Hochwasserschutzanlagen führen, was neue Überschwemmungsbereiche und enorme Schäden zur Folge hätte. Weder dieser gravierende Einfluss, noch die Verbesserungen im Hochwasserschutz, die derzeit bereits in Planung sind, werden in dieser Studie berücksichtigt, da keine Projektionen für Überschwemmungsbereiche für die Zukunft zur Verfügung standen.

Ergebnisse für die Gegenwart

Die Ergebnisse zeigen für die Gegenwart ein sehr differenziertes Bild. In den Regionen, in denen die Donau, Lech, Isar und der Main fließen, sind im Vergleich zu den anderen Landkreisen mehr Überschwemmungsflächen vorhanden. Die höchste Betroffenheit haben die Landkreise Dillingen und Deggendorf an der Donau (Abb. 29). In Deggendorf war zum Zeitpunkt der Datenerhebung der Hochwasserschutz noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichtet.

Kernaussage

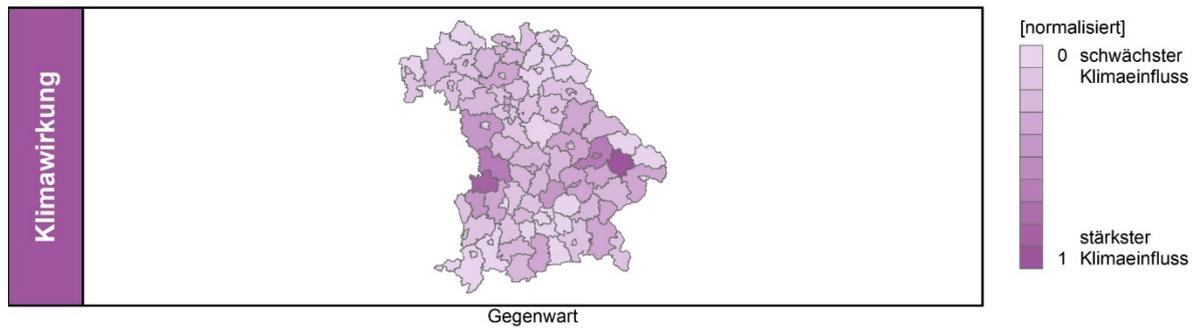
- Hochwasserabflüsse haben in Bayern in der Vergangenheit zugenommen. Aus diesem Grund fließen die damit ermittelten Überschwemmungsflächen in dieser Studie als klimatischer Einfluss in andere Klimawirkungen ein.
- Die Überschwemmungsflächen werden nur für die Gegenwart dargestellt, da belastbare Projektionen zur Abbildung der Zukunft zurzeit noch nicht verfügbar sind.
- Es wurde lediglich zwischen den Ausprägungen „überschwemmte Fläche“ und „nicht überschwemmte Fläche“ differenziert. Bei der Berechnung wären als zukünftige Verbesserungen insbesondere das Einbeziehen von Wassertiefen oder Fließgeschwindigkeiten möglich.
- Außerdem wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ in die Berechnung einbezogen. Die Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko können sich jedoch zukünftig erheblich ändern. Insgesamt wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch an zahlreichen weiteren Gewässern sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft wünschenswert.
- Die Landkreise Dillingen und Deggendorf weisen im Vergleich zu den anderen bayerischen Kreisen sowohl relativ als auch absolut am meisten Überschwemmungsfläche auf.

Karten

Arbeitsstand: 06.11.2017

Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt WW-1-2017

Abb. 29: Überschwemmungsfläche durch Flusshochwasser bei HQ₁₀₀

5.5.2 WW-2-2017, Sturzflutpotenzial

Hintergrund

Hochwasser infolge von Starkregen sind seit den Starkregenereignissen im Mai/Juni 2016 im Süden Bayerns, bei denen neben hohen Sachschäden auch sieben Menschen ums Leben kamen, stärker ins öffentliche Bewusstsein getreten. Starkregenereignisse zeichnen sich durch hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit (DWD-Definition Starkregen: $>25 \text{ mm h}^{-1}$) und auf begrenztem Raum aus. Sie können gerade in kleinen Einzugsgebieten Gewässer schnell ansteigen lassen und dadurch sturzflutartige Hochwasserwellen erzeugen (LfU 2017b). Hanglagen können auch fernab von Fließgewässern durch Oberflächenabfluss überschwemmt werden. Zusammen wird im Rahmen dieser Studie vereinfacht von Sturzfluten gesprochen. Insbesondere auf stark versiegelten Flächen in Siedlungsbereichen in Verbindung mit größeren Hangneigungen verursacht das unkontrolliert abfließende Wasser hohe Schäden. Aber auch landwirtschaftliche Flächen, insbesondere gering oder unbedeckte Ackerböden, sind hierbei besonders betroffen und werden beispielsweise durch Bodenerosion beeinträchtigt (StMUV 2016). Die Erosion verursacht eine Verringerung der Bodenfruchtbarkeit, Ernteauffälle sowie Bewirtschaftungsprobleme durch Erosionsrinnen und -gräben (StMUV 2015). Neben der Beeinträchtigung von Landwirtschaftsflächen und der Gewässergüte durch erosionsbedingte Stoffeinträge sind Überflutungsschäden von Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten sowie die damit einhergehende Verschmutzung der Umwelt eine häufige Folge von Starkregenereignissen. Hochwasser infolge von Starkregen können auch in flachen Gebieten ohne Gewässer zu Überschwemmungen führen, weil das Wasser nicht versickern oder abfließen kann. Dieser Effekt wird hier nicht durch die Klimawirkung Sturzflutpotenzial abgedeckt.

Durch die Umsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie wurden zwar etwa zwei Drittel der 2016 von Sturzfluten betroffenen Gemeinden erfasst, allerdings stehen die 2016 betroffenen vergleichsweise kleinen Gewässer sowie die infolge eines Starkregenereignisses flächenhaften und nicht an Gewässer gebundenen Sturzfluten nicht im Fokus des Hochwasserrisikomanagements. Deshalb ist es zur ganzheitlichen Betrachtung von gemeindlichen Hochwassersituationen sinnvoll, die von lokalen Sturzfluten ausgehende Risikopotenziale, die meist in kleineren Flusseinzugsgebieten zu finden sind, in den Risikodialog einzubinden (LfU 2017b).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt das Potenzial des Auftretens von Sturzfluten infolge von Starkregenergieereignissen in Abhängigkeit von der Hangneigung (Gefälle).

Zur Berechnung des Sturzflutpotenzials flossen zum einen die Anzahl der Starkregentage für die Gegenwart (1971–2000) und Zukunft (2021–2050) mit einer täglichen Auflösung im Raster von 12,5 km x 12,5 km in die Berechnung ein. In dieser Studie wurden Starkregentage als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 mm definiert. Der Grund dafür ist, dass die Projektionsdaten für den Niederschlag nur tagesbezogen vorliegen. Als Datensatz diente ein Klimamodellensemble aus 13 Modellläufen, dem das RCP8.5-Szenario zugrunde liegt. Zum anderen wurde die Reliefenergie verwendet, die durch die Standardabweichung der Geländesteigung in Prozent auf Landkreisebene abgebildet und mithilfe des Digitalen Geländemodells (DLM) des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern (LDBV) mit einer Auflösung von 5 m x 5 m berechnet wurde. Die Hangneigungen wurden für die Zukunft als konstant angenommen. Die multiplikative Verknüpfung der Anzahl der Starkregentage und der Standardabweichung der Geländeneigung (beides normalisiert) ergibt das Sturzflutpotenzial. Hierbei gilt: je höher die Anzahl der Starkregentage und je steiler das Gelände, desto höher ist das Sturzflutpotenzial. Verbesserungen bei der Berechnung sind insbesondere durch eine Berücksichtigung der Landbedeckung zu erzielen, die neben dem Gefälle einen starken Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit des Wassers und somit auf das Sturzflutpotenzial besitzt.

Insgesamt ist die Verwendung der Anzahl der Starkregentage mit einer hohen Unsicherheit verbunden, da weder für die Vergangenheit noch für die Zukunft aufgrund der zu groben Messsysteme beziehungsweise der zu groben raum-zeitlichen Modellauflösungen gesicherte Daten vorliegen. Hier wäre für eine verlässlichere Aussage zukünftig die Verwendung von Niederschlagsdaten in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung angezeigt.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse zeigen, dass das Sturzflutpotenzial gegenwärtig am stärksten in der Alpenregion hervortritt, während die Klimawirkung im restlichen Untersuchungsgebiet vergleichsweise schwach ausgeprägt ist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dort ein geringes Sturzflutpotenzial vorherrscht. Denn gerade im Thüringisch-Fränkischen Mittelgebirge sowie im Oberpfälzer und Bayerischen Wald sind große Höhenunterschiede in der Geländetopografie zu finden, die Sturzfluten begünstigen können. Die Ergebnisse werden durch die Anzahl der Starkregentage dominiert, die laut der verwendeten Definition (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) im Gebiet der Schwäbisch-Oberbayerischen Voralpen im Gegensatz zu den restlichen bayerischen Landkreisen vergleichsweise häufig auftreten (Abb. 30). Ein differenzierteres Ergebnis könnte man deshalb durch eine stärkere Gewichtung der Geländeneigung erzielen. Allgemein lassen sich durch den in dieser Studie verwendeten proxybasierten Ansatz nur pauschalisierte Aussagen treffen. Im Projekt „HiOS“ (Hinweiskarte Oberflächenabfluss und Sturzfluten)⁷ wird derzeit die Regionalisierung der Hochwassergefahr infolge Starkregen näher untersucht.

Für die Zukunft bei einem angenommenen schwachen Wandel (hier 15. Perzentil) zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Auch hier findet sich in der Alpenregion das höchste Sturzflutpotenzial. Aufgrund der abnehmenden Anzahl an Starkregentagen in einigen Kreisen in Südschwaben und in der Oberpfalz wird eine (wenn auch nur sehr leichte) Abnahme des Sturzflutpotenzials in diesen Kreisen erwartet. Wird hingegen ein „starker Wandel“ (85. Perzentil) angenommen, so erhöht sich das Sturzflutpotenzial flächendeckend, insbesondere in den südlichen Landkreisen in den Schwäbisch-Oberbayerischen Voralpen.

⁷ <http://www.hios-projekt.de/>

Kernaussage

- Starkniederschläge in Verbindung mit einem starken Gefälle können Sturzfluten verursachen.
- Das Sturzflutpotenzial wurde mithilfe der Anzahl der Starkregentage (Starkregen: > 25 mm d⁻¹) berechnet. Außerdem wurde das Digitale Geländemodell des LDBV zur Bestimmung der Reliefenergie verwendet.
- Verbesserungen bei der Berechnung sind insbesondere durch eine Berücksichtigung der Landbedeckung zu erzielen, die neben dem Gefälle einen starken Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit und Versickerung des Wassers und somit auf das Sturzflutpotenzial besitzt. Ferner könnten zukünftig Daten mit einer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung verwendet werden, die die Intensität des Niederschlags besser abbilden als Tageswerte. Eine detaillierte Untersuchung erfolgt derzeit im Projekt „HiOS“⁷.
- Aufgrund des hohen Gefälles und insbesondere des sehr hohen Anteils an Starkregentagen gemäß der verwendeten Definition ist in der Alpenregion sowohl in der Gegenwart, als auch in der Zukunft das höchste Sturzflutpotenzial verortet. Jedoch sind auch im Thüringisch-Fränkischen Mittelgebirge sowie im Oberpfälzer und Bayerischen Wald große Höhenunterschiede im Gelände zu finden, die aufgrund der geringeren Anzahl an Starkregentagen in den Klimawirkungskarten aber nicht hervortreten.
- Die Starkregentage nehmen in Bayern stark unterschiedliche Werte an. Aufgrund der multiplikativen Verknüpfung mit der Geländeneigung dominiert die vergleichsweise hohe Anzahl an Starkregentagen in der Alpenregion die Ergebnisse. Ein genaueres Ergebnis könnte man deshalb durch eine stärkere Gewichtung der Geländeneigung erzielen.

Karten

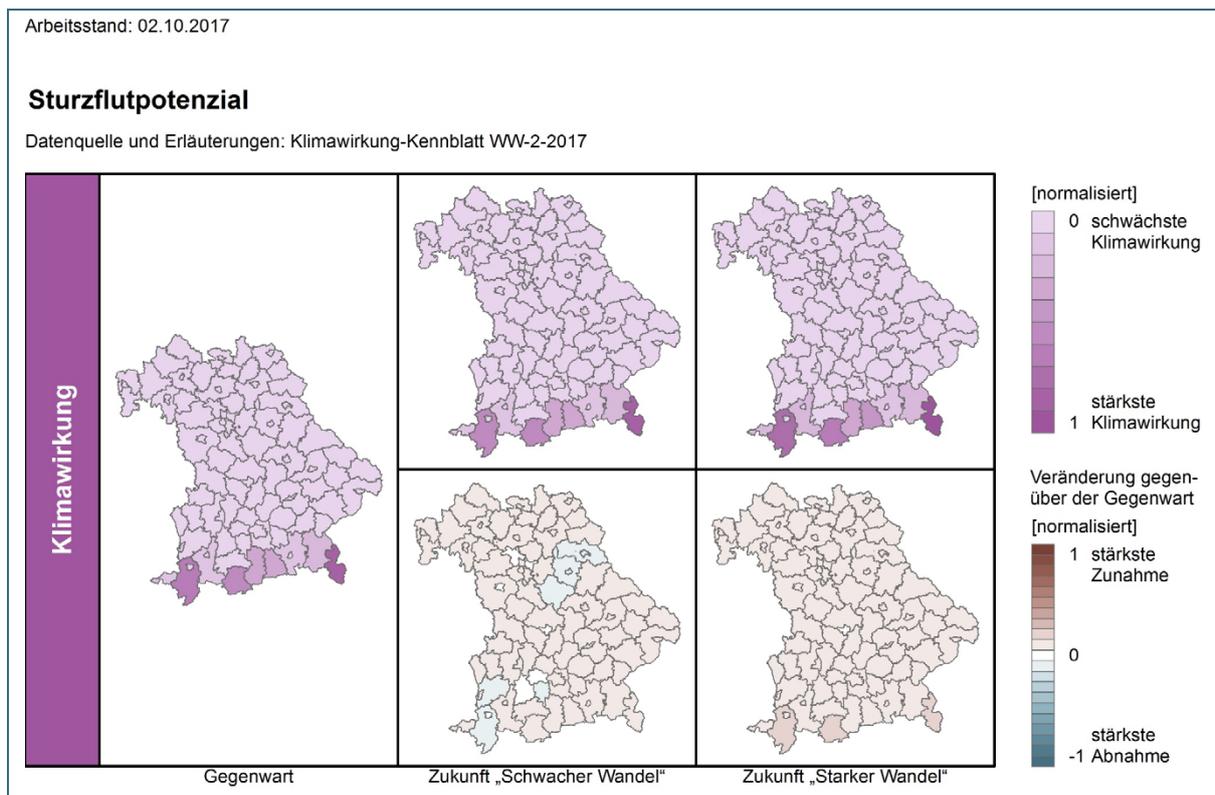


Abb. 30: Sturzflutpotenzial durch Starkniederschläge in Verbindung mit starkem Gefälle

5.6 Bauen

Durch veränderte klimatische Einflüsse werden zunehmend Auswirkungen auf den Baubestand erwartet. Denn intensive Starkregenereignisse, Überschwemmungen durch Flusshochwasser, aber auch langanhaltende Hitzeperioden oder durch die Zunahme konvektiver Ereignisse bedingte Starkwinde und Hagelschlag können z. T massive Gebäudeschäden verursachen. Neben den offensichtlichen oberirdischen Bau- und Erosionsschäden, kann es außerdem durch einen Anstieg des Grundwassers infolge von Starkniederschlägen oder Hochwassern zu Wasserschäden an Untergeschossen oder Tiefgaragen kommen. Doch nicht nur die Gebäudehülle, sondern auch die darin lebenden und arbeitenden Menschen sind von den Auswirkungen betroffen, da sich je nach klimatischem Einfluss das Gebäudeinnenklima negativ verändern kann. So kann die gesundheitliche Belastung durch die Gebäudeaufheizung während besonders heißer Sommertage beispielsweise in Pflegeeinrichtungen stark zunehmen. Dies betrifft insbesondere Gebäude, die konstruktions- und/oder altersbedingt nur wenig oder gar nicht an klimatische Extremereignissen angepasst sind (StMUV 2016).

Es gilt daher, den Gebäudebestand sowie Neubauten an die veränderten klimatischen Bedingungen anzupassen. Dies sollte sowohl von öffentlichen als auch von privaten Bauherren umgesetzt werden. Außerdem können Siedlungsbereiche so gestaltet werden, dass ausreichend klimatische Ausgleichs- und Retentionsflächen zur Verfügung stehen sowie Einschränkungen auf die Kaltluftproduktion und den -transport vermieden bzw. auf ein Mindestmaß reduziert werden. Zentrale Planungsinstrumente zur Umsetzung eines klimaangepassten Bauens sind die Bayerische Bauordnung sowie die verbindliche Bauleitplanung (BauGB in Verbindung mit BauNVO), die Art und Maß der baulichen Nutzung regeln (StMUV 2015, 2016).

Die Umsetzung der Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Starkwind“ wurde geprüft, konnte aber aufgrund nicht belastbarer Projektionsdaten zu Starkwindtagen nicht umgesetzt werden. Die beiden Klimawirkungen „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser“ (BA-1-2017) und „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten“ (BA-2-2017) konnten hingegen berechnet und dargestellt werden, ebenso wie die Klimawirkungen der Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln (BA-3-2017) und in hitzeempfindlichen Einrichtungen (BA-4-2017).

5.6.1 BA-1-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser

Hintergrund

Hochwasser und somit auch Überschwemmungen sind – wie bereits in Kapitel 5.5.1 genannt – Bestandteil des natürlichen Wasserkreislaufes und lassen sich somit nicht gänzlich verhindern. Extreme Hochwasserereignisse führen oft nicht nur zu Versorgungsengpässen und erheblichen Störungen der öffentlichen Sicherheit, sondern können auch enorme finanzielle Schäden verursachen (BBK 2011). Hohe ökonomische Schäden durch Überschwemmungen treten jedoch erst auf, wenn sie auf Siedlungsbereiche treffen, da sich dort hohe Schadenspotenziale akkumulieren. Als Siedlungsgebiete genutzte Räume in den natürlichen Überschwemmungsgebieten begünstigen somit den Effekt hoher Schadenspotenziale. Neben der Gefahr für Leib und Leben sowie Beeinträchtigungen im hygienischen und gesundheitlichen Bereich, kann es zu Erosionsschäden, Schäden am Baubestand, Straßen und Sachgütern sowie Einschränkungen in der wirtschaftlichen Produktion durch Überflutung von Gewerbe- und Industriegebieten kommen (Runhaar et al. 2012). Insbesondere Überschwemmungen in Gewerbe- und Industriegebieten bergen eine Gefahr für die Umwelt, da verunreinigende Stoffe dabei freigesetzt werden und Boden, Luft und Wasser kontaminieren können.

Die großen Hochwasserereignisse und erheblichen Schäden in den zurückliegenden Jahren (1999, 2002, 2006, 2013) zeigen bereits, dass Hochwasser ein ernstzunehmendes Risiko ist und dass das Problembewusstsein der Bevölkerung weiter geschärft werden muss. Es ist sinnvoll, für den Gebäu-

debestand in gesetzlich festgestellten Überschwemmungsgebieten sowie in deichgeschützten, aber potenziell überflutunggefährdeten Gebieten, zusätzlich private Vorsorge (Bauvorsorge) zu betreiben. Zu baulichen Vorsorgemaßnahmen zählt beispielsweise eine hochwasserangepasste Bauweise (unter anderem in Sicherung der Gebäudeeingänge, z. B. Kellerfenster, vor dem Eindringen von Wasser). Auch ein Versicherungsschutz kann nach einem Hochwasser finanzielle Abhilfe schaffen. Einer der ersten Schritte ist jedoch zunächst eine Aufklärung der potenziell betroffenen Bevölkerung über hochwasserbedingte Gefahren. Darüber hinaus ist bei Neuplanungen auch die planerische Vorsorge wichtig. Über Raumordnung und Bauleitplanung können die weitere Akkumulation von Schadenspotenzialen in hochwassergefährdeten Bereichen verhindert und somit zukünftige Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser vermieden werden.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die Potenziale für Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Siedlungsflächen verschnitten werden.

Um den Klimaeinfluss abzubilden, wurden die Überschwemmungsflächen aus den Hochwassergefahrenkarten für HQ₁₀₀ übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ (= Risikogewässer) in die Berechnung einbezogen (Informationen aus den Hochwassergefahrenkarten). Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft und mit einer größeren räumlichen Abdeckung wünschenswert. Bei der Berechnung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten möglich. Als Sensitivitätsindikator der Gegenwart (2009) und der Zukunft (2030) sind sowohl die absoluten, als auch die anteiligen Siedlungsflächen pro Kreis in die Berechnung eingeflossen. Die Daten lagen in einem 100 m x 100 m Raster vor. Die absoluten und anteiligen Siedlungsflächenwerte wurden normalisiert und additiv miteinander verknüpft. Weitere Informationen zur eingesetzten Landnutzungsprojektion finden sich im Kapitel 4.2. Verbesserungsmöglichkeiten bei der Berechnung der Sensitivität bietet eine detailliertere Schadenspotenzialermittlung, wie sie beispielsweise im Zuge der Bedarfsermittlung Flutpolder für die Donau⁸ durchgeführt wurde. Die Berechnung der zukünftigen Klimawirkung ohne Berücksichtigung der Änderung des Klimaeinflusses "Überschwemmungsfläche" und ohne Berücksichtigung der Anpassungen im Hochwasserschutz ist problematisch, die Ergebnisse sind vor diesem Hintergrund zu interpretieren.

Das Zusammenführen des Klimaeinfluss- und Sensitivitätsindikators erfolgte durch eine geografische Verschneidung der potenziellen Überschwemmungsflächen und der Siedlungsflächen, auf die eine additive Verknüpfung der normalisierten Werte der absoluten überschwemmungsgefährdeten Siedlungsfläche mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Siedlungsfläche an der Kreisfläche folgte.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse für die Gegenwart ergeben ein differenziertes Bild. Im Vergleich zu den restlichen Kreisen Bayerns ist die Klimawirkung in den an den Flüssen Donau, Lech, Isar und Main gelegenen Kreisen stärker ausgeprägt. Mit der stärksten Klimawirkung sticht der Landkreis Deggendorf hervor, in dem die Isar in die Donau mündet und größere potenziell überschwemmte Flächen zu finden sind. Die Analyse ergab, dass sich die Klimawirkung zukünftig nur wenig verändern wird. Dies ist jedoch damit

⁸ https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_flutpolder/index.htm

zu begründen, dass keine Veränderung der Überschwemmungsflächen aufgrund fehlender Abflussprojektionen und keine Anpassungen im Hochwasserschutz berücksichtigt wurde. Geht man davon aus, dass die Intensität und Häufigkeit von Überschwemmungsereignissen künftig zunehmen wird (Müller et al. 2018), so ist bei ansonsten gleichen Bedingungen in Zukunft vermutlich mit mehr Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser zu rechnen (Abb. 31).

Kernaussage

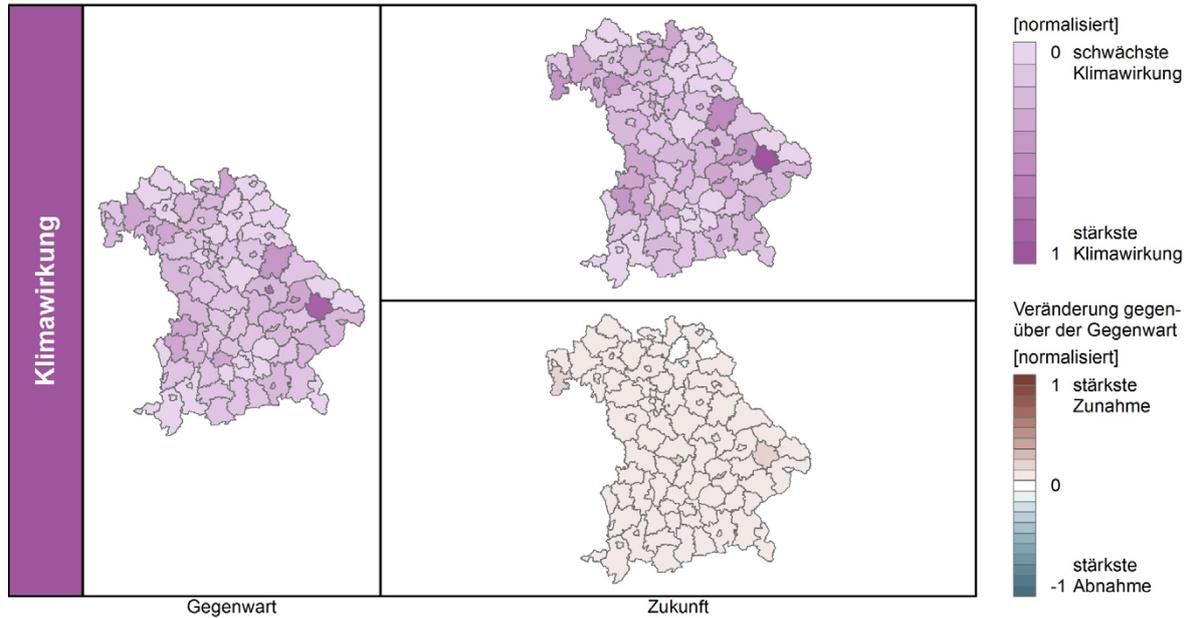
- Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird.
- Die Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert. Bei der Operationalisierung wäre als künftige Verbesserung das Einbeziehen von Zukunftsprojektionen für die Hochwasserdaten wichtig. Zusätzlich wäre die Berücksichtigung von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sinnvoll.
- In die Analyse sind als Klimaeinfluss die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmten Flächen eingeflossen. Zur Abbildung der Sensitivität wurde die Siedlungsfläche herangezogen. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität, indem beide Flächenkulissen miteinander geografisch verschnitten wurden.
- Im Landkreis Deggendorf kann anhand der vorliegenden Karten abgeleitet werden, dass eine erhöhte Hochwassergefahr vorliegt. Aber das heißt nicht per se, dass hier die schlimmsten Hochwasserereignisse auftreten.

Karten

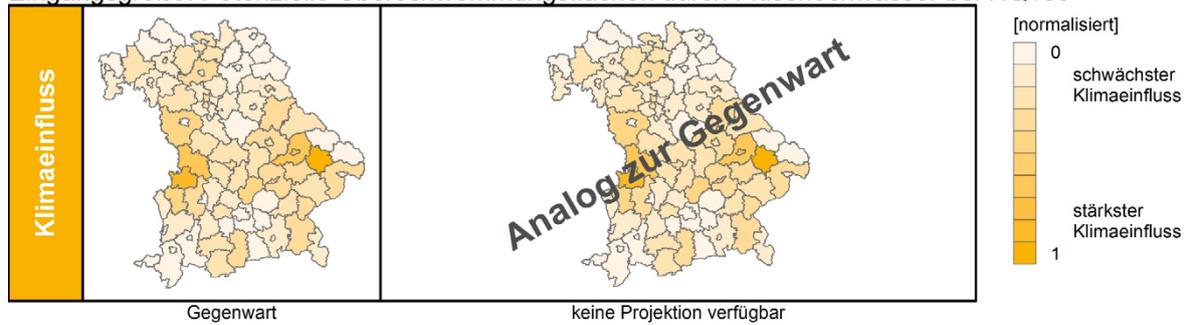
Arbeitsstand: 29.09.2017

Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt BA-1-2017



Eingangsgröße: Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100



Eingangsgröße: Siedlungsfläche

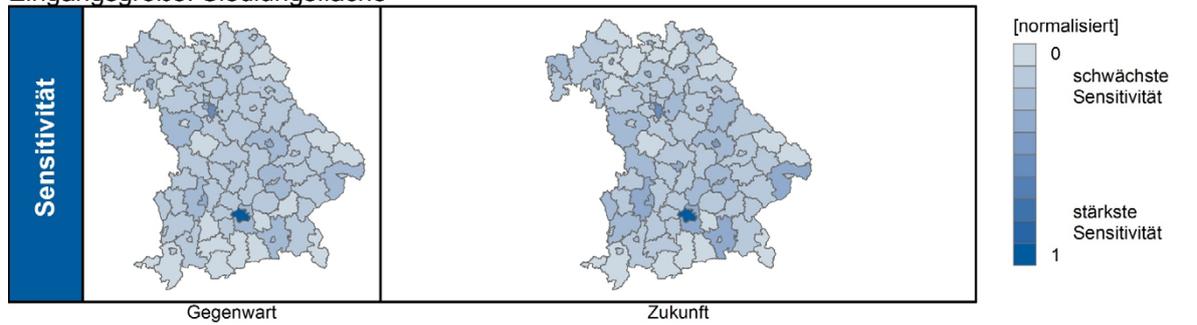


Abb. 31: Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser

5.6.2 BA-2-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten

Hintergrund

In Bayern konnten in den letzten Jahren größere Schadensereignisse nach Sturzflutereignissen verzeichnet werden, die vor allem durch Starkniederschläge in Verbindung mit Hangneigungen entstehen. Bei der Bewertung der potenziellen Schäden dieser Extremwetterereignisse muss insbesondere der urbane Raum betrachtet werden. Städte weisen eine hohe Bevölkerungszahl und -dichte und damit eine hohe Zahl an potenziell Betroffenen auf, verbunden mit einem hohen Schadenspotenzial an der städtischen Infrastruktur. Starkniederschlagsereignisse können überall auftreten. Daher ist beispielsweise die bauliche Vorsorge an Gebäuden, die vom Standort her potenziell exponiert sind (z. B. Hanglage), eine geeignete Maßnahme, um potenzielle Schäden zu vermeiden oder zumindest zu vermindern.

Eine Möglichkeit diesem Problem zu begegnen ist es auf gemeindlicher Ebene kleinräumige 2D-Niederschlags-Abfluss-Modellierungen durchzuführen, um Fließwege und Senken identifizieren und Wassertiefen abschätzen zu können. Diese können dann mit den vorhandenen beziehungsweise geplanten Flächennutzungen beziehungsweise Infrastrukturen verschnitten werden, um (Hoch-)Risikobereiche zu identifizieren. Derart können über die Bauleitplanung zudem Notwasserwege und Flächen (wie öffentliche Grünflächen, Parkplätze usw.) festgelegt werden, auf denen oberflächlich abfließendes Niederschlagswasser schadensarm zwischengespeichert oder über definierte Fließwege abgeführt werden kann.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt Potenziale für Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Verbindung mit einer starken Geländeneigung.

Die Berechnung des Sturzflutpotenzials berücksichtigt die Anzahl der Starkregentage ($> 25 \text{ mm d}^{-1}$) sowie die Geländesteigung und wird in Kapitel 5.5.2 ausführlich erklärt. Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage ist mit einer hohen Unsicherheit der Aussagefähigkeit verbunden. Ursache sind die geringe zeitliche (Messungen) und räumliche Auflösung (Messstationen) der Niederschlagsdaten. Für die Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Um die Gefährdung durch Starkregenereignisse zukünftig besser einschätzen zu können, können auf gemeindlicher Ebene Fließwege und Senken durch kleinräumige Niederschlags-Abfluss-Modellierungen identifiziert werden. Durch die integrierte Betrachtung der Abflussbahnen und der vorhandenen beziehungsweise geplanten Flächennutzungen beziehungsweise Infrastrukturen können (Hoch-)Risikobereiche dargestellt werden. Neben den Klimaeinflussdaten wurden zudem als Sensitivitätsindikatoren Daten des LfStat zur Bevölkerungszahl (Stand 2009) sowie die Siedlungsfläche in die Berechnung einbezogen. Die Siedlungsflächen wurden dem Teilprojekt „Landnutzungsszenarien“ des Projekts CC-LandStraD entnommen (Stand 2009), die als Rasterdaten mit einer Auflösung von $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ vorlagen und auf Kreisebene hochgerechnet wurden. Als Siedlungsfläche gelten hierbei die im CC-LandStraD-Projekt verwendeten Kategorien 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'. Die absolute Siedlungsfläche und die Bevölkerungsdichte pro Kreis wurden normalisiert, additiv miteinander verknüpft und anschließend erneut normalisiert.

Zur Abbildung der künftigen Entwicklung wurden die Einwohnerzahlen aus dem BMBF-Projekts CC-LandStraD verwendet. Für die Zukunft wurde nur das Szenario mit der dynamischeren Bevölkerungsentwicklung („Wachstumsszenario“) sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet. Der Grund hierfür war, dass das aus dem Projekt CC-LandStraD abgeleitete „Stagnationsszenario“ gegenwärtig bereits „überholt“ ist.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse zeigen aufgrund des oben beschriebenen Auswertungsalgorithmus, dass die höchsten Schäden durch Sturzfluten an Gebäuden gegenwärtig in der Alpenregion auftreten können, während die Klimawirkung im restlichen Untersuchungsgebiet vergleichsweise schwach hervor tritt (Abb. 32). Durch das sehr hohe Sturzflutpotenzial in den Alpen werden die Sturzflutpotenziale in den anderen bayerischen Kreisen aufgrund des Berechnungsalgorithmus zum Teil nivelliert. Dies bedeutet folglich nicht, dass in den nördlichen Kreisen ein geringes Sturzflutpotenzial vorherrscht. Denn auch im Thüringisch-Fränkischen Mittelgebirge sowie im Oberpfälzer und Bayerischen Wald sind beträchtliche Höhenunterschiede im Gelände zu finden, die Sturzfluten und Schäden an Gebäuden begünstigen können. Die Ergebnisse werden durch die Anzahl der Starkregentage gemäß der verwendeten Definition (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) dominiert, die auf dem Gebiet der Schwäbisch-Oberbayerischen Voralpen im Gegensatz zu den restlichen bayerischen Kreisen vergleichsweise hoch ist. Eine Optimierung des Ergebnisses könnte beispielsweise durch eine empirisch abgeleitete stärkere Gewichtung der Geländeneigung sowie der Sensitivitätsindikatoren erzielt werden. Auf Seite der Sensitivität stechen Nürnberg und München mit einer hohen Bevölkerungsanzahl sowie einer hohen Siedlungsfläche im Vergleich zur übrigen Region hervor. Jedoch ist das Sturzflutpotenzial der beiden Städte vergleichsweise gering, sodass die Klimawirkung hier trotz der hohen Sensitivität nur sehr schwach ausgeprägt ist.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Zukunft ergibt sich ein ähnliches Bild. Für den schwachen Wandel werden vergleichsweise hohe potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten im Süden Bayerns angezeigt. In der Oberpfalz nimmt die Klimawirkung negative Werte an, was sich auf die projizierte abnehmende Anzahl an Starkregentagen zurückführen lässt. Wird hingegen von einem starken Wandel ausgegangen, so erhöhen sich die potenziellen Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten flächendeckend, am meisten jedoch auch hier in den südlichen Kreisen, in den Schwäbisch-Oberbayerischen Voralpen.

Kernaussage

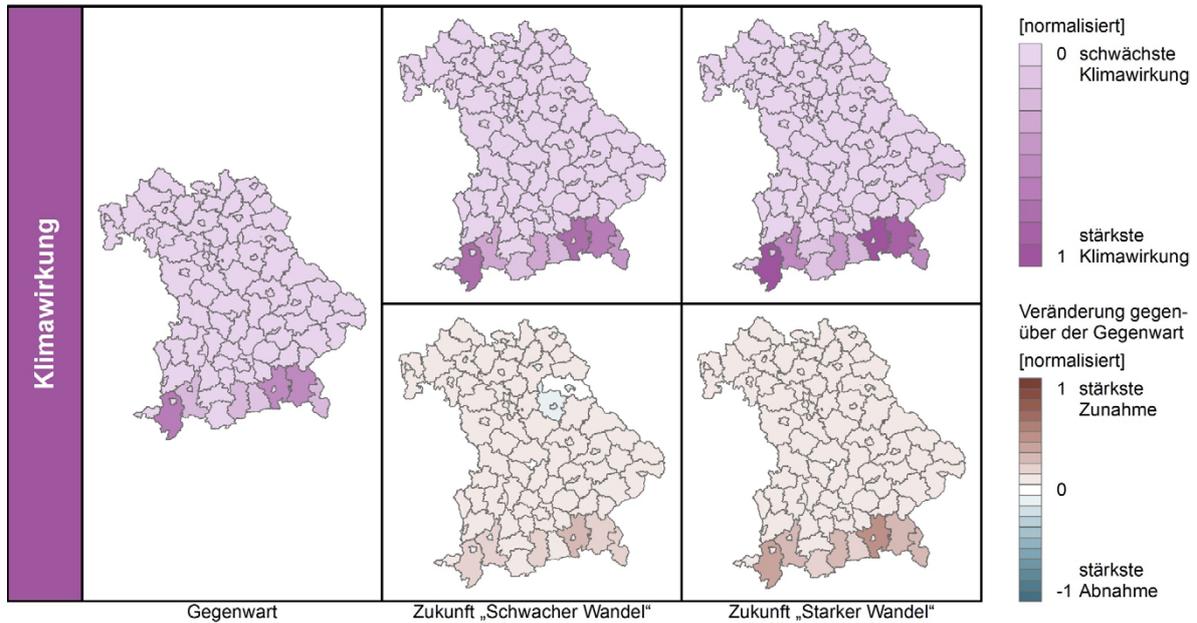
- Bei der Betrachtung von Extremwetterereignissen muss insbesondere der urbane Raum in den Fokus genommen werden. Einerseits haben Städte eine hohe Bevölkerungszahl und -dichte und damit eine hohe Zahl an potenziell Betroffenen auf. Zudem häufen diese durch soziale und wirtschaftliche Einrichtungen ein hohes Maß an Schadenspotenzialen an.
- Die Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten“ wird durch die Verknüpfung der Bevölkerungsdaten sowie Daten zu Siedlungsfläche, Starkregentagen und Reliefenergie dargestellt.
- Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage schränkt die Aussagefähigkeit stark ein. In Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Eine Optimierung des Ergebnisses könnte weiterhin durch eine empirisch abgeleitete stärkere Gewichtung der Geländeneigung sowie der Sensitivitätsindikatoren erzielt werden.
- Aufgrund des hohen Gefälles in Verbindung mit einer vergleichsweise sehr großen Anzahl an Starkregentagen gemäß der verwendeten Definition (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) in der Alpenregion ist dort sowohl in der Gegenwart, als auch in der Zukunft das höchste Sturzflutpotenzial und somit hohe potenzielle Schäden an Gebäuden zu verorten.

Karten

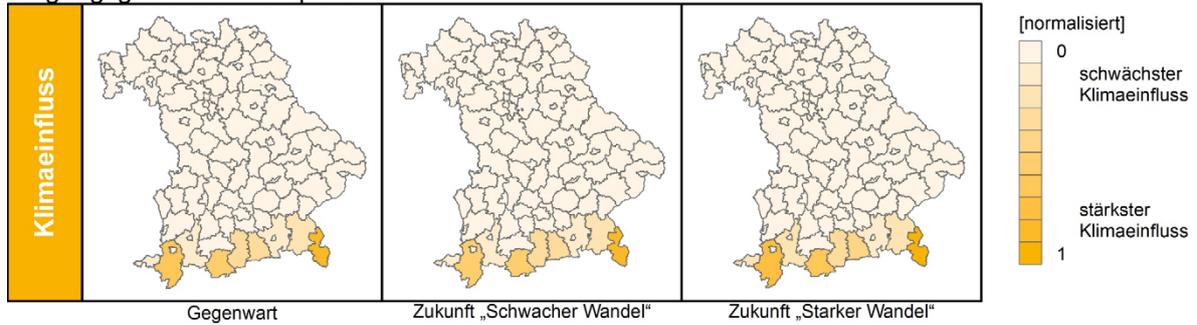
Arbeitsstand: 29.09.2017

Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt BA-2-2017



Eingangsgröße: Sturzflutpotenzial



Eingangsgröße: Siedlungsfläche und Bevölkerung

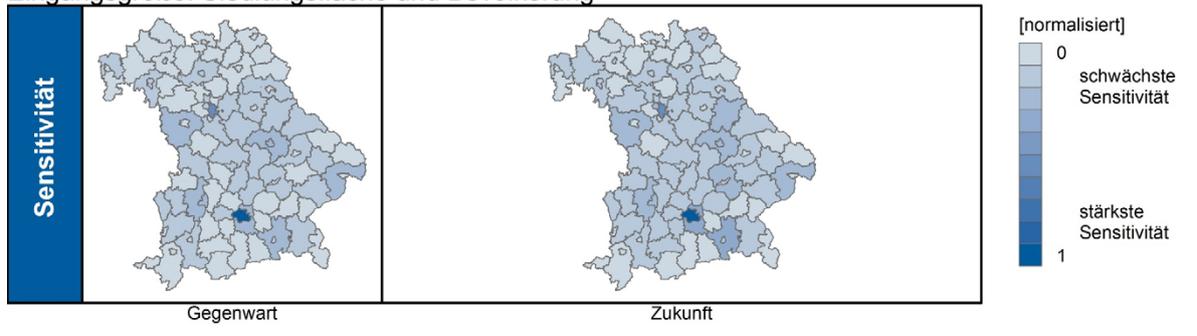


Abb. 32: Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten

5.6.3 BA-3-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln

Hintergrund

Das Innenraumklima von Gebäuden wird, neben der Bauweise und Belüftungstechnik, maßgeblich von Wetter- und Witterungsbedingungen beeinflusst. Die Gebäudehülle spielt dabei eine besondere Rolle, da es ihre Aufgabe ist, im Gebäudeinneren einen behaglichen Zustand sicherzustellen (Schittich 2012). So erhöhen stark wärmeleitende Baumaterialien die Innenraumtemperatur ebenso wie eine fehlende oder mangelhafte Dachisolierung. Dagegen reduzieren Verschattungselemente insbesondere an Süd- und Westseiten (beispielsweise Rollos, Lamellen, Mauervorsprünge, aber auch Vordächer, Balkone, Markisen, Sonnensegel, Dach- und Fassadenbegrünungen usw.) den Einfluss der Außentemperatur auf das Innenraumklima.

Verstärkt wird die Gebäudeaufheizung außerdem durch einen hohen Versiegelungsgrad der Umgebung. Dichte Bebauungsstrukturen und das damit einhergehende Defizit an Grün- und Wasserflächen, rufen einen Wärmeineffekt hervor, der das Gebäude zusätzlich aufheizt. Zur Verringerung von Hitzebelastungen dienen begrünte oder schattige Flächen sowie die Verwendung heller Materialien; auch eine aufgelockerte Bebauung, die die Ventilationsbahnen freihält, oder natürliche Verschattungselemente (z. B. Bäume) wirken der Hitzebelastung entgegen (StMUV 2015, 2016; Buth et al. 2015; MUNLV NRW).

In den Sommermonaten erhöht sich für die Einwohner die Gefahr von Hitzestress. Prinzipiell sind alle sich in einer städtischen Wärmeinsel aufhaltenden Menschen von den Auswirkungen betroffen. Die Fähigkeit zur Bewältigung von Hitzebelastungen ist jedoch individuell sehr verschieden. Insbesondere ältere Menschen, Neugeborene und gesundheitlich Beeinträchtigte sind davon betroffen, da sie sich der erhöhten Wärmebelastung körperlich schwierig anpassen können. Abgesehen davon sind jedoch auch im produzierenden Gewerbe beschäftigte Personen betroffen, da die Hitzebelastung aufgrund von körperlichen Arbeiten weiter zunimmt.

Die Hitzebelastung am Tage wird bei Auftreten von Tropennächten nicht von einer erholsamen nächtlichen Abkühlung ausgeglichen. Dadurch steigert sich die thermische Belastung zusätzlich, das zu erhöhten gesundheitlichen Risiken führen kann.

Umsetzung

Zur Berechnung potenzieller Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln wurden als klimatischer Einfluss sowohl für die Gegenwart (1971–2000) als auch für die Zukunft (2021–2050) Modellergebnisse zur mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 °C (Heiße Tage) sowie zur mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 °C (Tropennächte) eines RCP8.5-Ensembles aus 13 Klimaprojektionen eingesetzt. Beide Klimaeinflussdaten wurden miteinander additiv verknüpft und zu einem Klimaeinfluss zusammengefasst. Die Klimaeinflussdaten des 15. Perzentils sind dem schwachen Wandel zugeordnet, die des 85. Perzentils dem starken Wandel.

Als Sensitivitätsindikator wurde das Potenzial für die Ausbildung von urbanen Wärmeinseln in die Berechnung der Klimawirkung einbezogen, welches die Bevölkerungszahl sowie den Versiegelungsgrad einbezieht, da die Hitzebelastung nicht nur vom Klima, sondern maßgeblich auch von der Siedlungsdichte beeinflusst wird. Analog zur Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) wurde das Wärmeinselpotenzial auf Grundlage des Urban-Heat-Island-Index (UHI_{max}) nach Früh et al. (2011) beziehungsweise Wienert et al. (2013) berechnet. Dieser maximale urbane Wärmeineffekt wird für eine zentraleuropäische Stadt in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl berechnet:

$$UHI_{max} = 2,01 * \left[\frac{\log(\text{Einwohnerzahl})}{\log(10)} \right] - 4,06$$

Für die vorliegende Pilotstudie wurde das Wärmeineffekt-Potenzial (UHI-Potenzial) verwendet, in das der oben genannte UHI-Index sowie der Anteil versiegelter Fläche einfließt:

$$UHI_{potenzial} = 0,784 * UHI_{max} * (\text{Anteil versiegelter Fläche})$$

Als Eingangsdaten für den UHI-Index wurden für die Bevölkerung Daten für die Gegenwart (2009) und die Zukunft (2030) einbezogen. Die Daten zur Gegenwart stammen vom LfStat. Zur Abbildung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung wurden die Einwohnerzahlen aus dem PANTA-RHEI-REGIO-Modell verwendet, die auch in das CC-LandStraD- Landnutzungsmodell eingeflossen sind.

Als Eingangsdaten für den Versiegelungsgrad wurden für die Gegenwart (2009) und Zukunft (2030) die versiegelten Flächen aus dem Projekt CC-LandStraD verwendet. Als versiegelte Fläche gelten die im CC-LandStraD-Projekt verwendeten Kategorien 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen'. Dabei wurde lediglich das Szenario „Wachstum“ berücksichtigt, da das Szenario „Stagnation“ nicht der aktuellen, tatsächlichen Bevölkerungsentwicklung in Bayern entspricht. Für die Zukunft wurde somit lediglich ein Sensitivitätsszenario in die Berechnung der Klimawirkung einbezogen.

Um die potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln abbilden zu können, wurde der normalisierte Sensitivitätswert (Wärmeineffekt-Potenzial) mit dem normalisierten Klimaeinfluss multiplikativ verknüpft. Für die Interpretation der Klimawirkung heißt das: treffen eine hohe Sensitivität (hohes Wärmeineffekt-Potenzial, beeinflusst durch hohe Bevölkerungszahl und hoher Versiegelungsgrad) und ein starker Klimaeinfluss zusammen, so wird eine starke Klimawirkung abgebildet. Für die Zukunft wird auf Seiten der Sensitivität nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse zeigen für die Gegenwart eine eher schwach ausgeprägte Klimawirkung im Vergleich zur Zukunft. Wird die Sensitivität separat betrachtet, wird deutlich, dass Verdichtungsräume, wie die kreisfreien Städte München und Nürnberg, ein hohes Wärmeineffekt-Potenzial aufweisen. Dies ist zum einen mit einem hohen Versiegelungsgrad und zum anderen mit einer hohen Bevölkerungsdichte zu begründen. Auch in Zukunft, sowohl bei einem schwachen als auch bei einem starken Wandel, werden insbesondere diese Bereiche von Hitzebelastungen voraussichtlich betroffen sein. Die Klimawirkung verstärkt sich im Falle eines starken Wandels jedoch deutlich. Dies ist auf den deutlichen projizierten Anstieg des Klimaeinflusses (Heiße Tage und Tropennächte) zurückzuführen, der den Wärmeineffekt und somit die potenzielle Gebäudeaufheizung verstärkt. Neben der projizierten Zunahme des Versiegelungsgrads tragen auch die weiter ansteigenden Bevölkerungszahlen zur Verstärkung der Klimawirkung bei (Abb. 33).

Kernaussage

- Die Hitzebelastung am Tage wird bei Auftreten von Tropennächten nicht von einer erholsamen nächtlichen Abkühlung ausgeglichen. Dadurch steigert sich die thermische Belastung zusätzlich, das zu erhöhten gesundheitlichen Risiken führen kann. Durch eine starke Ausprägung des Wärmeinseleffekts verändert sich das Innenraumklima und erhöht sich der Aufwand der Kühlung in Gebäuden. Eine Anpassung an erhöhte Temperaturen kann durch Beschattung und Isolation der Gebäudehülle aber auch durch technische Klimatisierung erfolgen.
- Als Klimaeinflüsse sind die Anzahl Heißer Tage sowie Tropennächte eingeflossen. Auf Seite der Sensitivität wurde als Indikator das Wärmeinseleffekt-Potenzial verwendet, welches von der urbanen Dichte (Bevölkerungszahl und Versiegelungsgrad) beeinflusst wird.
- In Zukunft könnten insbesondere die Verdichtungszentren München und Nürnberg von potenziellen Gebäudeaufheizungen betroffen sein, da der Versiegelungsgrad dort im Vergleich zum Umland stark erhöht ist.
- Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene (Kreise) stellen die Ergebnisse lediglich eine grobe Annäherung dar, da die topographische Ausgestaltung der Kreise stark differenzieren kann. Auch innerhalb der Kreise bestehen aufgrund siedlungsstruktureller Unterschiede differenzierte Ausprägungen der Klimawirkung, z. B. zwischen Siedlungs- und Freiraumbereichen, größeren und kleineren Siedlungsflächen.
- Für die Gebäudeaufheizung spielen außerdem die verwendeten Gebäudematerialien, technische Verschattungselemente sowie Dach-, Freiland- und Fassadenbegrünungen eine Rolle, die nicht in die Berechnung eingeflossen sind. Diese Daten könnten in kleinräumigeren Analysen verwendet werden. Einfluss auf die Ausprägung der Wärmeinsel haben die Flächennutzung (Anteil der Wohn-, Gewerbe- und Grünstrukturen) sowie die Bebauungsstruktur und Bebauungsdichte innerhalb einer Stadt.

Karten

Arbeitsstand: 02.10.2017

Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt BA-3-2017

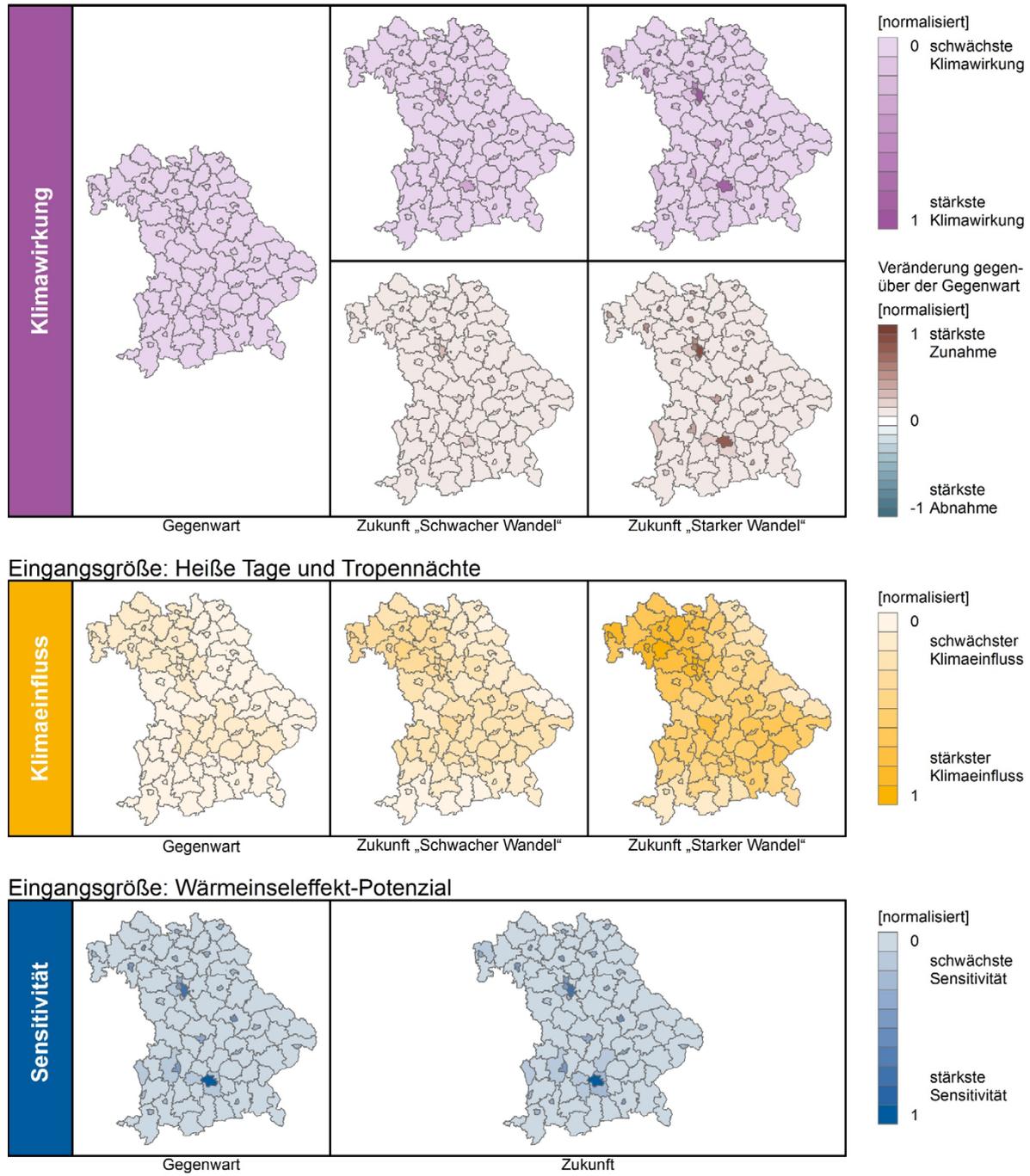


Abb. 33: Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln

5.6.4 BA-4-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen

Hintergrund

Für die Klimawirkung „Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen“ gelten die gleichen Hintergründe und Zusammenhänge, wie sie bereits für die zuvor beschriebene Klimawirkung „Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln“ genannt worden sind. Als weiteres Element kommt hinzu, dass kritische soziale Einrichtungen, wie Seniorenheime, Krankenhäuser und Kindertagesstätten, aufgrund ihrer z. T. sensiblen Nutzer als besonders hitzeempfindlich gelten. Dies begründet sich in der z. T. eingeschränkten Fähigkeit der darin lebenden älteren Menschen, Neugeborenen und gesundheitlich Beeinträchtigten, die Körpertemperatur zu regeln oder ausreichend Wasser zu trinken. Damit können sie Hitzestress schlechter bewältigen. Folgen einer Hitzebelastung sind unter anderem Atembeschwerden, Erkrankungen der Nieren, Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems oder Stoffwechselstörungen (StMUV 2016). Die Hitzebelastung am Tage wird bei Auftreten von Tropennächten nicht von einer erholsamen nächtlichen Abkühlung ausgeglichen. Dadurch steigert sich die thermische Belastung zusätzlich.

Umsetzung

Zur Berechnung der potenziellen Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen wurden als klimatischer Einfluss die Anzahl Heißer Tage sowie der Tropennächten eingesetzt (analog zu Kap. 5.6.3). Der Eingangsdatensatz wurde aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen gebildet und berücksichtigt für die Gegenwart den Zeitraum 1971 bis 2000 und für die Zukunft den Zeitraum 2021 bis 2050. Beide Klimaeinflussdaten wurden miteinander additiv verknüpft und damit zu einem Klimaeinfluss zusammengefasst. Die Klimaeinflussdaten des 15. Perzentils sind dem schwachen Wandel zugeordnet, die des 85. Perzentils dem starken Wandel.

Die gegenwärtige Sensitivität hitzeempfindlicher Einrichtungen wurde durch die Indikatoren „betreute Kinder in Tageseinrichtungen“ (unter drei Jahre und drei bis unter sechs Jahre, Stand 2016), „Schüler in allgemeinbildenden Schulen“ (Stand 2015/16) und „aufgestellte Betten in Krankenhäusern“ (Stand 2015) sowie „aufgestellte Betten in Vorsorge- und Reha-Einrichtungen“ (Stand 2015) dargestellt. Außerdem flossen Daten zu Pflegebedürftigen der Pflegeheime (Stand 2015) sowie zu Bewohnern in Einrichtungen für ältere Menschen (Stand 2014) ein. Die Daten stammen vom LfStat. Da keine Informationen über die Anzahl künftiger Nutzer der Einrichtungen vorliegen, wurden die Werte der Gegenwart auch für die Zukunft angenommen. Neben diesen Indikatoren floss zur Bewertung der gegenwärtigen und künftigen Situation außerdem das Wärmeinseleffekt-Potenzial ein, das als Komponenten die Bevölkerungszahlen (Stand 2009 und 2030) und die versiegelten Flächen enthält. Zur Berechnung des Urban-Heat-Island-Index siehe Kapitel 5.6.3, „Umsetzung“. Als versiegelte Fläche gelten die im CC-LandStraD-Projekt verwendeten Kategorien 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauf Flächen' und 'Brachen'.

Sowohl das Wärmeinseleffekt-Potenzial als auch die Summe der oben genannten Sensitivitätsindikatoren (Plätze/Betten) wurden normalisiert und additiv miteinander verknüpft. Um die potenzielle Gebäudeaufheizung der hitzeempfindlichen Einrichtungen abbilden zu können, wurde der normalisierte Sensitivitätswert mit dem normalisierten Klimaeinfluss multiplikativ verknüpft. Für die Interpretation der Klimawirkung heißt das: treffen ein hohes Wärmeinseleffekt-Potenzial und ein starker Klimaeinfluss auf eine hohe Anzahl an Bewohner/Nutzer sozialer Einrichtungen, so wird eine starke Klimawirkung abgebildet. Für die Zukunft wird auf Seiten der Sensitivität nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse (Abb. 34) zeigen für die Gegenwart eine eher schwach ausgeprägte Klimawirkung im Vergleich zur Zukunft. Bei Betrachtung der Sensitivitätskarten (Gegenwart und Zukunft) ist jedoch eine Akkumulation der Sensitivitätsindikatoren insbesondere in einigen Verdichtungsräumen (z. B. München und Umgebung, Erlangen, Fürth, Nürnberg, Würzburg) zu erkennen. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene (Kreise) stellen die Ergebnisse lediglich eine grobe Annäherung dar, die sich je nach topographischer Ausgestaltung der Kreise innerhalb dieser stark differenzieren können. Auf dieser Untersuchungsebene lassen sich keine räumlichen Unterschiede zwischen hitzeempfindlichen Einrichtungen und allgemeinem Gebäudebestand (BA-4-2017) darstellen, da sich beide Sensitivitäten in den Ballungszentren konzentrieren. Der Klimaeinfluss ist in den Regierungsbezirken Unterfranken und Niederbayern sowohl gegenwärtig, als auch in Zukunft etwas stärker ausgeprägt als in den restlichen Gebieten Bayerns.

Bei einer moderaten klimatischen Veränderung beim „schwachen Wandel“ ist in der Zukunft im Vergleich zur Gegenwart von einem schwachen Anstieg der Klimawirkung in den kreisfreien Städten auszugehen. Dieser Anstieg liegt mitunter an dem projizierten Anstieg des Versiegelungsgrades in den urbanen Zentren, der den Wärmeinseleffekt und damit die potenzielle Gebäudeaufheizung weiter verstärkt, aber auch an der projizierten steigenden Zahl Heißer Tage und Tropennächte. Die Trends verstärken sich bei einem starken Wandel sogar deutlich. Verdichtungsräume, in denen mit einem großen Bevölkerungszuwachs gerechnet wird, werden bei einem starken Wandel hohen Hitzebelastungen ausgesetzt sein. Dabei muss man beachten, dass in die Berechnung die o.g. Gruppen einbezogen wurden, aber sich diese vermutlich untereinander hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber von Hitze unterscheiden. So dürften ältere Menschen auf Hitzebelastungen sensibler reagieren als z. B. „Schüler in allgemeinbildenden Schulen“.

Kernaussage

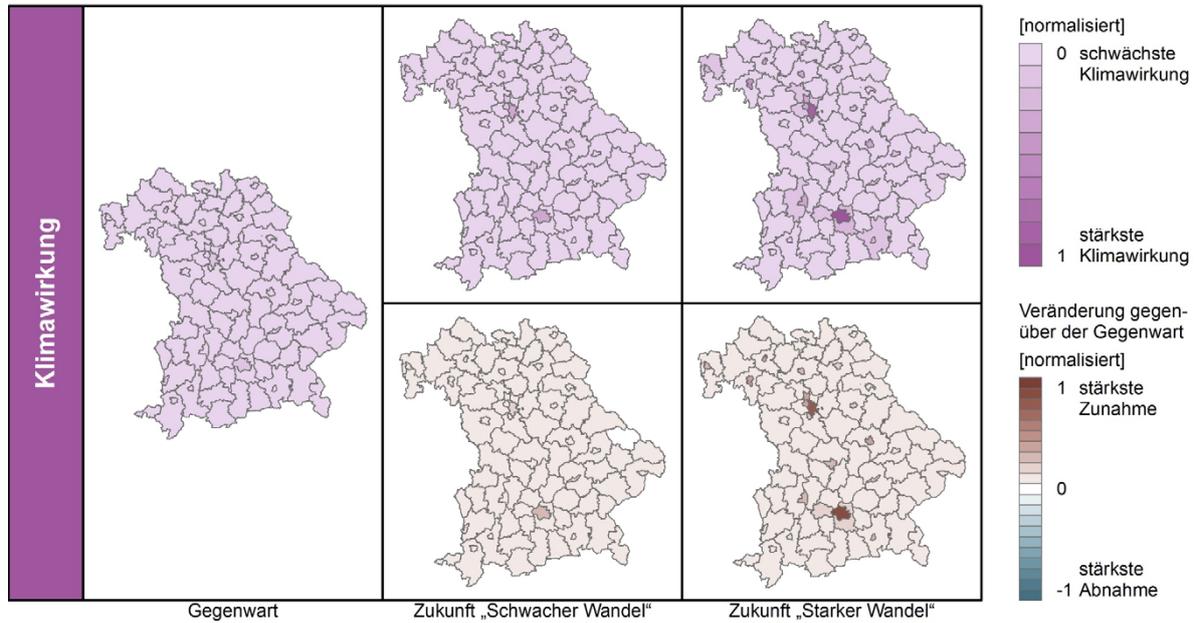
- Die Hitzebelastung am Tage wird bei Auftreten von Tropennächten nicht von einer erholsamen nächtlichen Abkühlung ausgeglichen. Dadurch steigert sich die thermische Belastung zusätzlich, das zu erhöhten gesundheitlichen Risiken führen kann. Durch eine starke Ausprägung des Wärmeinseleffekts verändert sich das Innenraumklima und erhöht den Aufwand der Kühlung. Eine Anpassung an erhöhte Temperaturen kann durch eine technische Klimatisierung, aber auch durch eine Beschattung und Isolierung der Gebäudehülle erfolgen.
- Als Klimaeinflüsse sind die Anzahl Heißer Tage sowie Tropennächte eingeflossen.
- Auf Seite der Sensitivität wurde die Anzahl an Bewohnern sowie andere Nutzer sozialer Einrichtungen als Indikatoren sowie das Wärmeinseleffekt-Potenzial verwendet.
- In Zukunft könnten insbesondere Verdichtungszentren von potenziellen Gebäudeaufheizungen betroffen sein, da der Versiegelungsgrad dort im Vergleich zum Umland stark erhöht ist. Außerdem erhöht sich die Betroffenheit, denn das LfStat geht von einer wachsenden Bevölkerung aus.
- Die Ergebnisse stellen lediglich eine grobe Annäherung dar, die sich innerhalb der Kreise stark differenzieren können. Deshalb lassen sich keine räumlichen Unterschiede zwischen hitzeempfindlichen Einrichtungen und allgemeinem Gebäudebestand (BA-4-2017) darstellen, da sich beide Sensitivitäten in den Ballungszentren konzentrieren.
- Für die Gebäudeaufheizung spielen außerdem die verwendeten Gebäudematerialien, technische Verschattungselemente sowie Dach- und Fassadenbegrünungen eine Rolle, die nicht in die Berechnung eingeflossen sind. Diese Daten könnten in kleinräumigeren Analysen verwendet werden.

Karten

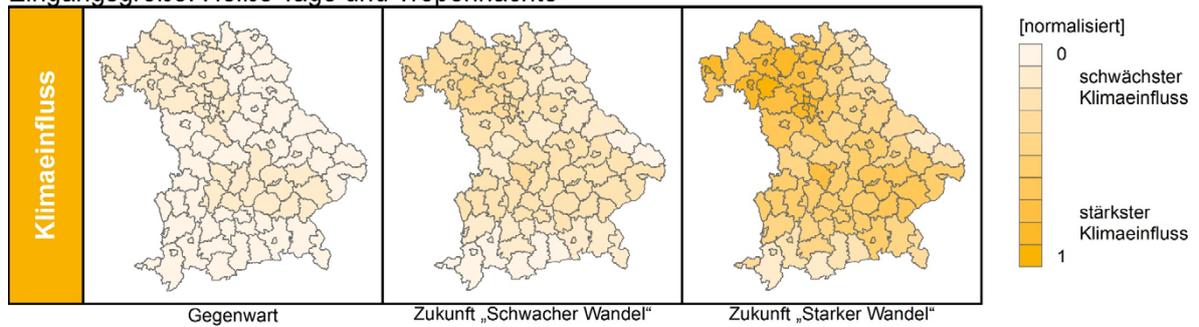
Arbeitsstand: 02.10.2017

Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt BA-4-2017



Eingangsgröße: Heiße Tage und Tropennächte



Eingangsgröße: Hitzeempfindliche Einrichtungen und Wärmeinseleffekt-Potenzial



Abb. 34: Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen

5.7 Industrie und Gewerbe

In der Vergangenheit sind in Bayern beziehungsweise in einzelnen Teilregionen Extremereignisse wie Stürme, Frost, Hitze und Starkregenereignisse eingetreten, deren Häufigkeit und Ausmaß im Rahmen des Klimawandels zugenommen hat. Die Folgen des Klimawandels können für einzelne Unternehmen und Branchen sehr unterschiedlich ausfallen. Sozio-ökonomische Faktoren wie Rohstoffeinsatz, Vernetzung innerhalb der Wertschöpfungskette oder die Abhängigkeit von klimatischen Rahmenbedingungen bei der Produktion spielen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der potenziellen Betroffenheit. Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ zeigen sich viele Verbindungen zu anderen Handlungsbereichen. Beispielsweise würden bei der Freisetzung und Verbreitung gefährlicher Stoffe durch Hochwasser geradezu alle weiteren Handlungsfelder betroffen sein (Buth et al. 2015).

Extremwetterereignisse können Bauwerke, Teilbereichsanlagen und Einrichtungen der Infrastruktur beschädigen. Ebenfalls führen sie zu betrieblichen Einschränkungen, wenn Schäden an Straßen und Schienen infolge der Extremereignisse Lieferverzögerungen verursachen. Produktionsausfälle und die Kosten der Schadensbeseitigung stellen sowohl für die Unternehmen als auch für die Lieferanten im In- und Ausland zusätzlich eine finanzielle Belastung dar (StMUV 2015). Im Jahr 2013 wurden über 70 % des Güteraufkommens auf der Straße und 9 % auf der Schiene transportiert (Destatis 2014). Besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels sind Ballungsgebiete aufgrund ihrer dichten Verkehrsinfrastruktur, aber auch die Lage zu einem angrenzenden Fluss kann sich im Falle eines Hochwassers negativ auf den Standort auswirken (StMUV 2016).

Weitere negative Auswirkungen, wie beispielsweise die geringe Wasserverfügbarkeit bei Trockenperioden für industrielle Prozessabläufe oder für die Kühlung, werden in den weiteren Handlungsfeldern (Kap. 5.8) thematisiert. Insbesondere zu den Handlungsfeldern Wasserwirtschaft, Bauen und Energiewirtschaft zeigen sich zahlreiche intersektorale Beziehungen (StMUV 2016).

Aufgrund nicht belastbarer Starkwinddaten konnten die Klimawirkungen „Potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen durch Starkwind“ sowie „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Starkwind“ nicht berechnet werden. Die zur Berechnung benötigten Spitzengeschwindigkeiten von Böen standen zur Zeit der Projektbearbeitung nicht zur Verfügung. Insgesamt sind die projizierten Winddaten mit Fehlern belastet, sodass von ihrer Verwendung aktuell (2018) abgesehen werden muss.

5.7.1 IG-1-2017, Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen

Hintergrund

Hochwasserereignisse können dazu führen, dass auch Kläranlagen, die oft in der Nähe von Flüssen angesiedelt sind, überschwemmt werden und dabei unzureichend gereinigte Abwässer in die Fließgewässer austreten. Da der Klimawandel die Niederschlagsmuster in Deutschland verändert und Flusshochwasser zukünftig häufiger und intensiver auftreten können, besteht hier ein relevanter Zusammenhang zwischen der Wasserwirtschaft und dem Klima sowie seiner Veränderung (Buth et al. 2015).

In der UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ wird im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe der Indikator „Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ als Teil der Klimawirkung „Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen“ beschrieben (Buth et al. 2015). Die Karte zu diesem Indikator weist kein einheitliches Muster auf, allerdings sind Landkreise mit einer stärkeren Klimawirkung vor allem in den Flusseinzugsgebieten von Elbe, Weser und Donau, und somit auch in Bayern verortet. Jedoch wurden als Eingangsdaten für

den Klimaeinfluss die Ergebnisse aus dem LISFLOOD-Modell verwendet, die die Schutzwirkung von Hochwasserschutzanlagen nicht berücksichtigen und somit den realen Verhältnissen nicht annähernd entsprechen. Das Modell bildet sozusagen ein „potenzielles Versagen“ der Schutzanlagen ab (Buth et al. 2015), was in Zukunft aufgrund extremerer Ereignisse ohne eine entsprechende Anpassung des Hochwasserschutzes häufiger auftreten könnte. In der UBA-Studie werden die Auswirkungen von Flusshochwassern auf Kanalnetz und Kläranlagen für die Gegenwart und einen zukünftigen eher schwächeren Wandel als mittel und für einen zukünftigen eher stärkeren Wandel als hoch eingeschätzt (Buth et al. 2015; StMUV 2016).

Für Bayern selbst sind die Auswirkungen von Flusshochwassern auf Kanalnetz und Kläranlagen aus Gründen der Datenverfügbarkeit bislang noch nicht untersucht worden (vgl. Kap. 5.5), sodass diesbezüglich auch keine weiterführenden Aussagen möglich sind.

Umsetzung

Um den Klimaeinfluss abzubilden, wurden die Überschwemmungsflächen für ein HQ₁₀₀ aus den Hochwassergefahrenkarten, die bereits durchgeführte technische Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigen, übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ (= Risikogewässer) in die Berechnung einbezogen (Informationen aus den Hochwassergefahrenkarten).

Für die Sensitivität wurden die vom LDBV über das Basis-DLM25 zur Verfügung gestellten Kläranlagenflächen (Stand 2016) verwendet, die Grundstücksscharf als georeferenzierte Vektordaten vorlagen. Auch hier erfolgte eine additive Verknüpfung der absoluten Kläranlagenfläche mit der anteiligen Kläranlagenfläche an der Kreisfläche mit anschließender Normalisierung. Da auch hier keine Projektionsdaten verfügbar waren, wurde nur die Gegenwart abgebildet. Allerdings ist zu beachten, dass die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen nicht von der Flächengröße der Kläranlage, sondern maßgeblich von dem in der Kläranlage verwendeten Verfahren abhängt. So ergeben sich aus naturnahen Verfahren zur Abwasserbehandlung, wie sie oft im ländlichen Raum verwendet werden, häufig hohe spezifische Kläranlagenflächen, bei gleichzeitig relativ geringen Gefahrenpotenzial. Andererseits ergeben sich für die technisierten Kläranlagen der großen Städte, die zum Teil auf historischen Standorten mit beengten Flächenverhältnissen lokalisiert sind, eher geringe spezifische Flächen bei gleichzeitig relativ hohem Gefahrenpotenzial.

Für die Berechnung der Klimawirkung wurden in einem ersten Schritt beide Flächenkulissen, das heißt die HQ₁₀₀ Überschwemmungsflächen und die Klärwerksflächen miteinander verschnitten, um so diejenigen Klärwerksflächen zu identifizieren, die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmt wären. Somit ergab sich für jeden Kreis ein Wert für die überschwemmungsgefährdete Klärwerksfläche. Dieser und der relative Wert (Anteil überflutete Klärwerksfläche an der Kreisfläche) wurden schließlich normalisiert und additiv kombiniert. Das Ergebnis ist in der Klimawirkungskarte dargestellt.

Ergebnisse für die Gegenwart

Die Klimawirkungskarte zeigt eine stärkere Ausprägung in Mittel- und Unterfranken im Bereich des Mains und seiner Zuflüsse (insbesondere in den Landkreisen Main-Spessart und Lichtenfels) sowie in den östlichen Landesteilen entlang der Donau (Abb. 35). Je dunkler ein Kreis in der Karte dargestellt ist, desto mehr Klärwerksfläche ist im Kreis absolut beziehungsweise relativ (gemessen an der Kreisfläche) potentiell überflutet.

Die Klimaeinflusskarte hat in diesem Fall lediglich informativen Charakter, da sie die bei einem 100-jährlichen Hochwasser (HQ₁₀₀) überschwemmten Flächen (Kombination von absoluten und relativen

Werten) darstellt, unabhängig davon, ob sich in den Überschwemmungsflächen tatsächlich Klärwerke befinden oder nicht. Dies gilt umgekehrt auch für die Sensitivitätskarte, die lediglich die Größe der Klärwerksflächen pro Landkreis (Kombination von absoluten und relativen Werten) darstellt, auch hier unabhängig davon, ob sie im Überschwemmungsbereich des 100-jährlichen Hochwassers liegen oder nicht.

Kernaussage

- Durch Hochwasserereignisse sind Kläranlagen potenziell überschwemmungsgefährdet. Bei Überschwemmungen können ungeklärte Abwässer in Fließgewässer gelangen. Zukünftig kann diese Auswirkung des Klimawandels aufgrund veränderter Niederschlagsmuster zunehmen.
- Die Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert.
- In die Analyse sind als Klimaeinfluss die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmten Flächen eingeflossen. Zur Abbildung der Sensitivität wurden die Klärwerksflächen herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen von dem Verfahren zur Abwasserreinigung abhängt, welches durch die Flächengröße eines Klärwerks nicht abgebildet wird. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität, indem beide Flächenkulissen miteinander geografisch verschnitten wurden.
- Die Klimawirkungskarte zeigt erhöhte Werte für die überschwemmungsgefährdete Klärwerksfläche in Mittel- und Unterfranken im Bereich des Mains und seiner Zuflüsse (insbesondere in den Landkreisen Main-Spessart und Lichtenfels) sowie in den östlichen Landesteilen entlang der Donau.

Karten

Arbeitsstand: 03.11.2017

Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt IG-1-2017

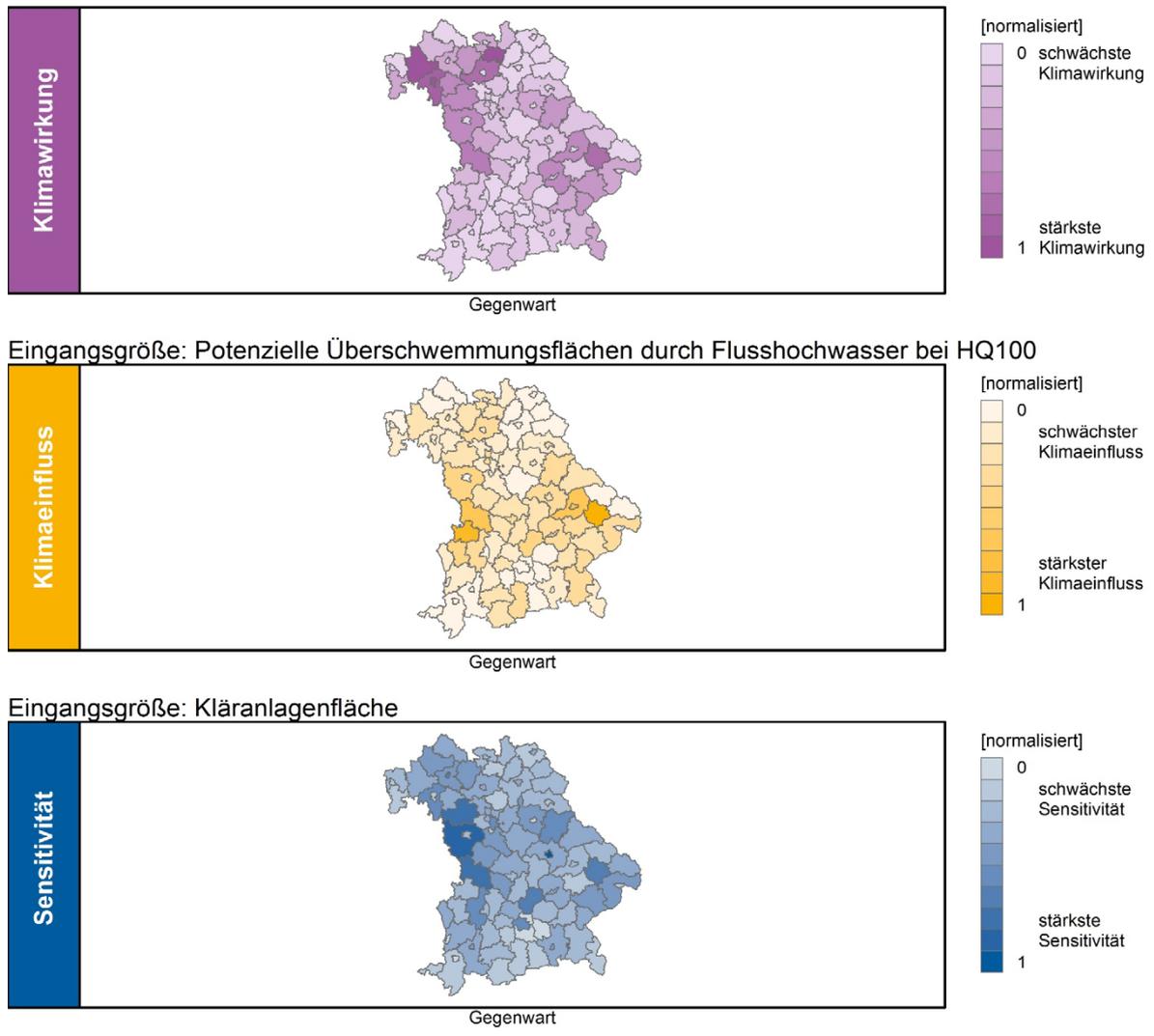


Abb. 35: Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser

5.7.2 IG-2-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen

Hintergrund

Obwohl technischer Hochwasserschutz keinen hundertprozentigen Schutz bieten kann, wurden in den letzten Jahrzehnten bundesweit immer wieder Gewerbegebiete in überschwemmungsgefährdeten Bereichen ausgewiesen. Diese werden im Falle eines Versagens von Hochwasserschutzanlagen, die vor einem 100-jährlichen Hochwasserereignis schützen sollen, überschwemmt. Industrieunternehmen liegen ebenfalls häufig an Flüssen, sie nutzen das Wasser für Kühlvorgänge oder die Produktion. Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes verwendeten im Jahr 2013 rund 4,4 Mrd. m³ Wasser, was in etwa 15 % der gesamtwirtschaftlichen Wassernutzung ist (UBA 2017c).

Ereignisse wie ein extremes Hochwasser können Betriebsanlagen, Bauwerke sowie Einrichtungen der Infrastruktur beschädigen.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an Betriebsanlagen von Industrie und Gewerbe durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen eines HQ₁₀₀ mit Industrie- und Gewerbeflächen verschnitten werden.

Um den Klimaeinfluss abzubilden, wurden die Überschwemmungsflächen aus den Hochwassergefahrenkarten, die bereits bestehende Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigen, übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ (= Risikogewässer) in die Berechnung einbezogen (Informationen aus den Hochwassergefahrenkarten). Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft und mit einer größeren räumlichen Abdeckung wünschenswert. Bei der Berechnung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten möglich. Die Sensitivität wurde über die absoluten und relativen Industrie- und Gewerbeflächen pro Kreis abgebildet. Für die Sensitivität wurden die Ergebnisse aus dem CC-LandStraD-Projekt herangezogen. Dafür wurden die vorhandenen Rasterdaten auf Kreisebene aggregiert. Um die Flächen abzubilden, wurde der Layer „Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude“ verwendet. Für die auf Kreisebene aggregierten absoluten und relativen Werte für die Industrie- und Gewerbeflächen erfolgte eine Normalisierung und anschließende additive Verknüpfung. Für die Gegenwart wurden Daten für das Jahr 2009 verwendet. Diese bildeten auch die Grundlage für die Modellierung der künftigen Industrie- und Gewerbeflächen für das Jahr 2030. Für die Zukunft wurde nur ein Szenario („Wachstumsszenario“ aus dem CC-LandStraD-Projekt) sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.

Für die Berechnung der Klimawirkung „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-2-2017) werden in einem ersten Schritt die potenziellen Überschwemmungsflächen und die Flächen für Industrie und Gewerbe geografisch miteinander verschnitten. Anschließend wurde die absolute und relative (Anteil an der Kreisfläche) überschwemmte Industrie- und Gewerbefläche der jeweiligen Kreise additiv verknüpft und erneut normalisiert.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse für die Gegenwart zeigen, dass die Klimawirkung in den an den Flüssen Donau, Isar und Main liegenden Landkreisen Deggendorf und Günzburg sowie im Regierungsbezirk Unterfranken am stärksten ausgeprägt ist (Abb. 36). Mit der am stärksten ausgeprägten Klimawirkung sticht der Landkreis Deggendorf hervor, in dem zum Zeitpunkt der Datenerhebung der Hochwasserschutz noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichtet war. Die Analyse ergab, dass sich die Klimawirkung zukünftig nur wenig verändern wird. Dies ist jedoch damit zu begründen, dass auch für die Zukunft die gegenwärtigen Überschwemmungsflächen eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses angenommen wurden und sich die Änderung der Klimawirkung allein aus der Veränderung der Sensitivitätsdaten ergibt. Geht man jedoch davon aus, dass die Intensität und Häufigkeit von Überschwemmungsereignissen künftig zunehmen wird, ist in Zukunft mit steigenden Schäden an Industrie- und Gewerbeanlagen durch Flusshochwasser zu rechnen, falls keine ausreichenden Anpassungen im Hochwasserschutz vorgenommen werden sollten.

Kernaussage

- Flusshochwasser können Betriebsanlagen, Bauwerke sowie Einrichtungen der Infrastruktur von Industrie- und Gewerbeflächen beschädigen. Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird.
- Die Klimawirkung wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert. Bei der Operationalisierung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Zukunftsprojektionen für die Hochwasserdaten wichtig sowie die Berücksichtigung von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sinnvoll.
- In die Analyse sind als Klimaeinfluss die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmten Flächen eingeflossen. Zur Abbildung der Sensitivität wurden die Flächen für Industrie und Gewerbe herangezogen. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität, indem beide Flächenkulissen miteinander geografisch verschnitten wurden.
- Der Landkreis Deggendorf zeigt im Vergleich zu den restlichen bayerischen Landkreisen die stärkste Klimawirkung, da hier zum Zeitpunkt der Datenerhebung der Hochwasserschutz noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichtet war.

Karten

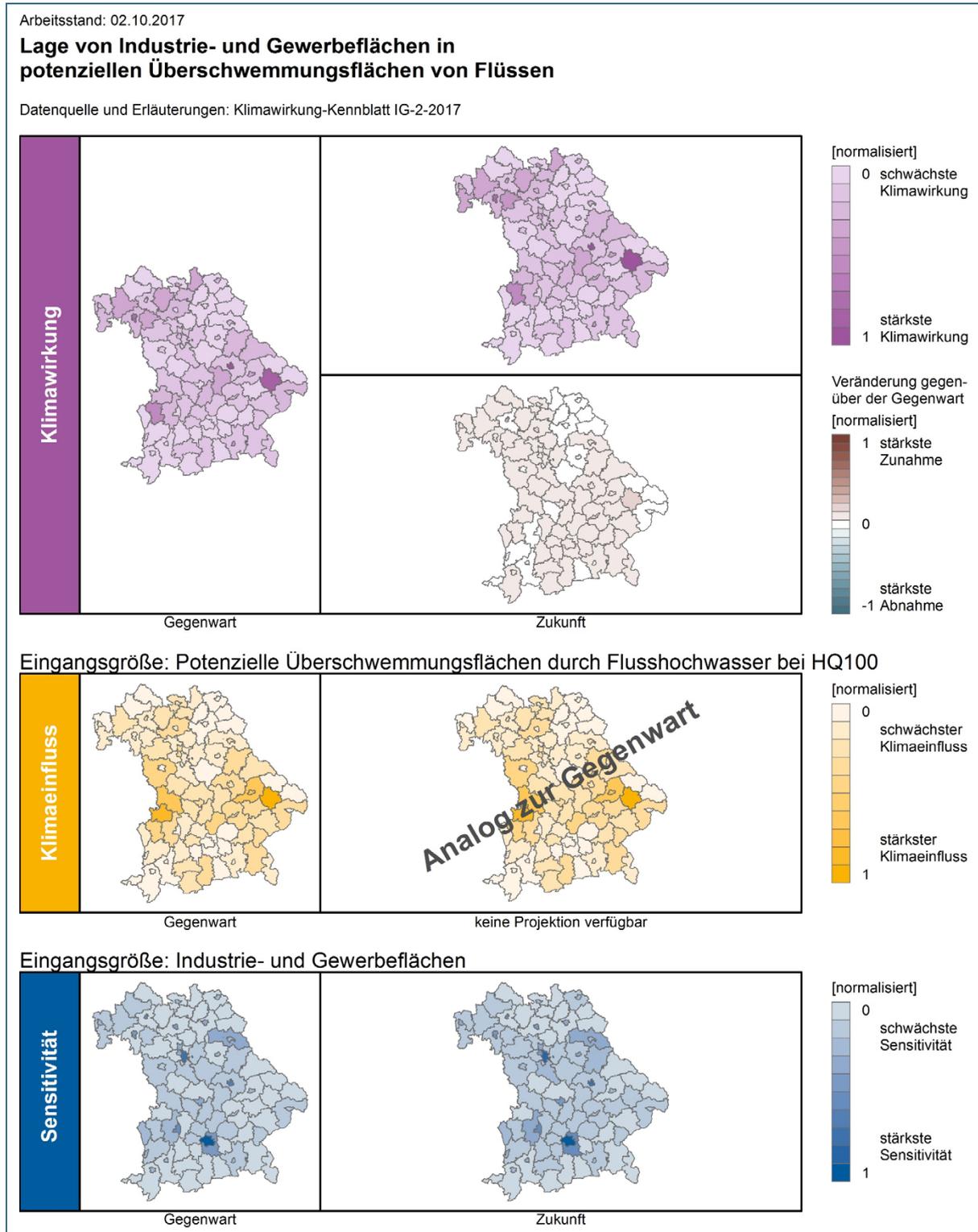


Abb. 36: Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen

5.7.3 IG-3-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)

Hintergrund

Starkregenereignisse zeichnen sich durch eine hohe Intensität und kurze Dauer aus. Sie können gerade in kleinen Einzugsgebieten Gewässer schnell ansteigen lassen und dadurch sturzflutartige Hochwasserwellen erzeugen (LfU 2017b). Insbesondere auf stark versiegelten Flächen in Siedlungsbereichen oder in Industrie- und Gewerbegebieten in Verbindung mit größeren Hangneigungen verursacht das unkontrolliert abfließende Wasser hohe Schäden.

Im deutschlandweiten Vergleich der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamts zeigte sich, dass das Sturzflutpotenzial im Süden Deutschlands größer als im Norden ist, was mit einer höheren Reliefenergie sowie einer größeren Anzahl an Starkregentagen begründet werden kann. Diese treten laut den Untersuchungsergebnissen der UBA-Studie in Bayern häufiger am Alpenrand auf als im restlichen Teil Bayerns (Buth et al. 2015).

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten potenziellen Schäden an Industrie- und Gewerbeflächen durch Sturzfluten gegenwärtig am Alpenrand auftreten, während die Klimawirkung in den restlichen Kreisen Bayerns vergleichsweise schwach ausgeprägt ist. Die Karte des Klimaeinflusses zeigt, dass dies auch die Kreise sind, in denen das Sturzflutpotenzial in Bayern deutlich höher ist als in anderen Kreisen. Dieser Effekt lässt sich insbesondere mit der Anzahl der Starkregentage nach der verwendeten Definition (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) begründen, die die Ergebnisse deutlich dominieren. Die höchste Sensitivität zeigt sich hingegen in den Verdichtungsräumen München, Ingolstadt und Nürnberg sowie im Landkreis Neustadt an der Waldnaab (Abb. 37).

Für die Zukunft zeichnet sich ein ähnliches Muster ab. Da in der Zukunft mit einer Zunahme der Starkregenereignisse gerechnet wird, ist beim Szenario des starken Wandels von einer stärker werdenden Klimawirkung auszugehen. Das heißt, durch eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen sind potenziell mehr Industrie- und Gewerbeflächen von Überflutungen betroffen und somit werden potenziell höhere Schäden verursacht. Beim schwachen Wandel ist hingegen keine große Veränderung erkennbar. Auch hier konzentrieren sich die stärksten Ausprägungen der Klimawirkung am Alpenrand in den Landkreisen Oberallgäu, Ostallgäu, Bad Tölz-Wolfratshausen, Rosenheim, Traunstein und Berchtesgadener Land.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden in Industrie- und Gewerbegebieten durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.

Die Berechnung des Sturzflutpotenzials wird in Kapitel 5.5.2 ausführlich erklärt. Eingangsdaten waren die Anzahl der Starkregentage ($> 25 \text{ mm d}^{-1}$), die in einer Auflösung von $12,5 \text{ km} \times 12,5 \text{ km}$ vorliegen und auf Landkreisebene aggregiert wurden, sowie das hochaufgelöste Digitale Geländemodell des LDBV mit einer Rasterzellengröße von $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ für die Berechnung der Reliefenergie, die ebenso auf Kreisebene aggregiert wurde. Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage ist mit einer hohen Unsicherheit der Aussagefähigkeit verbunden. Ursache sind die geringe zeitliche (Messungen) und räumliche Auflösung (Messstationen) der Niederschlagsdaten. Für die Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Verbesserungen bei der Operationalisierung wären insbesondere durch eine Berücksichtigung der Landbedeckung zu erzielen, die neben dem Gefälle einen starken Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit des Wassers und somit auf das

Sturzflutpotenzial besitzt. Die Sensitivität wird, wie bei der Klimawirkung „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-2-2017), über die absoluten und relativen Industrie- und Gewerbeflächen pro Kreis abgebildet (siehe Kapitel 5.7.2). Um die Klimawirkung abbilden zu können, wurde der normalisierte Sensitivitätswert mit dem normalisierten Klimaeinfluss multiplikativ verknüpft.

Kernaussage

- Starkniederschläge in Verbindung mit einem starken Gefälle können Sturzfluten verursachen.
- Das Sturzflutpotenzial wurde mithilfe der Anzahl der Starkregentage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) und der Reliefenergie berechnet. Die Klimawirkung ergibt sich aus der multiplikativen Verknüpfung der Industrie- und Gewerbeflächen mit dem Sturzflutpotenzial pro Kreis.
- Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage schränkt die Aussagefähigkeit stark ein. In Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung.
- Für die Gegenwart ist die Klimawirkung in den am Alpenrand liegenden Kreisen am höchsten, wobei besonders die Landkreise Oberallgäu, Rosenheim und Berchtesgadener Land hervortreten. Auch für die Zukunft, bei der beim starken Wandel von einer Zunahme der Starkregeneignisse und somit einer Erhöhung des Sturzflutpotenzials auszugehen ist, zeigen diese Landkreise eine weitere Zunahme der Klimawirkung.
- Der Klimaeinfluss nimmt in Bayern sehr unterschiedliche Werte an. Aufgrund der multiplikativen Verknüpfung mit der Geländeneigung dominiert die hohe Anzahl an Starkregentagen in der Alpenregion die Ergebnisse, während andere, ebenso gefährdete Mittelgebirgsregionen, nicht hervortreten.

Karten

Arbeitsstand: 12.10.2017

Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt IG-3-2017

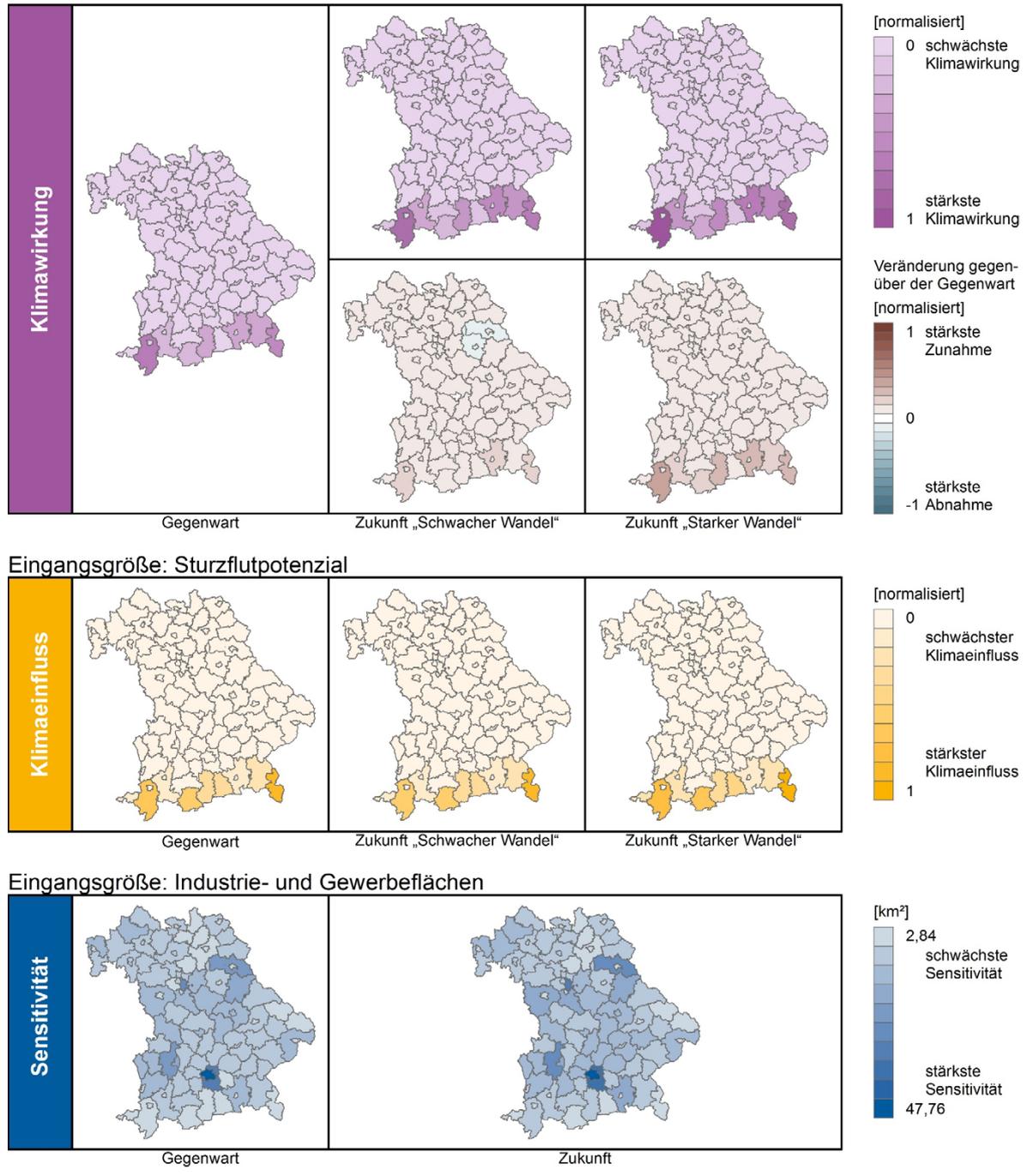


Abb. 37: Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)

5.7.4 IG-4-2017, Potenzielle Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Flusshochwasser

Hintergrund

Flusshochwasser können Straßen und Schienen überschwemmen, sodass es zu einer Beeinträchtigung bei der Nutzbarkeit der Infrastruktur kommen kann. Außerdem können permanente Schäden an der Infrastruktur verursacht werden, die den Betrieb dauerhaft beeinträchtigen. Der Landverkehr spielt in Bezug auf das Handlungsfeld Industrie und Gewerbe eine bedeutende Rolle, denn Schäden an Straßen und Schienen können den Transport von Gütern zeitweise verzögern oder gänzlich verhindern, was zu wirtschaftlichen Schäden durch Produktionsverluste und -ausfälle führen kann (StMUV 2016; Buth et al. 2015).

Generell wird von einer zunehmenden Bedeutung von Straße und Schiene für das Güterverkehrsaufkommen ausgegangen. Dies lässt sich nicht nur mit der Zunahme des Verkehrsaufkommens begründen, sondern auch mit der Logistik der Unternehmen. Die Berechnungen der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015), die mithilfe des hydrologischen Modells LISFLOOD ohne Berücksichtigung von Deichen und Dämmen potenzielle Überschwemmungsflächen berechneten, zeigen, dass in Bayern ohne Berücksichtigung von technischen Schutzanlagen im Einzugsgebiet der Donau und in den Verdichtungsräumen mit großen potenziellen Überschwemmungsflächen zu rechnen wäre (Buth et al. 2015).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen (unter Berücksichtigung bereits durchgeführter technischer Hochwasserschutzmaßnahmen) mit den Verkehrsflächen des Landverkehrs verschnitten wurden.

Um den Klimaeinfluss abzubilden, wurden die Überschwemmungsflächen eines HQ₁₀₀ aus den Hochwassergefahrenkarten, die bereits durchgeführte technische Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigen, übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ (= Risikogewässer) in die Berechnung einbezogen (Informationen aus den Hochwassergefahrenkarten). Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft und mit einer größeren räumlichen Abdeckung wünschenswert. Bei der Berechnung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten möglich. Als Sensitivitätsindikator wurde die Landverkehrsinfrastrukturfläche herangezogen, welche sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen ergibt. Die Daten für die gegenwärtigen Landverkehrsinfrastrukturflächen (2016) wurden dem vom LDBV zur Verfügung gestellten Basis-DLM25 entnommen und lagen als georeferenzierte Vektordaten vor. Um die Zukunft abbilden zu können, wurden für den künftigen Staatsstraßenausbau Daten der OBB und für den künftigen Ausbau der Bundesstraßen, Autobahnen und Schienenwege Daten des BMVI herangezogen. Je nach betrachtetem Szenario „starker“ oder „schwacher Wandel“ wurden für die Zukunft unterschiedliche Ausbaugrade angesetzt (im Detail siehe Klimawirkungskennblatt, Anhang). Um die Landverkehrsinfrastrukturfläche zu berechnen, wurden die absoluten und relativen Infrastrukturflächen additiv miteinander verknüpft und anschließend normalisiert.

Um die Klimawirkung abzubilden, wurde die jeweilige Landverkehrsinfrastrukturfläche mit den HQ₁₀₀ Überschwemmungsflächen geografisch verschnitten. Die absoluten und relativen (Anteil an der Kreis-

fläche) überfluteten Landverkehrsinfrastrukturflächen wurden jeweils auf Kreisebene normalisiert, additiv verknüpft und zuletzt noch einmal normalisiert.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für die Gegenwart ist die Klimawirkung am stärksten im Landkreis Deggendorf (zur Zeit der Datenerhebung war der Hochwasserschutz noch auf ein niedrigeres Bemessungshochwasser ausgerichtet) und im Regierungsbezirk Unterfranken (Würzburg, Schweinfurt, Main-Spessart, Haßberge und Lichtenfels) ausgeprägt. Zukünftig sind in einigen Kreisen Ausbauprojekte geplant, die von Überschwemmungen betroffen sein könnten.

Bei der Betrachtung des gesamten Bundeslandes ist zu erkennen, dass die Klimawirkung mit Ausnahme der oben genannten kreisfreien Städte und Landkreise vergleichsweise gering ausfällt, was jedoch nicht bedeutet, dass hier keine Betroffenheit vorliegt. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim schwachen und starken Wandel sind durch die marginale Abnahme der zukünftigen Verkehrsfläche (beispielsweise durch Rückbau von Abschnitten bei Straßenverlegungen) entstanden (vgl. Abb. 38). Allerdings ist zu beachten, dass auch für die Zukunft die gegenwärtigen Überschwemmungsflächen eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses angenommen wurden und sich die Änderung der Klimawirkung allein aus der Veränderung der Sensitivitätsdaten ergibt. Geht man jedoch davon aus, dass die Intensität und Häufigkeit von Überschwemmungsereignissen künftig zunehmen wird, ist in Zukunft mit steigenden potenziellen Schäden durch Flusshochwasser zu rechnen, falls keine ausreichenden Anpassungen im Hochwasserschutz vorgenommen werden sollten.

In den Kreisen und kreisfreien Städten mit einer starken Klimawirkung liegt im Vergleich zu den restlichen bayerischen Kreisen eine hohe Anzahl an Verkehrsflächen vor, die potenziell überschwemmt werden können. Dies lässt sich aus dem Einzelkarten des Klimaeinflusses und der Sensitivität jedoch nicht immer ablesen: sowohl Deggendorf und Passau als auch die nördlichen kreisfreien Städte und Kreise weisen gegenwärtig und künftig eine vergleichsweise geringe Sensitivität auf. Dennoch können durch die geografische Verschneidung von Klimaeinfluss und Sensitivität solche Kreise in den Vordergrund treten, wenn eine entsprechend große Landverkehrsfläche potenziell überflutet werden kann. Für die Kreise mit der schwächsten oder einer schwachen Klimawirkung heißt das also, dass dort keine oder nur wenige Überschwemmungsflächen auf Verkehrsinfrastrukturflächen treffen.

Kernaussage

- Flusshochwasser können Straßen und Schienen überfluten, sodass diese zeitweise nicht befahrbar sind. Folglich können Lieferverzögerungen zu finanziellen Einbußen führen. Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird.
- Die Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Flusshochwasser“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert. Bei der Operationalisierung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Zukunftsprojektionen für die Hochwasserdaten wichtig sowie die Berücksichtigung von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sinnvoll.
- In die Analyse sind als Klimaeinfluss die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmten Flächen eingeflossen. Für die Abschätzung der Sensitivität wurde die Landverkehrsinfrastrukturfläche abgebildet, die sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen ergibt. Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem Ausbauplan der Staatsstraßen entnommen. Die Klimawirkung ergibt sich aus der geografischen Verschneidung der potenziellen Überschwemmungsflächen und der Landverkehrsinfrastrukturfläche.

→ Die Klimawirkung für die Gegenwart ist im Landkreis Deggendorf (zur Zeit der Datenerhebung war der Hochwasserschutz noch auf ein niedrigeres Bemessungshochwasser ausgerichtet) und im Regierungsbezirk Unterfranken (Mainschleife mit hohem Anteil an Überschwemmungsflächen) am höchsten.

Karten

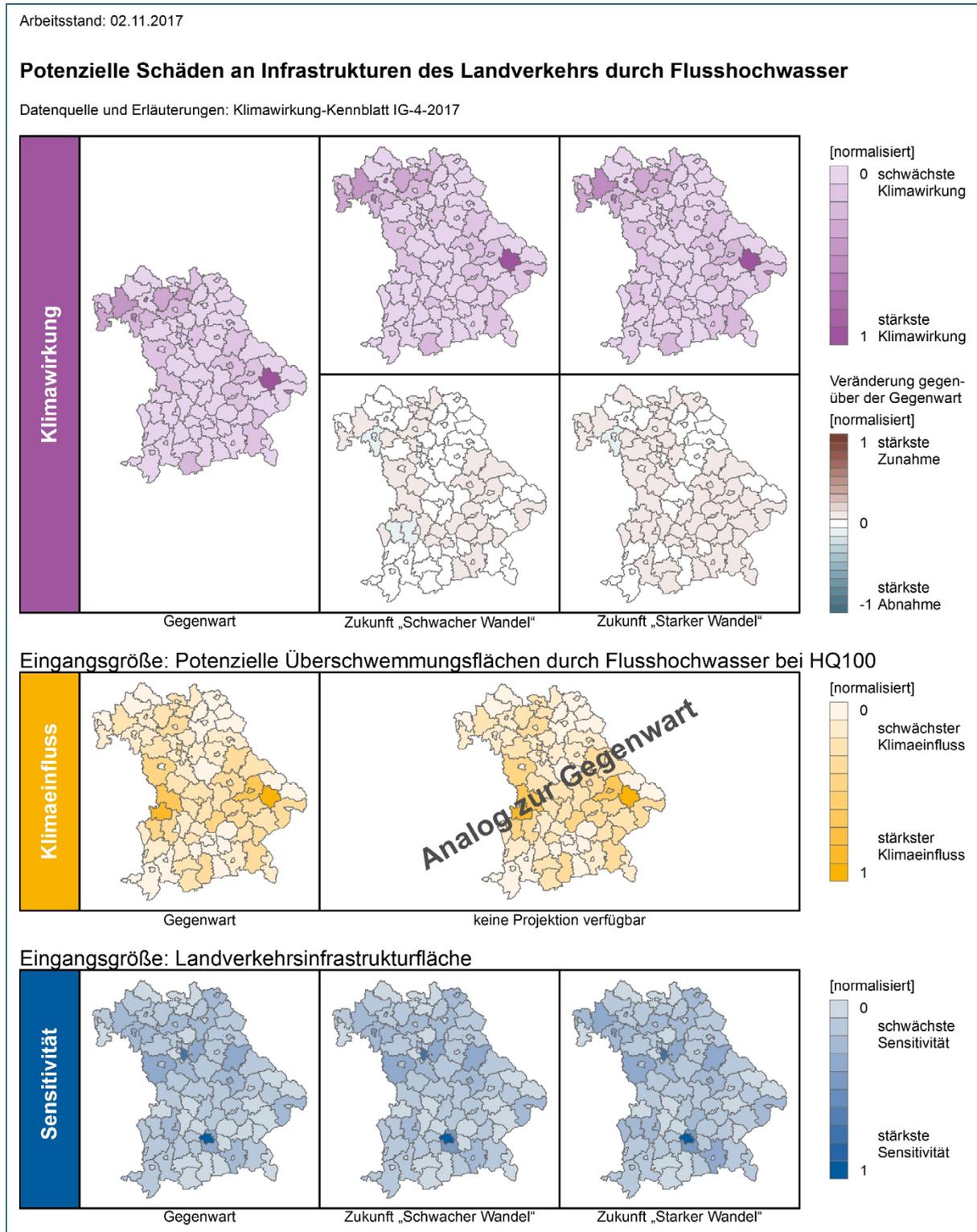


Abb. 38: Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser

5.7.5 IG-5-2017, Potenzielle Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs durch Sturzfluten

Hintergrund

Industrie- und Gewerbebetriebe sind auf eine permanent verfügbare Verkehrsinfrastruktur sowohl bei dem Bezug von Waren, Halbfertigwaren und Rohstoffen, als auch bei der Verteilung von Gütern und Produkten angewiesen. Bereits kleinere Beeinträchtigungen führen schon zu Störungen in der Logistikkette und zu finanziellen Einbußen aufgrund von Verzögerungen im Produktionsablauf, da in den letzten Jahrzehnten zunehmend Lagerkapazitäten zugunsten von „Just-in-time-Produktion“ verringert wurden. Daher ist davon auszugehen, dass der Klimawandel sowohl den Personenverkehr wie auch den Güterverkehr und somit auch Unternehmen vor Herausforderungen stellen wird. Insbesondere Einschränkungen des Güterverkehrs infolge von Extremwetterereignissen werden zu negativen wirtschaftlichen Folgen führen (StMUV 2015). Für extreme Wetter- und Witterungsbedingungen wird für Bayern in naher Zukunft ein hohes Gefährdungspotenzial für den landgestützten Warenverkehr mit negativen Auswirkungen auf die wirtschaftliche Leistung von Industrie und Gewerbe angenommen (StMUV 2016).

Die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ kam für den Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten“ zum Ergebnis, dass diesbezüglich bereits in der Gegenwart eine mittlere Betroffenheit besteht, die in der nahen Zukunft bei einem starken Wandel als hoch eingeschätzt wird (Buth et al. 2015). Das mögliche Auftreten von Sturzfluten lässt sich räumlich kaum eingrenzen und noch weniger sind Vorhersagen möglich, wie die Ereignisse der jüngsten Vergangenheit zeigen. Laut der Vulnerabilitätsstudie des Bundes befinden sich aber Schwerpunkte in den Bereichen der zentralen deutschen Mittelgebirge, insbesondere aber aufgrund des sehr hohen Sturzflutpotenzials am Alpenrand in Bayern (Buth et al. 2015).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Verbindung mit einer starken Geländeneigung.

Die Berechnung des Sturzflutpotenzials berücksichtigt die Anzahl der Starkregentage ($> 25 \text{ mm d}^{-1}$) sowie die Geländesteigung und wird in Kapitel 5.5.2 ausführlich erklärt. Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage ist mit einer hohen Unsicherheit der Aussagefähigkeit verbunden. Ursache sind die geringe zeitliche (Messungen) und räumliche Auflösung (Messstationen) der Niederschlagsdaten. Für die Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Die Sensitivität wurde über die Landverkehrsinfrastrukturfläche abgebildet, die sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen ergibt. Die Daten für die gegenwärtige Landverkehrsinfrastrukturfläche entstammen dem vom LDBV zur Verfügung gestellten Basis-DLM25 und lagen als georeferenzierte Vektordaten vor (Stand: 2016). Die Daten für den zukünftig geplanten Ausbau wurden für die Staatsstraßen von der Obersten Baubehörde bezogen, die Daten für die Ausbauten von Bundesstraßen, Autobahnen und Schiene vom BMVI. Je nach Szenario „starker“ oder „schwacher Wandel“ wurden für die Zukunft unterschiedliche Ausbaugrade angesetzt (Kap. 5.10.1 oder im Detail siehe Klimawirkungs-Kennblatt, Anhang). Der Sensitivitätsindikator wurde mittels einer additiven Verknüpfung der absoluten Landverkehrsinfrastrukturfläche mit dem Anteil der Landverkehrsinfrastrukturfläche am Kreis und anschließender Min./Max.-Normalisierung zusammengesetzt.

Die Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert) erfolgt multiplikativ mit anschließender Normalisierung.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für die Gegenwart ist die Klimawirkung in den am Alpenrand liegenden Landkreisen Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land am stärksten ausgeprägt. Die Karte des Klimaeinflusses zeigt, dass dies auch die Kreise sind, in denen das Sturzflutpotenzial in Bayern deutlich höher ist als in anderen Kreisen. Als Kreise mit der höchsten Sensitivität, also mit der meisten Verkehrsinfrastrukturfläche (absolut und relativ), stechen die Verdichtungsräume München und Nürnberg heraus. Darüber hinaus finden sich weitere Landkreise mit höherer Sensitivität insbesondere im Umland der kreisfreien Städte wie z. B. die Landkreise Ansbach, Augsburg oder Nürnberger Land, aber auch Schwandorf.

In der Zukunft wird eine Zunahme der Starkregenereignisse und somit eine Erhöhung des Sturzflutpotenzials für das Szenario des starken Wandels erwartet. Beim Szenario des schwachen Wandels ergibt sich für einige Kreise keine Veränderung bei den Klimawirkungen. In den Landkreisen Oberallgäu, Unterallgäu, Amberg-Weilheim und Neustadt an der Waldnaab ergibt sich rechnerisch sogar eine Abnahme der Klimawirkungen. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die jedoch aus den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen nicht ersichtlich werden. Beim stärkeren Wandel hingegen ist in ganz Bayern von einer Verstärkung der Klimawirkungen auszugehen, wobei diese am Alpenrand am stärksten zunehmen.

Die räumlichen Muster werden sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft insbesondere von der Definition der Starkregentage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen die Landkreise am Alpenrand besonders hervortreten. Ebenso besonders durch Sturzfluten gefährdete Mittelgebirgsregionen treten nicht hervor (Abb. 39).

Kernaussage

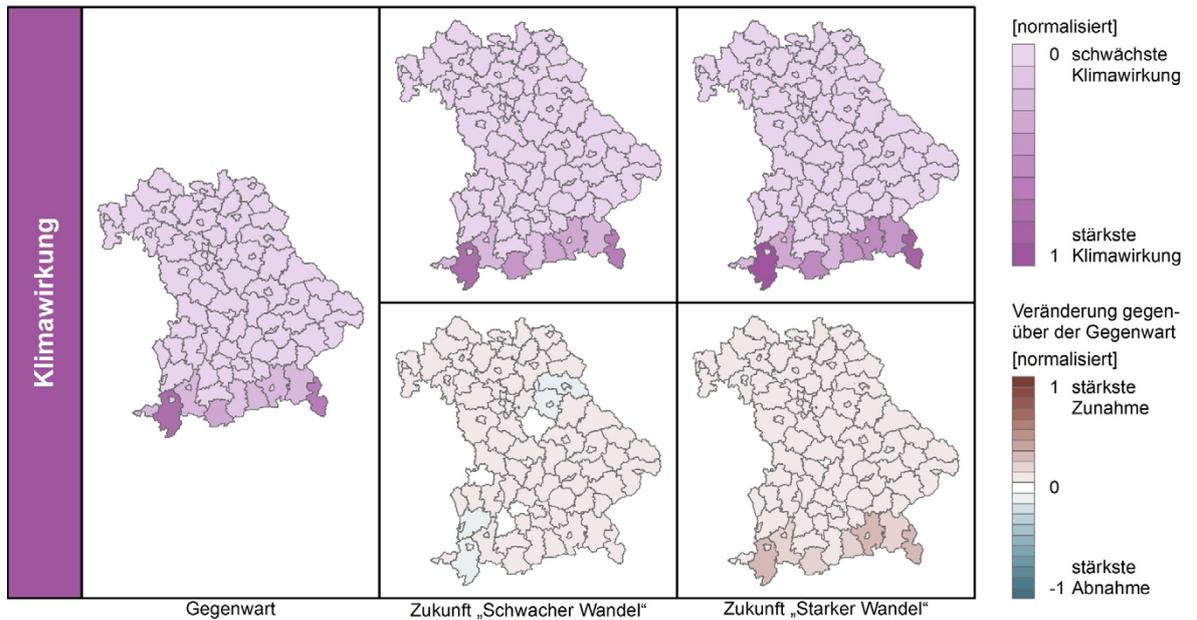
- Sturzfluten können sowohl den Personen- als auch den Güterverkehr beeinträchtigen und somit Unternehmen aufgrund der wirtschaftlichen Einbußen vor Herausforderungen stellen.
- Zur Berechnung des Klimaeinflusses wurde das Sturzflutpotenzial verwendet, das sich aus der Zahl der Starkregentage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) und der Reliefenergie zusammensetzt. Für die Abschätzung der Sensitivität wurde die Landverkehrsinfrastrukturfläche abgebildet, die sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen ergibt. Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem Ausbauplan der Staatsstraßen entnommen. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung des Sturzflutpotenzials mit der Landverkehrsinfrastrukturfläche.
- Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage schränkt die Aussagefähigkeit stark ein. In Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung.
- Für die Gegenwart ist die Klimawirkung in den am Alpenrand liegenden Landkreisen am höchsten, wobei besonders die Landkreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land hervortreten. Auch für die Zukunft, bei der beim starken Wandel von einer Zunahme der Starkregenereignisse und somit einer Erhöhung des Sturzflutpotenzials auszugehen ist, zeigen diese Landkreise eine weitere Zunahme der Klimawirkung. Beim schwachen Wandel hingegen fällt bei einigen Kreisen die Klimawirkung geringer aus, was mit der leichten Abnahme des Sturzflutpotenzials im 15. Perzentil zu erklären ist.
- Aufgrund der multiplikativen Verknüpfung mit der Geländeneigung dominiert die vergleichsweise hohe Anzahl an Starkregentagen in der Alpenregion die Ergebnisse und andere, ebenso gefährdete Mittelgebirgsregionen, treten, in Folge der relativen Betrachtungsweise nicht hervor.

Karten

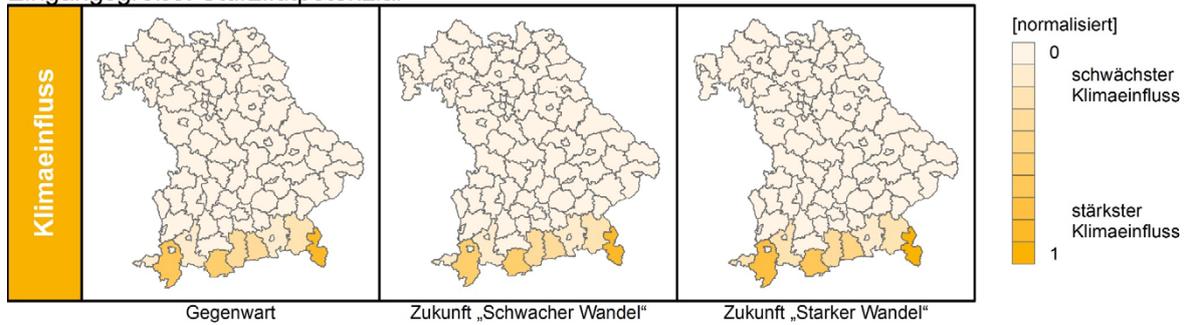
Arbeitsstand: 02.11.2017

Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt IG-5-2017



Eingangsgröße: Sturzflutpotenzial



Eingangsgröße: Landverkehrsinfrastrukturfläche

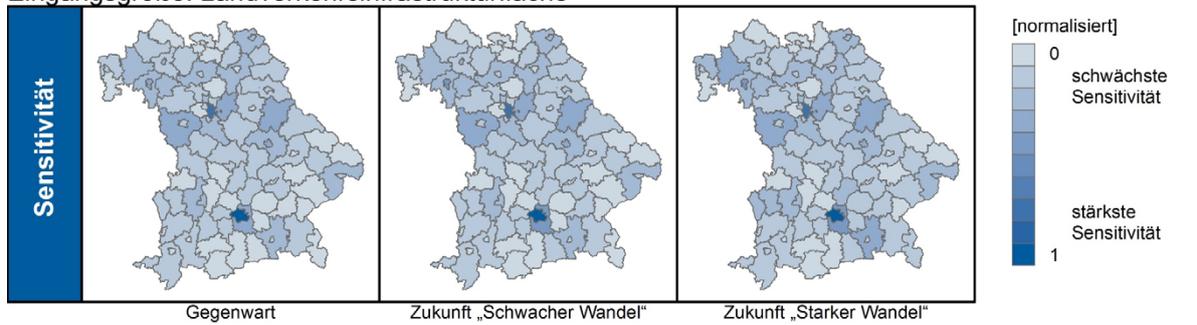


Abb. 39: Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten

5.8 Energiewirtschaft

Der Energiesektor, der neben den Einrichtungen der Energieproduktion auch die leitungsgebundene Verteilung, Übertragung und schließlich auch Nutzung der Energie umfasst, wird auf vielfältige Art und Weise durch Wetter- und Klimaverhältnisse beeinflusst. Da der Energiesektor ein komplexes und international dicht vernetztes System ist, verursachen Störungen nicht nur physische Schäden an einzelnen Einrichtungen, sondern auch Schäden, die letztlich an anderen Stellen des Systems auftreten (StMUV 2015). Infrastrukturen gelten dann als „kritisch“, wenn sie für die Funktionsfähigkeit moderner Gesellschaften von wichtiger Bedeutung sind und ihr Ausfall oder ihre Beeinträchtigung nachhaltige Störungen im Gesamtsystem zur Folge hat. Ein wichtiges Kriterium der Kritikalität ist die relative „Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat“ (BMI 2009).

Wichtig ist mithin festzuhalten, dass es nicht nur um den Schutz der Betriebsstätten an sich geht, sondern sich deren Schutzwürdigkeit erst aus ihrer Kritikalität im Gesamtkontext der Infrastrukturnetze und ihrer Interaktionen ergibt. Eine Infrastruktur besitzt eine systemische Kritikalität, wenn sie aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Gesamtsystem der Infrastrukturbereiche von besonders hoher interdependenter Relevanz ist. Das Bundesministerium des Inneren (BMI 2009) führt hier als Beispiele die Elektrizitätsinfrastrukturen an, die aufgrund ihrer Vernetzungsgröße und Vernetzungsstärke besonders relevant sind und bei großflächigem und lange anhaltendem Ausfall zu gravierenden Störungen der gesellschaftlichen Abläufe sowie der öffentlichen Sicherheit führen können.

Bei den Auswirkungen des Klimawandels spielen in diesem Sektor zum einen die Temperaturerhöhung und die Abflussänderungen in den Fließgewässern eine zentrale Rolle. Thermische Kraftwerke beanspruchen Fließgewässer oder auch Grundwasser zur Kühlwassergewinnung, Wasserkraft wird zur Erzeugung von Strom eingesetzt. Solarthermie und Photovoltaik nutzen kurzweilige Strahlung zur Erzeugung von Wärme beziehungsweise Strom (StMUV 2016). Für die Energieerzeugung und -verteilung stellen somit Stürme, Blitze, Starkniederschläge sowie Hochwasser und Trockenperioden ein beträchtliches Risiko dar. Im Zuge des Klimawandels werden solche Extremereignisse wahrscheinlich zunehmen, wodurch die Energieversorgungssicherheit beeinträchtigt wird. Dies kann folglich zu Versorgungsengpässen bei diesen Energieträgern führen (StMUV 2015, 2016).

Veränderte Temperaturen wirken sich jedoch auch auf die Stromnachfrage sowie auf das Leistungspotenzial Erneuerbarer Energien aus. Auch der Nutzungsgrad von Kraftwerken wird von einem Temperaturanstieg beeinflusst. Bei Niedrigwasser in Trockenperioden kann es aufgrund fehlenden Wassers zu Beeinträchtigungen oder Unterbrechungen in der Kraftwerkskühlung kommen, ebenso wie zu Betriebseinschränkungen von Wasserkraftwerken. Hinsichtlich des Temperaturanstiegs ist mit einer Veränderung der Stromverbrauchskurve zu rechnen. So wird in den milderen Wintern weniger Heizenergie benötigt, hingegen besteht in den Sommermonaten ein erhöhter Strombedarf für Kühlfunktionen (StMUV 2015). Hochwasser ist in demselben Maße eine ernstzunehmende Gefahr, da durch Überschwemmungen von Kraftwerken Anlagen aufschwimmen können, aber auch Umspannanlagen, Trafostationen oder weitere Netzbestandteile durch Hochwasser beschädigt werden können (Dunkelberg et al. 2011).

Bedingt durch den technischen Fortschritt, die Umgestaltung des Energiesystems und aufgrund der vorhandenen personellen wie auch finanziellen Ressourcen im Energiesektor sind die Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland momentan eher als gering einzustufen. Dementgegen wird jedoch für die Klimawirkung „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ ein mittleres Schadenspotenzial gesehen. Aufgrund zukünftig steigender Temperaturen bei gleichzeitig geringen Abflüssen während Tro-

ckenperioden muss mit steigenden Gewässertemperaturen gerechnet werden. Eine zusätzliche Wärmebelastung der Gewässer durch Prozesswärme aus Industriebetrieben ist dann stark einzuschränken bzw. muss eventuell sogar untersagt werden. Zusammengefasst wird für die Zukunft für Deutschland insgesamt eher eine geringe Vulnerabilität geschlussfolgert, da die Anpassungskapazität als hoch eingeschätzt wird (Buth et al. 2015).

5.8.1 EW-1-2017, Potenzieller Heizenergiebedarf

Hintergrund

Die Energiemenge, die einem Gebäude für die Beheizung, Lüftung und Warmwasserbereitung jährlich zugeführt werden muss, nennt man Heizenergiebedarf (LTM 2017). Bis 2016 ist der Energieverbrauch für Heizzwecke in Gebäuden gegenüber 2008 deutschlandweit um 6,3 % gesunken (BMW i 2018). Da die Einsparungen durch energetische Gebäudesanierung in den letzten Jahren jedoch kaum noch gestiegen sind, ist der klima- und witterungsbereinigte Heizenergieverbrauch in Mehrfamilienhäusern bis 2017 auf dem Niveau von 2010 stagniert. Diese machen rund die Hälfte des gesamten Wohnungsbestandes aus (Stede et al. 2018).

Der Heizenergiebedarf sinkt in Privathaushalten in den Wintermonaten, während in den Sommermonaten der Kühlenergiebedarf zunimmt. In Deutschland ist durch klimatische Veränderungen in Zukunft mit einer Verkürzung der winterlichen Heizperiode zu rechnen. Durch milde und kurze Winter, aber auch durch energetische Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen, eine energieeffizientere Bauweise, wie es bei Passivhäusern der Fall ist sowie durch neue Heizsysteme, kann der Heizenergiebedarf gesenkt werden (Buth et al. 2015; Michelsen & Ritter 2017).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt den potenziellen Heizenergiebedarf durch die Verknüpfung von Siedlungsfläche und Bevölkerung mit den Heiztagen.

Als Heiztage wurden entsprechend der VDI-Richtlinie 2067/DIN 41108 T6 alle Tage mit einer Tagesmitteltemperatur unter 15 °C definiert. Der Eingangsdatensatz wurde aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen gebildet. Die Daten lagen in einem 12,5 km x 12,5 km Raster für die Gegenwart (1971–2000) und die Zukunft (2021–2050) vor und wurden auf Kreisebene normalisiert. Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel (stärkere generelle Erwärmung und damit geringere Anzahl der Heiztage), das 85. Perzentil den schwachen Wandel.

Als Sensitivitätsindikatoren flossen zum einen die Siedlungsfläche der Gegenwart (2009) und Zukunft (2030) ein, die dem Projekt CC-LandStraD des BBSR entnommen wurden. Es wurde für die Zukunft nur das „Wachstumsszenario“ verwendet, da das „Stagnationsszenario“ bereits hinter der derzeitigen Entwicklung zurückliegt. Somit wurde nur eine Sensitivität für die Zukunft verwendet. Die Rasterdaten lagen mit einer Auflösung von 100 m x 100 m vor und wurden auf Kreisebene hochgerechnet. Als Siedlungsfläche gelten hierbei die im CC-LandStraD-Projekt verwendeten Kategorien 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude'. Zum anderen wurden die Bevölkerungszahlen der Gegenwart (2009) des LfStaD sowie die Einwohnerzahlenprojektion aus dem Projekt CC-LandStraD verwendet. Es folgte eine additive Verknüpfung der absoluten Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte pro Kreis für die Gegenwart und Zukunft mit anschließender Normalisierung. Zuletzt wurden die beiden normalisierten Werte von Sensitivität und Klimaeinfluss multiplikativ zur Klimawirkung verknüpft und zuletzt noch einmal normalisiert.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für die Gegenwart ergibt sich ein differenziertes Bild. Der höchste Heizenergiebedarf ist gegenwärtig in München verortet. Gründe hierfür sind die hohe Bebauungs- und Bevölkerungsdichte der Stadt, die sich auch in den Sensitivitätskarten dominant hervorhebt.

Bei einem angenommenen schwachen Wandel kann von einer flächendeckenden leichten Abnahme des Heizenergiebedarfs ausgegangen werden. Eine Zunahme des Bedarfs ist lediglich in Schwaben und in Oberbayern zu verzeichnen, aber auch in einigen nördlichen Landkreisen in Oberfranken (Abb. 40). Bei einem starken Wandel nimmt der Heizenergiebedarf weiter ab. Insbesondere in München, sowie in westlichen und östlichen Landkreisen Bayerns sowie in den östlichen Voralpengebieten ist eine Abnahme anzunehmen. Eine Zunahme wird lediglich in zwei Kreisen (Lindau und Garmisch-Partenkirchen) angenommen. In Zukunft kann also trotz eines steigenden Siedlungsflächenzuwachses und steigenden Bevölkerungszahlen in einigen bayerischen Landesteilen von einer Abnahme des Heizenergiebedarfes ausgegangen werden. Dies ist vor allem auf die projizierte Abnahme an Heiztagen zurückzuführen.

Kernaussage

- Der Heizenergieverbrauch ist in Bayern seit 2008 gesunken.
- Die Klimawirkung wurde mithilfe der Anzahl der Heiztage sowie der Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte für Gegenwart und Zukunft berechnet.
- In Zukunft kann trotz eines steigenden Siedlungsflächenzuwachses und steigender Bevölkerungsdichte von einer Abnahme des Heizenergiebedarfs aufgrund der Abnahme der Heiztage ausgegangen werden.
- Neben klimatischen Faktoren beeinflussen den Energieverbrauch aber auch eine energieeffiziente Bauweise und moderne Heizsysteme.

Karten

Arbeitsstand: 09.10.2017

Potenzieller Heizenergiebedarf

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt EW-1-2017

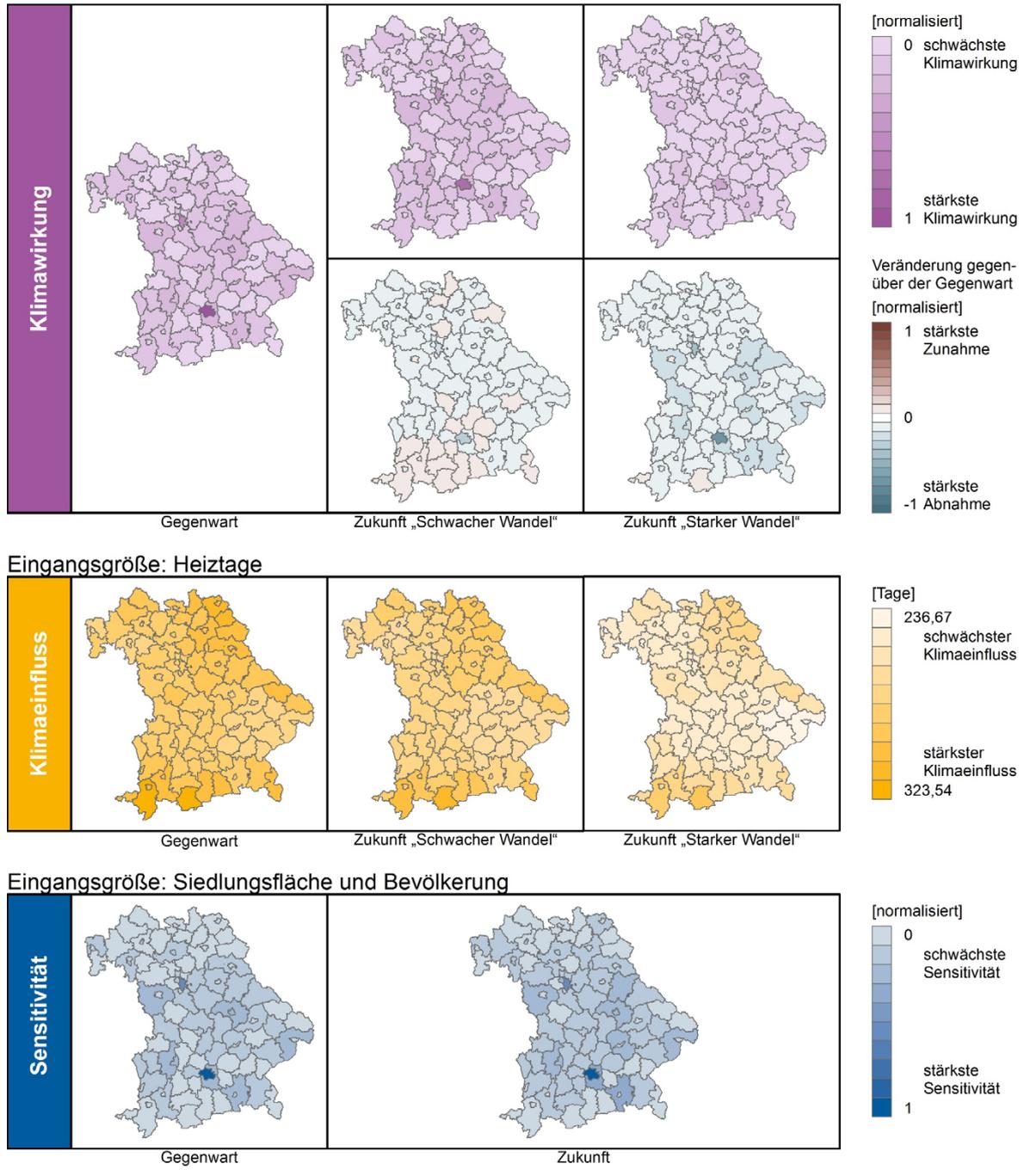


Abb. 40: Potenzieller Heizenergiebedarf anhand der Heiztage, Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte

5.8.2 EW-2-2017, Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage

Hintergrund

Kühlenergie beschreibt die Energie, die zur Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden sowie für Produktionsprozesse benötigt wird. Bei steigenden Tages- und Nachttemperaturen steigt dementsprechend auch der Bedarf an Kühlenergie im privaten und gewerblichen Bereich, insbesondere in den Sommermonaten. Im Immobiliensektor ist die Energieeffizienz des Gebäudes ein ausschlaggebender Einflussfaktor, denn durch eine Dämmung der Gebäudehülle wird der Wärmedurchgang verringert und folglich der Bedarf an Heiz- und Kühlenergie reduziert. Eine nachhaltige Temperaturregulation beispielsweise durch Fassadenbegrünung und eine angepasste Stadtplanung (Frischlufschneisen etc.) ist der energiegestützten Gebäudekühlung immer vorzuziehen. Diese sollte nur ausgebaut werden, wenn alle anderen Möglichkeiten erschöpft sind. Für das Wohlbefinden des Menschen ist die Klimatisierung von Wohnräumen in besonderem Maße bedeutend; insbesondere ältere Menschen, gesundheitlich Beeinträchtigte und Kleinkinder sind gegenüber Wärmebelastung besonders vulnerabel. Eine hohe Hitzebelastung kann Herz-Kreislaufprobleme auslösen und im schlimmsten Fall zum Tod führen (Buth et al. 2015; StMUV 2015); vgl. Kap. 5.10.1).

Im Gewerbebereich wird durch eine Klimatisierung beziehungsweise Kühlung der Schutz von Beschäftigten sowie Maschinen und somit von Produktionsprozessen gewährleistet. Beeinträchtigungen einiger an Flüssen gelegener Kraftwerke traten im Juli 2003 und im Jahr 2010 aufgrund eines Rückgangs von Sommerniederschlägen und der Zunahme von Trockenperioden auf. Sie mussten ihre Leistungen verringern, da ihnen nicht mehr genügend Kühlwasser zur Verfügung stand (StMUV 2015).

Die zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs für die Kühlung und Klimatisierung lässt sich nur schwer abschätzen. Es ist jedoch aufgrund von in Zukunft steigenden Temperaturen und einer steigenden Anzahl an Hitzetagen von einer Zunahme des Bedarfes an Kühlenergie auszugehen. Für gewerbliche Betriebe heißt das, dass Klimatisierungsanlagen u.U. nachgerüstet werden sollten, da die Kühlung an heißen Tagen nicht nur dem Schutz der Maschinen, sondern auch der Beschäftigten und somit dem Arbeitsschutz dient (Buth et al. 2015; StMUV 2015).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt den potenziellen Kühlenergiebedarf auf Grundlage der Kühltage. Als Kühltage sind die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmitteltemperatur über 18,3 °C definiert. Als Eingangsdaten wurde die Anzahl der Kühltage für die Gegenwart (1971–2000) und Zukunft (2021–2050) aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen verwendet. Diese lagen in einem Raster von 12,5 km x 12,5 km vor und wurden auf Kreisebene normalisiert. Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel und das 85. Perzentil den starken Wandel.

Aufgrund fehlender Daten zur räumlichen Verbreitung von Raumklimageräten für Gegenwart und Zukunft konnte die Sensitivität nicht abgebildet werden, sodass der potenzielle Kühlenergiebedarf lediglich anhand des Klimaeinflusses dargestellt werden konnte.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Gegenwärtig kann ein vergleichsweise hoher Kühlenergiebedarf in den Kreisen im Bereich des Bayerischen Hügellands und der Isar-Inn-Schotterplatten im Süden sowie im Nordwesten in den Landkreisen der Mainfränkischen Platte festgestellt werden. Insbesondere im Alpenvorland besteht nur ein geringer Bedarf an Kühlenergie (Abb. 41).

Für die Zukunft wird ein flächendeckender Anstieg des Kühlenergiebedarfs projiziert. Wird ein „schwacher Wandel“ angenommen, so werden voraussichtlich Kreise in Schwaben, Oberbayern, Niederbay-

ern sowie der Süden der Oberpfalz die stärkste Zunahme an Kühlenergiebedarf erfahren. In Unterfranken, Oberfranken und Mittelfranken wird es im Vergleich eine schwächere Zunahme geben. Bei einem angenommenen starken Wandel ist der Kühlenergiebedarf im Südosten Bayerns höher als im Rest des Bundeslandes. Am stärksten ist die Klimawirkung im bayerischen Hügelland und auf den Isar-Inn-Schotterplatten sowie im Nordwesten der Mainfränkischen Platte.

Kernaussage

- Wärmebelastungen können sowohl Menschen als auch Maschinen beeinträchtigen. Eine Überwärmung des menschlichen Organismus kann zu ernsthaften gesundheitlichen Beeinträchtigungen und im schlimmsten Fall zum Tode führen. Wärmebelastungen von Maschinen können Produktionsprozesse einschränken.
- Aufgrund fehlender Sensitivitätsdaten wurde die Klimawirkung nur anhand des Klimaeinflusses berechnet. In die Klimawirkung floss die Anzahl der Kühltage ein. Kühltage werden als mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmitteltemperatur über 18,3 °C definiert.
- Eine flächendeckende Zunahme des Kühlenergiebedarfs, insbesondere im Süden Bayerns, ist zu erwarten.

Karten

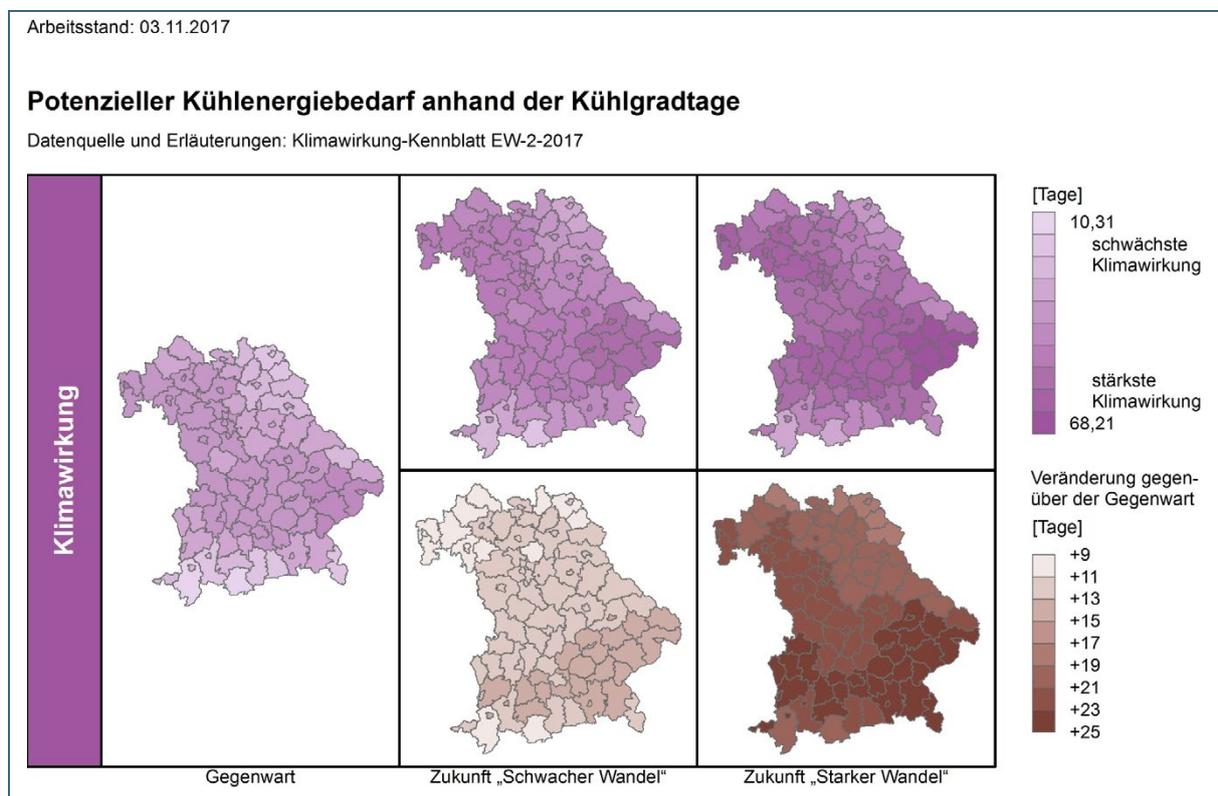


Abb. 41: Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage

5.8.3 EW-3-2017, Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser

Hintergrund

Kraftwerke gehören zur kritischen Infrastruktur, da sie zu den bedeutsamen Versorgungssystemen unserer Gesellschaft gehören, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere Folgen eintreten würden (BBK 2017). Störungen oder Ausfälle beispielsweise der Stromversorgung können durch Extrem-

wetterereignisse und/oder deren Folgen ausgelöst werden. Die gesamte Prozesskette der Energiewirtschaft, die die Elektrizitätserzeugung, -übertragung und -verteilung beinhaltet, kann dadurch beeinträchtigt werden. Deshalb sind nicht nur Schäden an energieerzeugenden Anlagen relevant. Insbesondere das Freispülen von Erdkabeltrassen, das Unterspülen von Mastfundamenten und das Beschädigen der Masten selbst bergen Ausfallrisiken der Versorgung (Dunkelberg et al. 2011; StMUV 2016). Zusätzlich können durch Überschwemmungen Gefahrenstoffe in die Umwelt gelangen und große Umweltschäden verursacht werden.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit den Standorten von Kraftwerken verschnitten werden

Um den Klimaeinfluss abzubilden, wurden die Überschwemmungsflächen eines HQ₁₀₀ aus den Hochwassergefahrenkarten, die bestehende Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigen, übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ in die Berechnung einbezogen. Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft und mit einer größeren räumlichen Abdeckung wünschenswert. Bei der Berechnung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Leitungstrassen möglich.

Die Netto-Nennleistung des Kraftwerksparks in Bayern setzt sich zu ca. 59 % aus der Leistung der EE-Anlagen (Photovoltaik-, Biomasse-, Wasserkraft-, Biogas- und Geothermieanlagen) und zu 41 % aus der Leistung der konventionellen Kraftwerke (fossile Kraftstoffe inklusive Kernenergie) zusammen (nachfolgend eigene Berechnungen basierend auf Datengrundlagen von Bundesnetzagentur 2017; UBA 2016b und Kuhlmann 2014; DGS 2016).

Als Sensitivität flossen Biomasse- und Windenergieanlagen mit einer Netto-Nennleistung über zwei Megawatt sowie konventionelle Kraftwerke (fossile Kraftstoffe) mit einer Netto-Nennleistung über zehn Megawatt in die Berechnung ein. Die ausgewählten konventionellen Kraftwerke decken den Großteil der installierten Leistung der konventionellen Kraftwerke in Bayern (in etwa 94 %) somit einen Anteil von ca. 38 % der gesamten installierten Leistung in Bayern ab. Die in der Studie berücksichtigten Biomasse- und Windenergieanlagen (ab zwei Megawatt Netto-Nennleistung) haben einen Anteil von ca. 11 % an der Netto-Nennleistung der Anlagen der Erneuerbaren Energien in Bayern und somit von ca. 7 % an der gesamten installierten Leistung in Bayern. Insgesamt wurde dadurch knapp die Hälfte (ca. 45 %) der gesamten installierten Leistung in Bayern berücksichtigt, wobei Photovoltaikanlagen und Wasserkraftanlagen (ca. 46 % der gesamten installierten Leistung in Bayern) bewusst aus der Studie ausgeklammert wurden. Wasserkraftanlagen wurden nicht in der Analyse aufgenommen, da sie im Rahmen anderer Projekte genauer betrachtet werden und die Gefahren weniger von der Wassermenge als vielmehr von Treibgut ausgehen. Photovoltaik-Anlagen wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, da diese ohnehin nicht in Überschwemmungsgebieten gebaut werden dürfen.

Der Anteil der durch die Auswahl der oben genannten Schwellenwerte unberücksichtigten Netto-Nennleistung an der gesamten installierten Leistung in Bayern beträgt ca. 8 bis 9 %, was im Rahmen der Studie als vertretbar angenommen wurde.

Die Daten zu den Standorten der Windenergie- und Biomasseanlagen stammen aus der Datenbank des Energie-Atlas Bayern und lagen für die Gegenwart (2016) vor. Die gegenwärtigen Standorte der konventionellen Anlagen wurden der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur entnommen. Zusätzlich

lag eine Liste zum erwarteten Zu- und Rückbau der konventionellen Kraftwerke bis 2019 vor, welche die Zukunft abbildet. Informationen über künftige Standorte von Biomasse- und Windenergieanlagen standen nicht zur Verfügung und wurden somit bei der Abbildung der Zukunft nicht berücksichtigt. Während die Standorte aus dem Energie-Atlas als georeferenzierten Vektordaten vorlagen, war eine Aufbereitung der Standorte der konventionellen Kraftwerke nötig. Sie wurden deshalb manuell georeferenziert. Da eine manuelle Prüfung der Lage der Kraftwerksstandorte erforderlich war, wurden in einem ersten Schritt die kleineren Kraftwerke, die nicht über eine Netto-Nennleistung von über zwei Megawatt verfügten, aus dem Datensatz aussortiert. Auf das Einbeziehen kleinerer Kraftwerke wurde verzichtet, da Kraftwerke mit geringerer Leistung für die Energieversorgung als vernachlässigbar eingestuft wurden und dadurch die Anzahl der betrachteten Anlagen erheblich reduziert werden konnte. Die Sensitivität ergibt sich aus der Gesamt-Netto-Nennleistung aller betrachteten Kraftwerke eines jeweiligen Kreises.

Bei konventionellen Kraftwerken handelt es sich meist um große Kraftwerkskomplexe, die durch einen Punktstandort nicht repräsentativ dargestellt werden. Deshalb wurden fossile Kraftwerke als betroffen definiert, wenn im Bereich von 100 m um den Standortpunkt des Kraftwerks ein Überschwemmungsgebiet liegt. Standorte von Biomasseanlagen sowie Windenergieanlagen wurden durch einen Punkt abgebildet, da die Anlagen in der Regel keine überdimensional großen Flächen in Anspruch nehmen. Deshalb wurde in dieser Analyse eine Betroffenheit von Biomasse- und Windenergieanlagen angenommen, wenn der durch einen Punkt abgebildete Standort in einem Überschwemmungsgebiet liegt. Die betroffenen Kraftwerksleistungen pro Kreis wurden anschließend aufsummiert und normalisiert (Klimawirkung).

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Außer in der kreisfreien Stadt Nürnberg, in der ein größeres Kraftwerk potenziell von Hochwasser gefährdet ist, sind in ganz Bayern insgesamt relativ wenige Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser mit dem Wiederkehrintervall HQ_{100} zu erwarten. Selbst die als betroffen identifizierten Kraftwerke müssen nicht zwangsläufig auch (in größerem) Umfang betroffen sein, da die Kraftwerksflächen auch aus weniger gegenüber Hochwasser sensiblen Bereichen bestehen können. Generell sind nur sehr wenige der betrachteten Energieanlagen im Bereich von potenziellen Hochwasserflächen angesiedelt. Auch in Zukunft kann von einem solchen Szenario ausgegangen werden. Betrachtet man die Sensitivität, so ist die Gesamt-Netto-Nennleistung der Kraftwerke in drei südlich gelegenen Landkreisen (Günzburg, Pfaffenhofen an der Ilm und Landshut) vergleichsweise hoch, was daran liegt, dass größeren Kraftwerksblöcke in diesen Kreisen liegen (Abb. 42).

Kernaussage

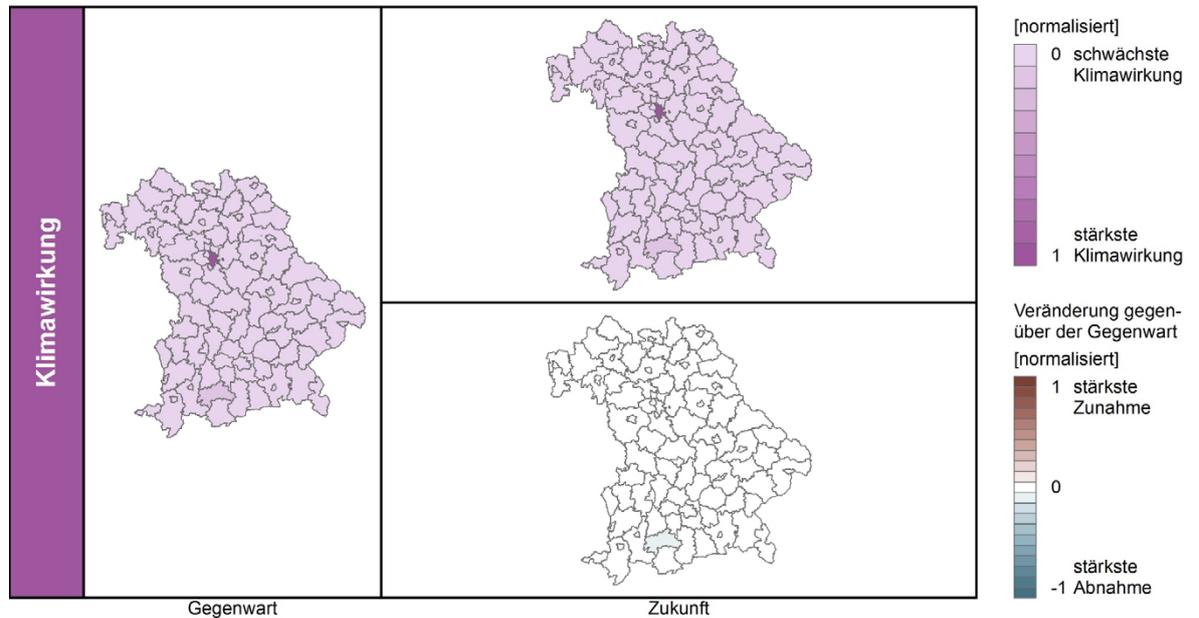
- Die Auswirkungen eines Störfalls treten bei leitungsgebundenen Systemen nicht nur am Einwirkungsort auf, sondern auch in anderen Systemteilen.
- Bei der Operationalisierung der Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser“ wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Zukunftsprojektionen für die Hochwasserdaten wichtig, sowie die Berücksichtigung von Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Leitungstrassen sinnvoll.
- In die Analyse wurden die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überschwemmten Flächen geografisch mit den Kraftwerksstandorten verschnitten.
- Die Klimawirkung ist mit Ausnahme von Nürnberg im gesamten Untersuchungsraum schwach ausgeprägt.
- Zu beachten ist, dass Kraftwerke, die in der Analyse als betroffen identifiziert wurden, nicht zwangsläufig (in größerem Umfang) gefährdet sein müssen, da insbesondere bei größeren Grundstücken die Kraftwerksbestandteile des Komplexes unterschiedlich sensitiv sein können.

Karten

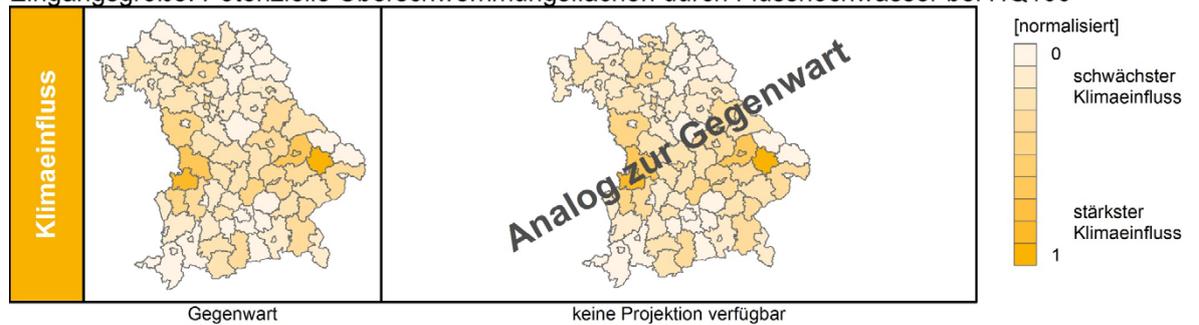
Arbeitsstand: 09.10.2017

Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt EW-3-2017



Eingangsgröße: Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100



Eingangsgröße: Gesamt-Netto-Nennleistung der Kraftwerke

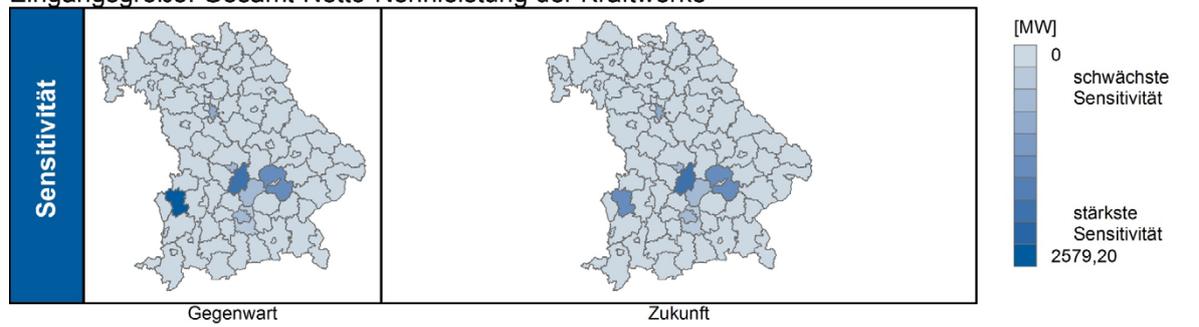


Abb. 42: Potenzielle Schäden an Kraftwerken mit einer Netto-Nennleistung ≥ 2 MW durch Flusshochwasser

5.9 Tourismus

Der Tourismussektor ist ein essenzieller Wirtschaftssektor in Bayern. Touristen geben in Bayern jedes Jahr über 33 Milliarden Euro aus. Bis zu 600.000 Personen erzielen ihr Einkommen vollständig im Tourismus. Bayern hat einen Anteil von 20,5 % an der touristischen Wertschöpfung in Deutschland (stMWi 2019). Auf der einen Seite ist der Tourismus ein Verursacher des Klimawandels und global für 5 bis 12 % der energiebedingten Emissionen verantwortlich, auf der anderen Seite ist die Tourismusbranche auch von den Folgen des Klimawandels betroffen (StMUV 2015). Dabei können sich die Klimawirkungen je nach naturräumlichen Gegebenheiten, Jahreszeit, Infrastruktur und Angebotsvielfalt einer Region sowohl positiv als auch negativ auswirken. Das Klima und das touristische Angebot sind die größten Einflussgrößen des tourismuswirtschaftlichen Erfolges einer Region, da diese die Destinationwahl und Konsumausgaben maßgebend beeinflussen und insbesondere die saisonale und regionale Nachfrage betreffen (Buth et al. 2015; StMUV 2015, 2016).

Grundsätzlich sind Regionen, in denen Tourismus einen Schwerpunkt auf Outdoor-Aktivitäten (Bade-, Winter-, Wanderurlaube) legt, abhängiger und somit anfälliger gegenüber den klimatischen Faktoren. Während der Wintersporttourismus in Bayern aufgrund des erwarteten Rückgangs der mittleren Schneedeckendauer um 30 bis 60 Tage bis zum Jahr 2060 (Szenario REMO regional) durch steigende Temperaturen und Änderung im Niederschlagsmuster regressiv verlaufen wird, bestehen für den bayerischen Sommertourismus Chancen für zusätzliche Reiseströme aus dem Mittelmeerraum und ein hohes Potenzial für den Wander-, Rad- und Wellness-tourismus (StMUV 2015).

Auch Extremwetterereignisse können den Tourismus beeinflussen. So können Überschwemmungen die Naherholungsfunktion der Gewässer und Auen einschränken und Hitzewellen eine gesundheitliche Gefährdung für Kleinkinder und ältere Personen darstellen. Dies kann mit enormen finanziellen Einbußen durch Ersatzinvestitionen für zerstörte touristische Infrastruktur oder durch das aufgrund der Ereignisse erfolgende Ausbleiben von Urlaubsgästen verbunden sein (StMUV 2016).

Für Bayern besteht die Herausforderung demnach darin, seinen Spitzenplatz auch unter veränderten klimatischen Rahmenbedingungen weiterhin zu behaupten, und sich durch zusätzliche Angebote auf die regionale Nachfrageverschiebung und Verschiebung der Reisezeiten anzupassen (StMUV 2015). Somit entstehen fortlaufend neue Anforderungen an die touristische Infrastruktur (StMUV 2016).

5.9.1 TO-1-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser

Hintergrund

Flusshochwasser kann zu Beeinträchtigungen der Tourismuswirtschaft führen, in erster Linie durch die Schädigung und/oder den temporären Ausfall touristischer Infrastruktur.

Extremwetterereignisse, die zu Niedrig- und Hochwasser führen können, wurden im Rahmen des Verbundprojekts GLOWA Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs) ausführlich betrachtet. Für das 100-jährliche Hochwasser errechnet das regionalisierte Simulationsmodell des Projektverbundes GLOWA geringfügige Änderungen im Einzugsgebiet der oberen Donau, was die Flusskreuzfahrten, die gesamte Ausflugsschiffahrt und den Bade- und Wassersporttourismus betrifft (StMUV 2015). Auch können die Hochwasser zahlreiche Auen und gewässernahe Siedlungsgebiete überschwemmen, die im Ereignisfall temporär nicht nutzbar sind. Dies hat zum einen Sachschäden (Schäden am Gebäude und der Einrichtung) oder ökonomische Schäden durch Betriebsunterbrechungen zur Folge. Außerdem kommt es zum Verlust der Naherholungsfunktion (StMUV 2016).

Laut der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015) ist die Klimawirkung „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ in Bayern eher

gering ausgeprägt. Grund hierfür ist die geringe Überlagerung der vom Klimaeinfluss betroffenen Bereiche, insbesondere entlang der Donau, mit den aus Sicht des Tourismus besonders sensitiven Kreisen im Alpenraum und in den Bereichen des Oberpfälzer und Bayerischen Waldes.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Beeinträchtigung der Tourismusaktivitäten durch Flusshochwasser bei einem 100-jährlichen Hochwasser.

Als Klimaeinfluss wurden die Überschwemmungsflächen für HQ_{100} aus den Hochwassergefahrenkarten, die bereits bestehende Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigen, übernommen. Das Vorgehen der Datenbearbeitung wird in Kapitel 5.5.1 beschrieben. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ (= Risikogewässer) in die Berechnung einbezogen (Informationen aus den Hochwassergefahrenkarten). Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft und mit einer größeren räumlichen Abdeckung wünschenswert. Bei der Berechnung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten möglich. Zur Abbildung der touristischen Nutzung wurde die Anzahl der Gästeübernachtungen (Stand 2016) als Proxyindikator herangezogen, da die Daten zu den genauen Standorten der einzelnen touristischen Anlagen (Hotels, Sehenswürdigkeiten, usw.) und Besucherzahlen nicht vorlagen. Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Übernachtungen durch den Proxyindikator abgebildet werden, da Übernachtungen bei Freunden, Bekannten oder Verwandten ebenso wenig in der amtlichen Statistik enthalten sind wie beispielsweise Tagesgäste (Buth et al. 2015). Darüber hinaus würden Daten zur genauen Lage von touristischen Einrichtungen eine direkte Verschneidung beziehungsweise Überlagerung mit den Überschwemmungsflächen ermöglichen und damit deutlich belastbarere Aussagen zulassen. Für die Gästeübernachtungen erfolgte eine Normalisierung zwischen null (geringste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis) und eins (höchste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis). Es lagen keine Projektionen für die Gästeübernachtungszahlen vor. Die zukünftige Veränderung der Gästeübernachtungen konnte daher nicht erfasst werden, obgleich davon auszugehen ist, dass die Anzahl der Übernachtungen in den einzelnen Kreisen nicht gleichbleiben wird.

Die Klimawirkung „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ (TO-1-2017) wird über die Eingangsdaten der potenziellen Überschwemmungsflächen und den Gästeübernachtungen auf Kreisebene berechnet, wobei diese multiplikativ verknüpft und anschließend normalisiert werden. Da weder für den Klimaeinfluss noch für die Sensitivität die Zukunft aufgrund von fehlenden Daten abgebildet werden konnte, wird keine Aussage zur zukünftigen Klimawirkung gemacht.

Ergebnisse für die Gegenwart

Die Sensitivitätskarte weist vor allem für die kreisfreie Stadt München, den Landkreis Passau und das Bayerische Alpenvorland vergleichsweise hohe Übernachtungszahlen auf. Die hohen Übernachtungszahlen lassen sich auf den Städtetourismus und den Wintertourismus zurückführen. Der Klimaeinfluss zeigt insbesondere für Niederbayern und das nördliche Schwaben eine höhere Anzahl an potenziellen Überschwemmungsflächen im Einzugsgebiet der Donau.

Die Klimawirkung ist in Bayern eher gering ausgeprägt. Stark betroffen sind lediglich der Landkreis Passau, welcher durch die Donau sowie deren Zuflüsse Ilz und Inn vergleichsweise höhere potenzielle Überschwemmungsflächen aufweist sowie der Landkreis Traunstein am Chiemsee (Abb. 43).

Kernaussage

- Flusshochwasser kann zu Beeinträchtigungen der Tourismuswirtschaft führen (Schädigung der touristischen Infrastruktur; temporärer Ausfall touristischer Infrastruktur). Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird.
- Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung der Überschwemmungsflächen für HQ₁₀₀ pro Landkreis mit der Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene.
- Da sowohl für die zukünftige Veränderung der Überschwemmungsflächen, als auch für die Veränderung der Gästeübernachtungen keine Daten beziehungsweise Projektionen vorlagen, wurde keine Veränderung der Klimawirkung abgebildet. Verbesserungen bei der Operationalisierung wären außerdem durch eine Verbesserung der Datenbasis zu privat übernachtenden Gästen sowie zu Tagesgästen und durch Daten zur genauen Lage von touristischen Einrichtungen zu erzielen.
- Die Klimawirkung ist in Bayern insgesamt eher gering ausgeprägt. Potenziell stark betroffen sind lediglich der Landkreis Passau und der Landkreis Traunstein.

Karten

Arbeitsstand: 02.11.2017

Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt TO-1-2017

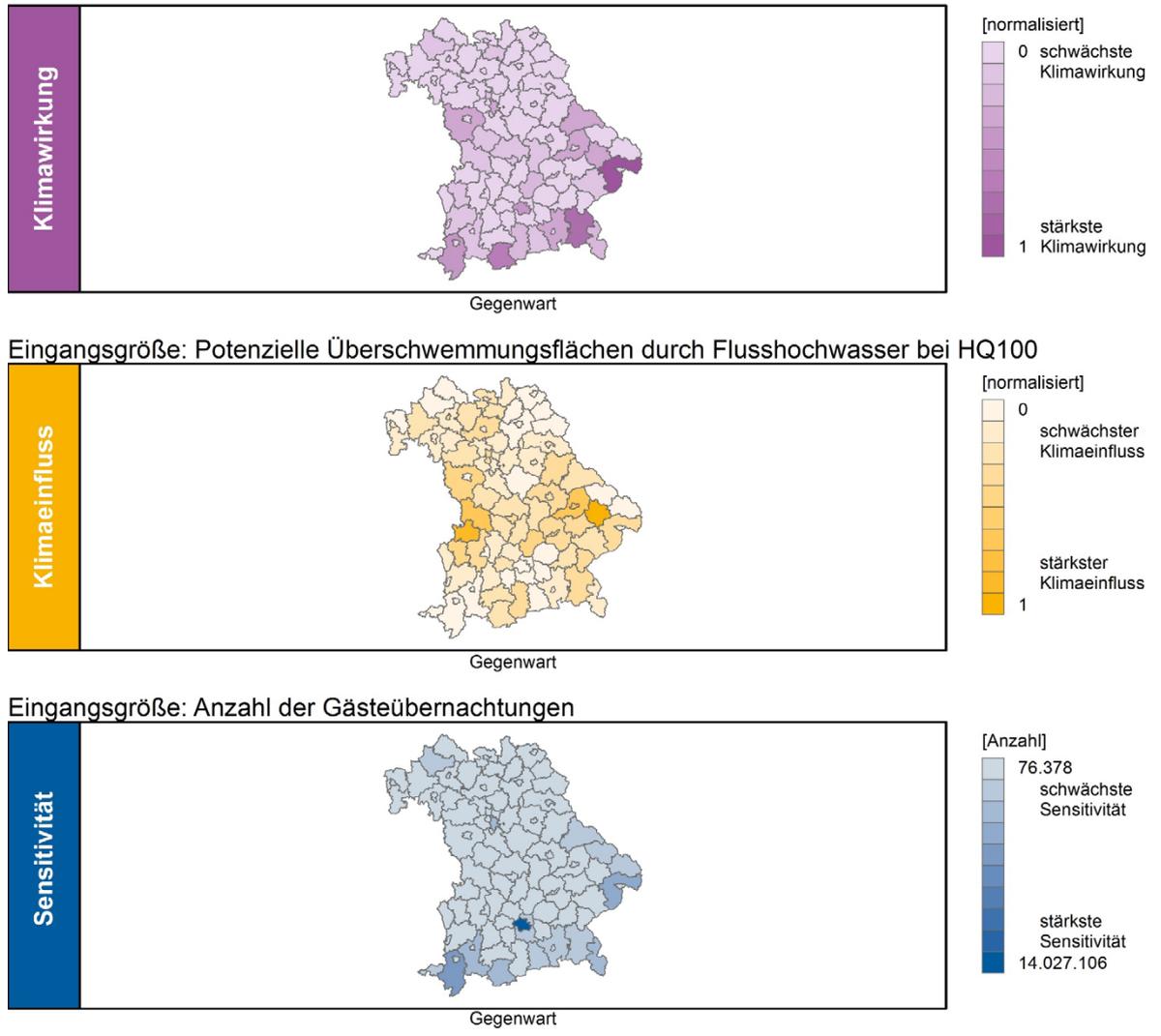


Abb. 43: Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser

5.9.2 TO-2-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten

Hintergrund

In der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ wird auch die erwartete Zunahme von Extremereignissen im Zusammenhang mit der Tourismuswirtschaft betrachtet. So könnten Extremereignisse die für den Tourismus notwendige Infrastruktur (Straßen und Gleise) sowie die touristische Infrastruktur selbst (z. B. Rad- und Wanderwege, Hotels und Gaststätten) gefährden und den Tourismusbetrieb vorübergehend unterbrechen (Buth et al. 2015). Die Studie kommt zum Ergebnis, dass die Betroffenheit für den Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung des Tourismus durch Sturzfluten“ aufgrund des hohen Sturzflutpotenzials in Deutschland am stärksten im Alpenraum ausgeprägt ist (Buth et al. 2015).

Auch die BayKLAS weist auf die negativen Einflüsse von Extremereignissen auf den Tourismus mit der Folge zunehmender finanzieller Einbußen hin. So würden Gebiete mit erhöhter Lawinen- oder Steinschlaggefahr als Urlaubsziel an Attraktivität verlieren und gleichzeitig die Kosten für Reparaturen und Versicherungspolizen steigen (StMUV 2016). Dies gilt letztlich auch für die zunehmende Gefahr durch die Folgen von Starkregenereignissen beziehungsweise Sturzfluten.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die Beeinträchtigung des Tourismusbetriebs durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Verbindung mit einer starken Geländeneigung.

Die Berechnung des Sturzflutpotenzials berücksichtigt die Anzahl der Starkregentage ($> 25 \text{ mm d}^{-1}$) sowie die Geländesteigung und wird in Kapitel 5.5.2 ausführlich erklärt. Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage ist mit einer hohen Unsicherheit der Aussagefähigkeit verbunden. Ursache sind die geringe zeitliche (Messungen) und räumliche Auflösung (Messstationen) der Niederschlagsdaten. Für die Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Für die Sensitivität wurde die Anzahl der Gästeübernachtungen als Proxyindikator für die Bedeutung der Tourismuswirtschaft herangezogen. Es erfolgte eine Normalisierung zwischen null (geringste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis) und eins (höchste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis). Da für die Zukunft keine Projektionsdaten verfügbar waren, wurden die Gästeübernachtungen der Gegenwart auch für die Abbildung der Zukunft verwendet. Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Übernachtungen durch den Proxyindikator abgebildet werden, da Übernachtungen bei Freunden, Bekannten oder Verwandten ebenso wenig in der amtlichen Statistik enthalten sind wie beispielsweise Tagesgäste (Buth et al. 2015).

Die Klimawirkung „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ (TO-2-2017) wird über die Eingangsdaten zum Sturzflutpotenzial und den Gästeübernachtungen auf Kreisebene berechnet, wobei diese multiplikativ verknüpft und anschließend normalisiert werden. Da die Sensitivität nicht für die Zukunft abgebildet werden konnte, wird die Veränderung der Klimawirkung zwischen der Gegenwart und der Zukunft allein durch die Veränderung des Klimaeinflusses hervorgerufen.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für die Gegenwart ergeben sich die stärksten Betroffenheiten in den am Alpenrand liegenden Kreisen (Abb. 44). Dies sind auch die Kreise, in denen das Sturzflutpotenzial deutlich höher ist als in anderen Kreisen Bayerns. Dabei treten besonders die Landkreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land hervor. Aufseiten der Sensitivität sind es neben der besonders hervortretenden Landeshauptstadt München und dem Landkreis Passau ebenfalls die am Alpenrand liegenden Landkreise Schwabens und Oberbayerns, die die höchsten Übernachtungszahlen zu verzeichnen haben,

sodass der Alpenrand aufgrund der besonderen Ausprägung bei Klimaeinfluss und Sensitivität hier besonders hervortritt. Trotz der vergleichsweise hohen Sensitivität tritt München bei der Klimawirkung nicht in Erscheinung, da das Sturzflutpotenzial aufgrund des vergleichsweise sehr flachen Geländes sehr gering ausfällt.

Für die Zukunft ist von einer Zunahme der Starkregenereignisse und somit einer Erhöhung des Sturzflutpotenzials auszugehen. Dies gilt sowohl für den schwachen, als auch für den starken Wandel. Bei einem schwachen Wandel zeigt sich eine leichte Verstärkung der Klimawirkung in den Kreisen Unterfrankens, im Oberpfälzer und Bayerischen Wald sowie am Alpenrand, für einige Kreise ergibt sich keine Veränderung bei den Klimawirkungen. In den Landkreisen Oberallgäu, Unterallgäu, Amberg-Weizsäckchen und Neustadt an der Waldnaab ergibt sich rechnerisch sogar eine Abnahme der Klimawirkungen. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die bei den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen jedoch nicht abgebildet werden. Bei einem starken Wandel sind für nahezu alle Landkreise und kreisfreien Städte Zunahmen der Klimawirkung zu erwarten, wobei hier neben den Landkreisen Berchtesgadener Land und Garmisch-Partenkirchen besonders der Landkreis Oberallgäu hervortritt. Dies ist der deutlichen Erhöhung des Sturzflutpotenzials in der Zukunft beim Szenario des starken Wandels geschuldet, da für die zukünftige Anzahl der Gästeübernachtungen der Wert für die Gegenwart angenommen wurde und mit in die Berechnung eingeflossen ist.

Sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft werden die räumlichen Muster insbesondere von der Definition der Starkregentage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst (siehe auch WW-2-2017).

Kernaussage

- Die Tourismuswirtschaft kann durch die Folgen von Sturzfluten (Schädigung touristischer Infrastruktur) beeinträchtigt werden.
- Zur Berechnung des Klimaeinflusses wurden die Sturzflutpotenziale auf Kreisebene verwendet. Für die Abschätzung der Sensitivität wurde als Proxyindikator die Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene verwendet. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung des Sturzflutpotenzials pro Kreis mit der Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene.
- Verbesserungen bei der Operationalisierung wären vor allem durch eine Verbesserung der Datenbasis bei der Sensitivität zu erzielen. Hier würden neben den Gästeübernachtungen vor allem Zahlen zu privat übernachtenden Gästen sowie zu Tagesgästen ein umfassenderes Bild der touristischen Bedeutung liefern.
- Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage schränkt die Aussagefähigkeit stark ein. In Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung.
- Für die Gegenwart ist die Klimawirkung in den am Alpenrand liegenden Landkreisen am höchsten, wobei besonders die Landkreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land hervortreten. Auch für die Zukunft, bei der von einer Zunahme der Starkregenereignisse und einer Erhöhung des Sturzflutpotenzials auszugehen ist, zeigen diese Kreise insbesondere beim starken Wandel eine weitere Zunahme der Klimawirkung. Da für die zukünftige Anzahl der Gästeübernachtungen der Wert für die Gegenwart angenommen wurde, ist die zukünftige Verstärkung der Klimawirkung auf die deutliche Erhöhung des Sturzflutpotenzials zurückzuführen.

Karten

Arbeitsstand: 19.10.2017

Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt TO-2-2017

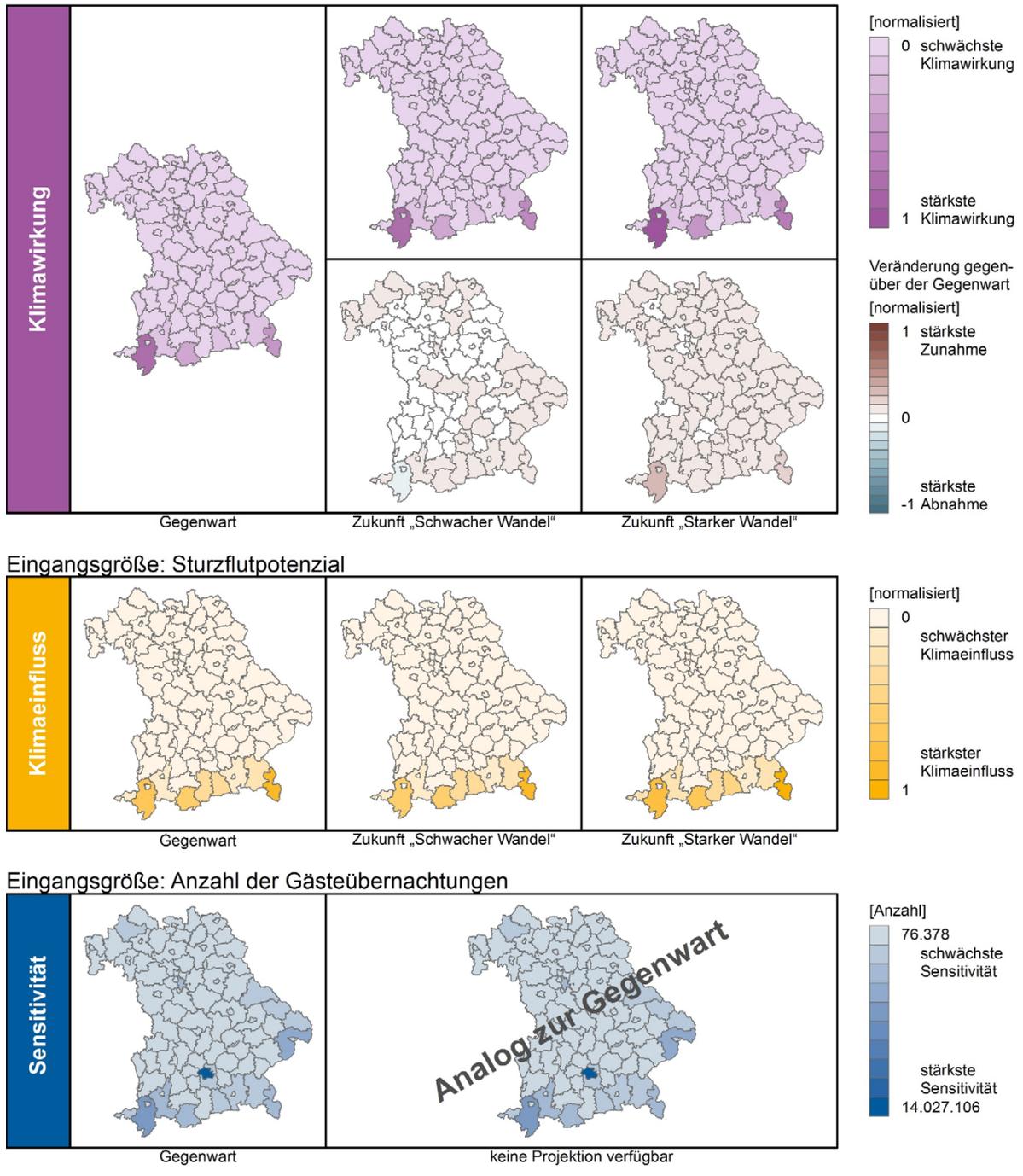


Abb. 44: Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten

5.9.3 TO-3-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze

Hintergrund

Das Klima prägt insbesondere den naturbasierten Tourismus, der den Fokus auf Außenaktivitäten legt. Für den Wintertourismus bedeuten steigende Temperaturen nicht nur Risiken für den Skitourismus, sondern auch Chancen im Bereich der Erholungs-, Gesundheits- und Wellness-Sektoren. Diese können einer steigenden Nachfrage nach umweltfreundlichen und nachhaltigen Aktivitäten durch Angebote wie beispielsweise Erlebnispfade oder Schneewandertouren begegnen. Im Bereich des Sommertourismus wirken wärmere und längere Sommer attraktivitätssteigernd auf bayerische Orte und können den Umsatz des Wander-, Fahrrad- und Wellness-tourismus steigern. Insbesondere von der Verlängerung der Sommersaison vom Frühjahr bis weit in den Herbst hinein wird der Tourismus voraussichtlich enorm profitieren. In Zukunft könnte die Änderung des Klimas zudem eine Umlenkung der Reiseströme verursachen, da deutsche Urlauber sowie Gäste aus dem Mittelmeerraum die höheren Lagen der Mittelgebirge und Alpen den Urlaubszielen im Mittelmeerraum vorziehen könnten. Risiken durch den Klimawandel sind aber auch zu erwarten: Eine hohe Anzahl an Hitzetagen birgt insbesondere für Kleinkinder und ältere Personen eine gesundheitliche Gefahr (StMUV 2015, 2016).

Umsetzung

Betrachtet wird die potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze, indem die Hitzebelastung und die Anzahl der Kurorte pro Kreis einander gegenübergestellt werden.

Der Klimaeinfluss wurde durch die Anzahl Heißer Tage und der Tropennächte abgebildet (analog zu Kap. 5.6.3). Der Eingangsdatensatz wurde aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen gebildet und berücksichtigt für die Gegenwart den Zeitraum 1971 bis 2000 und für die Zukunft den Zeitraum 2021 bis 2050. Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel. Die Rasterdaten lagen in einer Auflösung von 12,5 km x 12,5 km vor und wurden auf Kreisebene normalisiert. Beide Klimaeinfluss-Komponenten wurden normalisiert und additiv miteinander verknüpft.

Als Sensitivitätsindikator wurde die Anzahl der Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte pro Kreis hinzugezogen, die dem amtlichen Verzeichnis des Bayerischen Staatsministeriums des Innern, für Bau und Verkehr entnommen wurden. Zur Verfeinerung der Analyse könnten zukünftig neben den Kurstandorten auch Besucherzahlen mitbetrachtet werden. Da keine Daten für die Zukunft bereitstanden, wurden die gegenwärtigen Kurorte auch für die Abbildung der Zukunft verwendet. Im Normalisierungsvorgang erhalten diejenigen Kreise mit der höchsten Anzahl an Kurorten die höchsten Sensitivitätswerte.

Die normalisierten Daten des Klimaeinflusses wurden mit den normalisierten Daten der Sensitivität multiplikativ verknüpft und nochmals normalisiert. Das Ergebnis wird in Abb. 45 als Klimawirkung dargestellt. Hier gilt: Kreise mit einer hohen Anzahl an Heißen Tagen und Tropennächten im Zusammenspiel mit einer hohen Anzahl an Kurorten wird eine hohe Klimawirkung zugeschrieben.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze ist gegenwärtig als vergleichsweise gering einzuschätzen. Die Klimaeinflusskarte der Gegenwart zeigt einen flächendeckenden schwachen Einfluss der Heißen Tage und Tropennächte auf die bayerischen Kurorte, die überwiegend in der Alpenregion, im Oberpfälzer- und Bayerischen Wald sowie in Ober- und Unterfranken zu finden sind.

Bei einem schwachen klimatischen Wandel wären einige Kreise in der östlichen Alpenregion sowie Gemeinden im Bayerischen Wald stärker als die übrigen Kreise mit Kurorten betroffen. Tritt ein starker Klimawandel ein, so werden neben den Kreisen in der Alpenregion und im Bayerischen Wald, die Kurorte der Landkreise Rosenheim, Traunstein und Passau am stärksten betroffen sein.

Kernaussage

- Der Sommertourismus, insbesondere der Wander-, Fahrrad- und Wellnesstourismus, profitiert von einer Ausdehnung der Sommersaison vom Frühling bis in den Herbst. Neben steigenden ökonomischen Gewinnen können hohe Temperaturen jedoch insbesondere Kleinkinder und ältere Menschen in ihrer Gesundheit beeinträchtigen. Für die Zukunft wird erwartet, dass das trockenere und heißere werdende Klima an heutigen Urlaubszielen im Mittelmeerraum Besucher in höhere Lagen der Mittelgebirge und Alpen zieht.
- Die Klimawirkung betrachtet eine potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze, indem die heißen Tage und Tropennächte sowie Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte zusammen betrachtet wurden.
- Zur Verfeinerung der Analyse könnten neben den Kurstandorten auch Besucherzahlen mitbetrachtet werden.
- In Zukunft kann es zu einer Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze, insbesondere in den Alpenregionen, aber auch im Oberpfälzer und Bayerischen Wald kommen. Außerdem können in Zukunft bei einem starken klimatischen Wandel Regionen in Ober- und Unterfranken betroffen sein.

Karten

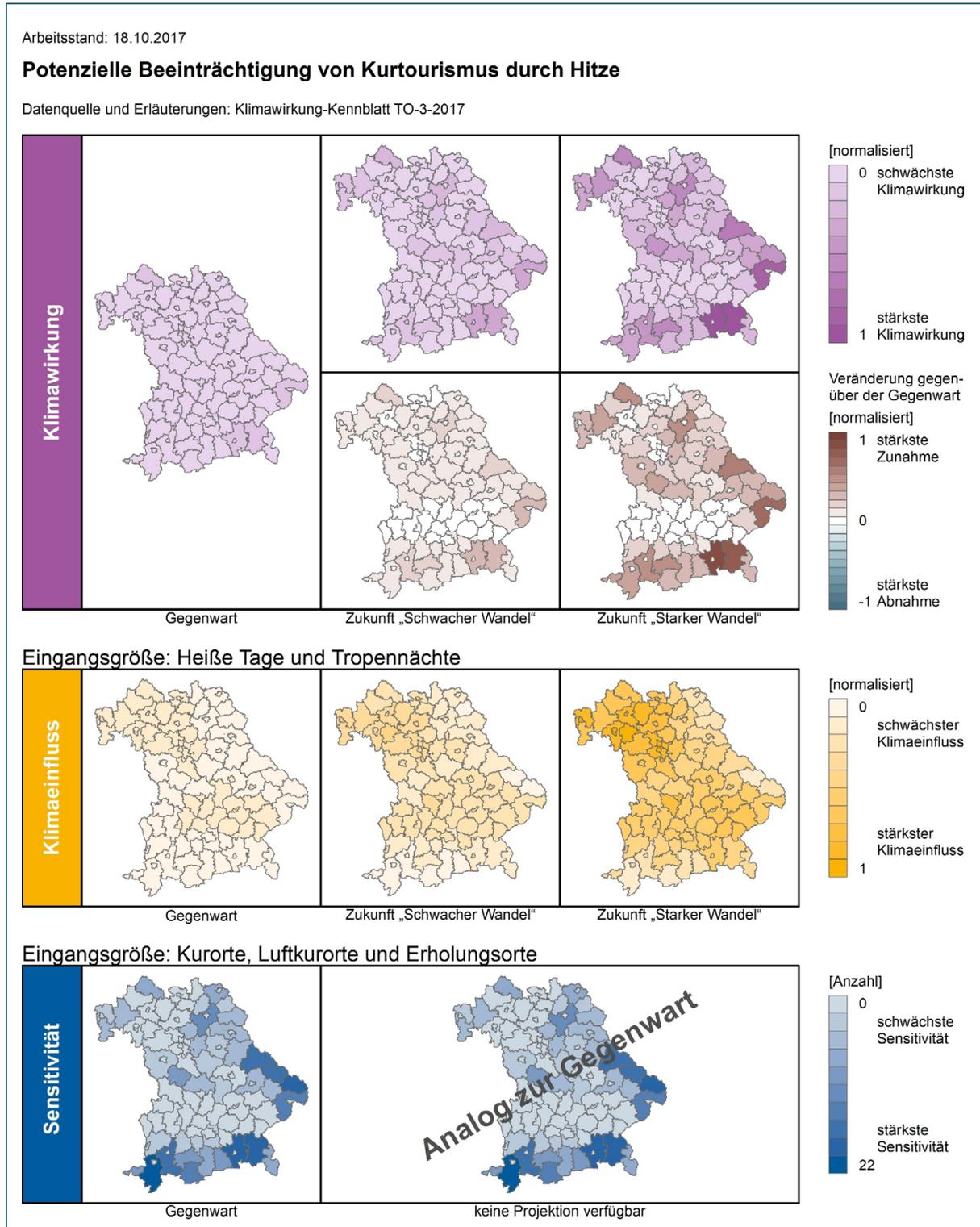


Abb. 45: Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze

5.10 Gesundheit

Die menschliche Gesundheit kann durch die Auswirkungen des Klimawandels, aber auch durch anthropogene Einflüsse erheblich beeinträchtigt werden. Der Klimawandel kann sich direkt über die Wirkung der Klimaparameter (Veränderung der Temperatur, erhöhte UV-Belastung einhergehend mit einem erhöhten Hautkrebsrisiko) oder auch indirekt durch die Ausbreitung vektorübertragender Infektionskrankheiten auf die menschliche Gesundheit auswirken (StMUV 2016). Zu den anthropogenen Einflüssen zählen beispielsweise veränderte lufthygienische Belastungen aus den Bereichen Verkehr und Industrie, die maßgeblich die städtische Luftqualität verschlechtern. Schädliche Emissionen sind insbesondere die Spurengase Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Ozon sowie Feinstäube und Ruß (PM_{2,5} und PM₁₀, Kuttler 2004). Das vermehrte Auftreten gesundheitlicher Belastungen wird allerdings nicht nur durch lufthygienische Veränderungen oder die erhöhten Temperaturen und das damit einhergehende wärmere Stadtklima beeinflusst, denn auch die Empfindlichkeit der Menschen oder bestimmter Bevölkerungsgruppen bestimmt das Ausmaß der gesundheitlichen Belastung. Alte und pflegebedürftige Menschen, Menschen mit Vorerkrankungen und Kleinkinder zeigen sich gegenüber den negativen Beeinträchtigungen besonders empfindlich (StMUV 2016; Kuttler 2004).

Im Hitzesommer 2003 sind in Europa rund 70.000 mehr Menschen an den hitzebedingten Belastungen gestorben als in den Jahren zuvor, darunter über 7.000 Menschen allein in Deutschland (Robine et al. 2007). Auch in Zukunft könnte es zu weiteren Extremwetterereignissen kommen: Laut Klima-Report Bayern ist mit einer Zunahme von bis zu 14 Heißen Tagen pro Jahr bis 2050 zu rechnen (StMUV 2015). Im Süden Deutschlands und insbesondere in den Kernstädten der Agglomerationsräume werden diese negativen Effekte intensiver auftreten. Aufgrund dessen besteht zukünftig ein erhöhter Bedarf an Klimaanpassungsmaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, insbesondere jedoch (hitze-)empfindlicher Gruppen. Seitens der Stadtplanung sind Strategien notwendig, welche das Maß der gesundheitlichen Belastungen durch stadtklimatische Effekte reduzieren (StMUV 2015).

Da bei aufeinanderfolgenden Hitzetagen mit einer Verstärkung der negativen Folgen für die Gesundheit, insbesondere für ältere Menschen, zu rechnen ist, wurde die Klimawirkung „Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre“ (GE-1-2017) gewählt. Zur Abbildung der städtischen Luftqualität und ihre mögliche zukünftige Veränderung durch den Klimawandel war ursprünglich beabsichtigt, auch die Klimawirkung „Potenzielle Betroffenheit durch bodennahes Ozon“ zu bearbeiten. Diese Klimawirkung konnte jedoch nicht berechnet und abgebildet werden, da die Darstellung auf Landkreisebene mit einem hohen Informationsverlust verbunden gewesen wäre. Das Messstellennetz hat eine zu geringe Dichte, sodass die Darstellung kleinräumiger Muster der Ozonkonzentration nicht möglich war.

5.10.1 GE-1-2017, Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre

Hintergrund

Der Hitzebelastung in Bayern wird eine hohe Bedeutung beigemessen, denn als Folge der sommerlichen Hitzeperioden treten häufig verstärkt gesundheitliche Probleme, wie Atembeschwerden, Erkrankungen der Nieren, Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems oder Stoffwechselstörungen, auf (StMUV 2016). Insbesondere ältere Menschen und Neugeborene können Hitze schlechter bewältigen, da ihre Temperaturregulierung eingeschränkt ist. Während die Hitzebelastung an einzelnen Tagen verträglicher ist, ist eine länger andauernde Hitzeperiode belastender für den Menschen. Insbesondere wenn die Lufttemperatur in der Nacht nicht ausreichend absinkt, und dadurch die Innenraumtemperaturen ansteigen, kann sich der Körper nicht erholen (MUNLV NRW).

Verstärkend wirkt die Hitzebelastung in Ballungsgebieten wie München und Nürnberg, da sie in der Regel aufgrund ihrer verdichteten Stadtstruktur stärker als ländliche Räume von Überwärmung betroffen sind und sich dort ausgeprägte Wärmeinseln (UHI, Urban Heat Island) bilden. Dichte Bebauungsstrukturen und das damit einhergehende Defizit an Grün- und Wasserflächen verstärken den Wärmeinseleffekt. Zudem wird der Kaltluftvolumentransport vielfach durch Bebauung blockiert. Ferner geben dunkle Materialien Wärme an die Umgebung ab und erhöhen die Lufttemperatur zusätzlich (Runhaar et al. 2012). Zur Verringerung der Folgen von Hitzebelastungen dienen begrünte oder schattige Flächen sowie die Verwendung heller Materialien; auch eine aufgelockerte Bebauung die Ventilationsbahnen freihält, wirken der Hitzebelastung entgegen (StMUV 2016; Buth et al. 2015; StMUV 2015; MUNLV NRW).

Umsetzung

Da insbesondere ältere Menschen von Hitzebelastungen betroffen sind, wurden hier Personen über 60 Jahre als besonders empfindliche Gruppe gegenüber Hitze betrachtet. Als klimatischer Einfluss wurden sowohl für die Gegenwart (1971-2000) als auch für die Zukunft (2021-2050) Modellergebnisse aus einem RCP8.5-Ensemble aus 13 Modellläufen zur mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 °C (Heiße Tage) sowie zur mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 °C (Tropennächte) eingesetzt. Beide Klimaeinflussdaten wurden miteinander additiv verknüpft und damit zu einem Klimaeinfluss zusammengefasst. Die Klimaeinflussdaten des 15. Perzentils sind dem schwachen Wandel zugeordnet, die des 85. Perzentils dem starken Wandel. Verbesserungen der Operationalisierung wären durch die Berücksichtigung von Hitzeperioden im Gegensatz zur Anzahl Heißer Tage möglich.

Als Sensitivitätsindikatoren wurden einerseits Daten zur Bevölkerungszahl insgesamt, andererseits Daten zum Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre für die Gegenwart (2009) und Zukunft (2030) verwendet. Zur Abbildung der zukünftigen Entwicklung wurden die Einwohnerzahlen aus dem PANTARHEI-REGIO-Modell verwendet. Der Anteil älterer Menschen wurde aus der aktuellen Raumordnungsprognose 2030 des BBSR entnommen (Schlömer et al. 2015). Die Daten zur Gegenwart stammen jeweils vom LfStat. Da die Hitzebelastung nicht nur vom Klima, sondern maßgeblich vom Versiegelungsgrad beeinflusst wird, wurden für die Gegenwart (2009) und Zukunft (2030) zusätzlich die versiegelten Flächen mithilfe der Ergebnisse aus dem Teilprojekt „Landnutzungsszenarien“ des Projekts CC-LandStraD berücksichtigt. Als versiegelte Fläche gelten die Kategorien 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen'. Es wurde nur das Szenario „Wachstum“ berücksichtigt, da das Szenario „Stagnation“ bereits hinter der aktuellen, tatsächlichen Bevölkerungsentwicklung zurückliegt. Für die Zukunft wurde somit lediglich ein Sensitivitätsszenario in die Berechnung der Klimawirkung einbezogen.

Grundlage für die Berechnung der Sensitivität ist – analog zur Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) – der Urban-Heat-Island-Index (UHI_{max}) nach Früh et al. (2011) und Wienert et al. (2013). Dieser maximale urbane Wärmeinseleffekt wird in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl einer zentraleuropäischen Stadt zu berechnen:

$$UHI_{max} = 2,01 * \left[\frac{\log(Einwohnerzahl)}{\log(10)} \right] - 4,06$$

Für die vorliegende Pilotstudie wurde das Wärmeinseleffekt-Potenzial ($UHI_{potenzial}$) verwendet, in das der oben genannte UHI-Index sowie der Anteil versiegelter Fläche einfließt:

$$UHI_{potenzial} = 0,784 * UHI_{max} * (\text{Anteil versiegelter Fläche})$$

Sowohl das Wärmeinseleffekt-Potenzial als auch der Anteil der über 60-Jährigen wurden normalisiert und additiv miteinander verknüpft, um die über 60-Jährigen in der Klimawirkung mit abbilden zu können. Um die Klimawirkung der potenziellen Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre (GE-1-2017) zu erhalten, wurde der genannte normalisierte Wert mit dem normalisierten Klimaeinfluss multiplikativ verknüpft. Verbesserungen bei der Operationalisierung sind insbesondere durch eine Berücksichtigung weiterer besonders sensibler Bevölkerungsgruppen (Kinder) denkbar oder die Betrachtung der arbeitenden Bevölkerung.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse für die Gegenwart zeigen, dass die durch die Klimaparameter Heiße Tage und Tropennächte beeinflusste Hitzebelastung der Bevölkerung über 60 Jahre im Vergleich zur Zukunft relativ gering ausfällt (Abb. 46). Bei Betrachtung der Sensitivitätskarte wird jedoch in einigen Kreisen Bayerns eine erhöhte Sensitivität der Bevölkerung deutlich. Dies trifft überwiegend auf die Ballungsgebiete München und Nürnberg zu, da diese zusätzlich hohe Versiegelungsgrade aufweisen. Der Klimaeinfluss ist in den Regierungsbezirken Unterfranken und Niederbayern etwas stärker ausgeprägt als in den restlichen Gebieten Bayerns.

Bei einer moderaten klimatischen und baulichen Entwicklung sowie einem gemäßigten demografischen Wandel ist in der Zukunft von einem schwachen Anstieg der Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre auszugehen. Lediglich im Regierungsbezirk Unterfranken ist die Klimawirkung etwas stärker ausgeprägt. Wird hingegen von einem starken Wandel ausgegangen, so nimmt die Hitzebelastung der Bevölkerung über 60 Jahre in Zukunft insbesondere in den ländlichen Gebieten in Franken und im Bayerischen Wald sowie in den Ballungsgebieten, speziell in Nürnberg, zu. Dies ist unter anderem auf einen projizierten stetigen Anstieg des Anteils der über 60-Jährigen an der ländlichen und städtischen Bevölkerung sowie auf einen zu erwartenden starken Anstieg des Versiegelungsgrades in Ballungsgebieten bis 2030 zurückzuführen. Die bayerische Bevölkerungsprognose 2015 beinhaltet jedenfalls auch die Annahme, dass die ländliche Bevölkerung in Franken und in Teilen von Schwaben abnimmt, hingegen die Altersgruppen der Über-60-Jährigen auch in diesen Regionen deutlich wachsen wird.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene (Kreise) stellen die Ergebnisse lediglich eine grobe Annäherung dar, die sich je nach topographischer Ausgestaltung der Kreise innerhalb dieser stark differenzieren können.

Kernaussage

- Langanhaltende sommerliche Hitzebelastungen führen zu Atembeschwerden, Erkrankungen der Nieren, Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems oder Stoffwechselstörungen vor allem bei älteren Menschen. Die körperliche Belastung wird verstärkt, wenn die Luft in der Nacht nicht deutlich abkühlt.
- Die Klimawirkung „Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre“ wurde auf Basis von Proxyindikatoren umgesetzt. Verbesserungen bei der Operationalisierung sind durch eine Berücksichtigung weiterer besonders sensibler Bevölkerungsgruppen oder die Betrachtung von Hitzeperioden im Gegensatz zur Anzahl Heißer Tage möglich.
- In die Analyse sind als Klimaeinfluss die Anzahl Heißer Tage sowie Tropennächte eingeflossen. Zur Bewertung der Sensitivität wurden Daten zur Bevölkerungsanzahl und Altersstruktur sowie zum Versiegelungsgrad verwendet. Die Klimawirkung baut insbesondere auf dem Urban-Heat-Island-Index auf und wurde in Anlehnung an die Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes abgeleitet.
- Aufgrund des projizierten ansteigenden Anteils der städtischen und ländlichen Bevölkerung über 60 Jahre sowie des Versiegelungsgrades wird in Zukunft überwiegend in Ballungsgebiete-

te wie Nürnberg oder München eine steigende Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre erwartet, aber auch in ländlichen Gebieten in Franken und im Bayerischen Wald.
 → Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene stellen die Ergebnisse lediglich eine grobe Annäherung dar, die sich innerhalb der Kreise stark differenzieren können.

Karten

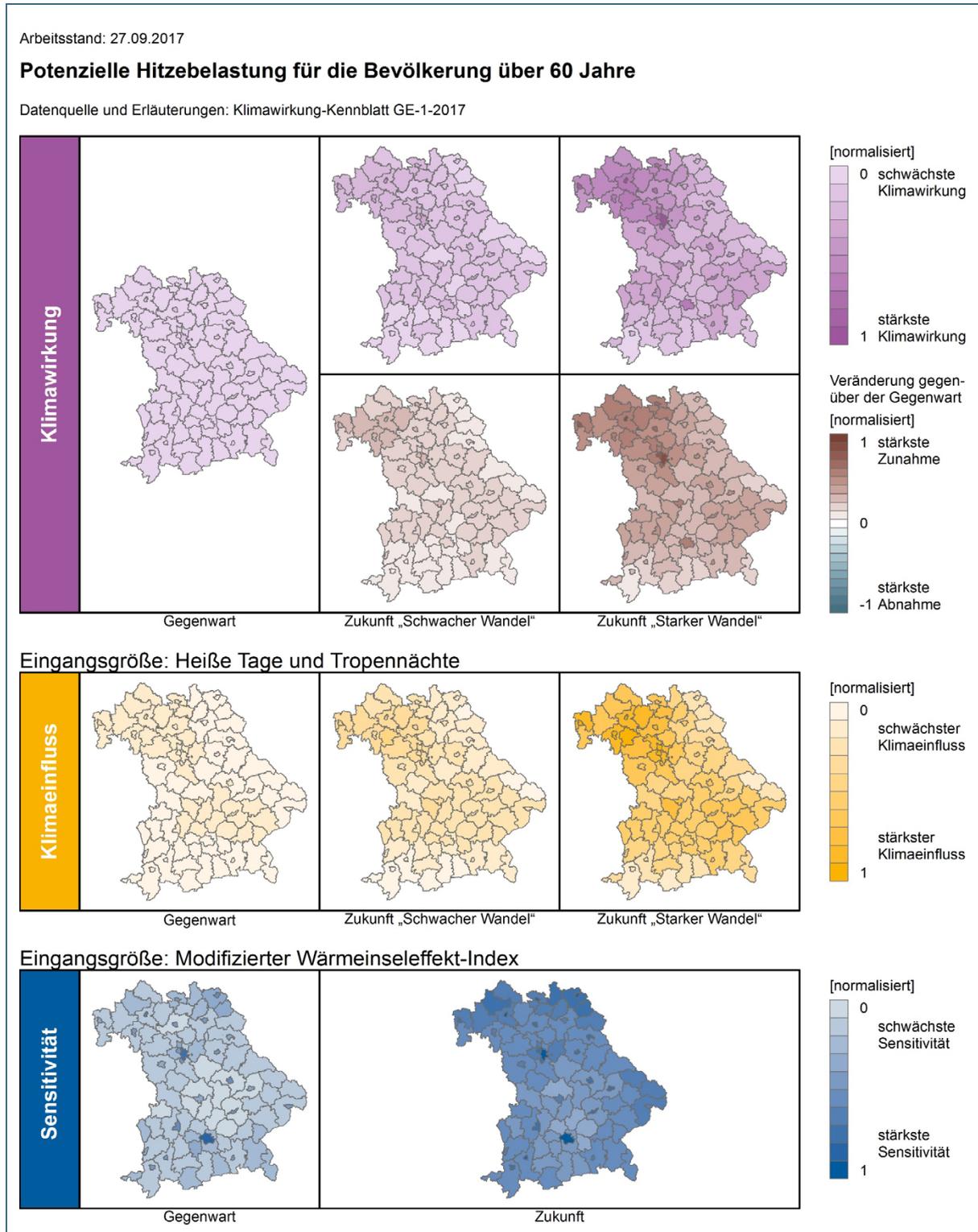


Abb. 46: Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre

5.11 Straßenbau und Verkehr

Die Verkehrsinfrastruktur umfasst nach der Deutschen Anpassungsstrategie (Die Bundesregierung 2008) Straßen-, Schienen- und Wasserwege sowie den Flugverkehr. Sie ist sowohl Betroffener von den Folgen des Klimawandels als auch Verursacher. 20,5 % der gesamten Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Jahr 2016 sind in Deutschland auf den Verkehr zurückzuführen (UBA 2017b). Extremwetterereignisse haben enorme Auswirkungen auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur. Sind bestimmte Straßen- oder Schienenwege kurz-, mittel- oder gar langfristig nicht nutzbar, ist eine Erfüllung der wirtschaftlichen Anforderungen oder des Alltags von Privatpersonen nicht möglich (Buth et al. 2015).

Die besondere gesellschaftliche Bedeutung der Verkehrsinfrastruktur basiert demgemäß auf einer hohen intersektoralen Vernetzung und der Rolle als Grundlage für eine funktionierende Gesellschaft. Bedeutende Verkehrsinfrastruktur zählt daher zu den Kritischen Infrastrukturen (Buth et al. 2015). 5 % der versiegelten Fläche (17.850 km²) wurden 2011 für den Verkehr genutzt. Kreisstraßen mit 91.700 km sowie Landes- und Staatsstraßen mit 86.600 km beanspruchen den größten Teil des Verkehrswegenetzes, dicht gefolgt von 39.700 km Bundesstraßen und 37.700 km Schienennetz (Hütter 2013). In Bayern hat die Verkehrsfläche im Vergleich zum Jahr 2000 in allen Regierungsbezirken deutlich zugenommen (Bayerische Staatsregierung 2016). Selbst unter der Annahme eines nur mäßigen Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums wird weiterhin davon ausgegangen, dass das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsfläche zunehmen (StMUV 2016).

Ein zunehmendes Verkehrsaufkommen stellt die Infrastruktur vor Herausforderungen; Verkehrswege müssen instandgehalten oder ausgebaut werden (Hütter 2013). Neben der Gewährleistung, Instandhaltung und dem Neubau der Infrastruktur müssen auch die Verkehrssicherheit und die Auswirkungen auf zukünftige Planungen berücksichtigt werden. Im Programm „Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ (AdSVIS) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ist bereits die zukunftsfähige Entwicklung der Straßenverkehrsinfrastruktur thematisiert worden. Dabei spielen tägliche Arbeitswege oder private Reisen sowie funktionierende Infrastruktur für den Logistiksektor eine Rolle (BASt 2017; Buth et al. 2015).

Infolge des Klimawandels können an der Verkehrsinfrastruktur Schäden durch Hitze und Frost oder Nutzungseinschränkungen durch Überschwemmungen und Sturzfluten entstehen. So können durch Hitzeperioden die Straßenbeläge beeinträchtigt werden, sodass bei einem hohen Verkehrsaufkommen Spurrinnen entstehen können. Bei häufigem Wechselfrost können Materialschäden in Form von Schlaglöchern und Verformungen von Schienen auftreten. In Folge dieser Auswirkungen ist mit einer Erhöhung der Gefahr von Unfällen zu rechnen. Überschwemmungsgefährdete Verkehrsflächen befinden sich in Bayern vor allem entlang der Flüsse Main und Donau. Der Luftverkehr selbst ist weniger von möglichen Klimaeinflüssen betroffen. Hier fließt in die Betrachtung die Fläche der Flughäfen ein, um Rückschlüsse auf die Betriebsfähigkeit der Flughäfen zu ziehen (StMUV 2016).

5.11.1 VE-1-2017, Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Hintergrund

Die Verkehrsinfrastruktur ist starken Wetter- und Witterungsbedingungen ausgesetzt, die in Zukunft extremere Ausmaße annehmen können. Sommerliche Hitze kann Schäden an der Fahrbahnoberfläche verursachen. Insbesondere Betonabschnitte sind davon betroffen, da das Material leichter als andere Oberflächen aufplatzt oder verkantet. Aber auch weicher Asphalt verformt sich unter Einfluss sommerlicher Hitze. Auch er kann Risse und somit sogenannte Spurrillen bilden. Sammelt sich in diesen Rillen nach einem Sommerregen zusätzlich Wasser, erhöht sich die Gefahr einer Wasserglätte,

bei der das Fahrzeug die Haftung auf der Oberfläche verliert („Aquaplaning“) und die Unfallgefahr ansteigt (UBA 2017a; StMUV 2016)

Auch der Schienenverkehr ist von Extremereignissen betroffen, wenngleich das Schienensystem wesentlich unabhängiger von Wetterverhältnissen ist als der Straßenbereich. Problematisch sind jedoch die fehlenden Ausweichmöglichkeiten und Alternativrouten bei einem Schadenseintritt. Starke Hitze kann nämlich auch bei Schienen Fehlfunktionen wie Schienenlagefehler auslösen. Außerdem ist bei extrem hohen Temperaturen mit Verformungen zu rechnen, die die Verkehrssicherheit beeinträchtigen. Zudem beeinträchtigt Hitze elektronische Geräte wie Signalanlagen stark (Marscheider et al. 2013). Zu beachten ist außerdem, dass sich einzelne heiße Tage im Frühjahr stärker auf die Schienenanlage auswirken, als dauerhaft hohe Temperaturen, da Temperatursprünge die Schienenanlagen stärker belasten (Transportation Research Board and National Research Council; Lindgren et al. 2009; StMUV 2016).

Für Bayern wird eine stärkere Beanspruchung des Straßenkörpers durch stärkere Hitzebelastung (z. B. Blow-Ups) im Sommer erwartet, wodurch eine erhöhte Gefährdung der Straßenverkehrsinfrastruktur befürchtet wird. Diese kann auch zu Gefährdungen und Behinderungen der Verkehrsteilnehmer führen, vorrangig an Betonfahrbahnen mit einem Lebensalter von bereits über 30 Jahren (StMUV 2015, 2016). Die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015) identifiziert für den Indikator „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ für Bayern im bundesweiten Vergleich insgesamt nur geringe Betroffenheiten. Lediglich bei einem zukünftig starken Wandel treten München und der Landkreis Ansbach hervor.

Umsetzung

Als Klimaeinfluss wurden die Heißen Tage in die Berechnung einbezogen. Die Klimadaten stammen aus Modellergebnisse eines RCP8.5-Ensembles aus 13 Modellläufen. Diese lagen für die Gegenwart (1971–2000) und Zukunft (2021–2050) als Rasterdatensatz mit einer Zellgröße von 12,5 km x 12,5 km vor. Als Heiße Tage wird die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 °C definiert.

Die Verkehrsinfrastrukturflächen der Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen wurden als Sensitivitätsindikator herangezogen, die für die Gegenwart (2016) aus dem vom LDBV zur Verfügung gestellten Basis-DLM 25 entnommen wurden. Die Fahrbahnbreiten der Straßen lagen vor. Die Flächen der Eisenbahnen bestimmen sich aus der Anzahl der Gleise. Für eingleisige Strecken wurde eine Breite von 10 m und für zweigleisige Strecken eine Breite von 20 m angenommen. Neben den Linien wurden auch größere Bahnverkehrsanlagen (z. B. Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40 ha und alle Flughäfen in der Analyse berücksichtigt (im Detail siehe Klimawirkungskennblatt, Anhang).

Zur Abbildung der Zukunft wurden die Trassenverläufe geplanter Straßen- und Schieneninfrastrukturen herangezogen. Zur Darstellung des schwachen Wandels wurden die Ausbauvorhaben der Staatsstraßen bis ca. 2020 („1UEB“ und „1“-Vorhaben) sowie der Bundesstraßen und -autobahnen und Schienen („FD“ und „VB-E“-Vorhaben, in der Regel deutlich vor 2030) verwendet. Für das Szenario des starken Wandels wurden die Ausbauvorhaben von Staatsstraßen bis ca. 2025 („1UEB“, „1“ und „1R“-Vorhaben) sowie Bundesstraßen und -autobahnen sowie die Schieneninfrastruktur bis ca. 2030 („FD“, „VB-E“ und „VB“-Vorhaben) in die Berechnung einbezogen. Die Breiten der jeweiligen Linien wurden wie folgt ermittelt: Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der OBB für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtpurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den

einzelnen Projektbeschreibungen des BMVI entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 m, für zweigleisige von 20 m usw. angenommen wird. Zu beachten ist, dass sich die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben im weiteren Planungsverlauf noch verändern können.

Die normalisierten absoluten Verkehrsinfrastrukturflächen wurden mit dem normalisierten Anteil der Verkehrsinfrastrukturflächen an der Kreisfläche additiv verknüpft und anschließend erneut normalisiert. Dadurch wurde vermieden, dass Landkreise nur aufgrund einer größeren Fläche und damit verbunden mehr Verkehrsinfrastruktur als sensibler identifiziert werden. Die normalisierten Werte der Sensitivitätsindikatoren wurden multiplikativ mit den normalisierten Werten des Klimaeinflusses verknüpft.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Gegenwärtig kann von einer vergleichsweise geringen Betroffenheit potenzieller hitzebedingter Schäden an Verkehrsinfrastruktur ausgegangen werden. Etwas stärker als der Rest Bayerns sind die Verdichtungsräume München und das nördlicher gelegene Nürnberg sowie die Landkreise Freising und Erding betroffen. Dies lässt sich auf die hohe Summe der Verkehrsinfrastrukturflächen – im Falle von Freising und Erding insbesondere auf den Flughafen München – zurückführen.

Das Bild verstärkt sich für die Zukunft bei einem angenommenen schwachen Wandel. Bei einem starken Wandel treten neben den oben genannten Landkreisen auch Regionen in Unter- und Mittelfranken sowie in Schwaben, in der östlichen Voralpenregion und im Bayerischen Wald hervor. Die Sensitivitätsindikatoren dominieren das Ergebnis der Klimawirkung, weswegen sich die Klimawirkungs- und Sensitivitätskarten stark ähneln (Abb. 47).

Kernaussage

- Sommerliche Hitze beeinträchtigt insbesondere Betonfahrbahnen, aber auch Asphaltbeläge, indem sie Aufkantung und Risse verursacht. Auch der Schienenverkehr ist von diesen extremen Witterungsbedingungen betroffen. Gleisanlagen können sich durch hohe Temperaturen verformen und somit die Verkehrssicherheit beeinträchtigen.
- Zur Berechnung der Klimawirkung „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur“ wurden als Klimaeinfluss Heiße Tage und als Sensitivitätsindikator die Verkehrsinfrastrukturflächen herangezogen.
- Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem 7. Ausbauplan für Staatsstraßen entnommen. Zur Berechnung der Infrastrukturflächen wurden spezifische Breiten angenommen, falls diese nicht im Datensatz angegeben waren. Durch die Einbeziehung von Planungsdokumenten des Bundes und des Freistaates konnten auch zukünftige Infrastrukturvorhaben in der Analyse berücksichtigt werden.
- Gegenwärtig sind die bayerischen Kreise in etwa gleichstark von hitzebedingten Schäden an Verkehrsinfrastruktur betroffen. Eine hohe Betroffenheit wird künftig insbesondere für Nürnberg und München sowie die Landkreise Freising und Erding erwartet. Der Sensitivitätsindikator dominiert die Ergebnisse der Klimawirkung stark.

Karten

Arbeitsstand: 03.11.2017

Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt VE-1-2017

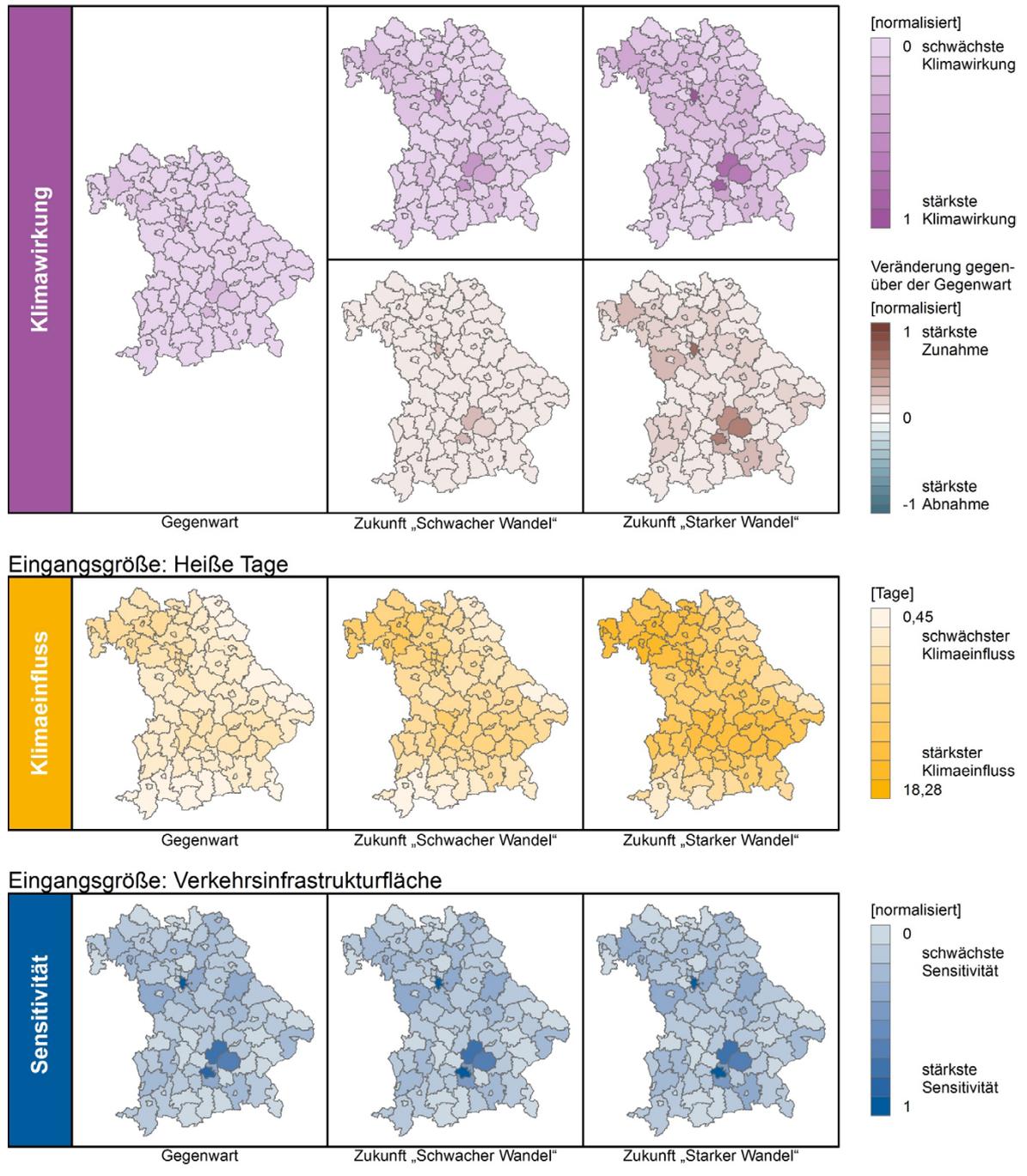


Abb. 47: Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

5.11.2 VE-2-2017, Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Hintergrund

Straßenschäden durch Frost entstehen dann, wenn Wasser durch Risse in der Fahrbahnoberfläche ins Innere dringt und dort gefriert. Das Volumen des Wassers vergrößert sich bei Frost und hinterlässt Hohlräume im Straßenbelag, nachdem das Eis bei steigenden Temperaturen wieder schmilzt und das Wasser anschließend verdunstet. Tritt ein Temperaturwechsel wiederholt auf, so kann es zu „Frostsprengungen“ kommen, die das Material der Oberfläche zum Reißen bringen. Durch die vergrößerten Risse können größere Wassermengen in das Material eindringen, was eine Beschleunigung des Prozesses verursacht. Die entstandenen Risse werden außerdem durch die mechanische Beanspruchung des Verkehrs weiter vergrößert, sodass es zu Aufwölbungen, breiteren Spalten bis hin zu großen Löchern kommen kann. Insbesondere von LKWs stark beanspruchte Straßen sind davon betroffen (Landesbetrieb Straßenbau NRW 2017; StMUV 2016). Künftig wird mit einer Verringerung der Anzahl der Frosttage gerechnet, sodass auch von einer Reduzierung der Straßenbelagsschäden ausgegangen werden kann. Dies kann sich positiv auf die Unfallstatistik, Verspätungen und Rückstaus auswirken (Marscheider et al. 2013; Transportation Research Board and National Research Council; Schuchardt & Wittig 2012). Allerdings ist gleichzeitig aber auch mit einem Anstieg der Anzahl von heißen Tagen zu rechnen, die Schäden an der Fahrbahnoberfläche verursachen (Hoffmann et al. 2011).

Für Bayern wird eine stärkere Beanspruchung des Straßenkörpers durch häufigere Frost-Tau-Salz-Wechsel im Winter erwartet, wodurch erhöhte Gefährdungen der Straßenverkehrsinfrastruktur befürchtet wird, die auch zu Gefährdungen und Behinderungen der Verkehrsteilnehmer führen kann (StMUV 2015, 2016). Die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015) identifiziert für den Indikator „Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen“ für Bayern im bundesweiten Vergleich insgesamt mäßige Betroffenheiten. Lediglich München und der Landkreis Ansbach treten hervor. Betroffenheiten bestehen generell bei Kreisen in Mittelgebirgsnähe und am Alpenrand. Trotz einer durch steigende Temperaturen bedingten, projizierten grundsätzlichen Verringerung dieser Klimawirkung können jedoch einige Kreise in Bayern (Mittelfranken, Bayerischer Wald) weiterhin stärker betroffen sein.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt Potenziale für frostbedingte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch die Verknüpfung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost mit der Verkehrsinfrastrukturfläche in den Kreisen.

Zur Abbildung des Klimaeinflusses wurden die Tage mit Wechselfrost verwendet, die die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmaximaltemperatur über 0 °C und gleichzeitiger Tagesminimaltemperatur von kleiner als 0 °C beschreiben. Die Klimadaten stammen aus Modellergebnisse eines RCP8.5-Ensembles aus 13 Modellläufen. Diese lagen für die Gegenwart (1971–2000) und Zukunft (2021–2050) als Rasterdatensatz mit einer Zellgröße von 12,5 km x 12,5 km vor. Dabei repräsentiert das 15. Perzentil den starken und das 85. Perzentil den schwachen Wandel. Die Daten wurden für die Verknüpfung mit den Sensitivitätsdaten auf Kreisebene normalisiert.

Die Verkehrsinfrastrukturfläche der Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen wurde – wie auch schon bei der Klimawirkung „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur“ – als Sensitivitätsindikator herangezogen (siehe Kap. 5.11.1 und Klimawirkungskennblatt im Anhang).

Die normalisierten absoluten Verkehrsinfrastrukturflächen wurden mit dem normalisierten Anteil der Verkehrsinfrastrukturflächen am Kreis additiv verknüpft und anschließend erneut normalisiert. Die

normalisierten Werte der Sensitivitätsindikatoren wurden multiplikativ mit den normalisierten Werten des Klimaeinflusses verknüpft.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse zeigen eine gegenwärtig starke Betroffenheit der Verdichtungsräume Nürnberg, Rosenheim und München sowie der nördlich der bayerischen Hauptstadt gelegenen Landkreise Freising und Erding. Die hohe Betroffenheit der letztgenannten Landkreise ist insbesondere durch den Flughafen München und die daran angeschlossene Infrastruktur zu erklären. Die Klimawirkung wird stark durch die Werte der Sensitivität geprägt, was sich in der Ähnlichkeit der beiden Karten widerspiegelt. Der Klimaeinfluss ist gegenwärtig in allen Kreisen relativ gleichstark ausgeprägt, mit leichter Dominanz im Voralpenraum und im Bayerischen Wald (Abb. 48).

Bei einem schwachen Wandel ist eine flächendeckende leichte Abnahme frostbedingter Schäden an Verkehrsinfrastruktur zu erwarten mit Ausnahme der östlichen Alpenregionen. Bei einem starken Wandel sind entgegen der Erwartung mit starken Abnahmen frostbedingter Schäden, insbesondere in den Kreisen mit einer gegenwärtig hohen Betroffenheit, zu rechnen. Dies ist auf den projizierten Klimaeinfluss zurückzuführen: Eine vergleichsweise starke Abnahme an Tagen mit Wechselfrost ist im Voralpenraum und im Bayerischen Wald zu erwarten, sodass sich das Bild der Klimawirkung für ganz Bayern homogenisiert.

Kernaussage

- Gefrieren des Wassers vergrößert Risse in der Fahrbahn, da sich das Wasser ausdehnt. Über einen längeren Zeitraum können sie sich durch wiederholtes gefrieren und auftauen zu Schlaglöchern ausweiten.
- Zur Berechnung der Klimawirkung „Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur“ wurden als Klimaeinfluss Tage mit Wechselfrost und als Sensitivitätsindikator die Verkehrsinfrastrukturflächen herangezogen.
- Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem 7. Ausbauplan für Staatsstraßen entnommen. Zur Berechnung der Infrastrukturflächen wurden spezifische Breiten angenommen, falls diese nicht im Datensatz angegeben waren.
- Gegenwärtig sind laut Analyse insbesondere die Landkreise Nürnberg, München, Freising, Erding und Rosenheim potenziell besonders von frostbedingten Schäden an Verkehrsinfrastruktur betroffen. In Zukunft werden Schäden durch Frost an Verkehrsinfrastrukturen abnehmen, da eine Abnahme der Tage mit Wechselfrost zu erwarten ist.

Karten

Arbeitsstand: 03.11.2017

Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt VE-2-2017

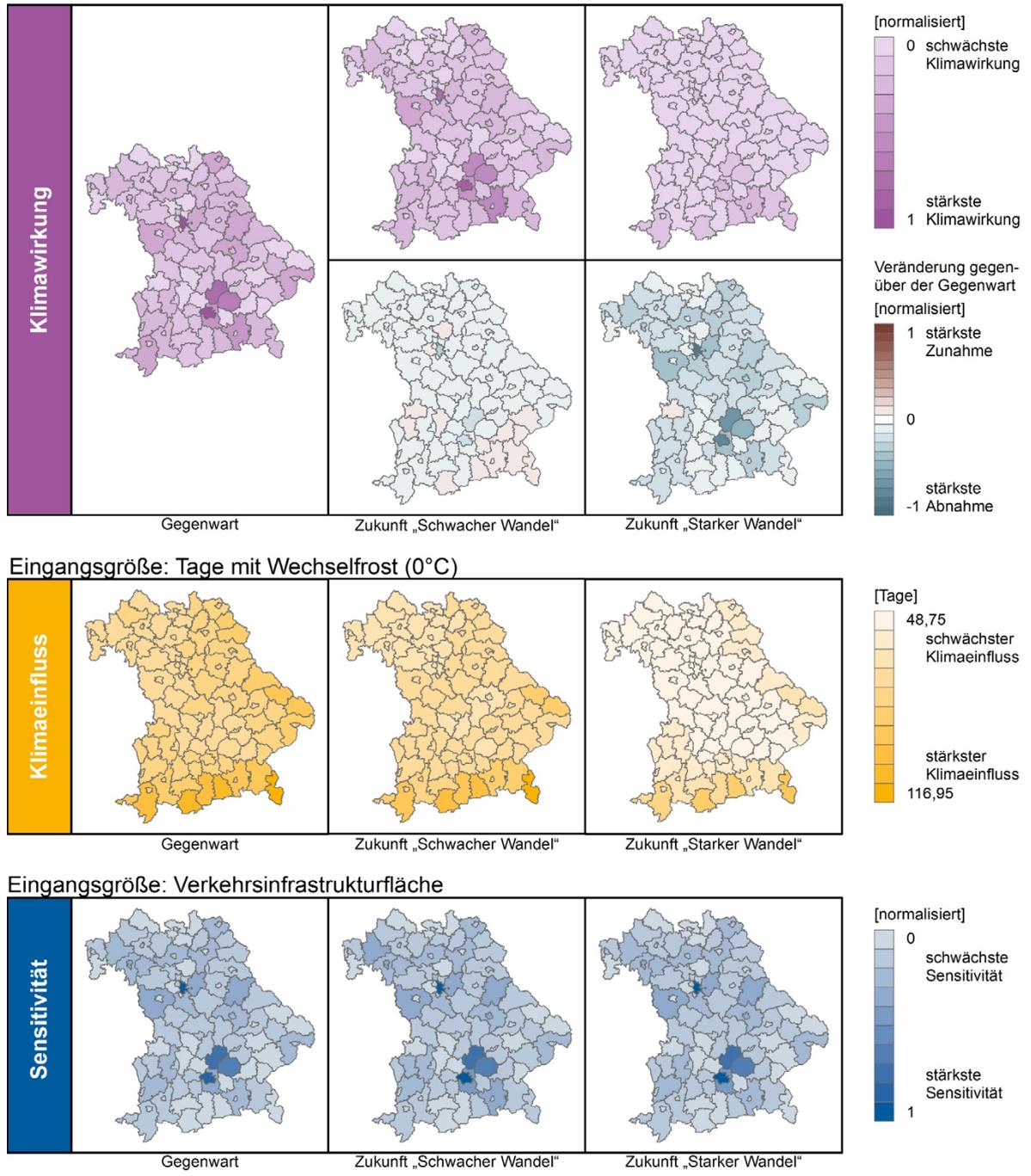


Abb. 48: Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

5.11.3 VE-3-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser

Hintergrund

Für die bayerische Verkehrsinfrastruktur sind insbesondere Stürme, Frost, Hitze und Starkregenereignisse von Bedeutung. Letztere können erhebliche Schäden an den im Überschwemmungsbereichen von Flüssen liegenden Infrastrukturen verursachen, da sich mit der Veränderung von Niederschlagsmustern und der Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen gleichzeitig auch die Hochwassergefahr und somit auch die Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen erhöht (StMUV 2016).

Sind Verkehrsinfrastrukturflächen von Extremwetterereignissen betroffen, dann treten Störungen nicht nur am Einwirkungsort auf, sondern können auch auf andere Teile des Verkehrssystems negativ einwirken. Beeinträchtigen Überschwemmungen beispielsweise den Güterverkehr, so kann die gesamte Prozess- und Logistikkette von der Herstellung bis zur Verteilung über die Transportwege gestört werden (Marscheider et al. 2013). Bei Personentransportsystemen ist die Nutzung und Erreichbarkeit im Ereignisfall gegebenenfalls eingeschränkt (StMUV 2016). Durch Überschwemmungen können jedoch nicht nur kurzfristige, sondern auch permanente Material- und Strukturschäden an der Verkehrsinfrastruktur entstehen. Sie können zu Unter- und Überspülungen von Straßen und Gleisen führen und somit die Stabilität der Straßen, von Böschungen, Bahndämmen, Gleisbetten und anderen baulichen Anlagen beeinträchtigen (Hoffmann et al. 2011; Transportation Research Board and National Research Council).

Neben den klimatischen Einflüssen ist auch die Veränderung der Sensitivität zu berücksichtigen, wie beispielsweise das Wirtschaftswachstum als sozioökonomischer Faktor. In Bayern ist selbst unter Annahme eines moderaten Wirtschaftswachstums davon auszugehen, dass die Verkehrsfläche und -belastung weiter zunehmen werden. Dies trifft jedoch vor allen Dingen auf das übergeordnete Wegebnetz, das heißt Autobahnen und Fernzugverbindungen, zu, während das regionale und lokale Wegebnetz künftig in Regionen mit abnehmender Bevölkerung eine geringere Belastung aufweisen könnte. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind unter anderem die Aufrechterhaltung der Transportwege und der Transportleistung sowie die Gewährleistung der Verkehrssicherheit Ziele der Bayerischen Staatsregierung (StMUV 2016).

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die Potenziale für Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Verkehrsinfrastrukturflächen verschnitten wurden.

Zur Abbildung des Klimaeinflusses wurden die vom LfU bereitgestellten Überschwemmungsflächen der Hochwassergefahrenkarten für HQ₁₀₀ herangezogen. Da zum Zeitpunkt der Bearbeitung für die Zukunft keine Projektionsdaten zur Verfügung standen, wurden die Überschwemmungsflächen (Stand 2016) sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft verwendet. Es wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich Informationen zu Überschwemmungsflächen für Flüsse mit „besonderem Hochwasserrisiko“ in die Berechnung einbezogen. Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wäre die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten auch für zahlreiche weitere Gewässer sowie Abflussmodellierungen auch für die Zukunft wünschenswert. Diese lagen zum Zeitpunkt der Analyse jedoch nicht vor. Bei der Operationalisierung wäre als künftige Verbesserung außerdem das Einbeziehen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sinnvoll.

Die Verkehrsinfrastrukturfläche der Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen wurde – wie auch schon bei der Klimawirkung „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur“ – als Sensitivitätsindikator herangezogen (siehe Kap. 5.11.1 und Klimawirkungskennblatt im Anhang). Dabei floss zwar mithilfe der Verkehrsinfrastrukturflächengröße gewissermaßen eine Gewichtung ein, jedoch wurde eine Priorisierung nach Bedeutsamkeit der Verkehrsinfrastruktur für die Wirtschaft nicht vorgenommen und somit eine systemische Komponente nicht betrachtet.

Das Zusammenführen der Klimaeinfluss- und Sensitivitätsindikatoren erfolgte durch eine geografische Verschneidung der potenziellen Überschwemmungsflächen und der Verkehrsinfrastrukturflächen, auf die eine additive Verknüpfung der normalisierten Werte der absoluten und relativen überschwemmungsgefährdeten Verkehrsfläche an der Kreisfläche folgte.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die Ergebnisse (Abb. 49) zeigen sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft eine vergleichsweise schwach ausgeprägte Klimawirkung in weiten Teilen Bayerns. Lediglich in Unter- und Oberfranken befinden sich einige kreisfreie Städte und Landkreise, die eine vergleichsweise starke Ausprägung der Klimawirkung aufweisen. Es handelt sich hierbei um die Städte Würzburg und Schweinfurt sowie die Kreise Main-Spessart, Haßberge und Lichtenfels, durch die der Main fließt. In Passau und im Landkreis Deggendorf ist die Klimawirkung am stärksten ausgeprägt, das heißt, dass dort vergleichsweise hohe potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser auftreten können. In Deggendorf war zum Zeitpunkt der Datenerhebung der Hochwasserschutz noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichtet.

In den Kreisen und kreisfreien Städten mit einer starken Klimawirkung liegt im Vergleich zu den restlichen bayerischen Kreisen eine hohe Anzahl an überschwemmungsgefährdeten Verkehrsflächen vor. Dies lässt sich aus den Einzelkarten des Klimaeinflusses und der Sensitivität jedoch nicht immer direkt ablesen: Die nördlichen Kreise im Bereich Unterfranken weisen gegenwärtig und künftig eine geringe Sensitivität und einen schwachen Klimaeinfluss auf. Dennoch haben sie durch die geografische Verschneidung des Klimaeinflusses und der Sensitivität eine im Vergleich zu anderen Teilen Bayerns deutlich größere Klimawirkung in Form von überschwemmungsgefährdeter Verkehrsfläche. Für die Kreise mit einer schwachen Klimawirkung heißt das also, dass dort keine oder nur wenige potenzielle Überschwemmungsflächen auf Verkehrsinfrastrukturflächen treffen.

Kernaussage

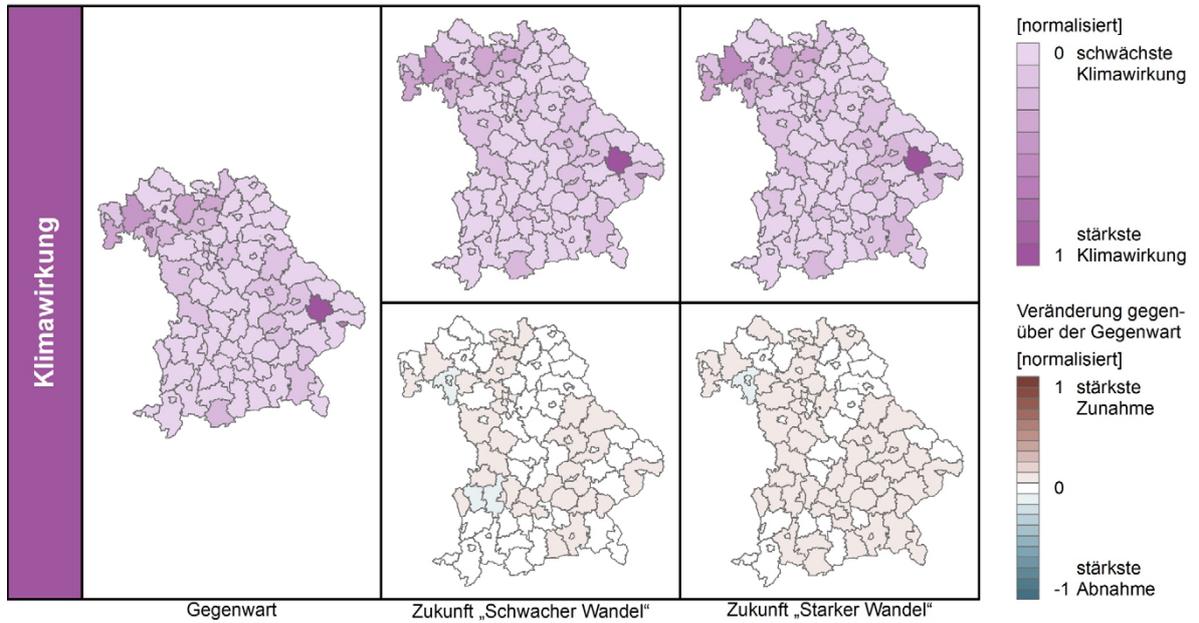
- Überschwemmungen werden durch Hochwasser infolge extremer Witterungsverhältnisse verursacht, deren Häufigkeit und Ausmaß im Zuge des Klimawandels zunehmen wird.
- Für diese Klimawirkung wurden die Überschwemmungsflächen eines HQ₁₀₀ mit den Verkehrsinfrastrukturflächen verschnitten.
- Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem 7. Ausbauplan für Staatstraßen entnommen.
- Bei der Operationalisierung wären als künftige Verbesserungen das Einbeziehen von Abflussmodellierungen für die Zukunft wichtig, sowie die Berücksichtigung von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sinnvoll. Zusätzlich könnte eine Gewichtung anhand der Bedeutsamkeit der Verkehrsinfrastruktur für die Wirtschaft vorgenommen werden.
- Die kreisfreie Stadt Passau sowie der Landkreis Deggendorf zeigen im Vergleich zu den restlichen bayerischen Landkreisen die stärkste Klimawirkung, da hier vergleichsweise viele Infrastrukturflächen auf potenzielle Überschwemmungsflächen treffen. Aber das heißt nicht per se, dass hier die schlimmsten Hochwasserereignisse auftreten.

Karten

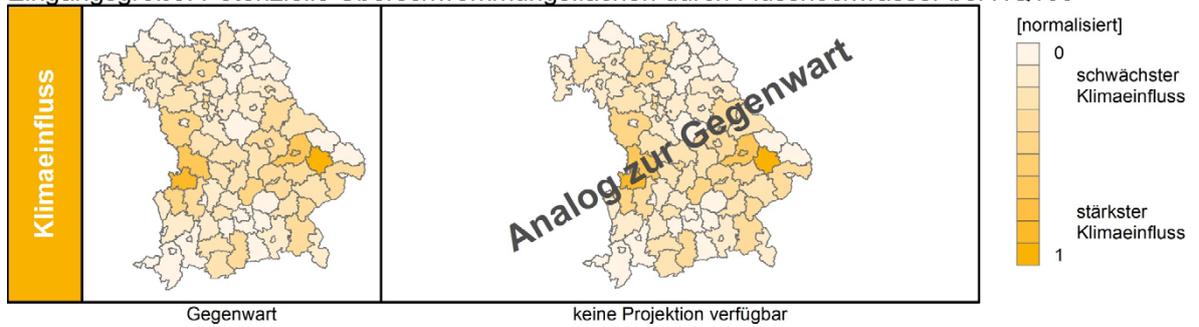
Arbeitsstand: 03.11.2017

Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt VE-3-2017



Eingangsgröße: Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100



Eingangsgröße: Verkehrsinfrastrukturfläche

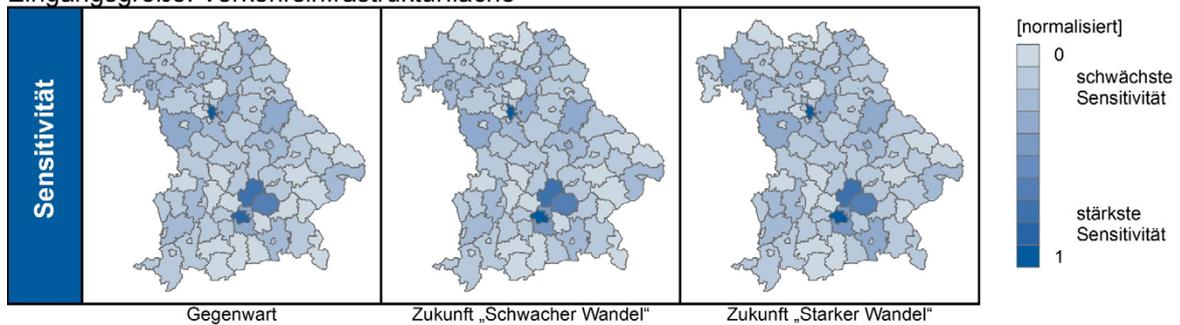


Abb. 49: Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser

5.11.4 VE-4-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten

Hintergrund

Mit der Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen nimmt auch die Gefahr von Aquaplaning, Überschwemmungen, Hochwasser, Erdbeben und Felsstürzen zu, die erhebliche Auswirkungen auf den Straßen- und Schienenverkehr haben können (StMUV 2016)(StMUV 2015). Überschwemmungen und Unterspülungen infolge von Sturzfluten können zu erheblichen Schäden nicht nur der Straßeninfrastruktur, sondern auch zu Schäden an Schienen- und Flugverkehrsinfrastruktur führen.

Die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ untersuchte den Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“, dessen deutschlandweite Bedeutung für die Gegenwart bereits als mittel, für die Zukunft bei einem starken Wandel als hoch eingeschätzt wurde (Buth et al. 2015). Schwerpunkte in der bundesweiten Studie finden sich insbesondere im Süden und Südwesten Deutschlands, aber auch in Teilen Mitteldeutschlands, die aufgrund ihres Gefälles ein hohes Sturzflutpotenzial aufweisen. Gemäß der UBA-Studie (Buth et al. 2015) zeigen sich für Bayern deutliche Sturzflutschadenspotenziale an der Verkehrsinfrastruktur gegenwärtig insbesondere in den Verdichtungsräumen und Landkreisen mit hoher Verkehrsflächendichte und zugleich hoher Reliefenergie am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim). Für die Zukunft könnte es bei Überflutungen und Unterspülungen von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturzfluten bei beiden Szenarien zu einer Intensivierung des Sturzflutschadenspotenzials und somit der Klimawirkung insbesondere am Alpenrand kommen.

Umsetzung

Die Klimawirkung beschreibt die Potenziale für Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Verbindung mit einer starken Geländeneigung.

Die Berechnung des Sturzflutpotenzials berücksichtigt die Anzahl der Starkregentage ($> 25 \text{ mm d}^{-1}$) sowie die Geländesteigung und wird in Kapitel 5.5.2 ausführlich erklärt. Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage ist mit einer hohen Unsicherheit der Aussagefähigkeit verbunden. Ursache sind die geringe zeitliche (Messungen) und räumliche Auflösung (Messstationen) der Niederschlagsdaten. Für die Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung. Als Sensitivität wurde die Verkehrsinfrastrukturfläche abgebildet, die sich aus der Landverkehrsinfrastrukturfläche (Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnbetriebsflächen) sowie der Luftverkehrsinfrastrukturfläche (Flughäfen für zivile Nutzung mit regionaler oder internationaler Bedeutung) zusammensetzt. Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur wurden Informationen aus dem Bundesverkehrswegeplan und dem 7. Ausbauplan für Staatsstraßen entnommen. (siehe Kap. 5.11.1 und Klimawirkungskennblatt im Anhang). Die Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert) erfolgte multiplikativ mit anschließender Normalisierung.

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Für die Gegenwart ergeben sich die am stärksten ausgeprägten Betroffenheiten bei der Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“ in den am Alpenrand liegenden Landkreisen Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land (Abb. 50). Die Karte des Klimaeinflusses zeigt, dass dies auch die Kreise sind, in denen das Sturzflutpotenzial in Bayern deutlich höher ist als in anderen Kreisen. Als Kreise mit der höchsten Sensitivität, also mit den meisten Verkehrsinfrastrukturflächen, treten neben der Landeshauptstadt München sowie der Stadt Nürnberg die Landkreise Erding und Freising hervor, letztere aufgrund der Flugverkehrsflächen des Flughafens

München. Weitere Kreise mit höherer Sensitivität bestehen insbesondere im Umland der kreisfreien Städte wie z. B. der Landkreise Ansbach, Augsburg oder Nürnberger Land, aber auch Schwandorf.

In der Zukunft wird eine Zunahme der Starkregenereignisse und somit eine Erhöhung des Sturzflutpotenzials für das Szenario des starken Wandels erwartet. Beim Szenario des schwachen Wandels ergibt sich für einige Landkreise keine Veränderung bei den Klimawirkungen. In den Landkreisen Oberallgäu, Unterallgäu, Amberg-Sulzbach und Neustadt an der Waldnaab ergibt sich rechnerisch eine Abnahme der Klimawirkungen. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die bei den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen jedoch nicht abgebildet werden. Beim stärkeren Wandel hingegen ist in ganz Bayern von einer Verstärkung der Klimawirkungen auszugehen, wobei diese am Alpenrand am stärksten zunehmen.

Die räumlichen Muster werden sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen die Kreise am Alpenrand besonders hervortreten.

Kernaussage

- Sturzfluten können durch Überflutungen und Unterspülungen die Verkehrsinfrastruktur schädigen und somit zu Unterbrechungen beim Personen- und Güterverkehr führen.
- Zur Berechnung der Klimawirkung wurden als Eingangsdaten für den Klimaeinfluss die Sturzflutpotenziale auf Kreisebene verwendet, die sich aus der Anzahl der Starkregentage und der Reliefenergie zusammensetzen. Für die Abschätzung der Sensitivität wurde die Verkehrsinfrastrukturfläche der Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen herangezogen. Die Klimawirkung ergibt sich aus der Verknüpfung des Sturzflutpotenzials pro Kreis mit der Verkehrsinfrastrukturfläche auf Kreisebene.
- Die Verwendung der Anzahl der Starkregentage schränkt die Aussagefähigkeit stark ein. In Zukunft verspricht die Verwendung von Niederschlagsdaten aus Radarmessungen des DWD aufgrund ihrer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung hier eine wesentliche Verbesserung.
- Für die Gegenwart ist die Klimawirkung in den am Alpenrand liegenden Landkreisen am höchsten, wobei besonders die Landkreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land hervortreten. Für die Zukunft des starken Wandels zeigen diese Landkreise eine weitere Zunahme der Klimawirkung. Beim schwachen Wandel hingegen fällt bei einigen Kreisen die Klimawirkung geringer aus, was mit der leichten Abnahme des Sturzflutpotenzials zu erklären ist.
- Die räumlichen Muster bei Klimaeinfluss und Klimawirkung werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu den Mittelgebirgen deutlich hervor.

Karten

Arbeitsstand: 03.11.2017

Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten

Datenquelle und Erläuterungen: Klimawirkung-Kennblatt VE-4-2017

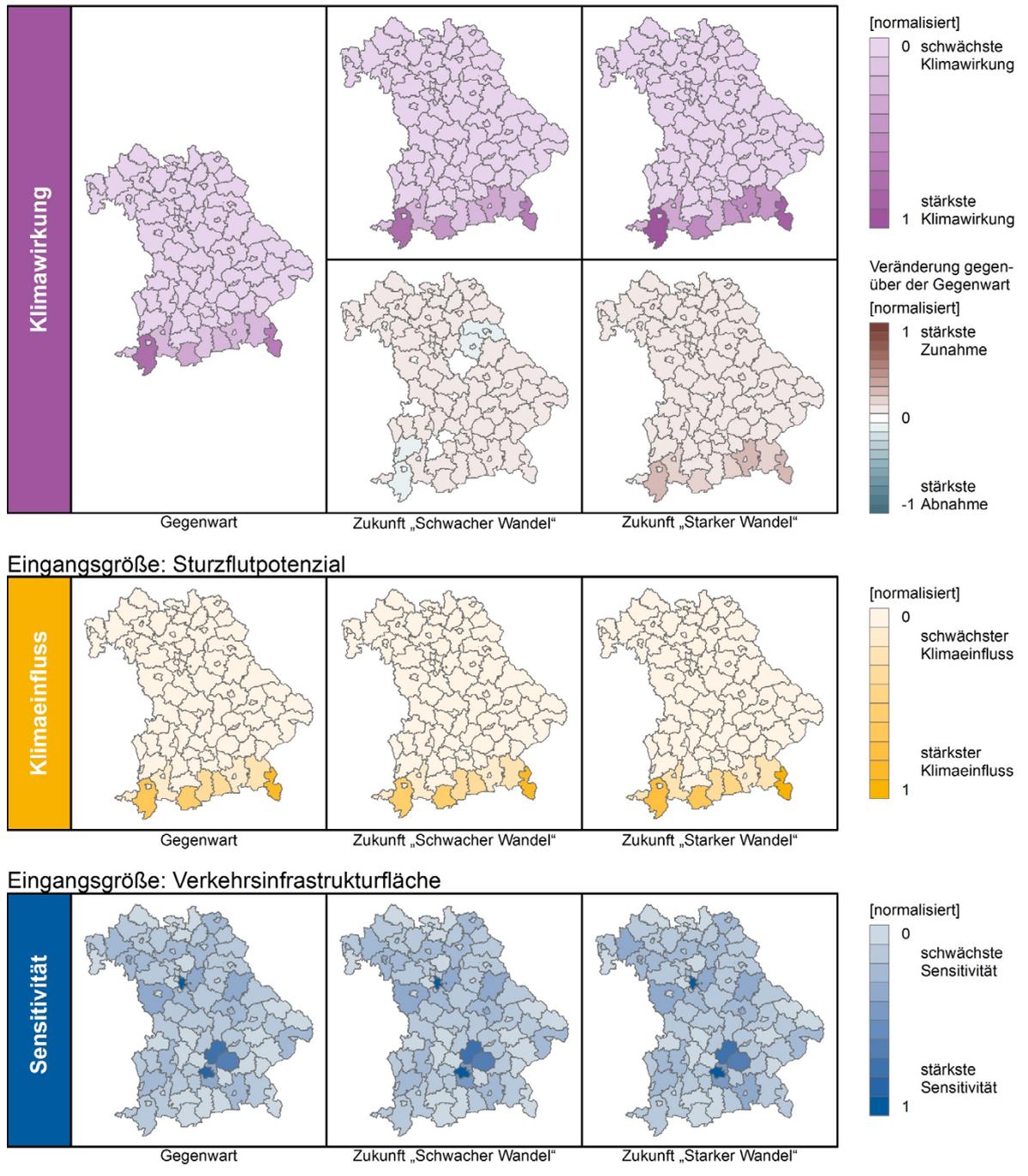


Abb. 50: Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten

6 Raumtypen der Klimawirkungen in Bayern

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse der Berechnungen von Klimawirkungen in Bayern beschrieben. Für jede Klimawirkung ergibt sich – aus den Klimawirkungskarten ersichtlich – ein räumliches Muster. Es wird deutlich, welche Landkreise und kreisfreien Städte Bayerns in Bezug auf die jeweilige Klimawirkung vergleichsweise stärker oder weniger stark betroffen sind. Zugleich lässt sich auch die Veränderung der Klimawirkung von der Gegenwart zur Zukunft aus den Karten ablesen. Gleichwohl repräsentieren die Karten immer nur jeweils eine Klimawirkung. Ein Ziel der Pilotstudie war es darüber hinaus, auch das gemeinsame Auftreten verschiedener Klimawirkungen in den Kreisen zu thematisieren und somit Raumtypen von Klimawirkungen in Bayern zu identifizieren. Dazu sollten auf Basis der vorliegenden quantitativen Analysedaten Räume, das heißt Kreise, innerhalb Bayerns identifiziert werden, die sich hinsichtlich der Merkmalsausprägungen ihrer Klimawirkungen ähneln.

Zu diesem Zweck wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, die dazu dient, anhand der Eingabedaten (hier: Klimawirkungen auf Kreisebene) in sich möglichst homogene Gruppen zu bilden, die sich untereinander möglichst deutlich unterscheiden. In Bezug auf die untersuchten Klimawirkungen in Bayern konnten auf diese Weise Regionen beziehungsweise Räume unterschiedlicher klimatischer Wirkungsmuster, sogenannte „Raumtypen der Klimawirkungen“ (alternativ: „Klimawirkungsraumtypen“), ermittelt werden.

6.1 Methodik zur Ermittlung der Raumtypen

Allgemein handelt es sich bei Clusteranalysen um Verfahren zur Einteilung von Objekten in Gruppen möglichst gleichartiger Merkmalsausprägungen. Diese sollen in sich möglichst homogen und untereinander möglichst unterschiedlich bezüglich der jeweiligen Merkmalsausprägungen sein. Im Ergebnis entstehen sogenannte „Cluster“, die gelegentlich auch als Klassen oder Typen bezeichnet werden. Daher sind neben dem Begriff der Clusterung auch die Begriffe Klassifikation oder Typologie üblich. Erläuterungen zur grundsätzlichen Funktion und zu den Anwendungsgebieten von Clusteranalysen finden sich in beispielsweise in Wilks (2009).

Eingangsdaten der Clusteranalyse

In der vorliegenden Pilotstudie wurden die Klimawirkungen für die Gegenwart mit Ausnahme der Regenerosivität geclustert. Von einer Clusterung der Klimawirkungen für die Zukunft wurde abgesehen. Es gingen alle 26 Klimawirkungen in die Clusteranalyse ein. Aus methodischen Gründen wurde die Clusterung mit den über alle drei Zeitschnitte normalisierten Daten durchgeführt. Eine Betrachtung ausschließlich auf die Gegenwart bezogener Daten könnte in Teilen abweichende Ergebnisse liefern.

Bei Clusteranalysen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die einzubeziehenden Variablen zunächst zu sondieren und z. B. mittels einer Korrelationsanalyse, identische oder sehr ähnliche Variablen auszuscheiden, um die Dominanz einzelner Phänomene zu vermeiden. Dieser Schritt wurde in dieser Clusteranalyse bewusst nicht durchgeführt, da dieses Vorgehen im Grunde einer Priorisierung einzelner Klimawirkungen gleichkommen würde. Die Ergebnisse der Clusteranalyse hätten dann nur noch eine Teilmenge der Klimawirkungen zur Charakterisierung der Regionstypen dargestellt. Ohnehin ist an dieser Stelle anzumerken, dass eine solche Typisierung nur die zur Verfügung stehenden Variablen in Betracht ziehen und insofern grundsätzlich keinen allumfassenden Anspruch haben kann, wie es z. B. die Bezeichnung ‚Klimawandelregionstypen‘ suggerieren mag.

Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse zwischen allen in die Clusteranalyse eingegangenen Variablen (hier Klimawirkungen für die Gegenwart; die Kürzel entsprechen den Bezeichnungen für die Klimawirkungen in den Klimawirkungskarten und Kennblättern).

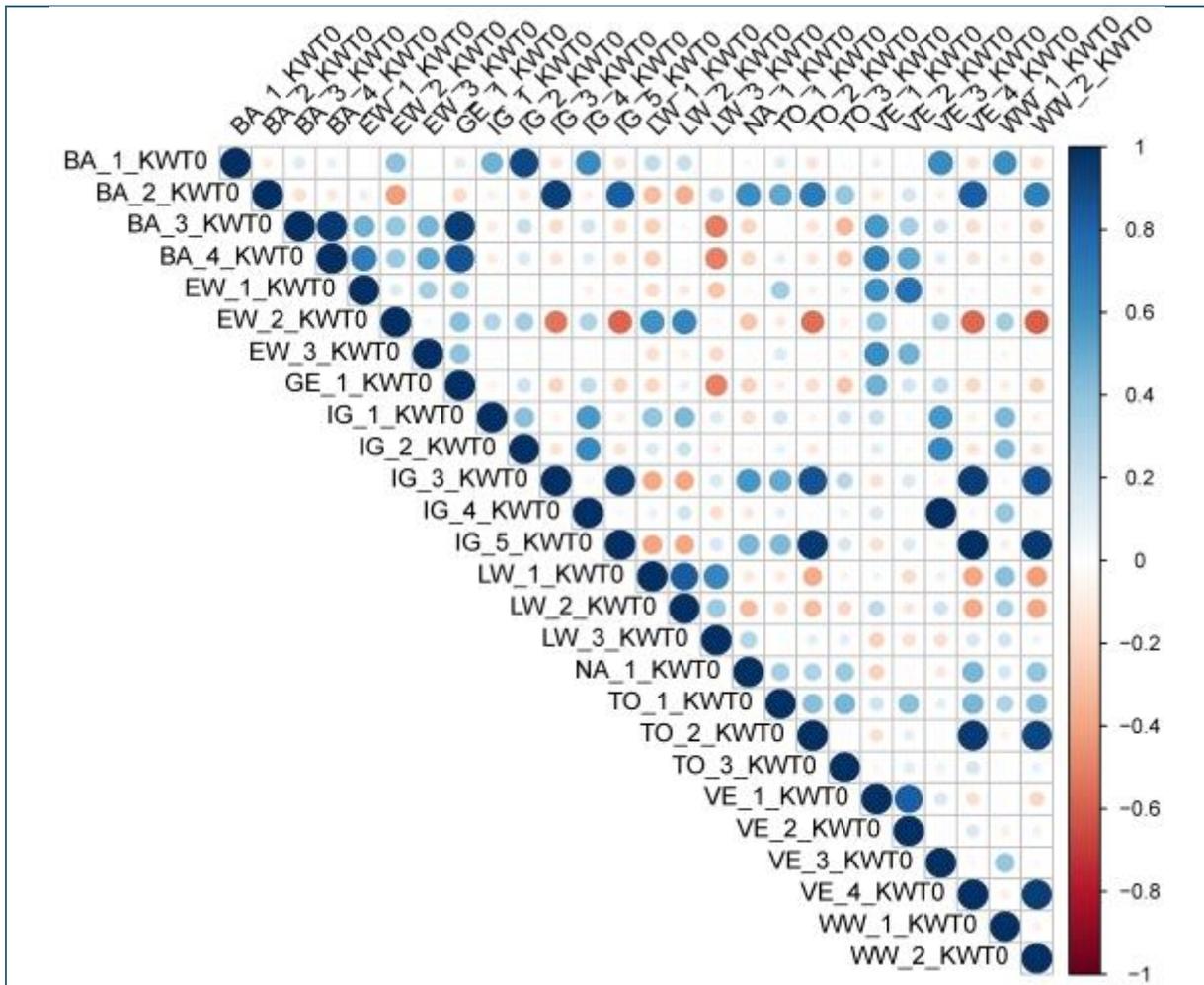


Abb. 51: Korrelationsanalyse der Eingangsdaten für die Clusteranalyse. Je größer das Punktsymbol, desto stärker ist die Korrelation. Blaue Symbole zeigen positive Korrelationen, rote Symbole zeigen hingegen negative Korrelationen an.

Stärkere Korrelationen treten überall dort auf, wo gleiche oder ähnliche Eingangsdaten die Sensitivität und/oder den Klimaeinfluss bestimmen, wie beispielsweise zwischen den Klimawirkungen der Handlungsfelder Bauen, Industrie und Gewerbe, Tourismus sowie Straßenbau und Verkehr, in denen jeweils die Klimaeinflüsse Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100 und Sturzflutpotenzial eine bedeutende Rolle spielen.

Clustering mittels k-Means

Die Clusteranalyse wurde mithilfe des k-Means-Verfahrens durchgeführt, welches zur Gruppe der partitionierenden Verfahren zählt. Die Analyse erfolgte auf Grundlage der ermittelten Klimawirkungswerte auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte. Dieses Verfahren ist besonders für größere Datensätze gut geeignet und relativ effizient in der Anwendung. Dabei werden Gruppen ohne den vorangehenden Aggregierungsprozess sogenannter hierarchisch-agglomerativer Verfahren konstruiert. Es wird dazu ein globales Maß der Binnenheterogenität der Gruppen definiert, welches in der Folge in einem iterativen Prozess algorithmisch minimiert beziehungsweise optimiert wird. Die Anzahl der zu bildenden Cluster wird bei diesem Verfahren modellextern vorgegeben (Kaufmann & Pape 1984).

Der eigentliche Cluster-Prozess erfolgt iterativ. Zunächst wird durch den Algorithmus eine Startgruppierung in Form zufällig gewählter Clusterzentren mit vorgegebener Anzahl festgelegt. Dann werden die zu clusternden Objekte auf Basis einer Distanzfunktion dem jeweils nächsten Clusterzentrum zugeordnet. Auf dieser Grundlage werden die Clusterzentren aufgrund der zuvor vorgenommenen Zuordnung neu berechnet. Solange sich dabei mindestens ein Clusterzentrum verschiebt, startet anschließend die Zuordnung der Objekte erneut, bis in diesem Sinne ein Optimum, oder aber eine extern vorgegebene maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist (iterative Optimierung). Da hierbei nicht unbedingt eine optimale Lösung hinsichtlich aller möglichen Gruppierungen gefunden wird, sondern oftmals nur lokale Optima, ist dieses Verfahren durch eine gewisse Ergebnisvarianz, vor allem abhängig von der Ausgangsgruppierung, gekennzeichnet. Dem kann grundsätzlich durch wiederholte Durchläufe mit jeweils unterschiedlichen Ausgangsgruppierungen begegnet werden (Monte-Carlo-Studie). Das häufigste Ergebnis kann dann als Clusterlösung betrachtet werden.

6.2 Durchführung der Clusteranalyse

Für die hier durchgeführte Clusteranalyse wurde in der Statistiksoftware R, in der standardmäßig der Algorithmus nach Hartigan & Wong (1979) zur Anwendung kommt, jede potenziell sinnvolle Lösungsvariante (zwei bis neun Cluster) jeweils 100-mal mittels k-Means durchlaufen. Im Anschluss wurden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität und Aussagekraft geprüft. Dabei wurden einerseits quantitative Maße (unter anderem Eindeutigkeit der Lösung mit Blick auf ihr Vorkommen im Vergleich zur Anzahl alternativer Lösungen) berücksichtigt, aber auch Aspekte inhaltlicher Interpretierbarkeit (Bestätigt die Clusterlösung theoretische Vorüberlegungen beziehungsweise lassen sich diese plausibel erklären?). Dazu wurden alle Lösungen jeweils in Karten und Diagrammen dargestellt und ausgewertet und im Projektteam diskutiert.

Da die Anzahl der Cluster dem Algorithmus vorzugeben ist, wurden zunächst alle potenziell sinnvollen Clusterlösungen (Clusteranzahl zwei bis neun) berechnet. Die folgende Abbildung (Abb. 52) zeigt eine kurze kartografische Übersicht über alle ermittelten Clusterlösungen (zwei bis neun Cluster), aus denen die drei detaillierter beschriebenen Varianten mit vier, sechs und acht Clustern zur näheren Betrachtung ausgewählt wurden.

Pro Lösung (Anzahl Cluster) lief der k-Means-Algorithmus jeweils 100-mal, anschließend erfolgte die Auswahl der häufigsten Lösung anhand der Clustermittelwerte. Die jeweils häufigste, zweit- und dritthäufigste Clusterlösung ist in Tab. 7 für jede Clustervariante dargestellt. Dabei zeigt sich insbesondere für die Variante mit vier Clustern eine im Vergleich zu den zweit- und dritthäufigsten Ergebnissen hohe Zahl an Ergebnissen für die beste Lösung (23:9:8).

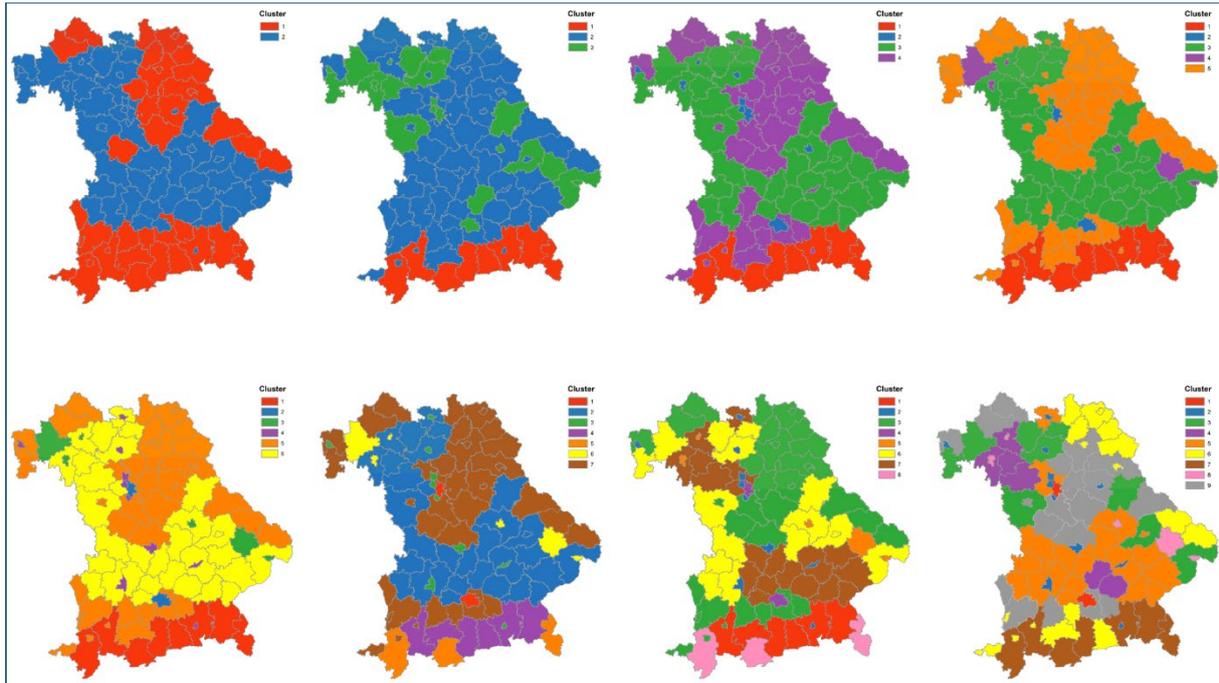


Abb. 52: Clusterung der Klimawirkungen für Bayern; Varianten „2-9 Cluster“, Darstellung der mittels k-Means ermittelten Clusterlösungen

Schließlich erfolgte die grafische und kartografische Darstellung und Bewertung der jeweils besten Clusterlösungen für die untersuchten Clusterzahlen sowie ein visueller Vergleich zur Identifikation der plausibelsten Lösung. Im Ergebnis haben sich in der Abschätzung durch das Projektteam die Varianten mit vier, sechs und acht Clustern als am plausibelsten erwiesen. Als Plausibilitätskriterien wurden hier Vorerfahrungen aus früheren Arbeiten mit geeigneten Anzahlen von Clustern (Buth et al. 2015; Regionale Planungsgemeinschaft Südwestthüringen 2016) sowie die Kenntnis räumlicher Muster aus den Klimaeinfluss- und Sensitivitätskarten sowie Expertenwissen zur Topographie, Siedlungsstruktur und weiteren raumbezogenen Informationen herangezogen.

Tab. 7: Häufigkeit Clusterlösungen für jede Clustervariante (jeweils in 100 Modellläufen)

Clustervariante	Anzahl häufigste Lösung	Anzahl zweithäufigste Lösung	Anzahl dritthäufigste Lösung
2-Cluster Lösung	26	20	19
3-Cluster Lösung	39	9	6
4-Cluster Lösung	23	9	8
5-Cluster Lösung	20	17	13
6-Cluster Lösung	20	16	12
7-Cluster Lösung	10	8	8
8-Cluster Lösung	9	7	7
9-Cluster Lösung	10	8	8

6.3 Ergebnisse Clusteranalyse Klimawirkungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Clusterung für die Varianten mit vier, sechs und acht Clustern näher vorgestellt. Hier werden zum einen die sich ähnelnden Räume kartografisch dargestellt und in den zugehörigen Diagrammen, wie stark die Klimawirkung in dem jeweiligen Cluster im Verhältnis vertreten ist. Bezüglich der Anzahl der Cluster kann es grundsätzlich keine „richtige“ Lösung geben, da die Auswahl der Clusteranzahl auf Grundlage plausibler Muster erfolgt und sich nach der Fragestellung und dem Anwendungsfall richten muss.

In der Variante mit vier Clustern (Abb. 53) trennen sich deutlich der Alpenrand (rot), die Verdichtungsräume (blau) sowie eher tiefer liegende, ländliche Bereiche im Umfeld größerer Flüsse mit großem Anteil landwirtschaftlicher Fläche (grün) ab. In Abb. 54 wird für jedes Cluster dargestellt, wie stark die in die Clusteranalyse eingegangenen Klimawirkungen im jeweiligen Cluster vertreten sind. Auf diese Weise lassen sich die Cluster hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägungen charakterisieren:

- Cluster 1 (rot): Die roten Bereiche am Alpenrand treten durch das hohe Sturzflutpotenzial und die damit verbundenen Klimawirkungen in den verschiedenen Handlungsfeldern hervor. Weiterhin sind in diesem Bereich Schäden durch Wechselfrost im Bereich Landwirtschaft und Verkehr besonders hoch.
- Cluster 2 (blau): Die blauen Bereiche finden sich in den Verdichtungsräumen wieder. Sie sind von besonders hohen Sensitivitäten im Bereich Verkehr, Industrie und Gewerbe geprägt und weisen einen erhöhten Kühlenergiebedarf auf.
- Cluster 3 (grün): Das grüne Cluster zeichnet sich durch den Einfluss von Wechselfrosttagen in der Landwirtschaft und eine höhere Gefahr durch Flusshochwasser, sofern die Kreise an entsprechenden Flüssen liegen, aus.
- Cluster 4 (violett): Der große violette Bereich zeigt mittelgebirgsartige, insbesondere durch Wald geprägte Regionen mit relativ unspezifischen Ausprägungen der im Rahmen der Analyse berechneten Klimawirkungen. Klimawirkungen aus dem Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft hätten in diesen (violetten) Bereichen vermutlich deutliche Ausprägungen, sofern man diese im Rahmen der Studie berechnet hätte.

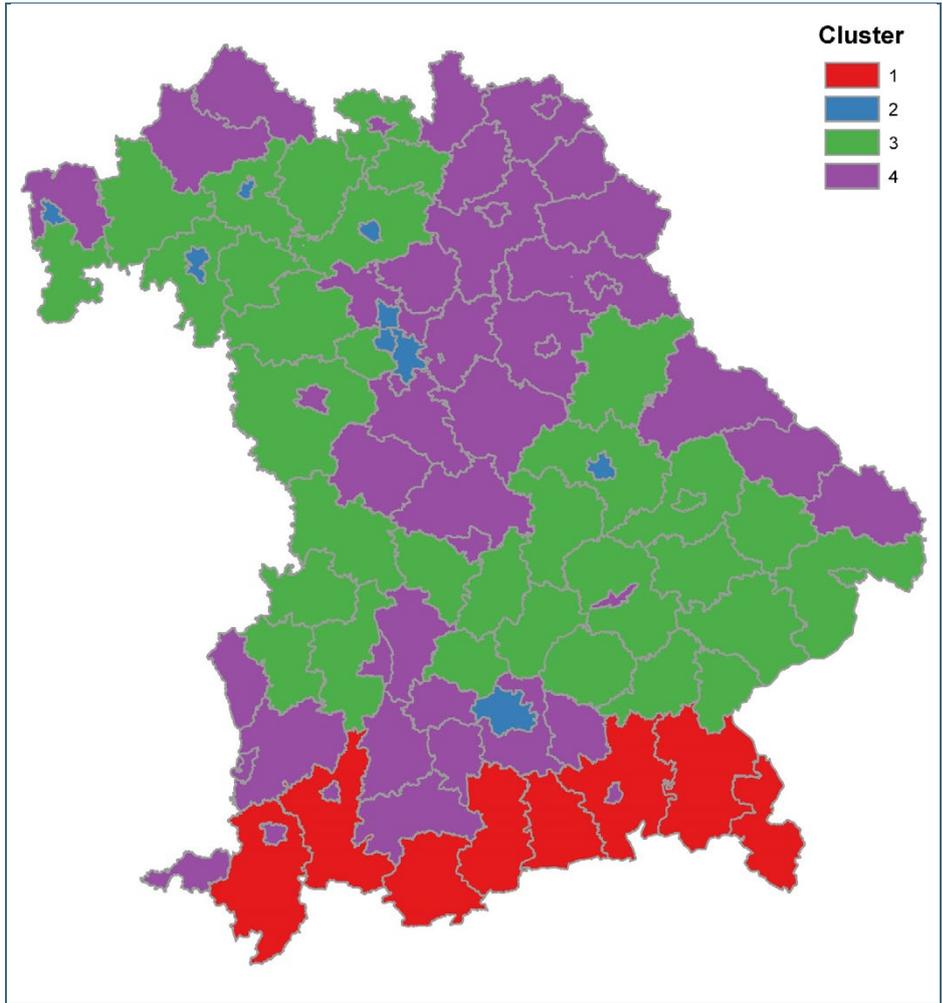


Abb. 53: Clustering der Klimawirkungen für Bayern; Variante „4 Cluster“

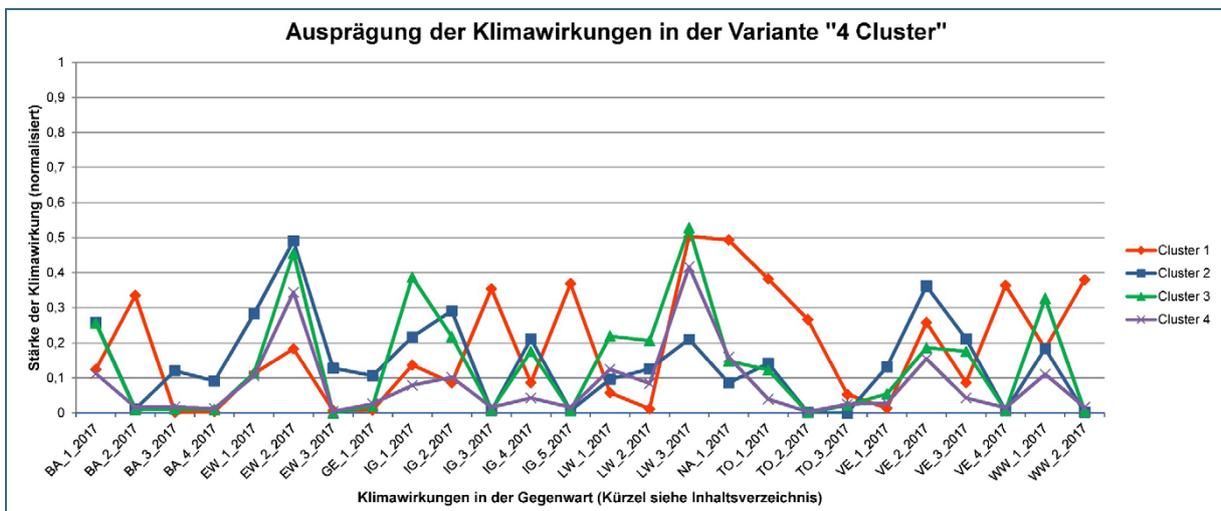


Abb. 54: Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „4 Cluster“

In der Variante mit sechs Clustern (Abb. 55 und Abb. 56) trennen sich im Vergleich zur Vier-Cluster-Variante zusätzlich noch die stärker von Hochwasser betroffenen Kreise Main-Spessart und Deggen-dorf sowie verschiedene kreisfreie Städte ab (grün). Besonders auffällig ist weiterhin, dass die blauen

Cluster, das heißt die Verdichtungsräume Nürnberg und München eher wenige, dafür sehr ausgeprägte Klimawirkungen aufweisen. Des Weiteren wird auch eine Differenzierung zwischen den größeren (blau) und kleineren kreisfreien Städten (violett) deutlich.

- Cluster 1 (rot): Die roten Bereiche am Alpenrand treten durch das hohe Sturzflutpotenzial, das wiederum vor allem durch die Starkregentage geprägt ist und durch die entsprechenden Klimawirkungen in verschiedenen Handlungsfeldern hervor. Weiterhin sind in diesem Bereich Schäden durch Wechselfrost im Bereich Landwirtschaft und Verkehr besonders hoch.
- Cluster 2 (blau): Die blauen Bereiche finden sich in den Verdichtungsräumen wieder. Sie sind von besonders hohen Sensitivitäten im Bereich Verkehr, Industrie- und Gewerbe geprägt und weisen einen erhöhten Kühlenergiebedarf auf. Hier sind vor allem die Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Wechselfrost aufgrund der hohen Sensitivität erwähnenswert.
- Cluster 3 (grün): Dieses Cluster wird von Kreisen, die in den Handlungsfeldern Bauen, Industrie und Gewerbe sowie Straßenbau und Verkehr stark von Überschwemmungen betroffen sind, geprägt. Ausschlaggebend sind beim Main-Spessart-Kreis die durch die Mainschleife bedingten relativ großen Überschwemmungsbereiche, im Landkreis Deggendorf ein zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichteter Hochwasserschutz sowie in den kreisfreien Städten die bestehenden hohen Schadenspotenziale gegenüber Überschwemmungen.
- Cluster 4 (violett): Kreisfreie Städte am Übergangsbereich von Verdichtungsräumen zum Umland mit verschiedenen Klimawirkungen, insbesondere aber auch einer Betroffenheit gegenüber hochwasserbezogenen Klimawirkungen.
- Cluster 5 (orange): Der große orange Bereich zeigt mittelgebirgsartige, insbesondere durch Wald geprägte Regionen mit relativ unspezifischen Ausprägungen der im Rahmen der Analyse berechneten Klimawirkungen. Klimawirkungen aus dem Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft hätten – sofern sie im Rahmen der Pilotstudie berechnet worden wären – in diesen (orange) Bereichen vermutlich deutliche Ausprägungen.
- Cluster 6 (gelb): Das gelbe Cluster zeichnet sich durch Klimawirkungen im Zusammenhang mit Wechselfrost in der Landwirtschaft und eine höhere Überschwemmungsgefahr durch Flusshochwasser, sofern die Kreise an entsprechenden Flüssen liegen, aus.

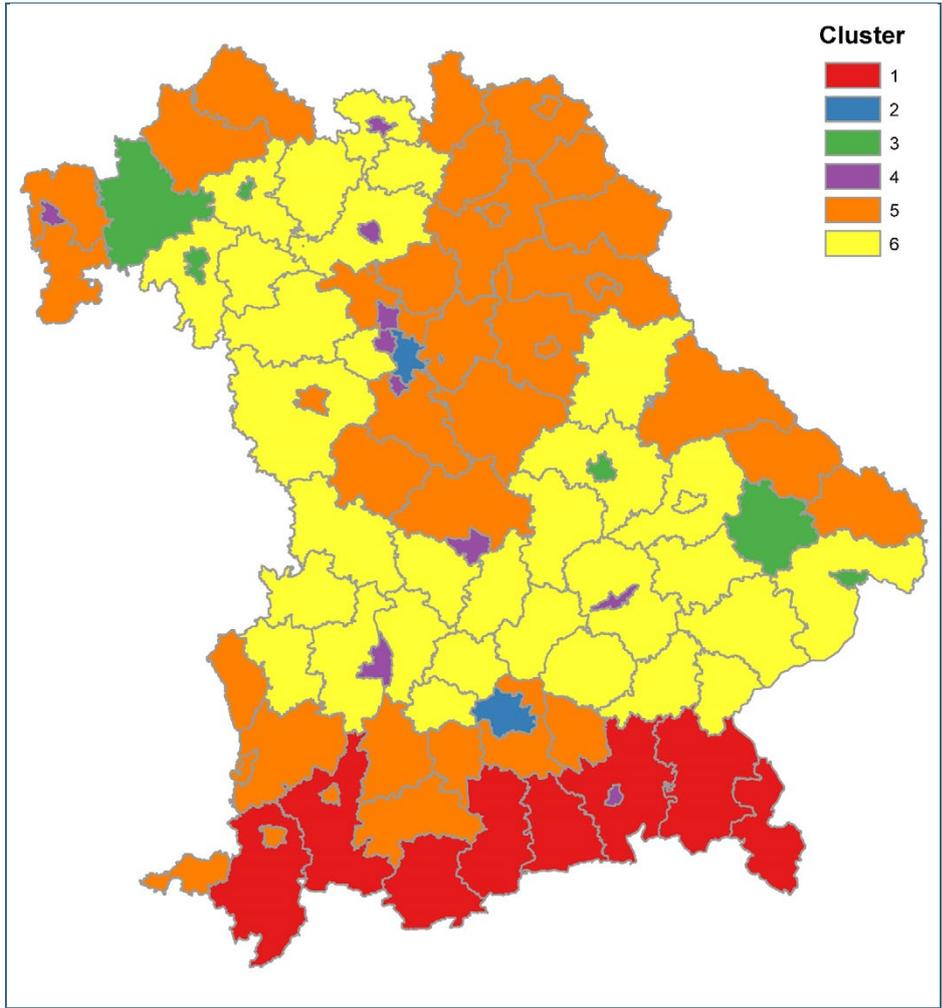


Abb. 55: Clustering der Klimawirkungen für Bayern; Variante „6 Cluster“

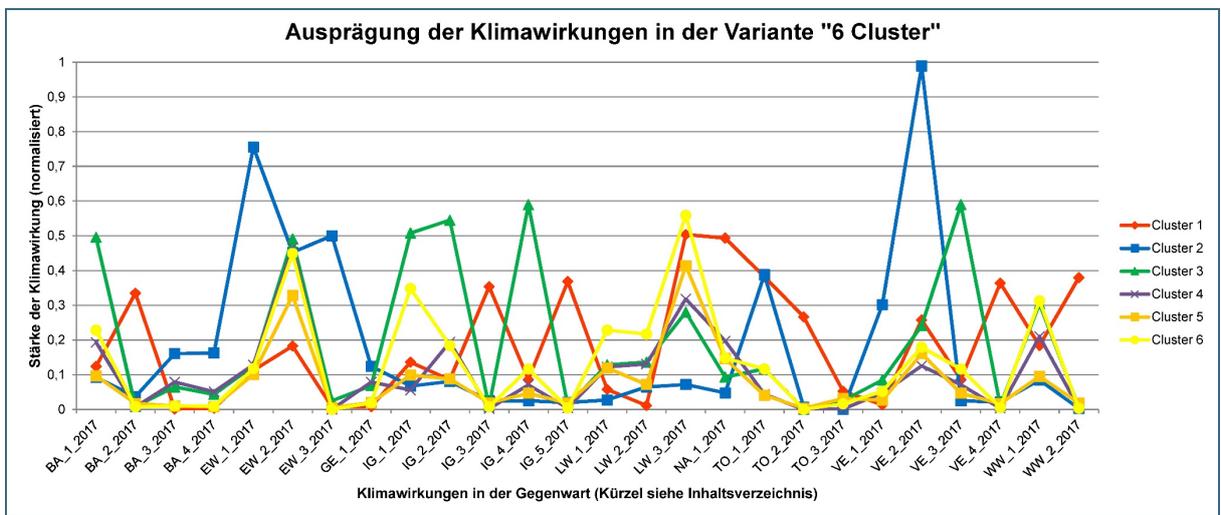


Abb. 56: Merkmalsausprägung der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „6 Cluster“

In der Variante mit acht Clustern (Abb. 57 und Abb. 58) tritt im Vergleich zur Sechs-Cluster-Variante im Alpenraum eine Differenzierung der dortigen Cluster auf (rote und rosa Cluster). Auch der gelbe,

durch Flusshochwasser geprägte und der braune landwirtschaftlich geprägte Cluster stellen eine Differenzierung im Vergleich zur 6-Cluster-Variante dar.

- Cluster 1 (rot): Auch hier tritt der Alpenrand durch das hohe Sturzflutpotenzial und die damit verbundenen Klimawirkungen hervor. Weiterhin sind in diesem Bereich Schäden durch Wechselfrost im Bereich Landwirtschaft und Verkehr besonders hoch.
- Cluster 2 (blau): Kreisfreie Städte am Übergangsbereich von Verdichtungsräumen zum Umland mit verschiedenen Klimawirkungen, insbesondere aber auch einer Betroffenheit gegenüber Klimawirkungen im Zusammenhang mit Flussüberschwemmungen.
- Cluster 3 (grün): Der grüne Bereich zeigt mittelgebirgsartige, insbesondere durch Wald geprägte Regionen mit relativ unspezifischen Ausprägungen der im Rahmen der Analyse berechneten Klimawirkungen, wobei die landwirtschaftlichen Schäden durch Wechselfrost sowie der Kühlenergiebedarf hervortreten. Sofern Klimawirkungen aus dem Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft im Rahmen der Studie berechnet worden wären, hätten diese in den grünen Bereichen vermutlich deutliche Ausprägungen.
- Cluster 4 (violett): Die violetten Bereiche finden sich in den Verdichtungsräumen wieder. Sie sind von besonders hohen Sensitivitäten im Bereich Verkehr, Industrie- und Gewerbe geprägt und weisen einen erhöhten Kühlenergiebedarf auf. Hier sind vor allem die Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Wechselfrost aufgrund der hohen Sensitivität erwähnenswert.
- Cluster 5 (orange): Dieses Cluster umfasst den Landkreis Deggendorf sowie einige kreisfreie Städte, die in den Handlungsfeldern Bauen, Industrie und Gewerbe sowie Straßenbau und Verkehr stark von Hochwasser betroffen sind. Ausschlaggebend für die deutliche Ausprägung im Landkreis Deggendorf ist ein zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch nicht auf ein 100-jährliches Hochwasserereignis ausgerichteter Hochwasserschutz sowie bei den kreisfreien Städten das hohe Schadenspotenzial in der Nähe von Flüssen.
- Cluster 6 (gelb): Das gelbe Cluster zeichnet sich durch hohe potenzielle Wechselfrostschäden in der Landwirtschaft und eine höhere Gefahr durch Flusshochwasser, sofern die Kreise an entsprechenden Flüssen liegen, aus.
- Cluster 7 (braun): Das braune Cluster repräsentiert naturräumlich die Mainfränkischen Platten sowie das Unterbayerische Hügelland und die Isar-Inn-Schotterplatten. Hier sind sehr unterschiedliche Klimawirkungen prägend, wie die Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsgebieten, der potenzielle Kühlenergiebedarf sowie alle landwirtschaftsbezogenen Klimawirkungen, wobei hier die potenziellen Schäden durch Wechselfrost hervortreten.
- Cluster 8 (rosa): Die drei zum rosa Cluster gehörenden Landkreise Oberallgäu, Garmisch-Partenkirchen und Berchtesgadener Land sowie die Stadt Kempten treten durch ein ausgeprägtes Sturzflutpotenzial, das wiederum vor allem durch die Starkregentage geprägt ist und die entsprechenden Wirkungen auf die verschiedenen Handlungsfelder entfaltet, hervor. Im Gegensatz zum roten Cluster treten die sturzflutbezogenen und tourismusbezogenen Klimawirkungen deutlich stärker und die Schäden durch Wechselfrost im Bereich Landwirtschaft sowie die Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit geringer auf.

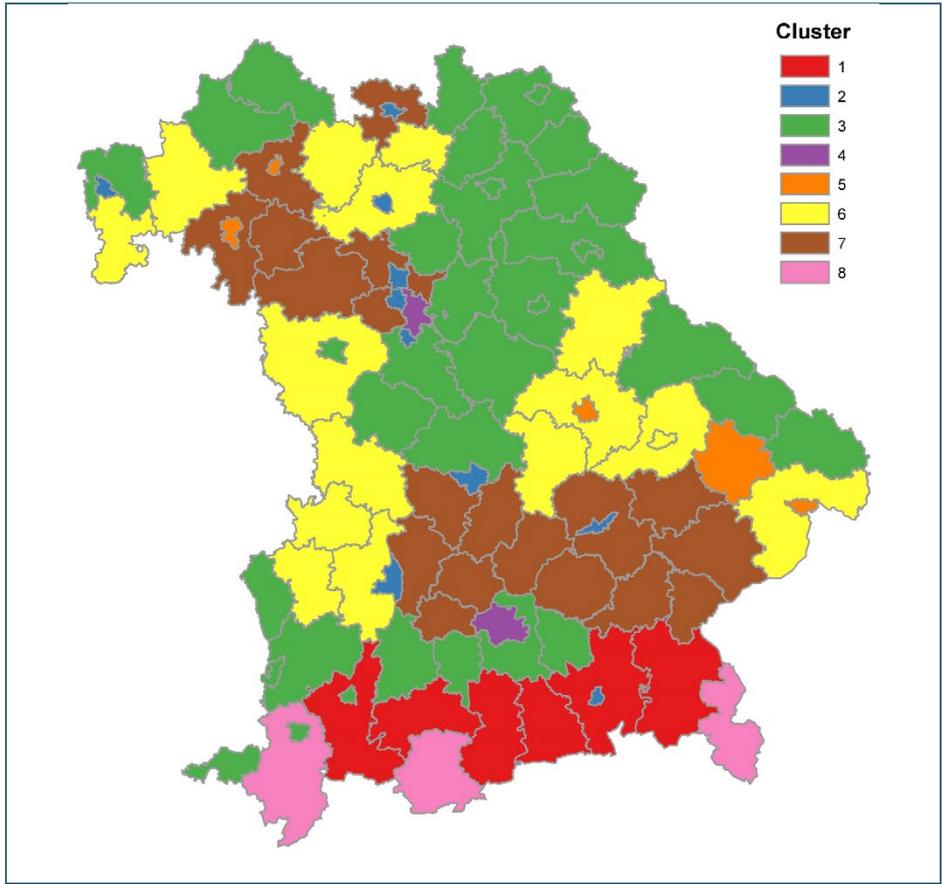


Abb. 57: Clustering der Klimawirkungen für Bayern; Variante „8 Cluster“

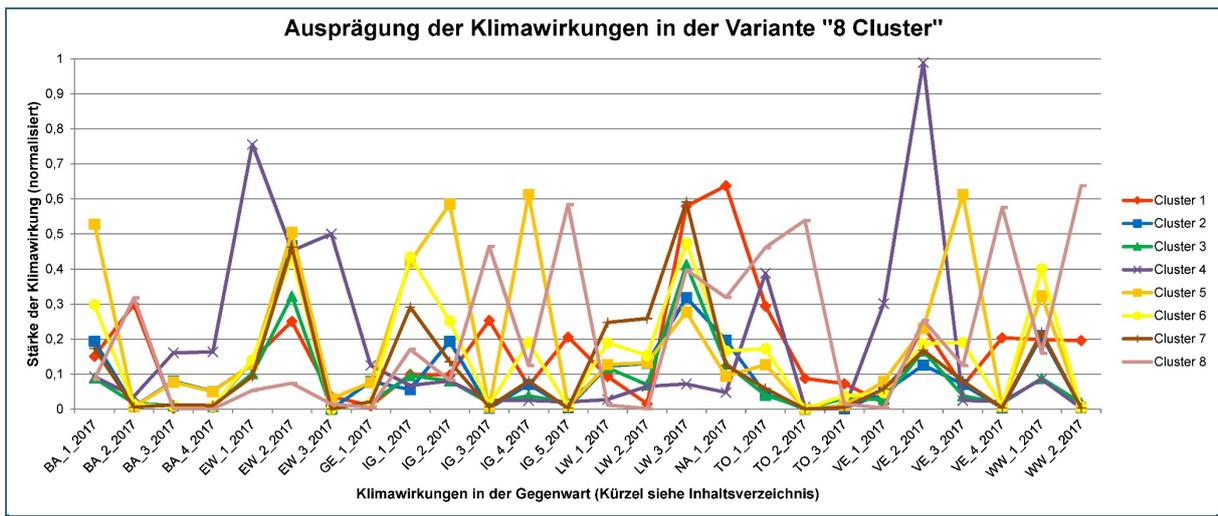


Abb. 58: Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Bayern; Variante „8 Cluster“

Die im Rahmen der Clusteranalyse identifizierten Raumtypen ergeben plausible Ergebnisse, welche die bestehenden naturräumlichen und siedlungsstrukturellen Muster abbilden. Die verschieden farblich gekennzeichneten Landkreise und kreisfreien Städte stellen Ähnlichkeitsmuster dominanter Klimawirkungen dar. Es muss jedoch nicht bedeuten, dass in einem Kreis oder einer Gemeinde diese Betroffenheiten ausschließlich oder andere Betroffenheiten gar nicht vorherrschen.

Die Ermittlung von Raumtypen der Klimawirkungen kann beispielsweise dazu dienen, eine Orientierungshilfe bei der Abgrenzung von Kooperationsräumen oder Fördergebietskulissen zu bieten. Innerhalb bereits bestehender Kooperationsräume (z. B. Flussgebietseinheiten, Regierungsbezirke oder Regionale Planungsverbände) können die Raumtypen für die Definition und Fokussierung von jeweils prioritären Themen verwendet werden. Auf diese Weise können beispielsweise auf die einzelnen Raumtypen zugeschnittene Maßnahmenpakete entwickelt und von den dem jeweiligen Raumtyp zugehörigen Kreisen aufgegriffen und umgesetzt werden.

6.4 Anwendungsbeispiele und weiterführende methodische Überlegungen zur Clusterung von Klimaeinfluss- und Klimawirkungsdaten

Der in diesem Pilotprojekt vorgestellte Ansatz der Bestimmung von Klimawirkungsraumtypen unter Einsatz einer Clusteranalyse stellt für Bayern einen ersten Versuch dar, in Bezug auf Klimawirkungen sich ähnelnde Teilregionen voneinander abzugrenzen. Eine Erweiterung des Ansatzes, der dann auch zu anderen Ergebnissen führen würde, wäre beispielsweise über die Hinzunahme weiterer Klimawirkungen, die getrennte Clusterung der Eingangsdaten (Klimaeinfluss, Sensitivität) oder eine Clusterung der Veränderungsdaten möglich. Darüber hinaus würde auch die Clusterung eines Satzes ausgewählter Klimawirkungen klimabezogene Raumtypen erzeugen. Dies könnten beispielsweise für einzelne Handlungsfelder repräsentative Klimawirkungen und/oder Klimawirkungen sein, die für Bayern insgesamt von hoher Bedeutung sind oder aber solche, die eine geringe Korrelation mit anderen Klimawirkungen aufweisen. In jedem Fall übertragen sich Ungenauigkeiten in der Ermittlung der Klimawirkungen (bzw. Klimaeinfluss, Sensitivität) wie sie beispielsweise bei einer proxybasierten Operationalisierung entstehen, auch auf die Clusterung.

Anwendungsbeispiele zur Clusterung von Klimaeinfluss- und Klimawirkungsdaten

Für den Einsatz von Clusteranalysen zur statistischen und auch räumlichen Aggregation von Daten zum Klima beziehungsweise zum Klimawandel lassen sich in der Literatur verschiedene Anwendungsbeispiele finden. In der Regel handelt es sich um einzelne Ansätze, in denen eine Clusteranalyse als methodischer Ansatz zur Identifikation von Ähnlichkeitsmustern ausgewählt wurde. Die bestehenden Studien und Arbeiten clustern in der Regel Klimaeinflussdaten auf Rasterzellenbasis. Dabei wird in den meisten Fällen, wie auch in dem hier vorgestellten Methodenansatz, das k-Means-Verfahren zur Clusterung herangezogen. Dabei ist regelmäßig die entscheidende Frage, welche (dem Verfahren vorzugebende) Clusteranzahl (k), das beste beziehungsweise sinnvollste Ergebnis liefert. Von der Clusterung auf Rasterzellenbasis sind jene Anwendungsbeispiele zu unterscheiden, die auf verschiedenen räumlichen Ebenen (Gemeinde, Kreis, Region) aggregierte Ausprägungen clustern.

Eine erste Arbeit zur raumbezogenen Clusterung von Klimaausprägungen und Klimaänderungen setzte sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in Spanien auseinander (Iglesias et al. 2000). Auf Grundlage der Clusterung von Temperatur- und Niederschlagsdaten von 392 meteorologischen Stationen konnten sieben agro-klimatische Regionen auf Grundlage einer k-Means-basierten Clusteranalyse identifiziert werden, in denen unterschiedliche, für den Weizenanbau relevante Merkmalskombinationen der klimatischen Ausprägungen vorherrschend sind (Iglesias et al. 2000).

Im Aufsatz von Coelho et al. (2008) liegt der Fokus auf der Clusterung des zeitlich eng beieinanderliegenden Auftretens von klimatisch bedingten Extremereignissen mit der zentralen Frage, wie sich Temperaturextreme im zeitlichen Verlauf an bestimmten Orten clustern. Durchgeführt wurde diese zeitlich bezogene Clusterung („temporal clustering“) anhand von monatlichen Durchschnittswerten der Sommertemperaturen der Nordhalbkugel im Zeitraum 1870 bis 2005 (Coelho et al. 2008). Auch wenn hier die Clusterung von klimabezogenen Daten im Vordergrund stand, sind die Fragestellung und Er-

gebnisse aufgrund der Betrachtung nur eines Eingangsparameters und der zeitbezogenen Clusterung nur bedingt mit der Bildung von Raumtypen, wie beispielsweise in der vorliegenden Pilotstudie, vergleichbar.

Mahlstein & Knutti (2010) gehen der Frage nach dem Umgang mit dem Klimawandel durch eine regionalisierte und aggregierte Darstellung von Klimadaten und deren Änderung nach. Ziel der Studie war es, mittels einer Clusteranalyse (k-Means-Verfahren) im globalen Maßstab Regionen zu identifizieren, die ähnliche klimatische Ausprägungen und ähnliche projizierte Veränderungen aufweisen. Diskutiert werden Lösungen zwischen 20 und 35 Clustern. Das auf diese Weise erzeugte Bild der räumlichen Verteilung von Klimaänderungen bietet eine Grundlage für die Formulierung geeigneter Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen (Mahlstein & Knutti 2010).

Ziel der Arbeit von Carvalho et al. (2016) war es, für Europa Regionen mit ähnlichen langfristigen Klimaänderungen zu identifizieren. Eingangsdaten waren die täglichen Niederschlagssummen sowie Minimum- und Maximumtemperaturen für das rezente Klima (1986–2005) sowie für die ferne Zukunft (2081–2100). Auch hier wurde das k-Means-Verfahren für die Clusterung verwendet, die zunächst für jede einzelne Variable (univariate Version) und schließlich für alle drei Variablen (multivariate Version) durchgeführt wurde. Als optimale Anzahl wurde mittels eines mathematischen Ansatzes die Sechs-Cluster-Lösung ermittelt. Dabei erstrecken sich zwei Cluster auf den ozeanischen Bereich Europas und vier Cluster auf den europäischen Festlandsbereich. Anschließend wurden die Ergebnisse mit einem Sensitivitätstest auf ihre Konsistenz hin getestet (Carvalho et al. 2016).

Im Projekt „Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies“ wurde eine indikatorenbasierte Klimawirkungsanalyse auf Ebene der europäischen NUTS3-Regionen durchgeführt. Im Anschluss daran wurde mittels einer Clusteranalyse eine sogenannte „Typology of climate change regions“ erarbeitet. In dieser Studie wurden Regionen mit sich ähnelnden Klimaveränderungen identifiziert, das heißt es wurden die auf Regionesebene aggregierten Klimaänderungen geclustert. Im Ergebnis wurden fünf Klimawandelregionen voneinander abgegrenzt (ESPON 2011).

Im Rahmen der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Buth et al. 2015) wurde eine Clusteranalyse der rasterzellenbasierten Klimaeinflussdaten für die Gegenwart, die nahe, sowie die ferne Zukunft durchgeführt. Eingangsdaten waren hier Starkwind, Starkregen, Heiße Tage, Tropennächte, Frosttage, Durchschnittstemperatur (Winter), Durchschnittstemperatur (Sommer), Trockentage (Winter), Trockentage (Sommer), Niederschlag (Jahreszeitmittel Winter) sowie Niederschlag (Jahreszeitmittel Sommer). Im Ergebnis wurden die sechs Klimaraumtypen hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägungen und raum-zeitlichen Veränderungen beschrieben und vor dem Hintergrund anderer Raummuster (Demographie, Siedlungsstruktur) interpretiert (Buth et al. 2015).

In der Klimawirkungsstudie zur „Raumentwicklungsstrategie Klimawandel“ für die Regionale Planungsgemeinschaft Südwestthüringen (Regionale Planungsgemeinschaft Südwestthüringen 2016) wurde im Anschluss an die Klimawirkungsanalyse eine Clusteranalyse durchgeführt, mit der drei klimasensitive Raumtypen ermittelt wurden. Geclustert wurden hier 15 auf Gemeindeebene aggregierte Klimawirkungen („Betroffenheitsmerkmale“) für den Projektionszeitraum 2011 bis 2040. Die Darstellung erfolgte auf Ebene der 162 Gemeinden innerhalb der Planungsregion. Die drei Raumtypen wurden hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägungen charakterisiert und mit Maßnahmenpaketen zur Anpassung an den Klimawandel verknüpft (Regionale Planungsgemeinschaft Südwestthüringen 2016).

Die hier genannten Arbeiten deuten allesamt auf das Erfordernis hin, aus den komplexen und vielschichtigen Ergebnissen von Studien zum Klima beziehungsweise Klimawandel zusammenfassende raumbezogene Aussagen und Anhaltspunkte zu Klimafolgen zu erhalten, welche letztlich vor allem

auch für Anpassungsaktivitäten von hohem Wert sind, letztlich also Raumbilder und Typologien, die den Klimawandel in seiner Gesamtheit greifbar machen.

Anwendungsbeispiel und methodische Überlegungen des Deutschen Wetterdiensts zur Clusterung von Klimaeinfluss- und Klimawirkungsdaten

Auch der Deutsche Wetterdienst hat sich in der Vergangenheit bereits mit der Clusterung von Klimadaten befasst, so unter anderem im Rahmen der Studie „Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit“ (Deutschländer & Dalelane 2012). Im Abschlussbericht wird beschrieben, wie mithilfe einer Clusteranalyse Regionen in Deutschland bestimmt werden können, die bis 2100 Ähnlichkeiten hinsichtlich der Überschreitungshäufigkeit verschiedener meteorologischer Parameter aufweisen. Dabei wurde der Bereich der 99er-Quantile (Extremwerte) verschiedener Klimasimulationen betrachtet. Verwendet wurde das k-Means-Verfahren, verbunden mit der methodenbedingten Frage nach der optimalen Wahl der Clusteranzahl (k). Dazu stellen die Autoren fest, dass es durch die schrittweise Erhöhung der Anzahl der Cluster zu einer zunehmenden räumlichen Zergliederung des Gesamtbilds sowie zu einer Verringerung der Trennschärfe zwischen den Ausprägungen der einzelnen Raumtypen kommt. Dies zeigt sich auch daran, dass ab einer Zahl von fünf Klassen die Unterschiede zwischen den mittleren zeitlichen Verläufen der einzelnen Cluster abnehmen (Deutschländer & Dalelane 2012). Auch hier wird der Lösungsansatz in wiederholten Clusterexperimenten mit unterschiedlicher Clusteranzahl und unterschiedlichen Startpartitionen gesucht. Im Ergebnis wird das Verfahren als solches bestätigt. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass die Ergebnisse in einigen Fällen klimatologisch nicht vollständig zu deuten sind. So sind die sich ergebenden räumlichen Strukturen zwar statistisch gesehen von hoher Qualität, aufgrund der starken räumlichen Zergliederung jedoch wenig anwenderfreundlich. Als Alternative wird eine naturräumlich basierte Ergebnisdarstellung präsentiert, die sich an den Regionen orientiert, die im Rahmen der Erstellung der sogenannten Testreferenzjahre verwendet wurden (Deutschländer & Dalelane 2012; BBR & DWD 2014).

Im Artikel „A robust estimator for the intensity of the Poisson point process of extreme weather events“ beschreiben (Dalelane & Deutschländer 2013)) neben der Anwendung von stochastischen Verfahren zur Beschreibung seltener Extremereignisse (Poisson-Punktprozess, Kerndichteschätzung) unter dem Stichwort der räumlichen Aggregation („spatial aggregation“) auch die Ermittlung von Klimaregionen für Deutschland. Mittels Kernel-Schätzung werden zunächst die Intensitäten der Poisson-Punkt-Prozesse ermittelt, ein Vorgehen, das in der Klimatologie bislang kaum Anwendung gefunden hat. Anschließend werden mittels Clusteranalyse Regionen gebildet, die Ähnlichkeiten hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Überschreitung der Extrema (90er-, 95er- bzw. 99er-Quantile) aufweisen. Zum Einsatz kommt dabei das k-Means-Verfahren, ergänzt um andere Ansätze, wie zum Beispiel den CATS-Algorithmus (Clustering after Transformation and Smoothing). Im Ergebnis werden verschiedene Clustervarianten (Zwei- bis Fünfer-Lösung) vorgestellt und diskutiert. Grundsätzlich wird die angewendete Methodik bestätigt. Ein unbefriedigendes Ergebnis stellt allerdings die räumliche Streuung von Clustermitgliedern insbesondere bei der niederschlagsbezogenen Clusterbildung dar. Zur Vermeidung eines derartig zersplitterten räumlichen Musters wird von den Autoren als Alternative zur k-Means-basierten Clusterung vorgeschlagen, die räumliche Aggregation über ein sogenanntes Fuzzy-Clustering zu optimieren. Dem Prinzip der unscharfen Mengen (Fuzzylogik) folgend stellt ein derartiger Cluster-Algorithmus eine Erweiterung des k-Means-Verfahrens dar, da jedes Objekt in Folge der Optimierungsschritte nicht immer eindeutig einem Clusterzentrum zugeordnet wird. Vielmehr wird bei einem fuzzy-basierten Ansatz für jedes Objekt mittels einer Gewichtung angegeben, wie stark die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Cluster ist. Im Gegensatz zur vorgenannten Methode erlaubt das Fuzzy Clustering sanfte Übergänge zwischen Clustern und ermöglicht somit eine potenziell elegantere räumliche Zuordnung (Dalelane & Deutschländer 2013). Beschreibungen derartiger Algorithmen, die jedoch in der Klimaforschung noch nicht systematisch eingesetzt werden, finden sich beispielsweise

bei Bezdek (1981, Fuzzy C-Means Algorithmus) oder Liu & George (2003, Unsupervised Fuzzy K-Means Clustering).

Zusammenfassende methodische Vorschläge für die Verbesserung der Clusterung

Zusammenfassend lassen sich als methodische Vorschläge für die Verbesserung der Clusterung die folgenden Punkte nennen:

- Ausweitung der Clusterung auf verschiedene Aspekte von Klima- bzw. klimawirkungsbezogenen Daten (Klimaeinfluss, Sensitivität, Veränderungsraten)
- Konzentration der Clusterung auf eine repräsentative oder relevante Auswahl einzelner Parameter (insbesondere Klimawirkungen)
- Konzentration der Clusterung auf statistisch voneinander möglichst unabhängige Parameter, die wenig miteinander korrelieren
- Erweiterung des k-Means-Verfahrens, um die aus der Vorgabe der Clusteranzahl entstehenden Nachteile zu vermeiden, z. B. mittels fuzzy-basierten Algorithmen
- Ergebnisdarstellung bei rasterzellenbasierten Clusterungen zur Erhöhung der Anwenderfreundlichkeit auf Basis bereits bestehender räumlicher Unterteilungen vornehmen (z. B. naturräumlich basierte Ergebnisdarstellung).

7 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Schlussfolgerungen erfolgt zunächst eine zusammenfassende Betrachtung der wesentlichen Ergebnisse, gefolgt von einer Reflexion zu den verwendeten Daten sowie methodischen Ansätzen.

7.1 Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse

Die Analyse in dieser Pilotstudie ermöglicht für die betrachteten Handlungsfelder ein nach Landkreisen und kreisfreien Städten in Bayern differenziertes räumliches und zeitliches Bild der Klimawirkungen. Durch die Darstellung der Eingangsgrößen des Klimaeinflusses und der Sensitivität wird deutlich, dass Klimawirkungen nicht alleine durch das sich verändernde Klima beeinflusst werden, sondern auch von dynamischen Veränderungen aufseiten der Sensitivität, die in einigen Teilräumen Bayerns besonders ausgeprägt sind. Diese können für die Klimawirkungen in seltenen Fällen prägender sein, als der Klimaeinfluss selbst.

7.1.1 Zentrale Klimaeinflüsse

Zentrale für die Klimawirkungen verwendete Klimaeinflüsse sind Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags. Einen Schwerpunkt bilden vor allem temperatur- und niederschlagsbezogene Extremereignisse wie Hitze oder Trockenheit, Flusshochwasser oder Sturzfluten. Einige Klimaeinflüsse wie z. B. Starkwind wurden nicht betrachtet, da die Datenbasis als nicht belastbar oder methodisch als unsicher eingeschätzt wurde. Es muss daher betont werden, dass nicht alle denkbaren Klimaeinflüsse betrachtet wurden. Zudem tauchen einzelne Klimaeinflüsse wie z. B. Hochwasser oder Sturzfluten in der Analyse häufiger auf. Die Klimaeinflüsse sind also in das durch die Klimawirkungskarten erzeugte Gesamtbild nicht gleichmäßig eingeflossen.

Die Muster der Klimaeinflüsse ähneln sich für die Gegenwart und die Zukunft. In der Zukunft sind sie vielfach deutlich verstärkt, in einigen Fällen erstrecken sich die in der Gegenwart punktuell auftretenden höchsten klimatischen Einflüsse flächendeckend auf große Bereiche Bayerns oder gar auf ganz Bayern. Einige Klimaeinflüsse sind sehr stark an regionale/naturräumliche Gegebenheiten gebunden und prägen dann auch sehr stark die Klimawirkungen, z. B. die mit Sturzfluten in Verbindung stehenden Klimawirkungen am Alpenrand.

Betrachtet man die Muster der klimatischen Einflüsse in den Karten in Kapitel 3, so werden hier naturräumliche und siedlungsstrukturelle Einflussfaktoren deutlich. Unterfranken ist stark von Klimaeinflüssen mit höheren Temperaturen und geringeren Niederschlägen geprägt, bei gleichzeitigem Auftreten von Hochwasser. Die Mittelgebirge, insbesondere die Schwäbisch-Fränkische Alb, sind in den westexponierten Lagen von zunehmenden Winterniederschlägen und Starkregenereignissen betroffen. Der Alpenrand zeichnet sich deutlich durch insgesamt kühlere Temperaturen, mehr Starkregenereignisse und insgesamt höhere Niederschläge deutlich ab. Aber auch die Verdichtungsräume treten bei einzelnen Klimaeinflusskarten deutlich hervor, wie z. B. München in Bezug auf die Anzahl der Tropennächte.

7.1.2 Zentrale Sensitivitäten

Wesentliche Sensitivitätsdaten, die in die Berechnung der Klimawirkungen eingeflossen sind, umfassen siedlungsbezogene Größen wie Bevölkerung, Siedlungsflächen oder Verkehrsinfrastrukturflächen. Darüber hinaus wurden aber auch handlungsfeldspezifische Sensitivitäten zur Landwirtschaft oder zum Tourismus als Eingangsdaten für die Berechnung der Klimawirkungen verwendet.

Die Muster der Sensitivitäten in den Karten in Kapitel 4 zeigen insbesondere die siedlungsstrukturellen Einflussfaktoren deutlich auf. Besonders treten daher die Verdichtungsräume mit ihrer hohen Sied-

lungs- und Infrastrukturdichte hervor. Dies sind in erster Linie Ballungsgebiete wie die Region München und Nürnberg, aber auch kleinere kreisfreie Städte. Die Dynamik der räumlichen beziehungsweise siedlungsstrukturellen Entwicklung ist besonders in Oberbayern stark ausgeprägt, wo neben deutlichen Bevölkerungszuwächsen auch ein intensives Siedlungsflächenwachstum projiziert wird. Dagegen ist in weiten Teilen Unter- und Oberfrankens, im Oberpfälzer und Bayerischen Wald von Bevölkerungsverlusten auszugehen und demzufolge von einem geringeren Siedlungsflächenwachstum. Die landwirtschaftsbezogene Sensitivität konzentriert sich vor allem in den ländlichen Bereichen des Voralpenrandes sowie in Mittel- und Unterfranken, in denen intensive Landwirtschaft betrieben wird. Darüber hinaus existieren sehr spezifische Sensitivitäten (Kraftwerke, Kläranlagen), die keinem bestimmten räumlichen Muster folgen.

7.1.3 Zentrale Klimawirkungen und handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte

Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse zeigen einige handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte. Betroffenheiten durch die ansteigende Hitzebelastung in Verdichtungsräumen spielen im Handlungsfeld Bauen mit der potenziellen Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln und in hitzeempfindlichen Einrichtungen, im Handlungsfeld Menschliche Gesundheit durch die potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre sowie im Handlungsfeld Straßenbau und Verkehr bezüglich der potenziellen hitzebedingten Schäden an Verkehrsinfrastruktur eine Rolle.

Auch die Klimawirkungen mit Bezug zu Flusshochwasser nehmen einen breiten Raum in verschiedenen Handlungsfeldern ein. Potenzielle Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Flusshochwasser treten in den Handlungsfeldern Bauen (Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser), Industrie und Gewerbe (Lage von Kläranlagen und von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen, Schäden an Infrastruktur des Landverkehrs), Energiewirtschaft (Lage von Kraftwerken in potenziellen Überschwemmungsflächen), Tourismus (Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser) sowie Straßenbau und Verkehr (Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser) auf.

Starkregen und Sturzfluten führen insbesondere im Alpenraum zu Klimawirkungen im Zusammenhang mit Gebäuden und Infrastruktur. Dies betrifft die Handlungsfelder Bauen (Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten), Industrie und Gewerbe (Lage von Kläranlagen und von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen [Sturzfluten], potenzielle Schäden an der Verkehrsinfrastruktur), Tourismus (Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten) sowie Straßenbau und Verkehr (potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten).

Auch zunehmende Sommertrockenheit führt in mehreren Handlungsfeldern zu Betroffenheiten, so beim Naturschutz bezüglich der Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit, in der Landwirtschaft aufgrund von Schäden durch Trockenheit sowie auch in der Wald- und Forstwirtschaft (Trockenheit auf Waldflächen; Klimawirkung jedoch nicht berechnet).

Insbesondere in den dynamisch wachsenden Kreisen in Oberbayern überlagern sich Flächenwachstum, steigende Bevölkerungszahlen sowie Hitzebelastungen. Darüber hinaus liegen viele wachsende Gemeinden auch in der Nähe von Flüssen wie der Donau oder dem Main, sodass es dort zu einer Überlagerung von Siedlungsflächenwachstum und Überschwemmungsgefährdung kommt und in der Folge zu steigenden Schadenspotenzialen. Die Anstrengungen der Wasserwirtschaft zur Freihaltung von Überschwemmungsgebieten sind hier von besonders hoher Bedeutung. In Oberbayern und Unterfranken überlagern sich die Muster von Trockenheit sowie landwirtschaftlicher Nutzung. Im Alpenraum ist die Siedlungs- und Infrastrukturdichte zwar geringer, aber aufgrund des ausgeprägten Sturzflutpotenzials bestehen hier handlungsfeldübergreifende Auswirkungen.

7.2 Reflexion verwendeter Daten und der Methodik

In der vorliegenden Pilotstudie konnten einige Klimawirkungen auf Grundlage der UBA-Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ berechnet werden. Dabei wurden die Klimaeinflussdaten durch aktuellere Modellläufe auf Basis des RCP8.5-Szenarios ersetzt und bei vielen Sensitivitätsdaten wurden aktuellere und spezifisch für Bayern zur Verfügung stehende Daten verwendet. Die methodischen Schritte und zum Teil auch die verwendeten Daten entsprachen jedoch der UBA-Vorgängerstudie für Deutschland.

Darüber hinaus konnten die in der Vulnerabilitätsstudie Deutschland verwendeten Grundlagen im Rahmen der Pilotstudie teilweise weiterentwickelt und für die Klimawirkungsanalyse in Bayern optimiert werden.

In zahlreichen Fällen musste jedoch von den Berechnungsvorlagen aus der Vulnerabilitätsstudie aus datenbezogenen und/oder fachlich-methodischen Gründen abgewichen werden. In einigen Fällen führten fehlende Daten oder fachliche Bedenken sogar dazu, dass ursprünglich für eine Berechnung vorgesehene Klimawirkungen nicht weiter berücksichtigt wurden. Im Folgenden werden die aus der Pilotstudie in diesem Zusammenhang gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse gebündelt dargestellt und dienen somit als Grundlage für die Diskussion und Entwicklung zukünftiger Klimawirkungsanalysen.

7.2.1 Weiterentwicklung von Datengrundlagen im Rahmen der Pilotstudie

Im Rahmen der Pilotstudie konnten die Sensitivitätsdaten im Bereich der Landverkehrsinfrastruktur sowie der Kraftwerke weiterentwickelt werden. Auf diese Weise war eine differenziertere Darstellung der Sensitivität in den jeweiligen Klimawirkungen der Handlungsfelder Straßenbau und Verkehr, Industrie und Gewerbe sowie Energiewirtschaft möglich.

Um die *Veränderung der Landverkehrsinfrastrukturfläche* in der Zukunft abbilden zu können, wurden für Bayern systematisch die vorliegenden Ausbaupläne und Ausbaustufen zur Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt. Zusätzlich zu den für die Gegenwart vorliegenden Daten wurden für den künftigen Staatsstraßenbau Daten der OBB und für den künftigen Ausbau der Bundesstraßen, Autobahnen und Schienenwege Daten des BMVI (insbesondere Bundesverkehrswegeplan) herangezogen. Je nach betrachtetem Szenario „starker“ oder „schwacher Wandel“ wurden für die Zukunft unterschiedliche Ausbaugrade angesetzt. Auf diese Weise konnte die Sensitivität der Landverkehrsinfrastruktur für die Gegenwart und die Zukunft berücksichtigt werden. Ein derartiges Vorgehen wäre grundsätzlich auch bei einer deutschlandweiten Betrachtung oder auch bei anderen Untersuchungsräumen möglich.

Auch bei der *Betrachtung von Kraftwerken* wurde gegenüber der UBA-Vulnerabilitätsstudie die Datengrundlage für diesen Sensitivitätsindikator erheblich verbessert. Im Gegensatz zur Vulnerabilitätsstudie flossen neben den konventionellen Kraftwerken (fossile Kraftstoffe) mit einer Netto-Nenn-Leistung über zehn Megawatt auch Biomasse- und Windenergieanlagen mit einer Netto-Nennleistung über zwei Megawatt in die Berechnung ein. Dadurch konnte bei der Berechnung der Klimawirkung „Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser“ knapp die Hälfte (ca. 45 %) der gesamten installierten Leistung in Bayern berücksichtigt werden. Da Photovoltaikanlagen und Wasserkraftanlagen in Bezug auf eine Gefährdung durch Hochwasser weniger relevant sind, konnten über den neu generierten Datensatz nahezu alle für diese Klimawirkungen relevanten Kraftwerke erfasst werden. Eine weitere Verbesserung dieser Datengrundlage würde darin bestehen, die genauen Standorte der besonders sensitiven Kraftwerksbereiche zu ermitteln. Denn Kraftwerke, die in der Pilotstudie als betroffen identifiziert wurden, müssen nicht zwangsläufig (in größerem Umfang) gefährdet sein, da insbesondere bei größeren Grundstücken die Kraftwerksbestandteile des Komplexes unterschiedlich sensitiv sein können.

7.2.2 Datenlücken und methodische Weiterentwicklung bei der Analyse von Klimawirkungen

Die Bearbeitung der Pilotstudie förderte neben Datenlücken oder nicht mehr aktuellen Daten auch offene methodische Fragen zutage. Diese Punkte werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Gleichwohl muss betont werden, dass für die Studie die besten für die Klimawirkungen jeweils zur Verfügung stehenden Daten verwendet wurden und die Berechnung vor dem Hintergrund der bestehenden zeitlichen, ressourcen- und datenbezogenen Rahmenbedingungen nach dem derzeitigen Stand der Technik durchgeführt wurden.

Fehlende Daten

In den meisten Fällen führte das Fehlen von Daten dazu, dass einzelne Klimawirkungen nicht im Rahmen der Pilotstudie bearbeitet werden konnten. Der Ausdruck „fehlende Daten“ ist in dieser Studie so zu verstehen, dass die Daten entweder gar nicht erhoben worden waren oder (noch) nicht in geeigneter Form (z. B. Auflösung, Genauigkeit) zur Verfügung standen.

Die Klimawirkung *Pflanzenverfügbares Wasser auf Ackerflächen*, die in der Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) über die effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode operationalisiert wurde, konnte aufgrund fehlender Daten nicht berechnet werden. Zwar kann für die Berechnung der Klimawirkung ein einfaches Wirkmodell verwendet werden. Allerdings ergab die Prüfung der benötigten Eingangsdaten, dass flächendeckende Datensätze für die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums und den gegenwärtigen kapillaren Aufstieg für Bayern seitens des LfU noch nicht vorlagen. Da die Erstellung von entsprechenden Grundlagenkarten aus punktuellen Bodenprofilen im Projekt nicht realisierbar war und zugleich große Unsicherheiten in Bezug auf die Grundwasserstände und damit zum kapillaren Aufstieg für die betrachtete Zukunft (2021–2050) bestehen, was den Nutzwert der Karten herabsetzen würde, konnte die Klimawirkung in der Pilotstudie nicht betrachtet werden.

Auch beim Thema *Massenbewegungen* konnte unter anderem aufgrund nicht verfügbarer Datengrundlagen keine Klimawirkung berechnet werden. Hier war geplant, über den qualitativen Ansatz bei der Vulnerabilitätsstudie Deutschland hinauszugehen und einen Ansatz zur quantitativen Operationalisierung von klimabezogenen Georisiken zu entwickeln. Hierzu wären Daten zur räumlichen Verteilung von Georisiken wie Felsstürze, Rutschungen und Schuttströme notwendig gewesen. Allerdings umfasst das LfU-Kataster zu Georisiken nur fallbezogene Meldungen. Somit existierte keine belastbare Datenbasis zur Häufigkeit spezifischer Prozesse, die eine gegenwärtige Bestimmung oder künftige Projektion des Geogefahrenrisikos erlaubt hätte. Darüber hinaus bestanden auch methodische Vorbehalte seitens des LfU-Fachreferats. So können komplexe Wirkzusammenhänge bei Massenbewegungen, über einen proxybasierten Ansatz nur unzureichend abgebildet werden.

Bei allen Klimawirkungen, bei denen *Starkregenereignisse* eine Rolle spielen, erschwerte das Fehlen von Niederschlagsdaten in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung eine genauere Berechnung der Klimawirkungen. Bei der letztlich verworfenen Klimawirkung „Auswirkungen auf Kanalnetz und Kläranlagen (Starkregen auf versiegelte Fläche)“ wurde von den beteiligten LfU-Experten empfohlen, mittels Niederschlagsdaten in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung die Dauer und Intensität eines Regenereignisses innerhalb eines kurzen Zeitraums zu erfassen und daraus die Belastung des Kanalnetzes näherungsweise ableiten zu können. Diese Daten waren zum Zeitpunkt der Bearbeitung jedoch nicht verfügbar. Darüber hinaus muss die Verwendung der Starkregentage bei Klimawirkungen in Bezug zu Sturzflutereignissen kritisch gesehen. Ein Starkregentag mit einer Niederschlagssumme von – je nach Definition – 20 oder 25 mm erlaubt keine Aussage über die Intensität des Starkregenereignisses. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass aufgrund der multiplikativen Verknüpfung der Starkregentage mit der Geländeneigung und der gewählten Definition (Tage mit mehr als 25 mm Nieder-

schlag) die Alpenregion die Ergebnisse dominieren und infolge der Normierung die Bedeutung für die ebenfalls gefährdeten Mittelgebirgsregionen nicht adäquat dargestellt wird.

Bei allen Klimawirkungen, in denen die Auswirkungen temperaturbezogener Klimaparameter im Zusammenhang mit dem *Gebäudezustand und der Gebäudeausstattung* eine Rolle spielen, konnten die Klimawirkungen aufgrund fehlender Daten nicht ausreichend genau bestimmt werden. Beispielsweise stellen die Ergebnisse zur potenziellen Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene (Kreise) lediglich eine grobe Annäherung dar. Neben der Einbeziehung der Topographie und der Siedlungsstruktur wären insbesondere Daten zu den verwendeten Gebäudematerialien, technischen Verschattungselementen sowie zu Dach- und Fassadenbegrünungen wichtig, um die Klimawirkung realitätsnäher abbilden zu können. Gleiches gilt für die Daten zur Abschätzung des potenziellen Kühlenergiebedarfs, für die keine Informationen zur Verbreitung von Raumklimageräten vorlagen, sodass der potenzielle Kühlenergiebedarf lediglich anhand des Klimaeinflusses dargestellt werden konnte. In der Praxis können derartige Daten jedoch lediglich für kleinräumigere Analysen zusammengetragen werden.

Bei den Sensitivitätsindikatoren im Handlungsfeld *Tourismus* konnte in der Pilotstudie nur mit sehr groben Daten gearbeitet werden. Zur Abbildung des touristischen Angebotes wurde die Anzahl der Gästeübernachtungen als Proxyindikator herangezogen. Diese Daten bilden für die Betroffenheit touristischer Einrichtungen durch Sturzfluten und Hochwasser die Sensitivität nur sehr unscharf ab, da sie nicht die genauen Standorte der einzelnen touristischen Anlagen (Hotels, Sehenswürdigkeiten, usw.) repräsentieren. Eine direkte Verschneidung der tatsächlichen Standorte mit den Überschwemmungsflächen würde deutlich belastbarere Aussagen zulassen. Aber auch die Anzahl der Gästeübernachtungen bildet die Sensitivität nur zu einem Teil ab, da die Zahlen weder die privat übernachtenden Gäste noch die Tagesgäste umfassen. Schließlich lagen auch keine Projektionen für die Gästeübernachtungszahlen in der Zukunft vor.

Geringe Aktualität der Daten

Eine hohe Aktualität der verwendeten Daten verspricht genauere Analyseergebnisse und erhöht außerdem die Akzeptanz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse bei Fachakteuren und der Öffentlichkeit. Zwar ist nicht für alle Indikatoren ein hoher Aktualitätsgrad zwingend notwendig, denn beispielsweise ändern sich topographische Daten zum Relief oder zum Verlauf von Fließgewässern nur wenig. Bei den Sensitivitätsdaten jedoch besteht oft eine hohe Entwicklungsdynamik, die innerhalb weniger Jahre zu deutlich veränderten Werten führen kann. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn aufwändige Modelle mit Daten gespeist wurden, die allmählich an Aktualität verlieren und somit auch die Modellergebnisse veralten.

In der Pilotstudie ist dieses Problem vor allem bei den Sensitivitätsdaten aufgetreten, die aus dem Modellverbund (PANTA-RHEI-REGIO und LAND USE SCANNER) des BMBF-Projekts CC-LandStraD abgeleitet wurden, einem Landnutzungsmodell, welches die Siedlungsentwicklung bis zum Jahr 2030 in einem Wachstums- und einem Stagnationsszenario abbildet. Da die Eingangsdaten zu diesem Modell einerseits aus dem Jahr 2009 stammen und das Modell andererseits die in den letzten Jahren anhaltende enorme Entwicklungsdynamik insbesondere in den Landkreisen und kreisfreien Städten Oberbayerns in dieser Form nicht berücksichtigt, konnten die Modellergebnisse nur zum Teil für die Pilotstudie verwendet werden. Das „Stagnationsszenario“ hat sich als überholt dargestellt, da in den meisten Kreisen Bayerns die im Stagnationsszenario projizierte Bevölkerungszahl für das Jahr 2030 bereits heute erreicht worden ist. Aus diesem Grund wurde für die Pilotstudie lediglich mit dem Wachstumsszenario gerechnet. Im Umkehrschluss ist diesbezüglich jedoch eine Aktualisierung eines Siedlungsentwicklungsmodells dringend angeraten, sei es im Rahmen eines deutschlandweiten Mo-

dells (z. B. durch eine Neuauflage des CC-LandStraD-Projekts) oder eines auf Bayern spezifisch zugeschnittenen Modells.

Fachliche Vorbehalte bezüglich der Daten

Nach Abschluss dieser Pilotstudie wurden einige der hier verwendeten Projektionen vom DWD zurückgezogen. Zudem wurde im Laufe des Jahres 2018 eine Methode zur Qualitätsprüfung von Klimaprojektionen am LfU entwickelt und angewendet. Mithilfe dieses Audits wurden gravierende Schwächen bei zwei in dieser Studie verwendeten Projektionen entdeckt. **Insofern wird von einer Verwendung der Klimawirkungskarten als Planungsgrundlage abgeraten. Vielmehr sollten die Karten als Anregung für vertiefende Untersuchungen und die Pilotstudie zur Erprobung und Bewertung der eingesetzten Methoden dienen.**

In einigen Fällen wurden Eingangsdaten, die beispielsweise bei der Erarbeitung der Vulnerabilitätsstudie Deutschland zum Einsatz kamen, aufgrund fachlicher Vorbehalte nicht für die Pilotstudie verwendet.

Dies gilt insbesondere für die Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern Wald- und Forstwirtschaft, Bauen, Industrie und Gewerbe sowie Straßenbau und Verkehr, die im Zusammenhang mit *Sturm- beziehungsweise Starkwindereignissen* stehen. In der Vulnerabilitätsstudie Deutschlands (Buth et al. 2015) wurden zur Abbildung des Klimaeinflusses Daten zu Tagen mit extremen Windgeschwindigkeiten pro Jahr verwendet. In der vorliegenden Pilotstudie wurde ein ähnliches Vorgehen für die Berechnung der Klimawirkung angestrebt. Für den Klimaeinfluss sollte für die Gegenwart zunächst die Bestimmung des Wertes für das 98. Perzentil (absoluter Wert in m s^{-1} , Auflösung $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$) für jede Zelle über den gesamten Zeitraum für jeden der 13 Modellläufe der Klimaprojektionen erfolgen, sodass anschließend der Median aus den 13 Modellläufe gebildet werden könnte. Für die Zukunft sollte die Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes aus dem Zeitraum 1971 bis 2000 für jede Zelle der einzelnen 13 Modellläufe berechnet werden, um abschließend das 15. und 85. Perzentil der Überschreitungshäufigkeit aus den 13 Modellläufen zu berechnen. Eine Prüfung der zugrundeliegenden und für die Bearbeitung benötigten Projektionsdaten zur Windgeschwindigkeit ergab jedoch, dass diese Daten häufig nicht plausibel und damit nicht belastbar sind. Daher wurde die Berechnung der im Zusammenhang mit Starkwind stehenden Klimawirkungen für die Pilotstudie verworfen. Mit einer Verbesserung der Datengrundlagen zu Starkwind- und Sturmereignissen für die Gegenwart und Zukunft könnten die Klimawirkungen in einer zukünftigen Studie berechnet werden.

Auch bezüglich der in der Vulnerabilitätsstudie Deutschland verwendeten Daten zur Abbildung zukünftiger *Hochwasserereignisse* bestanden fachliche Vorbehalte. Dies betraf die in der Studie des Umweltbundesamtes (Buth et al. 2015) verwendeten LISFLOOD-Daten. Aus fachlicher Sicht waren die fehlende Berücksichtigung von Hochwasserschutzanlagen sowie die grobe räumlichen Auflösung von $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ bei den LISFLOOD-Daten nicht zu akzeptieren. Da Projektionsdaten zu zukünftigen Überschwemmungsflächen noch nicht zur Verfügung standen, wurden die mit Flusshochwasser in Zusammenhang stehenden Klimawirkungen für die Zukunft mit den aktuellen potentiellen Überschwemmungsflächen berechnet. Bei zukünftigen potenziell extremeren Hochwassern kann es zu einem Versagen des auf ein heutiges HQ_{100} ausgerichteten Hochwasserschutzes kommen. Gleichsam wurden durch das Vorgehen auch für die Zukunft geplante Anpassungsmaßnahmen im Hochwasserschutz nicht berücksichtigt.

Für die vorliegende Pilotstudie war ursprünglich beabsichtigt gewesen, die *potenzielle Betroffenheit durch bodennahes Ozon* in Analogie zum Vorgehen in der Vulnerabilitätsstudie Deutschland zu berechnen. Diese Klimawirkung wurde jedoch nicht berechnet, da das Messstellennetz für Ozonkonzentrationen in Bayern für eine solche Auswertung eine zu geringe Dichte hat. Nach Einschätzung des LfU ist das Vorgehen in der Vulnerabilitätsstudie Deutschland, die von den 34 Stationen in Bayern gemes-

senen Ozonwerte flächendeckend zu interpolieren, fachlich fragwürdig. Um die Ozonkonzentrationen verlässlich abzubilden wäre als Basis ein sehr kleinmaschiges Messnetz (< 10m x 10m) notwendig. Als alternatives Vorgehen wurde vonseiten des LfU diskutiert, die klimatischen Bedingungen während der in der Vergangenheit gemessenen Ozon-Belastungsspitzen auszuwerten (Daten liegen ab 1980 vor), um dann die zu den jeweiligen Zeitpunkten vorherrschenden Konstellationen von Strahlung, Temperatur usw. in den Klimaprojektionen zu suchen. Ein ähnlicher Ansatz wurde in der Studie „KLENOS – Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen“ gewählt. Eine detaillierte Beschreibung des methodischen Ansatzes findet sich im KLENOS-Endbericht (UBA 2016a). Ein derartiges Vorgehen war jedoch im Rahmen der Pilotstudie aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Verbesserung und Erweiterung bestehender Daten

Für die Pilotstudie wurden in vielen Fällen Daten verwendet, die sich grundsätzlich als geeignet erwiesen und bei denen eine qualitative Verbesserung oder eine Erweiterung auf andere Teilaspekte eine Verfeinerung der Analyseergebnisse ermöglicht hätte.

Bei allen Klimawirkungen, in denen *Flusshochwasser bzw. Überschwemmungen* aufseiten des Klimaeinflusses eine Rolle gespielt haben, wird potenzieller Verbesserungsbedarf gesehen. In die Berechnungen flossen die modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen bei einem 100-jährlichen Flusshochwasser (HQ₁₀₀) ein, welche als georeferenzierte Vektordaten im Maßstab 1 : 10 000 zur Verfügung standen. Aufgrund fehlender Projektionsdaten der zukünftigen Überschwemmungsflächen zum Zeitpunkt der Berichterstellung mussten die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die Abbildung der Gegenwart als auch für die Zukunft verwendet werden. Hier wäre eine Modellierung zukünftiger Hochwasserereignisse vor dem Hintergrund sich ändernder klimatischer Rahmenbedingungen von hoher Bedeutung. Darüber hinaus wären für die Verbesserung hochwasserbezogener Klimawirkungen die Einbeziehung von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten wünschenswert. Da sich Wasserabflussverhältnisse und somit das Hochwasserrisiko zukünftig erheblich ändern können, wären auch für kleinere Fließgewässer Abflussmodellierungen wünschenswert.

Bei der infolge des Klimawandels möglicherweise eintretenden *Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit* stellte sich heraus, dass die aus anderen Studien bereits vorliegenden Forschungsergebnisse (Pompe et al. 2011) nicht für die Pilotstudie verwendet werden konnten. Diese wurden auf Basis von SRES-Emissionsszenarien erstellt und eine neue Modellierung war unter Verwendung von RCP-Szenarien innerhalb des Projekts aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Auch die ursprünglich angedachte Verwendung eines zusätzlichen Indikators zur Bewertung der Biotoptypen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel, wie sie von Behrens et al. (2009) für Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurde, konnte nicht realisiert werden. Grund ist, dass diese Studie nur etwa 15 % der für Bayern benannten wasserabhängigen Biotoptypen berücksichtigt. Verbesserungen in der Operationalisierung der Klimawirkung sind einerseits durch den Einsatz von Habitatmodellen möglich, vergleichbar zur Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes. Gleichzeitig bleibt festzuhalten, dass der – in Ermangelung geeigneter Modellergebnisse – verwendete proxybasierte Ansatz auf Ebene von Kreisen für aussagekräftige „Hot-Spot-Analysen“ zu grob ist.

Bezüglich der *Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen* durch früheren Vegetationsbeginn ließen sich die Analyseergebnisse durch die Verwendung zeitlicher Ausschlusskriterien (z. B. Berücksichtigung von Werten erst ab dem Monat März) oder durch Hinzuziehung anderer Parameter wie der vom DWD zur Verfügung gestellten Wärmesummen optimieren. Denn dass der Vegetationsbeginn im Szenario des starken Wandels bei dieser Klimawirkung bereits im Januar auftritt, ist im Wesentlichen der Berechnungsvorschrift geschuldet, die keine zeitlichen Ausschlusskriterien verwendet.

Um im Vergleich zur Vulnerabilitätsstudie die *Sensitivitätsdaten im Handlungsfeld Energiewirtschaft* für den Bereich der Kraftwerke erheblich zu verbessern, mussten die Datengrundlagen aus mehreren Quellen zusammengetragen werden. Zukünftig könnte hier eine Homogenisierung der Datengrundlagen für Kraftwerke zu einer Erleichterung der Bearbeitung und Verbesserung der Analyseergebnisse beitragen. Dazu gehören eine konsistente Erfassung der Leistungsangaben und Georeferenzierung der Kraftwerksstandorte.

Verbesserung methodischer Ansätze

Schließlich bestehen für verschiedene Klimawirkungen und deren Operationalisierung methodische Unsicherheiten und Bedenken, aufgrund derer Klimawirkungen nicht betrachtet wurden oder letztlich nur zu recht groben Aussagen führten.

Die Abschätzung der *Ausbreitung invasiver Arten* infolge des Klimawandels gestaltet sich aus methodischer Sicht sehr schwierig, da eine große Anzahl an Einflussfaktoren zu berücksichtigen ist. Neben den eigentlichen klimatischen Randbedingungen, die eine Etablierung gebietsfremder Arten auf Dauer ermöglichen, sind es Faktoren wie Ausbreitungsmechanismen und -wege sowie die spezifischen Ansprüche der einzelnen Arten, die eine einfache Operationalisierung und allgemeingültige Aussagen erschweren. Geeignete Abschätzungen bieten Habitatmodelle, die neben den klimatischen Randbedingungen weitere artenspezifische Ansprüche an den Lebensraum und die Ausbreitung integrieren. Ein proxybasierter Operationalisierungsansatz hingegen wurde nach Abstimmung mit dem zuständigen Fachreferat des LfU als nicht belastbar genug eingeschätzt, um künftige Schwerpunkte im Auftreten invasiver Neophyten zu beschreiben.

Für alle Klimawirkungen mit *Bezug zu Starkregen und Sturzfluten* konnte eine nur sehr grobe Analyse durchgeführt werden. Diskutiert wurde bereits auch die Notwendigkeit, Niederschlagsdaten in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung zur besseren Abbildung von Extremereignissen zu verwenden. Darüber hinaus wäre aber vor allem eine methodische Verbesserung des Analyseansatzes notwendig, der jedoch einen sehr hohen Anspruch an die Eingangsdaten stellt. Wichtig beim Umgang mit Klimawirkungen dieser Art ist es, auf gemeindlicher Ebene kleinräumige Niederschlags-Abfluss-Modellierungen durchzuführen, um Fließwege und Senken identifizieren zu können. Diese sind mit den vorhandenen beziehungsweise geplanten Flächennutzungen (insbesondere Siedlungs- und Infrastruktur) zu verschneiden, um (Hoch-)Risikobereiche identifizieren zu können. Zu diesem Thema wurden in der Vergangenheit bundesweit verschiedene Studien durchgeführt. Dazu kann festgestellt werden, dass für eine genaue Aussage auch detaillierte und kleinräumige Grundlagendaten vorliegen müssen, wozu Niederschlagsdaten (gemessen sowohl mit Radar als auch mit Regenschreibern), Abflussmessungen, Flächennutzungsdaten, Kanalnetzdaten sowie hochaufgelöste Daten zur Topografie (gegebenenfalls Laserscan-Daten) zählen, die zusätzlich durch Ortsbegehungen zu überprüfen sind. Darüber hinaus ist die Betrachtung von Topografie und Geländemerkmale, Entwässerungsnetz einschließlich Kanalnetz, Bebauungsstruktur und Lage von Gebäuden und Infrastrukturanlagen für eine genaue Folgenabschätzung unerlässlich (LANUV 2012). Wie bei den Daten zum Gebäudezustand und der Gebäudeausstattung können derartige Daten in der Praxis jedoch lediglich für kleinräumigere Analysen zusammengetragen werden.

Zur Abschätzung der *Hitzebelastung für die Bevölkerung* wurde als ein wesentlicher, die Sensitivität bestimmender Faktor, die Anzahl beziehungsweise der Anteil der Menschen über 60 Jahre in die Berechnung mit einbezogen. Verbesserungen bei der Operationalisierung sind insbesondere durch eine Berücksichtigung weiterer besonders sensibler Bevölkerungsgruppen (z. B. Kinder, arbeitende Bevölkerung) denkbar. Eine weitere Verbesserung wäre durch die Berücksichtigung von Hitzeperioden im Gegensatz zur Anzahl heißer Tage möglich. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsebene (Kreise)

stellen die Ergebnisse lediglich eine grobe Annäherung dar, die sich je nach topographischer Ausgestaltung der Kreise innerhalb dieser stark differenzieren können.

Eine Verbesserung der Operationalisierung bei der *Abschätzung der landwirtschaftlichen Schäden durch Trockenheit* wäre die Berücksichtigung bodenbezogener Daten (z. B. Bodenart, nutzbare Feldkapazität).

7.2.3 Methodische Reflexion und Forschungsbedarf

Die in der Pilotstudie durchgeführte Analyse ausgewählter Klimawirkungen für einige Handlungsfelder der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie bietet einen ersten, räumlich differenzierten Überblick. Gleichwohl müssen die Ergebnisse immer auch im Zusammenhang mit den Rahmenbedingungen interpretiert werden, die die Bearbeitung der Studie mitbestimmt haben. Aus der methodischen Reflexion lässt sich zudem der weitere Forschungsbedarf ableiten.

So stellt bereits die Auswahl der betrachteten Klimawirkungen nur einen Ausschnitt aus der Gesamtheit der Klimawirkungen dar, die idealerweise für eine allumfassende und sämtliche Handlungsfelder abdeckende Analyse wünschenswert gewesen wären. In einigen Fällen standen keine geeigneten Daten zur Verfügung, in anderen Fällen war eine Berechnung der Klimawirkungen aus methodischen Gründen nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Für verschiedene Klimawirkungen sind in dieser Pilotstudie die Ansatzpunkte für eine zukünftige Berechnung dokumentiert.

Auch die Ergebnisse aus den Berechnungen der Klimawirkungen sind vor dem Hintergrund der verwendeten Daten und ihrer Qualität zu interpretieren. Nicht in allen Fällen konnten die aktuellsten Daten verwendet werden, da diese entweder nicht flächendeckend zur Verfügung standen oder nicht mit den Zukunftsprojektionen vergleichbar waren, welche noch nicht auf Basis aktueller Eingangsdaten zur Verfügung standen. In solchen Fällen musste auf „Ersatzdaten“ ausgewichen werden, die nicht immer aktuell waren oder auch Lücken aufwiesen. Trotz der Einschränkungen bezüglich der Datenqualität ist andererseits festzuhalten, dass für die Berechnung der Klimawirkungen die besten Daten verwendet wurden, die für die Studie herangezogen beziehungsweise neu generiert werden konnten.

Hinsichtlich der Verknüpfung von absoluten (z. B. Gesamtgröße überschwemmter Verkehrsinfrastrukturflächen pro Kreis) und relativen Werten (z. B. Anteil der überschwemmten Verkehrsinfrastrukturflächen an der Gesamtfläche des Kreises) wäre für weitere Arbeiten zu prüfen, ob eine andere Bezugsgröße bei der Darstellung der relativen Werte eine sinnvolle Alternative darstellt. So könnte alternativ beispielsweise auch der Anteil der „betroffenen“ Untersuchungseinheit an der Gesamtgröße der jeweiligen Einheit als Bezugsgröße gewählt werden (z. B. Anteil der überschwemmten Verkehrsinfrastrukturflächen an der gesamten Verkehrsinfrastrukturfläche des Kreises).

Des Weiteren ist hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse anzumerken, dass die berechneten Klimawirkungen aufgrund des angewendeten Prinzips der Normalisierung der Eingangsdaten immer nur relative Zusammenhänge darstellen. Die Aussage, ob eine Klimawirkung in einer Klimawirkungskarte als hoch, mittel oder eher gering dargestellt wird, ist immer im zeitlichen und räumlichen Zusammenhang zu sehen. Wenn für den Landkreis A als Eingangswert der Klimaeinfluss als „eher gering“ angezeigt wird, so bedeutet dies, dass der Klimaeinfluss immer nur im Vergleich zu anderen Kreisen zum selben Zeitpunkt oder im Vergleich zu einem anderen Zeitpunkt gering ist. Es kann also durchaus sein, dass bereits die „geringe“ Anzahl von beispielsweise sechs heißen Tagen im Landkreis A für die dort lebenden Menschen eine hohe Belastung darstellt. Oder mit anderen Worten: Aus den Klimawirkungskarten lassen sich keine direkten Grenz- oder Schwellenwerte ableiten, deren Überschreitung oder Unterschreitung unmittelbaren Handlungsbedarf erzeugen. Hier wäre als methodische Weiterentwicklung die Definition von Schwellen- oder Grenzwerten ein An-

satzpunkt. Dies erfordert allerdings ein normativ-politisch und fachlich abgestimmtes Übereinkommen darüber, was allgemein als „akzeptabel“ oder als „nicht akzeptabel“ eingestuft werden kann.

Ein weiterer Aspekt zur Interpretation der Ergebnisse ist der Hinweis auf den bei der Normalisierung auftretenden Effekt, dass einzelne sehr hohe Werte die Ergebnisse dominieren können und dazu führen, dass die übrigen Werte bei der Normalisierung nivelliert werden. Dieser Effekt tritt beispielsweise bei den Klimawirkungen mit Bezug zu Starkregenereignissen auf. Da die Anzahl der Starkregentage am Alpenrand überproportional hoch ist, erscheint in den Klimawirkungskarten kaum ein Unterschied zwischen den Mittelgebirgslagen (in denen durchaus auch ein deutliches Sturzflutpotenzial existiert) und den Gebieten in den Niederungen mit tendenziell geringerer Sturzflutgefährdung. Inhaltlich ist dies durchaus nachvollziehbar, denn auf diese Weise wird ein prioritärer Handlungsbedarf in den besonders betroffenen Kreisen am Alpenrand deutlich. Eine weitere Abstufung des Handlungsbedarfs in anderen Teilregionen wird aber auf diese Weise nicht möglich. Hier wäre zu überlegen, ob die Klassengrenzen für die Normalisierung lediglich um die Klassemitte streuen und zur Mitbehandlung sehr hoher oder niedriger Werte die oberste und unterste Klasse offengelassen werden.

Dennoch erscheint das gewählte Vorgehen für eine sektorübergreifende Analyse von Klimawirkungen sinnvoll, da nur auf diese Weise Informationen, die auf unterschiedlichen Skalen vorliegen, miteinander in Beziehung gesetzt werden können und so einen Vergleich zwischen Raumeinheiten zulassen.

Darüber hinaus hängen die Ergebnisse immer auch von normativen Setzungen bei der Auswahl, Gewichtung und dem Setzen von Schwellenwerten bei den Eingangsdaten ab. Um hier zu möglichst aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, wurde das methodische Vorgehen für den Großteil der Klimawirkungen mit Experten aus den zuständigen Landesfachbehörden abgestimmt.

7.3 Fazit

Die Bearbeitung und Evaluation der Pilotstudie hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Klimawirkungskarten vor allem auf regionaler Ebene relevant und einsetzbar sind. Durch die Verschneidung verschiedener Datengrundlagen mit unterschiedlicher Qualität hinsichtlich der Abbildungsschärfe (Proxyindikatoren), räumlichen Auflösung und Aktualität, kann das Ergebnis höchstens die Genauigkeit des schwächsten Eingangsdatensatzes erlangen. Dadurch sind Aussagen oft nur auf regionaler und nicht auf lokaler Ebene möglich. Dies betrifft vor allem die Klimawirkungen, die mittels Proxyindikatoren operationalisiert wurden. Zudem sind die Karten aufgrund der fehlenden Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Handlungsbedarfes schwer interpretierbar. Angesichts des enormen zeitlichen und finanziellen Aufwandes, der mit der Erstellung von Klimawirkungskarten verbunden ist, mag die fehlende Belastbarkeit der Ergebnisse als rechtssichere Planungsgrundlage nicht in allen Fällen in angemessenem Verhältnis zum gewonnenen Nutzen erscheinen. Die Stärke und der Nutzen von Klimawirkungskarten liegen vielmehr darin, einen schnellen Überblick zu verschaffen. So kann vor allem aus der gemeinsamen Betrachtung der verschiedenen Klimawirkungen ersehen werden, welche Handlungsfelder in einer Region potenziell am stärksten von Klimaänderungen betroffen sein werden. Die Ergebnisse eignen sich als Argumentationshilfe für die Stärkung der Belange der Klimaanpassung im Rahmen der Landes- und Regionalplanung. Um jedoch konkrete Anpassungsprioritäten zu ermitteln, müssen die Ergebnisse durch Experten bewertet und in ihrer Bedeutung eingeschätzt werden. Zusätzlich sind lokale Anpassungsprioritäten mit den Beteiligten vor Ort zu entwickeln oder zumindest frühzeitig mit ihnen abzustimmen. Dadurch werden die lokalen Gegebenheiten berücksichtigt und die Akzeptanz in der Region erhöht.

Literaturverzeichnis

- Auerswald, K.; Fischer, F.; Kistler, M.; Treisch, M.; Maier, H.; Brandhuber, R. (2018): Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. In: *Science of the Total Environment*, 613-614, 1–9 S.
- Auerswald, K.; Fischer, F.; Winterrath, T.; Brandhuber, R. (2019a): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 1819–1832 S.
- Auerswald, K.; Fischer, F.; Winterrath, T.; Elhaus D.; Maier H.; Brandhuber R. (2019b): Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G. König W. und Utermann J. (Hg.): *Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser* (Loseblattsammlung), Berlin, Erich Schmidt Verlag.
- BASt, Bundesanstalt für Straßenwesen (2017): AdSVIS. Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel. adsvis.de/index.php?lang=de (Abruf am 24.11.2017).
- Bayerische Staatsregierung (2013): Verordnung über das Landesentwicklungsprogramm Bayern (LEP). LEP.. LEP –, Fundstelle: 230-1-5-W.
- Bayerische Staatsregierung (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) 2016. München, 224 S.
- BBK, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011): Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hochwasserereignissen auf kommunaler Ebene. 2. Aufl. 08/2013, Praxis im Bevölkerungsschutz, Bonn, 196 S.
- BBK, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2017): Kritische Infrastrukturen. www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/KritischeInfrastrukturen/kritischeinfrastrukturen_no.de.html (Abruf am 23.10.2017).
- BBR, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung; DWD, Deutschen Wetterdienst (2014): Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2012): Trends der Siedlungsflächenentwicklung. Status quo und Projektion 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT, 09/2012, Bonn.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Wachstumsdruck in deutschen Großstädten. Adam, B. BBSR-Analysen KOMPAKT, 10/2017, Bonn.
- Behrens, M.; Fartmann, T.; Hölzel, N. (2009): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biologische Vielfalt. Pilotstudie zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf ausgesuchte Tier- und Pflanzenarten in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Bezdek, J. C. (1981): *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Springer US, Advanced Applications in Pattern Recognition, New York, 272 S.
- BMEL, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016): *Agrarexporte verstehen. Fakten und Hintergründe*. Dezember 2016, Berlin.
- BMI, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2009): *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)*.
- BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): *Die Energie der Zukunft. Sechster Monitoring-Bericht der Energiewende - Berichtsjahr 2016*. Berlin, 194 S.

- Bundesnetzagentur (2017): Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur. Stand 07.11.2017.
www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html (Abruf am 09.11.2017).
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Schauser, I. (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung. Dessau-Roßlau.
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving Stefan; Fleischhauer Mark; Zebisch, M.; Schneiderbauer Stefan; Schauser Inke (2016): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse. Empfehlungen für den Bund und die Bundesländer.
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
- Carvalho, M. J.; Melo-Gonçalves, P.; Teixeira, J. C.; Rocha, A. (2016): Regionalization of Europe based on a K -Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation. In: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 94, DOI: 10.1016/j.pce.2016.05.001, S. 22–28.
- Coelho, C. A. S.; Ferro, C. A. T.; Stephenson, D. B.; Steinskog, D. J. (2008): Methods for Exploring Spatial and Temporal Variability of Extreme Events in Climate Data. In: J. Climate, Volume 21, DOI: 10.1175/2007JCLI1781.1, S. 2072–2092.
- Dalelane, C.; Deutschländer, T. (2013): A robust estimator for the intensity of the Poisson point process of extreme weather events. In: Weather and Climate Extremes, Volume 1, DOI: 10.1016/j.wace.2013.07.003, S. 69–76.
- Destatis (2014): Güterverkehr 2013: Transportaufkommen steigt um 0,8 %. Pressemitteilung Nr. 041 vom 07.02.2014.
www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2014/02/PD14_041_463.html (Abruf am 06.11.2017).
- Destatis (2017): Agrarstrukturerhebung 2016 (endgültige Ergebnisse): 9.600 landwirtschaftliche Betriebe weniger als im Jahr 2013.
www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/LandwirtschaftlicheBetriebe/ASE_Aktuell.html (Abruf am 26.10.2017).
- Deutschländer, T.; Dalelane, C. (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt Technischen Hilfswerk. Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt, Offenbach am Main, 153 S.
- DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (2016): Die Karte der erneuerbaren Energien.
www.energymap.info/ (Abruf am 24.11.2017).
- Die Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.
- DIN-NAW, DIN-Normenausschuss Wasserwesen (2017): DIN 19708 Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Berlin.
- Distelkamp, M.; Großmann, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P.; Wolter, M. I. (2009): PANTA RHEI REGIO. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in

- Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. gws Discussion Paper, 2009/7, Osnabrück.
- Dunkelberg, E.; Hirschl, B.; Hoffman, E. (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Energiewirtschaft. Dessau-Roßlau.
- DWD, Deutscher Wetterdienst (2017a): Dokumentation. Waldbrandgefahrenindex WBI. Offenbach, www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbx_erlaeuterungen.pdf?_blob=publicationFile&v=8 (Abruf am 06.11.2017).
- DWD, Deutscher Wetterdienst (2017b): Vegetationsbeginn. www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklima-atlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussell/vegetationsbeginn.html (Abruf am 24.11.2017).
- ESPON, European Spatial Planning Observation Network (2011): ESPON Climate. Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies. Greiving, S.; Flex, F.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schmidt-Thomé, P.; Klein, J. et al. 65 S.
- Falk, W.; Mellert, K.; Bachmann-Gigl, U.; Kölling, C. (2013): Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. Anbaurisikoarten jetzt um Boden- und Reliefparameter ergänzt. In: LWF aktuell, 94/2013, S. 8–10.
- Fischer, F.; Hauck, J.; Brandhuber, R.; Weigl, E.; Maier, H.; Auerswald, K. (2016): Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 72–80 S.
- Fischer, F.; Kistler, M.; Brandhuber, R.; Maier, H.; Treisch, M.; Auerswald, K. (2017): Validation of official erosion modelling based on high-resolution radar rain data by aerial photo erosion classification. In: *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Fischer, F.; Winterrath, T.; Auerswald, K. (2018): Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6505–6518 S.
- Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M.; Mieskes, I. et al. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1, 167–184 S.
- GLORIA (2017): Global Observation Research Initiative in Alpine Environments. www.gloria.ac.at/ (Abruf am 22.11.2017).
- GWS, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (2013): Sozioökonomische Daten und Daten zur Flächeninanspruchnahme bis 2030. Ergebnis einer Projektion mit dem Modell PANTA RHEI REGIO. Zur Verfügung gestellt am 31.05.2017, Osnabrück.
- Hartigan, J.A.; Wong, M.A. (1979): Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1979, Vol. 28, 100–108 S.
- Hilferink, M.; Rietveld, P. (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: *Journal of Geographical Systems*, 2, S. 155–177.
- Hoffmann, E.; Gebauer, J.; Dunkelberg, E.; Hirschfeld, J.; Hirschl, B.; Rotter, M. et al. (2011): Stakeholder-Dialoge: Chancen und Risiken des Klimawandels. In: UBA (Hg.): *Climate Change*, 03/2011, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4071.pdf (Abruf am 07.11.2017).

- Hoymann, J.; Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks. In: *Raumforschung und Raumordnung*, 72, 3, S. 211–225.
- Hübener, H.; Bülow, K.; Fooker, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S. et al. (2017): ReKliEs-De Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland.
- Hütter, A. (2013): *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden, www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 07.11.2017).
- Iglesias, A.; Rosenzweig, C.; Pereira, D. (2000): Agricultural impacts of climate change in Spain: developing tools for spatial analysis. In: *Global Environmental CHange*, Volume 10, S. 69–80.
- IPCC (2014): Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report (AR5).
- Kaufmann, H.; Pape, H. (1984): Clusteranalyse. In: Ludwig Fahrmeir, Alfred Hamerle und Walter Häußler (Hg.): *Multivariate statistische Verfahren*, Berlin, de Gruyter.
- KLIWA (2015): Vorgehenskonzept. Fachlicher Rahmen für die Zusammenarbeit der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst zum Thema: Klima- veränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 5. Fortschreibung des Vorgehenskonzeptes vom Dezember 1998.
- Kölling, C. (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. In: *AFZ-Der Wald*, 23/2007, S. 1.242–1.247.
- Kölling, C.; Bachmann, M.; Falk, W.; Grünert, S.; Schaller, R.; Tretter, S.; Wilhelm, G. (2009): Der klimagerechte Waldumbau bekommt vorläufige Planungsunterlagen. Klima-Risikokarten für heute und morgen. In: *AFZ-Der Wald*, 15/2009, S. 806–810.
- Koomen, E.; Bakema, A.; Scholten, H. J.; Stillwell, J. (2007): *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications*. Dordrecht, Springer, The GeoJournal Library, 90.
- Kuhlmann, A. (2014): *Entwicklung des Kraftwerksparks in Deutschland und Bayern*. Energiedialog Bayern. BDEW, München.
- Kuttler, W. (2004): Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 16, 3, 187–199 S.
- LABO (2017): *Vorsorge gegen Bodenerosion durch Wasser vor dem Hintergrund des Klimawandels*. Kiel (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein).
- Landesbetrieb Straßenbau NRW (2017): *Frostschäden an Straßen*. www.strassen.nrw.de/planung-bau/bautechnik/frostschaden.html (Abruf am 04.11.2017).
- LANUV, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2012): *Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung. Methoden und Konzepte*. KISS.
- LfStat, Bayerisches Landesamt für Statistik (2016): *Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Bayern bis 2035*. Beiträge zur Statistik Bayerns, 548, Fürth.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): *KLIP 2020 - Ein Sonderprogramm zur Moorrenaturierung*. Augsburg.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014): *Beeinflusst der Klimawandel die Jahreszeiten in Bayern? Antworten der Phänologie*. *UmweltSpezial*, Augsburg.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017a): *Schutzgebiete in Bayern*. www.lfu.bayern.de/natur/schutzgebiete/index.htm (Abruf am 06.11.2017).

- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017b): Sturzfluten und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Wasserwirtschaftlicher Bericht. UmweltSpezial, Augsburg.
- Lindgren, J.; Jonsson, D.; Carlsson-Kanyama, A. (2009): Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden. In: EJTIR, 9 (2), 164–181 S.
- Liu, Z.; George, R. (2003): Fuzzy Cluster Analysis of Spatio-Temporal Data. In: Gerhard Goos, Juris Hartmanis, Jan van Leeuwen, Adnan Yazıcı und Cevat Şener (Hg.): Computer and Information Sciences - ISCIS 2003, Bd. 2869, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 984–991.
- LTM, Lüftungstechnik Meinerzhagen (2017): Heizenergiebedarf. Glossar. www.ltm-ulm.de/de/LTM_Glossar/Glossar_H.php (Abruf am 30.10.2017).
- LWF, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2017a): Nischenmodelle (Projekt B 76). www.lwf.bayern.de/boden-klima/baumartenwahl/144538/index.php (Abruf am 23.11.2017).
- LWF, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2017b): Überlebenszeit-Wald-Klimawandel - SURVIVAL-KW (Projekt C 25). www.lwf.bayern.de/boden-klima/baumartenwahl/144530/index.php (Abruf am 23.11.2017).
- Mahlstein, I.; Knutti, R. (2010): Regional climate change patterns identified by cluster analysis. In: Clim Dyn, Volume 35, DOI: 10.1007/s00382-009-0654-0, S. 587–600.
- Marscheider, N.; Schäfer, L.; Rotter, M. (2013): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung – Logistik und Supply Chain. Berlin.
- Michelsen, C.; Ritter, N. (2017): Wärmemonitor 2016: Die "zweite Miete" sinkt trotz gestiegenem Heizenergiebedarf. DIW Wochenbericht, 38/2017, Berlin.
- MKRO, Ministerkonferenz für Raumordnung (2013): Umlaufbeschluss Raumordnung und Klimawandel. Handlungskonzept der Raumordnung zur Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien in Hinblick auf die räumlichen Konsequenzen des Klimawandels vom 23.01.2013.
- Müller, C.; Komischke, H.; Katzenberger, B.; Nied, M.; Fink, G.; Iber, C.; Brahmer, G. (2018): Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B. KLIWA-Kurzbericht, 27 S.
- MUNLV NRW, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Pompe, S.; Berger, S.; Bergmann, J.; Badeck, F.; Lübbert, J.; Klotz, S. et al. (2011): Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben FKZ 805 81 001. Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten, 304, Bonn, 98 S.
- Regionale Planungsgemeinschaft Südwestthüringen (2016): Regionales Energie- und Klimakonzept. Teil II - Klimakonzept, Raumentwicklungsstrategie Klimawandel. Suhl.
- Robine, J.-M.; Cheung, S.-L.; Le Roy, S.; van Oyen, H.; Herrmann, F. R. (2007): Report on excess mortality in Europe during summer 2003. EU Community Action Programm for Public Health, Grant Agreement 2005114. 2003 Heat Wave Project. Brüssel.
- Roloff, A.; Grundmann, B. (2008): Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel. In: Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie, 42 (3), S. 97-109.
- Runhaar, H.; Mees, H.; Wardekker, A.; van der Sluijs, J.; Driessen, P. P. J. (2012): Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas. Stimuli and barriers. In: Reg Environ Change, 12, 4, 777–790 S.

- Schaller, M.; Weigel, H.-J.; Schrader, S. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Braunschweig, Bundesforschungsanst. für Landwirtschaft (FAL), Landbauforschung Völknerode Sonderheft, 316, 248 S.
- Schittich, C. (2012): Building Skins. Birkhäuser, Birkhäuser Generalstandingorder, Basel, 10 S.
- Schlömer, C.; Bucher, H.; Hoymann, J. (2015): Die Raumordnungsprognose 2035 nach dem Zensus. Bevölkerung, private Haushalt und Erwerbspersonen. BBSR-Analysen KOMPAKT, 05/2015, Bonn.
- Schuchardt, B.; Wittig, S. (2012): Vulnerabilität der Metropolregion Bremen-Oldenburg gegenüber dem Klimawandel (Synthesebericht). In: Projektkonsortium Nordwest2050 (Hg.): Nordwest2050-Berichte, Heft 2, Bremen/Oldenburg.
- Schunk, C. (2016): Contributions to the assessment of past, present and future forest fire danger in Bavaria and the Alpine region. mediatum.ub.tum.de/doc/1297369/1297369.pdf (Abruf am 06.11.2017).
- Schunk, C.; Leuchner, M.; Menzel, A. (2009): Waldbrand. Historische, aktuelle und zukünftige Bedeutung in Bayern. In: LWF aktuell, 72/2009, S. 30–31.
- Schwertmann, U.; Vogl, W.; Kainz, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl. Ulmer Verlag Stuttgart.
- Statista (2017): Ertrag je Hektar Anbaufläche von Getreide in Deutschland nach Art in den Jahren 1960 bis 2016 (in Dezitonnen). de.statista.com/statistik/daten/studie/28888/umfrage/hektarertrag-von-getreide-in-deutschland-seit-1960/ (Abruf am 26.10.17).
- Stede, J.; Michelsen, C.; Singhal, P. (2018): Wärmemonitor 2017: Heizenergieverbrauch stagniert, Klimaziel wird verfehlt. DIW Wochenbericht, 39/2018, Berlin.
- StMELF, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2017): Waldbrandgefahr in Bayern. www.stmelf.bayern.de/wald/waldbesitzer_portal/053086/index.php (Abruf am 06.11.2017).
- StMELF, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2018): Bayerischer Agrarbericht 2018 – Kartenanhang. 22 S.
- StMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2014): Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. Bayerns Schutzstrategie Ausweiten. Intensivieren. Beschleunigen.
- StMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. München.
- StMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie. München.
- StMWi, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2019): Tourismus in Bayern. Wirtschaftsfaktor und Leitökonomie. Tourismus in Bayern Wirtschaftsfaktor und Leitökonomie (Abruf am 13.06.2019).
- Transportation Research Board and National Research Council: Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation. Special Report 290. The National Academies Press, Washington, DC.
- UBA, Umweltbundesamt (2013): Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft. www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/handlungsfeld-wald-forstwirtschaft.

- UBA, Umweltbundesamt (2014): Wasserwirtschaft in Deutschland. Wasserversorgung – Abwasserbe-
seitigung. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/wawiflyer_uba_de_web.pdf (Abruf am
28.11.2017).
- UBA, Umweltbundesamt (2015a): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den
Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregie-
rung. Dessau-Roßlau.
- UBA, Umweltbundesamt (2015b): Wärmebelastung in heilklimatischen Kurorten.
www.umweltbundesamt.de/tou-i-3-das-indikator (Abruf am 28.11.2017).
- UBA, Umweltbundesamt (2016a): KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Kli-
mas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und
Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen. Pavlik, D.; Heidenreich, M.; Wolke
Ralf; Hinneburg Detlef; Stern, R. Texte, 84/2016, Dessau-Roßlau.
- UBA, Umweltbundesamt (2016b): Kraftwerksleistung in Deutschland. Installierte Kraftwerksleistung in
Deutschland 2015 nach Energieträgern.
- UBA, Umweltbundesamt (2017a): DAS-Handlungsfeld Verkehr. [www.umweltbundesamt.de/das-
handlungsfeld-verkehr](http://www.umweltbundesamt.de/das-handlungsfeld-verkehr) (Abruf am 05.11.2017).
- UBA, Umweltbundesamt (2017b): Kohlendioxid-Emissionen.
[www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-
deutschland/kohlendioxid-emissionen](http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen) (Abruf am 06.11.2017).
- UBA, Umweltbundesamt (2017c): Wassereinsatz des verarbeitenden Gewerbes.
www.umweltbundesamt.de/daten/industrie/wassereinsatz-des-verarbeitenden-gewerbes (Abruf am
06.11.2017).
- van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K. et al. (2011): The
representative concentration pathways. An overview. In: *Climatic Change*, 109, 1-2, DOI:
10.1007/s10584-011-0148-z, 5–31 S.
- Wienert, U.; Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat
island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. In: *Meteo-
rologische Zeitschrift*, 22, 2, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0397, 179–185 S.
- Wilks, D. S. (2009): *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2. ed. [Nachdr.], Elsevier, Inter-
national geophysics series, 91, Amsterdam, 627 S.
- Winterrath, T. (2016): Hocho aufgelöste Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur nutzerspezifi-
schen Analyse von Extremereignissen. In: *Annalen der Meteorologie*, 49, 43–46 S.
- Winterrath, T.; Brendel, C.; Hafer, M.; Junghänel, T.; Klameth, A.; Walawender, E. et al. (2017): Erstel-
lung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*,
251, Offenbach/M.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation
planning. *Agricultural Handbook*, 537, Washington, DC.

Anhang: Klimawirkung-Kennblätter

NA-1-2017, Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	NA-1-2017
Karte	Abb. 21
Klimawirkung	Beeinträchtigung wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit
Handlungsfeld	Naturschutz
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Beeinträchtigungen wasserabhängiger Biotope durch Trockenheit, indem die klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (Klimaeinfluss) mit der Fläche wasserabhängiger Biotope (Sensitivität) verknüpft wird.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	-
Klimaeinfluss	Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	Ensemble aus 5 Modellläufen des RCM RCA (nicht bias-korrigiert)
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (April-September): -149,21 bis 595,21 mm
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: niedrigste Klimatische Wasserbilanz; null: höchste Klimatische Wasserbilanz). Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Die Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr ist definiert als die mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus potenzielle Evapotranspiration) in der Vegetationsperiode (April-September)
Sensitivität	Fläche wasserabhängiger Biotope
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Biotopkartierung
Zeitbezug	Gegenwart: 2017 (Zeitpunkt der Übermittlung der Daten)

Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten aus der Biotopkartierung
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Fläche wasserabhängiger Biotope pro Kreis: 0,05 bis 178,42 km ² Anteil der Fläche wasserabhängiger Biotope am Kreis: 0,06 bis 17,64 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der normalisierten absoluten Fläche wasserabhängiger Biotope und dem normalisierten Anteil der Fläche wasserabhängiger Biotope am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Fläche wasserabhängiger Biotope; null: geringste absolute/relative Fläche wasserabhängiger Biotope). Die wasserabhängigen Biotope der Gegenwart werden auch für die Abbildung der Zukunft verwendet (keine Projektionsdaten verfügbar).
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Die wasserabhängigen Biotope enthalten auch Flächen im Bereich militärischer Nutzung

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

LW-1-2017, Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	LW-1-2017
Karte	Abb. 26

Klimawirkung	Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch früheren Vegetationsbeginn
Handlungsfeld	Landwirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die Verschiebung agrarphänologischer Wachstumsphasen durch einen früheren Vegetationsbeginn durch die Verknüpfung des Tags des Vegetationsbeginns mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche pro Kreis.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die Klimawirkung konnte nicht mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) abgestimmt werden.

Klimaeinfluss	Tag des Vegetationsbeginns
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt

Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Tag des Vegetationsbeginns: 15,55 bis 102,12 Tag des Jahres
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: frühester Tag des Vegetationsbeginns; null: spätestester Tag des Vegetationsbeginns). Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Tag des Vegetationsbeginns: mittlerer jährlicher erster Tag im Jahr mit 6 aufeinanderfolgenden Tagen mit Temperatur ≥ 5 Grad Celsius. Bedingt durch diese Definition kann der Vegetationsbeginn auch im Januar festgestellt werden, wie dies für die Zukunft (starker Wandel) aus den Klimaprojektionen berechnet wurde (siehe Karte). Dadurch wird auf die steigende Gefahr der Unterbrechung der Vegetationsperiode durch Spätfrost hingewiesen.

Sensitivität	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) pro Kreis
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“) 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) am Kreis: 13,39 bis 77,17 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche; null: geringster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die landwirtschaftlich genutzte Fläche abzubilden, werden die Layer 'Ackerland' und 'Grünland' verwendet.

Literaturhinweise	ADELPHI/PRC/EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Hrsg.: UMWELTBUNDESAMT. Dessau-Roßlau (Climate Change, 24/2015). https://www.adelphi.de/de/publikation/vulnerabilit%C3%A4t-deutschlands-gegen%C3%BCber-dem-klimawandel , Abruf am 26.04.2017.
-------------------	--

LW-2-2017, Landwirtschaftliche Schäden durch Trockenheit

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	LW-2-2017
Karte	Abb. 27

Klimawirkung	Landwirtschaftliche Schäden durch Trockenheit
Handlungsfeld	Landwirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden in der Landwirtschaft durch die Verknüpfung der Anzahl der Heißen Tage mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche (Ackerland) pro Kreis.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die Klimawirkung konnte nicht mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) abgestimmt werden.

Klimaeinfluss	Heiße Tage
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage; null: geringste Anzahl Heißer Tage). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius.

Sensitivität	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Ackerland) pro Kreis
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“): 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Ackerland) am Kreis: 0,08 bis 63,60 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche; null: geringster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.

Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die landwirtschaftlich genutzte Fläche abzubilden, wird der Layer 'Ackerland' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

LW-3-2017, Landwirtschaftliche Schäden durch Wechselfrost

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	LW-3-2017
Karte	Abb. 28

Klimawirkung	Landwirtschaftliche Schäden durch Wechselfrost
Handlungsfeld	Landwirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden in der Landwirtschaft durch die Verknüpfung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost mit dem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche pro Kreis.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die Klimawirkung konnte nicht mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) abgestimmt werden. Die leichte Zunahme der Klimawirkung beim Schwachen Wandel ist auf eine leichte Zunahme der Tage mit Wechselfrost im 85. Perzentil zurückzuführen.

Klimaeinfluss	Tage mit Wechselfrost (+/-3°C)
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Tage mit Wechselfrost (+/-3°C): 0,32 bis 15,40 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Tage mit Wechselfrost (+/-3°C); null: geringste Anzahl Tage mit Wechselfrost (+/-3°C)). Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	Tage mit Wechselfrost (+/-3°C): mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmaximaltemperatur über 3 Grad Celsius und gleichzeitiger Tagesminimaltemperatur von kleiner als -3 Grad Celsius.
Sensitivität	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) pro Kreis
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“): 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche (Acker- und Grünland) am Kreis: 13,39 bis 77,17 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche; null: geringster Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die landwirtschaftlich genutzte Fläche abzubilden, werden die Layer 'Ackerland' und 'Grünland' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

WW-1-2017, Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ₁₀₀

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	WW-1-2017
Karte	Abb. 29
Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft
Kurzbeschreibung	Der indirekte Klimaeinfluss beschreibt die potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei einem 100-jährlichen (mittleren) Hochwasser (HQ100).
Analysemethode	Wirkmodell
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, wird nur die Gegenwart anhand der Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 abgebildet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Bei den Überschwemmungsflächen handelt es sich genau genommen nicht um Klimaeinflussdaten. Die maßgeblichen Klimaeinflüsse für die Überschwemmungsflächen sind die großräumigen Niederschlagsmuster, die sich im Zuge des Klimawandels wahrscheinlich zeitlich und räumlich verändern werden. Die Auswirkungen der daraus entstehenden Abflüsse in Form von Hochwasser bzw. Überschwemmungen auf Umwelt und Gesellschaft werden sich dementsprechend auch verändern. Somit werden Überschwemmungsflächen in dieser Studie auch als (indirekter) Klimaeinfluss für die Berechnung anderer Klimawirkungen betrachtet. Die Überschwemmungsflächen aus den Hochwassergefahrenkarten wurden um die (gewöhnlichen) Wasserflächen aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM250) reduziert.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

WW-2-2017, Sturzflutpotenzial

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	WW-2-2017
Karte	Abb. 30

Klimawirkung	Sturzflutpotenzial
Handlungsfeld	Wasserwirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt das Potenzial des Auftretens von Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in Abhängigkeit von der Hangneigung (Gefälle).
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor.

Klimaeinfluss	Starkregentage
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Starkregentage; null: geringste Anzahl Starkregentage). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimeter.

Sensitivität	Reliefenergie (Standardabweichung Gefälle)
Quelle(n)	Digitales Geländemodell des LDBV.
Zeitbezug	Datenbezug: 2017; Es wird angenommen, dass sich die Reliefenergie in der Zukunft nicht verändert.
Raumbezug / Maßstab	5 Meter x 5 Meter Rasterdaten; Standardabweichung des Gefälles auf Kreisebene berechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Standardabweichung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung

Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Reliefenergie; null: geringste Reliefenergie).
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

BA-1-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	BA-1-2017
Karte	Abb. 31

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Bauen
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Siedlungsflächen verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Siedlungsflächen (Sensitivität), danach additive Verknüpfung der absoluten überschwemmungsgefährdeten Siedlungsfläche mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Siedlungsfläche an der Kreisfläche (zuvor jeweils Normalisierung und danach Normalisierung). Wertebereich absolute überschwemmungsgefährdete Siedlungsfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 9,09 km ² Wertebereich relative überschwemmungsgefährdete Siedlungsfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 2,40 Prozent
Bemerkungen	-

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)

Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
---------------------	--

Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, werden die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die Abbildung der Gegenwart als auch für die der Zukunft verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Sensitivität	Siedlungsfläche
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“) 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Siedlungsfläche pro Kreis: 11,05 bis 175,64 km ² Anteil der Siedlungsfläche am Kreis: 3,06 bis 56,50 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Siedlungsfläche und dem Anteil der Siedlungsfläche am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Siedlungsfläche; null: geringste absolute/relative Siedlungsfläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Siedlungsfläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' verwendet.

Literaturhinweise	<p>Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.</p> <p>BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): 30-ha-Ziel realisiert. Konsequenzen des Szenarios Flächenverbrauchsreduktion auf 30 ha im Jahr 2020 für die Siedlungsentwicklung. Distelkamp, M.; Ulrich, P.; Siedentop, S.; Mohr, K. Forschungen, Bonn, 78 S.</p> <p>Distelkamp, M.; Großmann, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P.; Wolter, M. I. (2009): PANTA RHEI REGIO. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. gws Discussion Paper, 2009/7, Osnabrück.</p> <p>Hilferink, M.; Rietveld, P. (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: Journal of Geographical Systems, 2, S. 155–177.</p> <p>Hoymann, J.; Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland</p>
-------------------	---

– Darstellung eines methodischen Frameworks. In: Raumforschung und Raumordnung, 72, 3, S. 211–225.

BA-2-2017, Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	BA-2-2017
Karte	Abb. 32
Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten
Handlungsfeld	Bauen
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen andere Gebirge als die Alpen nicht hervortreten.
Klimaeinfluss	Sturzflutpotenzial
Quelle(n)	Starkregentage: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Reliefenergie: Digitales Geländemodell des LDBV.
Klimaszenario und Ensembles	Starkregentage: RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Starkregentage: Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050; Reliefenergie: Datenbezug: 2017
Raumbezug / Maßstab	auf Kreisebene normalisierte Werte des Sturzflutpotenzials (Eingangsdaten Sturzflutpotenzial: siehe Klimawirkung WW-2-2017)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr Standardabweichung Steigung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Das Sturzflutpotenzial ergibt sich durch die multiplikative Verknüpfung von Starkregentagen und der Reliefenergie (siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017)) (beides normalisiert). Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Sturzflutpotenzial; null: geringstes Sturzflutpotenzial). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor. Siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017). Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimetern. Die Reliefenergie ergibt sich aus der Standardabweichung der Steigung des jeweiligen Kreises.
Sensitivität	Siedlungsfläche und Bevölkerung
Quelle(n)	Bevölkerungszahlen Gegenwart: Bayerisches Landesamt für Statistik Bevölkerungszahlen Zukunft: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor- schung mbH Siedlungsfläche (CC-LandStraD): Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumfor- schung
Zeitbezug	Bevölkerungsdichte: 2009 und 2030 Siedlungsfläche: 2009 und 2030
Raumbezug / Maßstab	Bevölkerungsdichte: Kreisebene Siedlungsfläche: 100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Siedlungsfläche pro Kreis: 11,05 bis 175,64 km ² Bevölkerungsdichte pro Kreis: 60,65 bis 4279,87 EW/km ²
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte pro Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste Siedlungsfläche/Bevölkerungsdichte; null: geringste Siedlungsfläche/Bevölkerungsdichte). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Siedlungsfläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau. BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): 30-ha-Ziel realisiert. Konsequenzen des Szenarios Flächenverbrauchsreduktion auf 30 ha im Jahr 2020 für die Siedlungsentwicklung. Distelkamp, M.; Ulrich, P.; Siedentop, S.; Mohr, K. Forschungen, Bonn, 78 S. Distelkamp, M.; Großmann, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P.; Wolter, M. I. (2009): PANTA RHEI REGIO. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. gws Discussion Paper, 2009/7, Osnabrück. Hilferink, M.; Rietveld, P. (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: Journal of Geographical Systems, 2, S. 155–177. Hoymann, J.; Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks. In: Raumforschung und Raumordnung, 72, 3, S. 211–225.

BA-3-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	BA-3-2017
Karte	Abb. 33
Klimawirkung	Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln
Handlungsfeld	Bauen
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln durch die Verknüpfung der Anzahl Heißer Tage und Tropennächte mit dem Wärmeinseleffekt-Potenzial in den Kreisen
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	-
Klimaeinfluss	Heiße Tage und Tropennächte
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr Tropennächte: 0 bis 2,01 Nächte im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage bzw. höchste Anzahl an Tropennächten; null: geringste Anzahl Heißer Tage bzw. geringste Anzahl an Tropennächten). Additive Verknüpfung von Heißen Tagen und Tropennächten (beides normalisiert). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius. Tropennächte: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 Grad Celsius.
Sensitivität	Wärmeinseleffekt-Potenzial
Quelle(n)	Bevölkerungszahlen Gegenwart: Bayerisches Landesamt für Statistik Bevölkerungszahlen Zukunft: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung mbH Versiegelte Fläche (CC-LandStraD): Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung

Zeitbezug	Bevölkerungszahlen: 2009 und 2030 Versiegelte Fläche: 2009 und 2030
Raumbezug / Maßstab	Statistische Daten: Kreisebene Versiegelte Fläche: 100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil versiegelter Fläche am Kreis: 3,35 bis 61,69 Prozent Bevölkerung pro Kreis: 34.780 bis 1.330.440 Wärmeineleffekt-Potenzial: 0,15 bis 3,98
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Modifizierte Berechnung des Urban Heat Island (UHI)-Index nach (UBA 2015b) (Früh et al. 2011; Wienert et al. 2013) in Abstimmung mit dem DWD): $UHI_max = 2,01 * [\log(\text{Einwohnerzahl}) / \log(10)] - 4,06$ und anschließend $UHI_potenzial = 0,784 * UHI_max * (\text{Anteil versiegelter Fläche})$ Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Wärmeineleffekt-Potenzial; null: geringstes Wärmeineleffekt-Potenzial). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die versiegelte Fläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau. Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M.; Mieskes, I. et al. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 1, 167–184 S. Wienert, U.; Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. In: Meteorologische Zeitschrift, 22, 2, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0397, 179–185 S.

BA-4-2017, Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	BA-4-2017
Karte	Abb. 34
Klimawirkung	Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen
Handlungsfeld	Bauen
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen durch die Verknüpfung der Anzahl Heißer Tage und Tropennächte mit der Anzahl hitzeempfindlicher Einrichtungen und dem Wärmeineffekt-Potenzial in den Kreisen
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	-
Klimaeinfluss	Heiße Tage und Tropennächte
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr Tropennächte: 0 bis 2,01 Nächte im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage/ höchste Anzahl an Tropennächten; null: geringste Anzahl Heißer Tage/ geringste Anzahl an Tropennächten). Additive Verknüpfung von Heißen Tagen und Tropennächten (beides normalisiert). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius. Tropennächte: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 Grad Celsius.

Sensitivität	Hitzeempfindliche Einrichtungen und Wärmeinseleffekt-Potenzial
Quelle(n)	Bewohner bzw. Betten in hitzeempfindlichen Einrichtungen (betreute Kinder in Tageseinrichtungen (unter 3 Jahre und 3 bis unter 6 Jahre, 2016), Schüler in Allgemein bildenden Schulen (2015/16), aufgestellte Betten in Krankenhäusern (2015), aufgestellte Betten in Vorsorge- und Reha-Einrichtungen (2015), Pflegebedürftige der Pflegeheime (2015), Bewohner in Einrichtungen für ältere Menschen (2014)) und Bevölkerungszahlen Gegenwart: Bayerisches Landesamt für Statistik Bevölkerungszahlen Zukunft: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung mbH Versiegelte Fläche (CC-LandStraD): Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Bevölkerungszahlen: 2009 und 2030 Versiegelte Fläche: 2009 und 2030 Bewohner/Betten in hitzeempfindlichen Einrichtungen: 2014-2016 (s.o., nur Gegenwart)
Raumbezug / Maßstab	Statistische Daten: Kreisebene Versiegelte Fläche: 100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil versiegelter Fläche am Kreis: 3,35 bis 61,69 Prozent Bevölkerung pro Kreis: 34.780 bis 1.330.440 Bewohner bzw. Betten in hitzeempfindlichen Einrichtungen pro Kreis: 7.606 bis 201.096 Wärmeinseleffekt-Potenzial: 0,15 bis 3,98
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Modifizierte Berechnung des Urban Heat Island (UHI)-Index nach (UBA 2015b) (Früh et al. 2011; Wienert et al. 2013) in Abstimmung mit dem DWD): $UHI_max = 2,01 * [\log(\text{Einwohnerzahl}) / \log(10)] - 4,06$ und anschließend $UHI_potenzial = 0,784 * UHI_max * (\text{Anteil versiegelter Fläche})$ Normalisierung des UHI-Potenzials und der Anzahl der Bewohner bzw. Betten in hitzeempfindlichen Einrichtungen, danach additive Verknüpfung und nochmalige Normalisierung. Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Wärmeinseleffekt-Potenzial bzw. höchste Anzahl Betten bzw. Bewohner; null: geringstes Wärmeinseleffekt-Potenzial bzw. geringste Anzahl Betten bzw. Bewohner). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die versiegelte Fläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau. Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M.; Mieskes, I. et al. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 1, 167–184 S. Wienert, U.; Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. In: Meteorologische Zeitschrift, 22, 2, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0397, 179–185 S.

IG-1-2017, Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	IG-1-2017
Karte	Abb. 35

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Kläranlagen durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Industrie und Gewerbe
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Beeinträchtigung von Kläranlagen durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Kläranlagenflächen verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Kläranlagenflächen (Sensitivität), danach additive Verknüpfung der absoluten überschwemmungsgefährdeten Kläranlagenfläche mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Kläranlagenfläche an der Kreisfläche (zuvor jeweils Normalisierung und danach Normalisierung). Wertebereich absolute überschwemmungsgefährdete Kläranlagenfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 11,35 ha Wertebereich relative überschwemmungsgefährdete Kläranlagenfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,04 Prozent
Bemerkungen	Da weder für die Überschwemmungsflächen noch für die Kläranlagenflächen Projektionen verfügbar sind, wird diese Klimawirkung nur für die Gegenwart dargestellt.

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, wird nur die Gegenwart anhand der Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 abgebildet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Sensitivität	Kläranlagenfläche
Quelle(n)	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25
Zeitbezug	Gegenwart: 2016
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Kläranlagenfläche pro Kreis: 0 bis 112,12 ha Anteil der Kläranlagenfläche am Kreis: 0 bis 0,44 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Kläranlagenfläche und dem Anteil der Kläranlagenfläche am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Kläranlagenfläche; null: geringste absolute/relative Kläranlagenfläche). Da keine Projektionsdaten verfügbar sind, wird nur die Gegenwart abgebildet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Kläranlagenflächen abzubilden, wurden Objekte mit den Attributen 'FKT' = '2610' (Kläranlagenflächen) und 'ZUS' ≠ '2100' (außer Betrieb) aus der Datei 'sie02_f.shp' verwendet.

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau. UBA, Umweltbundesamt (2014): Wasserwirtschaft in Deutschland. Wasserversorgung – Abwasserbeseitigung. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/wawiflyer_uba_de_web.pdf (Abruf am 28.11.2017).
-------------------	--

IG-2-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	IG-2-2017
Karte	Abb. 36

Klimawirkung	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen
Handlungsfeld	Industrie und Gewerbe
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Betriebsanlagen von Industrie und Gewerbe und an öffentlichen Gebäuden durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Industrie- und Gewerbeflächen verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator

Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Flächen für Industrie und Gewerbe (Sensitivität), danach additive Verknüpfung der absoluten überschwemmungsgefährdeten Industrie- und Gewerbeflächen mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Industrie- und Gewerbeflächen an der Kreisfläche (zuvor jeweils Normalisierung und danach Normalisierung). Wertebereich absolute überschwemmungsgefährdete Industrie- und Gewerbefläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 2,72 km ² Wertebereich relative überschwemmungsgefährdete Industrie- und Gewerbefläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,98 Prozent
Bemerkungen	-

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, werden die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die Abbildung der Gegenwart als auch für die der Zukunft verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Sensitivität	Industrie- und Gewerbefläche
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“) 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Industrie- und Gewerbefläche pro Kreis: 2,84 bis 47,76 km ² Anteil der Industrie- und Gewerbefläche am Kreis: 0,46 bis 19,54 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Industrie- und Gewerbefläche und dem Anteil der Industrie- und Gewerbefläche am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Industrie- und Gewerbefläche; null: geringste absolute/relative Industrie- und Gewerbefläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.

Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Industrie- und Gewerbeflächen abzubilden, wird der Layer 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

IG-3-2017, Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	IG-3-2017
Karte	Abb. 37

Klimawirkung	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)
Handlungsfeld	Industrie und Gewerbe
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden in Industrie- und Gewerbegebieten durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen andere Gebirge als die Alpen nicht hervortreten. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim Schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die bei den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen nicht abgebildet werden.

Klimaeinfluss	Sturzflutpotenzial
Quelle(n)	Starkregentage: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Reliefenergie: Digitales Geländemodell des LDBV.
Klimaszenario und Ensembles	Starkregentage: RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Starkregentage: Gegenwart: 1971-2000, Zukunft: 2021-2050; Reliefenergie: Datenbezug: 2017
Raumbezug / Maßstab	auf Kreisebene normalisierte Werte des Sturzflutpotenzials (Eingangsdaten Sturzflutpotenzial: siehe Klimawirkung WW-2-2017)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr Standardabweichung Steigung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung

Skalierung / Berechnungsvorschrift	Das Sturzflutpotenzial ergibt sich durch die multiplikative Verknüpfung von Starkregentagen und der Reliefenergie (siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017)). Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Sturzflutpotenzial; null: geringstes Sturzflutpotenzial). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor. Siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017). Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimeter. Die Reliefenergie ergibt sich aus der Standardabweichung der Steigung des jeweiligen Kreises
Sensitivität	Industrie- und Gewerbeflächen
Quelle(n)	CC-LandStraD: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Gegenwart: 2009, Zukunft: Wachstumsszenario („Referenzszenario“) 2030
Raumbezug / Maßstab	100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Industrie- und Gewerbefläche pro Kreis: 2,84 bis 47,76 km ²
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste absolute Industrie- und Gewerbefläche; null: geringste absolute Industrie- und Gewerbefläche). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Industrie- und Gewerbeflächen abzubilden, wird der Layer 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' verwendet.
Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

IG-4-2017, Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	IG-4-2017
Karte	Abb. 38

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Industrie und Gewerbe
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an der Infrastruktur des Landverkehrs durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit den Verkehrsflächen des Landverkehrs verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Verkehrsflächen des Landverkehrs (Sensitivität), danach additive Verknüpfung der absoluten überschwemmungsgefährdeten Verkehrsfläche des Landverkehrs mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Verkehrsfläche des Landverkehrs an der Kreisfläche (zuvor jeweils Normalisierung und danach Normalisierung). Wertebereich absolute überschwemmungsgefährdete Verkehrsfläche des Landverkehrs pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,71 km ² Wertebereich relative überschwemmungsgefährdete Verkehrsfläche des Landverkehrs pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,15 Prozent
Bemerkungen	Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim Schwachen und Starken Wandel sind durch marginale Veränderungen (Abnahme) der Sensitivität (Verkehrsfläche) infolge der Anpassung der Datensätze für die Zukunft entstanden (beispielsweise Rückbau von Abschnitten bei Straßenverlegungen), die jedoch vom Ausmaß her völlig unbedeutend sind.

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, werden die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die

	Abbildung der Gegenwart als auch für die der Zukunft verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-
Sensitivität	Landverkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	Landverkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25 Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Zeitbezug	Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (schwacher Wandel), ca. 2025 (starker Wandel); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel) Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)
Raumbezug / Maßstab	Landverkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf) Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf) Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Landverkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 10,49 km ² Anteil der Landverkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 3,38 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Landverkehrsinfrastrukturfläche und dem Anteil der Landverkehrsinfrastrukturfläche am Kreis (beides normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Landverkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Landverkehrsinfrastrukturfläche). Die Landverkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen. Für die Zukunft werden beim "Schwachen Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Starken Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	<p>Um die Landverkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_l.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnachsen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_l.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen.</p> <p>Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.</p> <p>Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.</p>
Literaturhinweise	<p>Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.</p> <p>OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).</p>

IG-5-2017, Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	IG-5-2017
Karte	Abb. 39
Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten
Handlungsfeld	Industrie und Gewerbe
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an der Infrastruktur des Landverkehrs durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen andere Gebirge als die Alpen nicht hervortreten. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim Schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die bei den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen nicht abgebildet werden.
Klimaeinfluss	Sturzflutpotenzial
Quelle(n)	Starkregentage: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Reliefenergie: Digitales Geländemodell des LDBV.
Klimaszenario und Ensembles	Starkregentage: RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Starkregentage: Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050; Reliefenergie: Datenbezug: 2017
Raumbezug / Maßstab	auf Kreisebene normalisierte Werte des Sturzflutpotenzials (Eingangsdaten Sturzflutpotenzial: siehe Klimawirkung WW-2-2017)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr Standardabweichung Steigung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Das Sturzflutpotenzial ergibt sich durch die multiplikative Verknüpfung von Starkregentagen und der Reliefenergie (beides normalisiert, siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017)). Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Sturzflutpotenzial; null: geringstes Sturzflutpotenzial). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	<p>Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor. Siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017).</p> <p>Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimeter. Die Reliefenergie ergibt sich aus der Standardabweichung der Steigung des jeweiligen Kreises.</p>
Sensitivität	Landverkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	<p>Landverkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25</p> <p>Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr</p> <p>Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur</p>
Zeitbezug	<p>Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (schwacher Wandel), ca. 2025 (starker Wandel); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)</p> <p>Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)</p>
Raumbezug / Maßstab	<p>Landverkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf)</p> <p>Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf)</p> <p>Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet</p>
Wertebereich (vor Normalisierung)	<p>Absolute Landverkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 10,49 km²</p> <p>Anteil der Landverkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 3,38 Prozent</p>
Skalierung / Berechnungsvorschrift	<p>Additive Verknüpfung der absoluten Landverkehrsinfrastrukturfläche und dem Anteil der Landverkehrsinfrastrukturfläche am Kreis (beides normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Landverkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Landverkehrsinfrastrukturfläche). Die Landverkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen.</p> <p>Für die Zukunft werden beim "Schwachen Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Starken Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.</p>
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	<p>Um die Landverkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_l.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnachsen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_l.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen.</p> <p>Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.</p> <p>Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.</p>
Literaturhinweise	<p>Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.</p> <p>OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).</p>

EW-1-2017, Potenzieller Heizenergiebedarf

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	EW-1-2017
Karte	Abb. 40

Klimawirkung	Potenzieller Heizenergiebedarf
Handlungsfeld	Energiewirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt den potenziellen Heizenergiebedarf durch die Verknüpfung von Siedlungsfläche und Bevölkerung mit den Heiztagen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Der Heizenergiebedarf kann trotz abnehmender Heiztage in der Zukunft bei entsprechendem Bevölkerungs-/Siedlungswachstum zunehmen. Durch die relativ breiten Klassengrenzen bei der Sensitivität kann die Sensitivität eines Kreises trotz tatsächlichem Bevölkerungs-/Siedlungswachstum bzw. -rückgang in der Zukunft in derselben Farbe dargestellt sein.

Klimaeinfluss	Heiztage
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiztage: 236,67 bis 323,54 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heiztage; null: geringste Anzahl Heiztage). Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiztage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmitteltemperatur unter 15 Grad Celsius.

Sensitivität	Siedlungsfläche und Bevölkerung
Quelle(n)	Bevölkerungszahlen Gegenwart: Bayerisches Landesamt für Statistik Bevölkerungszahlen Zukunft: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor- schung mbH Siedlungsfläche (CC-LandStraD): Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Bevölkerungsdichte: 2009 und 2030 Siedlungsfläche: 2009 und 2030

Raumbezug / Maßstab	Bevölkerungsdichte: Kreisebene Siedlungsfläche: 100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Siedlungsfläche pro Kreis: 11,05 bis 175,64 km ² Bevölkerungsdichte pro Kreis: 60,65 bis 4279,87 EW/km ²
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte pro Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste Siedlungsfläche/Bevölkerungsdichte; null: geringste Siedlungsfläche/Bevölkerungsdichte). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Siedlungsfläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete' und 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude' verwendet.

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

EW-2-2017, Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	EW-2-2017
Karte	Abb. 41

Klimawirkung	Potenzieller Kühlenergiebedarf anhand der Kühlgradtage
Handlungsfeld	Energiewirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt den potenziellen Kühlenergiebedarf auf Grundlage der Kühlstage.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	siehe Klimaeinfluss
Bemerkungen	Aufgrund der fehlenden Daten zur räumlichen Verbreitung von Raumklimageräten (auch in der Zukunft) kann die Sensitivität nicht abgebildet werden und der potenzielle Kühlenergiebedarf wird lediglich anhand des Klimaeinfluss analysiert (Buth et al. 2015).

Klimaeinfluss	Kühlgradtage
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Kühlgradtage: 10,31 bis 68,21 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Kühltag; null: geringste Anzahl Kühltag). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Kühltag: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmitteltemperatur über 18,3 Grad Celsius.

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

EW-3-2017, Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	EW-3-2017
Karte	Abb. 42

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Energiewirtschaft
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit den Standorten von Kraftwerken verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Kraftwerksflächen/-standorten (Sensitivität). Biomasseanlagen und Windenergieanlagen gelten als betroffen, wenn der Standort/Punkt im Überschwemmungsgebiet liegt. Fossile Kraftwerke gelten als betroffen, wenn im Bereich von 100 Metern um den Punkt/Standort des Kraftwerks ein Überschwemmungsgebiet liegt (es handelt sich in aller Regel um sehr große Kraftwerkskomplexe, für die ein Punkt nicht repräsentativ ist). Danach Aufsummieren der betroffenen Kraftwerksleistungen pro Kreis mit anschließender Normalisierung (eins: höchste betroffene Kraftwerksleistung; null: geringste betroffene Kraftwerksleistung).

Bemerkungen	Die Klimawirkungskarten zeigen nur sehr vereinzelte betroffene Kreise, da nur ein Bruchteil der in die Analyse einbezogenen Kraftwerke im Bereich von Überschwemmungsgebieten liegt. Zu beachten ist, dass Kraftwerke, die in der Analyse als betroffen identifiziert wurden, nicht zwangsläufig (in größerem Umfang) gefährdet sein müssen, da insbesondere bei größeren Grundstücken die Kraftwerksbestandteile des Komplexes unterschiedlich sensitiv sein können.
-------------	---

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, werden die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die Abbildung der Gegenwart als auch für die der Zukunft verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Sensitivität	Gesamt-Netto-Nennleistung der Kraftwerke
Quelle(n)	Windenergieanlagen, Biomasseanlagen: Energie-Atlas Bayern (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie) Fossile Anlagen (inklusive Atomkraft): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur, Kraftwerksliste Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2016 bis 2019
Zeitbezug	Energie-Atlas Bayern: 2016 (alle Anlagen, die 2016 in Betrieb waren, nur Gegenwart) Bundesnetzagentur: 2016 (Gegenwart) und 2019 (Zukunft)
Raumbezug / Maßstab	Energie-Atlas Bayern: Georeferenzierte Vektordaten der Kraftwerksstandorte Bundesnetzagentur: Tabelle der Kraftwerksstandorte, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Installierte Gesamt-Netto-Nennleistung der Kraftwerke je Kreis: 0 bis 2579,20 MW

Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste installierte Kraftwerksleistung; null: geringste installierte Kraftwerksleistung). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet, indem die Zu- und Rückbauten der Kraftwerke aus der Liste der Bundesnetzagentur entsprechend berücksichtigt wurden.
Schwellenwerte	Es werden nur Kraftwerke in die Analyse einbezogen, die eine Leistung von über 2 MW aufweisen.
Bemerkungen	<p>In der Analyse wurden unter den konventionellen Kraftwerken nur die in der Liste der Bundesnetzagentur aufgeführten berücksichtigt, welche jedoch den Großteil der installierten Leistung der konventionellen Kraftwerke in Bayern abdecken (etwa 94%). Dadurch wurden ca. 2% der installierten Gesamtleistung des Kraftwerksparks in Bayern nicht berücksichtigt. Eine Einbeziehung (meist kleinerer) konventioneller Kraftwerke aus dem Bayerischen Energieatlas war kurzfristig nicht möglich, da hier andere Leistungsangaben verwendet werden, die aufwändig umgerechnet werden müssten. Windenergieanlagen und Biomasseanlagen wurden ab einer Leistung von über 2 MW berücksichtigt, wodurch weitere 5% der installierten Gesamtleistung des Kraftwerksparks in Bayern nicht in der Analyse berücksichtigt wurden. Dies war nötig, um die Anzahl der zu betrachteten Anlagen zu reduzieren (manuelle Prüfungen der Lage von Kraftwerksstandorten).</p> <p>Wasserkraftanlagen werden in der Analyse nicht betrachtet, da sie im Rahmen anderer Projekte genauer betrachtet werden und die Gefahren weniger von der Wassermenge als vielmehr von Treibgut ausgehen. Photovoltaik-Anlagen wurden nicht in der Analyse berücksichtigt, da diese ohnehin nicht in Überschwemmungsgebieten gebaut werden dürfen. Bei den Sensitivitätskarten stehen vor allem Kreise mit größeren Kraftwerksblöcken hervor.</p>
Literaturhinweise	<p>Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.</p> <p>Kuhlmann, A. (2014): Entwicklung des Kraftwerksparks in Deutschland und Bayern. Energiedialog Bayern. BDEW, München.</p> <p>Bundesnetzagentur (2016a): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen) Stand 16.11.2016. www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_In (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>Bundesnetzagentur (2016b): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2016 bis 2019 Stand 16.11.2016. www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html (Abruf am 28.11.2017).</p> <p>UBA, Umweltbundesamt (2016b): Kraftwerksleistung in Deutschland. Installierte Kraftwerksleistung in Deutschland 2015 nach Energieträgern.</p>

TO-1-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	TO-1-2017
Karte	Abb. 43
Klimawirkung	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Tourismus
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Beeinträchtigung des Tourismus durch Flusshochwasser, indem die Überschwemmungsflächen der Kreise mit den Gästeübernachtungen der Kreise verknüpft werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Es wurde keine geografische Verschneidung zwischen den Überschwemmungsflächen und touristischen Anlagen (Hotels, Sehenswürdigkeiten usw.) durchgeführt. Da weder für die Überschwemmungsflächen noch für die Gästeübernachtungen Projektionen verfügbar sind, wird diese Klimawirkung nur für die Gegenwart dargestellt.
Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, wird nur die Gegenwart anhand der Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 abgebildet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-
Sensitivität	Anzahl der Gästeübernachtungen
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Statistik, Gästeübernachtungen 2016

Zeitbezug	Gegenwart: 2016
Raumbezug / Maßstab	Kreis
Wertebereich (vor Normalisierung)	Gästeübernachtungen: 76.378 bis 14.027.106 Übernachtungen
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis; null: geringste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis). Da keine Projektionsdaten verfügbar sind, wird nur die Gegenwart abgebildet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

TO-2-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	TO-2-2017
Karte	Abb. 44

Klimawirkung	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten
Handlungsfeld	Tourismus
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenzielle Beeinträchtigung des Tourismus durch Sturzfluten, indem das Sturzflutpotenzial der Kreise mit den Gästeübernachtungen der Kreise gegenübergestellt wird.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen andere Gebirge als die Alpen nicht hervortreten.

Klimaeinfluss	Sturzflutpotenzial
Quelle(n)	Starkregentage: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Reliefenergie: Digitales Geländemodell des LDBV.
Klimaszenario und Ensembles	Starkregentage: RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Starkregentage: Gegenwart: 1971-2000, Zukunft: 2021-2050 Reliefenergie: Datenbezug: 2017

Raumbezug / Maßstab	auf Kreisebene normalisierte Werte des Sturzflutpotenzials (Eingangsdaten Sturzflutpotenzial: siehe Klimawirkung WW-2-2017)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr Standardabweichung Steigung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Das Sturzflutpotenzial ergibt sich durch die multiplikative Verknüpfung von Starkregentagen und der Reliefenergie (beide normalisiert siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017)). Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Sturzflutpotenzial; null: geringstes Sturzflutpotenzial). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor. Siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017). Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimetern. Die Reliefenergie ergibt sich aus der Standardabweichung der Steigung des jeweiligen Kreises.

Sensitivität	Anzahl der Gästeübernachtungen
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Statistik, Gästeübernachtungen 2016
Zeitbezug	Gegenwart: 2016
Raumbezug / Maßstab	Kreis
Wertebereich (vor Normalisierung)	Gästeübernachtungen: 76.378 bis 14.027.106 Übernachtungen
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis; null: geringste Anzahl an Gästeübernachtungen im Kreis). Die Gästeübernachtungen der Gegenwart werden auch für die Abbildung der Zukunft verwendet (keine Projektionsdaten verfügbar).
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.
-------------------	--

TO-3-2017, Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	TO-3-2017
Karte	Abb. 45
Klimawirkung	Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze
Handlungsfeld	Tourismus
Kurzbeschreibung	Betrachtet wird die potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze, indem die Hitzebelastung (Klimaeinfluss) und die Anzahl der Kurorte pro Kreis einander gegenüber gestellt werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die Klimawirkung ist angelehnt an den Indikator "TOU-I-1: Wärmebelastung in heilklimatischen Kurorten" des Monitoringberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
Klimaeinfluss	Heiße Tage und Tropennächte
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr Tropennächte: 0 bis 2,01 Nächte im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage bzw. höchste Anzahl an Tropennächten; null: geringste Anzahl Heißer Tage bzw. geringste Anzahl an Tropennächten). Additive Verknüpfung von Heißen Tagen und Tropennächten (beides normalisiert). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius. Tropennächte: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 Grad Celsius.
Sensitivität	Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte
Quelle(n)	Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, Amtliches Verzeichnis der anerkannten Kurorte, Luftkurorte, und Erholungsorte in Bayern Stand 9. Februar 2017

Zeitbezug	Gegenwart: 2017
Raumbezug / Maßstab	Liste der Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte für jeden Kreis
Wertebereich (vor Normalisierung)	Kurorte, Luftkurorte, Erholungsorte: 0 bis 22 Orte
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl an Kurorten, Luftkurorten und Erholungsorten im Kreis; null: geringste Anzahl an Kurorten, Luftkurorten und Erholungsorten im Kreis). Die Kurorte, Luftkurorte und Erholungsorte der Gegenwart werden auch für die Abbildung der Zukunft verwendet (keine Projektionsdaten verfügbar).
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	-

Literaturhinweise	Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau. UBA, Umweltbundesamt (2015b): Wärmebelastung in heilklimatischen Kurorten. www.umweltbundesamt.de/tou-i-3-das-indikator (Abruf am 28.11.2017).
-------------------	--

GE-1-2017, Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	GE-1-2017
Karte	Abb. 46

Klimawirkung	Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre
Handlungsfeld	Gesundheit
Kurzbeschreibung	Betrachtet werden potenzielle negative Auswirkungen von Hitze auf die Bevölkerung (zum Beispiel Herz-Kreislauf, Leistungsfähigkeit, Hitzetote), indem die Hitzebelastung (Klimaeinfluss) und die sensitiven Bevölkerungsgruppe der über 60jährigen verknüpft werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	-

Klimaeinfluss	Heiße Tage und Tropennächte
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050

Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr Tropennächte: 0 bis 2,01 Nächte im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage bzw. höchste Anzahl an Tropennächten; null: geringste Anzahl Heißer Tage bzw. geringste Anzahl an Tropennächten). Additive Verknüpfung von Heißen Tagen und Tropennächten (beides normalisiert). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius. Tropennächte: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturminimum > 20 Grad Celsius.

Sensitivität	Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre und Wärmeinseleffekt-Potenzial
Quelle(n)	Bevölkerungszahlen und Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre Gegenwart: Bayerisches Landesamt für Statistik Bevölkerungszahlen Zukunft: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung mbH Anteil der Bevölkerung über 60 Jahre Zukunft: Raumordnungsprognose, Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung Versiegelte Fläche (CC-LandStraD): Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
Zeitbezug	Bevölkerungszahlen: 2009 und 2030 Versiegelte Fläche: 2009 und 2030
Raumbezug / Maßstab	Statistische Daten: Kreisebene Versiegelte Fläche: 100 Meter x 100 Meter Rasterdaten (CC-LandStraD), auf Kreisebene hochgerechnet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Anteil versiegelter Fläche am Kreis: 3,35 bis 61,69 Prozent Bevölkerung pro Kreis: 34.780 bis 1.330.440 Anteil Bewohner über 60 Jahre: 19,80 bis 43,69 Prozent Wärmeinseleffekt-Potenzial: 0,15 bis 3,98
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Modifizierte Berechnung des Urban Heat Island (UHI)-Index nach (UBA 2015b) (Früh et al. 2011; Wienert et al. 2013) in Abstimmung mit dem DWD): $UHI_max = 2,01 * [\log(\text{Einwohnerzahl}) / \log(10)] - 4,06$ und anschließend $UHI_potenzial = 0,784 * UHI_max * (\text{Anteil versiegelter Fläche})$ Normalisierung des UHI-Potenzials und des Anteils der Bevölkerung über 60 Jahre, danach additive Verknüpfung und nochmalige Normalisierung. Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Wärmeinseleffekt-Potenzial/höchster Anteil Bewohner über 60 Jahre; null: geringstes Wärmeinseleffekt-Potenzial/geringster Anteil Bewohner über 60 Jahre). Für die Zukunft wird nur ein Szenario sowohl für den schwachen als auch für den starken Wandel verwendet.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die versiegelte Fläche abzubilden, werden die Layer 'Bebaute Gebiete', 'Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude', 'Verkehrsflächen', 'Abbauflächen' und 'Brachen' verwendet. Als hitzeempfindliche Bevölkerung wird die Be-

völkerung ab einem Alter von 60 Jahren mit dem Urban Heat Island-Index kombiniert.

Literaturhinweise	<p>Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.</p> <p>Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M.; Mieskes, I. et al. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 1, 167–184 S.</p> <p>Wienert, U.; Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. In: Meteorologische Zeitschrift, 22, 2, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0397, 179–185 S.</p>
-------------------	--

VE-1-2017, Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer VE-1-2017

Karte Abb. 47

Klimawirkung	Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur
Handlungsfeld	Straßenbau und Verkehr
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch die Verknüpfung der Anzahl Heißer Tage mit der Verkehrsinfrastrukturfläche in den Kreisen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Der Schwerpunkt der Klimawirkung nördlich Münchens ist insbesondere durch den Flughafen München und die daran angeschlossene Infrastruktur zu erklären.

Klimaeinfluss	Heiße Tage
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971-2000, Zukunft: 2021-2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert

Wertebereich (vor Normalisierung)	Heiße Tage: 0,45 bis 18,28 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Heißer Tage; null: geringste Anzahl Heißer Tage). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Heiße Tage: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 Grad Celsius.

Sensitivität	Verkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25 Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Zeitbezug	Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (schwacher Wandel), ca. 2025 (starker Wandel); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel) Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)
Raumbezug / Maßstab	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf) Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf) Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Verkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 11,96 km ² Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 4,63 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der normalisierten absoluten Verkehrsinfrastrukturfläche und dem normalisierten Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche). Die Verkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen. Für die Zukunft werden beim "Schwachen Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Starken Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Verkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_1.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnach-

sen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_l.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen. Des Weiteren werden alle Flughäfen aus der Datei 'ver04_f' in der Analyse berücksichtigt, die eine zivile Nutzung (NTZ = '1000') aufweisen und eine regionale oder internationale Bedeutung haben (ART = '5511' oder ART = '5512'). Nicht berücksichtigt wird jedoch (wie auch in der Studie des Umweltbundesamtes) der Sonderflughafen Oberpfaffenhofen.

Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.

Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.

Literaturhinweise

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).

VE-2-2017, Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	VE-2-2017
Karte	Abb. 48
Klimawirkung	Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur
Handlungsfeld	Straßenbau und Verkehr
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch die Verknüpfung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost mit der Verkehrsinfrastrukturfläche in den Kreisen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Der Schwerpunkt der Klimawirkung nördlich Münchens ist insbesondere durch den Flughafen München und die daran angeschlossene Infrastruktur zu erklären.
Klimaeinfluss	Tage mit Wechselfrost (0°C)
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Gegenwart: 1971–2000, Zukunft: 2021–2050
Raumbezug / Maßstab	ca. 12,5 Kilometer x 12,5 Kilometer, Rasterdaten, auf Kreisebene normalisiert
Wertebereich (vor Normalisierung)	Tage mit Wechselfrost (0°C): 48,75 bis 116,95 Tage im Jahr
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchste Anzahl Tage mit Wechselfrost (0°C); null: geringste Anzahl Tage mit Wechselfrost (0°C)). Das 15. Perzentil repräsentiert den starken Wandel, das 85. Perzentil den schwachen Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Tage mit Wechselfrost (0°C): mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmaximaltemperatur über 0 Grad Celsius und gleichzeitiger Tagesminimaltemperatur von kleiner als 0 Grad Celsius.
Sensitivität	Verkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25 Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Zeitbezug	Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (hier dargestellt im "Starken Wandel"), ca. 2025 (hier dargestellt im "Schwachen Wandel"); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (hier dargestellt im "Starken Wandel"), ca. 2030 (hier dargestellt im "Schwachen Wandel") Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (hier dargestellt im "Starken Wandel"), ca. 2030 (hier dargestellt im "Schwachen Wandel")
Raumbezug / Maßstab	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf) Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf) Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Verkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 11,96 km ² Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 4,63 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der normalisierten absoluten Verkehrsinfrastrukturfläche und dem normalisierten Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche). Die Verkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen. Für die Zukunft werden beim "Starken Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Schwachen Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	Da die größeren Klimawirkungsveränderungen bei der Szenariokombination, in der das 15. Perzentil des Wechselfrosts zusammen mit der "geringeren" Sensitivität (Szenario mit weniger Ausbauvorhaben) kombiniert wird, eintreten, wird diese als "Starker Wandel" bezeichnet. Im "Starken Wandel" sind bei dieser Klimawirkung daher die weniger stark ausgeprägte Sensitivitäten eingegangen, im "Schwachen Wandel" hingegen das Sensitivitäts-Szenario mit den meisten Ausbauvorhaben. Um die Verkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_l.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnachsen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_l.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für
-------------	---

zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen. Des Weiteren werden alle Flughäfen aus der Datei 'ver04_f' in der Analyse berücksichtigt, die eine zivile Nutzung (NTZ = '1000') aufweisen und eine regionale oder internationale Bedeutung haben (ART = '5511' oder ART = '5512'). Nicht berücksichtigt wird jedoch (wie auch in der Studie des Umweltbundesamtes) der Sonderflughafen Oberpfaffenhofen.

Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.

Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.

Literaturhinweise

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).

VE-3-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	VE-3-2017
Karte	Abb. 49

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser
Handlungsfeld	Straßenbau und Verkehr
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser, indem potenzielle Überschwemmungsflächen mit Verkehrsinfrastrukturflächen verschnitten werden.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Zunächst geografische Verschneidung von potenziellen Überschwemmungsflächen (hier: Klimaeinfluss) und den Verkehrsflächen (Sensitivität), danach additive Verknüpfung der absoluten überschwemmungsgefährdeten Verkehrsfläche mit dem Anteil der überschwemmungsgefährdeten Verkehrsfläche an der Kreisfläche (zuvor jeweils Normalisierung und danach Normalisierung). Wertebereich absolute überschwemmungsgefährdete Verkehrsfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,71 km ² Wertebereich relative überschwemmungsgefährdete Verkehrsfläche pro Kreis (vor Normalisierung): 0 bis 0,15 Prozent
Bemerkungen	Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim Schwachen und Starken Wandel sind durch marginale Veränderungen (Abnahme) der Sensitivität (Verkehrsfläche) infolge der Anpassung der Datensätze für die Zukunft entstanden (beispielsweise Rückbau von Abschnitten bei Straßenverlegungen), die jedoch vom Ausmaß her völlig unbedeutend sind.

Klimaeinfluss	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser bei HQ100
Quelle(n)	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimaszenario und Ensembles	-
Zeitbezug	Gegenwart: 2016 (Publikation)
Raumbezug / Maßstab	Georeferenzierte Vektordaten der Hochwassergefahrenkarten für HQ100 (1:10.000)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute potenzielle Überschwemmungsfläche pro Kreis: 0 bis 132,22 km ² Anteil potenzieller Überschwemmungsfläche am Kreis: 0 bis 19,16 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten und der relativen Überschwemmungsflächen pro Kreis (beides normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Überschwemmungsfläche; null: geringste absolute/relative Überschwemmungsfläche). Da Projektionsdaten zu Hochwassergefahrenflächen derzeit nicht verfügbar sind, werden die Überschwemmungsflächen zum Stand 2016 sowohl für die Abbildung der Gegenwart als auch für die der Zukunft verwendet.
Schwellenwerte	-

Bemerkungen	-
Sensitivität	Verkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25 Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Zeitbezug	Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (schwacher Wandel), ca. 2025 (starker Wandel); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel) Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)
Raumbezug / Maßstab	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf) Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf) Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Verkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 11,96 km ² Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 4,63 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Verkehrsinfrastrukturfläche und dem Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis (beides normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche). Die Verkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen. Für die Zukunft werden beim "Schwachen Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Starken Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Verkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_l.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnachsen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_l.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der

Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe) mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen. Des Weiteren werden alle Flughäfen aus der Datei 'ver04_f' in der Analyse berücksichtigt, die eine zivile Nutzung (NTZ = '1000') aufweisen und eine regionale oder internationale Bedeutung haben (ART = '5511' oder ART = '5512'). Nicht berücksichtigt wird jedoch (wie auch in der Studie des Umweltbundesamtes) der Sonderflughafen Oberpfaffenhofen.

Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.

Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.

Literaturhinweise

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).

VE-4-2017, Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten

Klimawirkung-Kennblatt-Nummer	VE-4-2017
Karte	Abb. 50

Klimawirkung	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten
Handlungsfeld	Straßenbau und Verkehr
Kurzbeschreibung	Die Klimawirkung beschreibt die potenziellen Schäden an der Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.
Analysemethode	Proxyindikator
Berechnung der Klimawirkung	Multiplikative Verknüpfung von Klimaeinfluss und Sensitivität (beides normalisiert)
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage als Teil des Sturzflutpotenzials beeinflusst, weswegen andere Gebirge als die Alpen nicht hervortreten. Die leichten Abnahmen der Klimawirkung beim Schwachen Wandel sind durch geringe Abnahmen des Sturzflutpotenzials zu erklären (Abnahme der Starkregentage im 15. Perzentil), die bei den Karten des Klimaeinflusses aufgrund der (zu groben) Klassengrenzen nicht abgebildet werden.

Klimaeinfluss	Sturzflutpotenzial
Quelle(n)	Starkregentage: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Reliefenergie: Digitales Geländemodell des LDBV.
Klimaszenario und Ensembles	Starkregentage: RCP8.5; Ensemble aus 13 Modellläufen
Zeitbezug	Starkregentage: Gegenwart: 1971-2000, Zukunft: 2021-2050; Reliefenergie: Datenbezug: 2017
Raumbezug / Maßstab	auf Kreisebene normalisierte Werte des Sturzflutpotenzials (Eingangsdaten Sturzflutpotenzial: siehe Klimawirkung WW-2-2017)
Wertebereich (vor Normalisierung)	Starkregentage: 1,21 bis 18,51 Tage im Jahr Standardabweichung Steigung: 4,68 bis 56,17 Prozent Steigung
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Das Sturzflutpotenzial ergibt sich durch die multiplikative Verknüpfung von Starkregentagen und der Reliefenergie (siehe Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017)). Normalisierung zwischen null und eins (eins: höchstes Sturzflutpotenzial; null: geringstes Sturzflutpotenzial). Das 15. Perzentil repräsentiert den schwachen Wandel, das 85. Perzentil den starken Wandel.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Die räumlichen Muster werden insbesondere von der Definition der Starkregentage beeinflusst. Deswegen stechen die Alpen im Gegensatz zu anderen Gebirgen hervor. Siehe auch Klimawirkung Sturzflutpotenzial (WW-2-2017). Starkregentage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 Millimetern. Die Reliefenergie ergibt sich aus der Standardabweichung der Steigung des jeweiligen Kreises.

Sensitivität	Verkehrsinfrastrukturfläche
Quelle(n)	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Basis-DLM25 Ausbauvorhaben Straßen: Oberste Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr Ausbauvorhaben Schiene: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Zeitbezug	Gegenwart: 2016, Zukunft: Ausbauvorhaben Straßen: Staatsstraßen: ca. 2020 (schwacher Wandel), ca. 2025 (starker Wandel); Bundesstraßen und -autobahnen: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel) Ausbauvorhaben Schiene: in der Regel deutlich vor 2030 (schwacher Wandel), ca. 2030 (starker Wandel)
Raumbezug / Maßstab	Verkehrsinfrastrukturfläche Gegenwart: Georeferenzierte Vektordaten (grundstücksscharf) Ausbauvorhaben Straße: Georeferenzierte Vektordaten (geplanter Trassenverlauf) Ausbauvorhaben Schiene: PDF der geplanten Trassenverläufe, manuell zu georeferenzierten Vektordaten aufbereitet
Wertebereich (vor Normalisierung)	Absolute Verkehrsinfrastrukturfläche pro Kreis: 0,35 bis 11,96 km ² Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis: 0,21 bis 4,63 Prozent
Skalierung / Berechnungsvorschrift	Additive Verknüpfung der absoluten Verkehrsinfrastrukturfläche und dem Anteil der Verkehrsinfrastrukturfläche am Kreis (beides normalisiert) mit anschließender Min./Max.-Normalisierung (eins: höchste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche; null: geringste absolute/relative Verkehrsinfrastrukturfläche). Die Verkehrsinfrastrukturfläche ergibt sich aus den Staatsstraßen, Bundesstraßen, Autobahnen, Flughäfen, Eisenbahnen und größeren Bahnflächen. Für die Zukunft werden beim "Schwachen Wandel" die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB' und '1' (Staatsstraßen) sowie 'FD' und 'VB-E' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt. Für den "Starken Wandel" werden die Ausbauvorhaben der Kategorie '1UEB', '1' und '1R' (Staatsstraßen) sowie 'FD', 'VB-E' und 'VB' (Bundesstraßen, -autobahnen und Eisenbahn) berücksichtigt.
Schwellenwerte	-
Bemerkungen	Um die Verkehrsinfrastrukturfläche für die Gegenwart abzubilden, wurden für die Straßen die Objekte mit 'WDM' = '1301' (Autobahnen), 'WDM' = '1303' (Bundesstraßen) und 'WDM' = '1305' (Staatsstraßen) und BRF > '0' (Breite der Fahrbahn größer 0 Meter) aus der Datei 'ver01_1.shp' verwendet. Durch letzteres werden bei getrennten Richtungsfahrbahnen die Breiten der Fahrbahnachsen, nicht aber die (in der Mitte befindliche) Straßenachse (die keine Breite aufweist) berücksichtigt. Im Bau befindliche Straßen (ZUS = '4000') werden ebenso in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus der in den Daten angegebenen Breite der Fahrbahn (BRF) und der Erstellung eines entsprechenden Puffers. Für die Eisenbahnen wurden alle Objekte, die OBJART = '42014' aufweisen (also ohne Seilbahnen und einzelne Gleise) aus der Datei 'ver03_1.shp' für die Gegenwart verwendet. Ausgeschlossen werden aus der Analyse Straßenbahnen (BKT = '1201'), U-Bahnen (BKT = '1202') und Museumsbahnen (BKT = '1400') sowie solche Strecken, die außer Betrieb sind (ZUS = '2100'). Im Bau befindliche Strecken werden hingegen in der Analyse berücksichtigt. Die Fläche bestimmt sich aus den angegebenen Daten zur Anzahl der Gleise (GLS), wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige eine Breite von 20 Metern angenommen wird. Neben den Linien werden auch größere Bahnverkehrsanlagen (beispielsweise Rangierbahnhöfe)

mit einer Größe über 40ha aus der Datei 'ver06_f.shp' in die Analyse mit aufgenommen. Des Weiteren werden alle Flughäfen aus der Datei 'ver04_f' in der Analyse berücksichtigt, die eine zivile Nutzung (NTZ = '1000') aufweisen und eine regionale oder internationale Bedeutung haben (ART = '5511' oder ART = '5512'). Nicht berücksichtigt wird jedoch (wie auch in der Studie des Umweltbundesamtes) der Sonderflughafen Oberpfaffenhofen.

Bei den Ausbauvorhaben der Staatsstraßen wurden die geplanten Straßenbreiten aus den jeweiligen Projektbeschreibungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr für die Zukunft berücksichtigt. Bei den Ausbauvorhaben für die Bundesstraßen und Autobahnen wurden entsprechende Breiten je nach Ausbauziel angenommen: zweispurig: 8,5 m; vierspurig: 20 m, sechsspurig 30 m; achtspurig 40 m usw. Die Ausbauvorhaben für die Eisenbahn wurden georeferenziert und die zukünftige Anzahl der Gleise aus den einzelnen Projektbeschreibungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entnommen, wobei für eingleisige Strecken eine Breite von 10 Metern, für zweigleisige von 20 Metern usw. angenommen wird.

Die Trassenverläufe der Ausbauvorhaben können sich im weiteren Planungsverlauf noch verändern.

Literaturhinweise

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change, 24/2015, Dessau-Roßlau.

OBB, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2017): 7. Ausbauplan für die Staatsstraßen - Projektauswahl. www.baysis.bayern.de/web/content/ausbauprogramme/ausbauplan/informationssystem/default.aspx (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030. www.bvwp-projekte.de/map_railroad.html (Abruf am 28.11.2017).

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Übersichtskarte Projekte Bedarfsplan Schiene. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/uebersichtskarte-projekte-bedarfsplan-schiene.html (Abruf am 28.11.2017).



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

