CLIMATE CHANGE
08/2020

Siedlungsflächen-projektion 2045

Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 08/2020
Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Forschungskennzahl 3717 48 1020
FB000190/ZW

Siedlungsflächenprojektion 2045

Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021

von

Julian Behmer
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat I 6 – Stadt-, Umwelt- und Raumbeobachtung
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Abschlussdatum:
September 2019

Redaktion:
Fachgebiet 1.6 KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Dr. Inke Schauser

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2020

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

Kurzbeschreibung: Siedlungsflächenprojektion 2045

Im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel wurde für die Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 des Behördennetzwerks Klimawandel und Anpassung drei Landnutzungsprojektion erstellt. Dabei sind hochauflösende Landnutzungsprojektionen mit Schwerpunkt Siedlungsflächenprojektion (Raster von 100x100 m) in Fünf-Jahres-Schritten bis 2045 entstanden. Sie ermöglichen eine kleinräumige Analyse unabhängig von administrativen Grenzen.

Basierend auf den Ergebnissen des PANTA RHEI Regio Modells der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung wurden drei Szenarien (Stabilität, Trend, Dynamik) berechnet. Für die Landnutzung bis zum Jahr 2045 ergibt sich daraus deutschlandweit je nach Szenario eine moderate bis starke Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen, eine leichte Zunahme der Wald- und naturnahen Flächen und eine leichte Abnahme der landwirtschaftlichen Flächen. Je nach Region und Gemeinde unterscheidet sich die projizierte Entwicklung der Landnutzung erheblich. Demnach könnte die Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2045 insbesondere in den Gemeinden im Umland der großen Metropolen deutlich wachsen, während die eigentlichen Metropolen nur ein moderates und die ländlichen Gemeinden in Mittel- und Ostdeutschland nur ein geringes Wachstum verzeichnen würden.

Abstract: Settlement area projection 2045

In the framework of the German Climate Adaptation Strategy and for the “Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021” (climate impact and vulnerability analysis 2021) by the authority network “Klimawandel und Anpassung” (Climate Change and Adaptation), three land use projection were prepared. High resolution land use projections with focus on settlement area projection (grid of 100x100 m) in five-year steps until 2045 were developed which enable a small-scale analysis independent of administrative boundaries.

Based on the results of the PANTA RHEI Regio model of the Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung three scenarios (stability, trend, dynamics) were calculated. Depending on the scenario, this will result in a moderate to strong increase in settlement and transport areas, a slight increase in forest and near-natural areas and a slight decrease in agricultural areas by 2045. Depending on the region and municipality, the projected development of land use differs considerably. Accordingly, the settlement and transport area may grow significantly until 2045, especially in the municipalities in the surrounding areas of large metropolises, while the actual metropolises may show only moderate growth and the rural municipalities in central and eastern Germany may show only slight growth.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 7
Tabellenverzeichnis 7
Abkürzungsverzeichnis 9
Zusammenfassung 10
1 Einleitung 16
2 Konzept und Methode der Landnutzungsmodellierung 19
2.1 Land Use Scanner 19
2.2 Räumliche Ausgangsdaten 21
2.2.1 Aktuelle Landnutzung 21
2.2.2 Physische Faktoren 23
2.2.3 Planerische Festlegungen 24
2.2.4 Erreichbarkeiten 26
2.2.5 Gunstfaktoren und Restriktionen für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung 27
2.3 Entwicklung der regionalen Raumansprüche 28
2.3.1 Siedlungs- und Verkehrsflächen 28
2.3.2 Baustellen 29
2.3.3 Wald- und Forstflächen 30
2.3.4 Naturnahe Flächen und Offenland 31
2.3.5 Landwirtschaftliche Flächen 31
2.3.6 Abbauflächen und Deponien, Feuchtgebiete und Wasser 32
2.3.7 Diskussion: Zusätzliche Landnutzungsklassen 32
3 Ergebnisse 34
3.1 Grenzen der Modellierung des Land Use Scanners 35
3.2 Stabilitätsszenario 38
3.3 Trendszenario 40
3.4 Dynamikszenario 42
3.5 Die Szenarien im Vergleich 44
4 Ausblick 47
5 Quellenverzeichnis 48
A ANHANG 50
A.1 Landnutzungsentwicklung 50
A.2 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Typ und Lage 51
A.3 Landwirtschaftsflächen nach Typ und Lage 52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Funktionsprinzip des Land Use Scanners 20
Abbildung 2 Projektion der Landnutzungsentwicklung 2015 – 2045 (2015 = 100 %) 34
Abbildung 3 Modellierung des LUS für Hamburg: Entwicklung der SuV bis 2045 35
Abbildung 4 Entwicklung der innerstädtischen Grün- und Erholungsflächen im Dynamikszenario bis 2045 in Boltenhagen 36
Abbildung 5 Stabilitätsszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene 39
Abbildung 6 Trendszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene 41
Abbildung 7 Dynamikszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene 43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die 12 modellierten Landnutzungsarten 22
Tabelle 2 Eignungsfaktoren: Physische Gegebenheiten 24
Tabelle 3 Eignungsfaktoren: Restriktionen durch Naturschutz 24
Tabelle 4 Eignungsfaktoren: Restriktionen durch Landesplanung (ROPLAMO) 25
Tabelle 5 Eignungsfaktoren: Erreichbarkeiten und Straßennetz 26
Tabelle 6 Eignungsfaktoren: Gunstfaktoren für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung 27
Tabelle 7 Eignungsfaktoren: Restriktionen für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung 27
Tabelle 8 Zusammenfassung der drei Szenarien von GWS 29
Tabelle 9 Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Lage der Gemeinde in Prozent 44
Tabelle 10 Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Typ der Gemeinde in Prozent 44
Tabelle 11 Veränderung der Landwirtschaftsfläche nach Typ der Gemeinde in Prozent 45
Tabelle 12 Veränderung der Landwirtschaftsfläche nach Lage der Gemeinde in Prozent 45
Tabelle 13 Landnutzung Stabilitätsszenario 2015 – 2045 in km² 50
Tabelle 14 Landnutzung Trendszenario 2015 – 2045 in km² 50
Tabelle 15 Landnutzung Dynamikszenario 2015 – 2045 in km² 51
Tabelle 16 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Stadt- und Gemeindetyp in km² 51
Tabelle 17 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Lage in km² 51

Tabelle 18 Landwirtschaftsfläche nach Stadt- und Gemeindetyp in km² 52
Tabelle 19 Landwirtschaftsflächen nach Lage in km² 52

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin und Bonn
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Ehemaliges Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CC-LandStraD	Climate Change - Land Use Strategies
CLC	CORINE Land Cover
DAS	Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DLM-DE	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (bis 2012), BKG
DWD	Deutscher Wetterdienst
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
GuF	Gebäude- und Freifläche
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
km	Kilometer
LBM-DE	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (seit 2012), BKG
LUS	Land Use Scanner von object vision bv
m	Meter
MW	Megawatt
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Washington DC
PRR	PANTA RHEI Regio, Modell von GWS
ROPLAMO	Raumordnungsplan-Monitor des BBSR
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UN	Vereinte Nationen (engl. United Nations)
USA	Vereinigten Staaten von Amerika (engl. United States of America)
vgl.	vergleiche

Zusammenfassung

Mit der Siedlungsflächenprojektion 2045 wird ein Blick in die Zukunft der Landflächennutzung in Deutschland gewagt. Dazu werden drei Szenarien (Stabilität, Trend, Dynamik) die von der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) auf Kreisebene berechnet worden sind, auf Basis eines Optimierungsmodells, auf ein 100x100m-Raster projiziert. Dabei sind hochauflösende Landnutzungsprojektionen mit Schwerpunkt Siedlungsflächenprojektion in Fünf-Jahres-Schritten bis 2045 entstanden. Sie ermöglichen eine kleinräumige Analyse unabhängig von administrativen Grenzen.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Methodik zur Landnutzungsprojektion des CC-LandStraD-Projekts (01.11.2010 bis 20.04.2016) von Hoymann und Goetzke. Dieses Modell lieferte für das CC-LandStraD-Projekt hochauflösende Landnutzungsprojektionen in 5-Jahresschritten bis zum Jahr 2030 (vgl. Hoymann/Goetzke 2014). Für die Siedlungsflächenprojektion 2045 wird das bestehende Modell aktualisiert und in einigen wichtigen Punkten angepasst. So wird der Zeitrahmen bis zum Jahr 2045 erweitert, die raumstatistischen Ausgangsdaten (Eignungskarten) aktualisiert und der aktuelle Gebietsstand der administrativen Grenzen (401 Kreise) eingepflegt. Drei Szenarien (Stabilität, Trend, Dynamik) des PANTA RHEI Regio Modells der GWS bilden die Grundlage für die Modellierung der regionalen Raumansprüche. Landnutzungskategorien, die nicht vom PANTA RHEI Regio Modell abgedeckt werden, werden im Zuge der vorliegenden Arbeit modelliert.

Die Szenarien des PANTA RHEI Regio Modells unterscheiden sich in fünf wesentlichen Parametern: Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung Bruttoinlandsprodukt, Erreichen von Energiewende- und Klimaschutzzielen, Entwicklung des Verkehrs und Erreichen des Flächenverbrauchziels (30 ha pro Tag). Das Stabilitätsszenario zeichnet sich durch das Erreichen der Klima-, Energiewende- und Flächenziele aus. Im Trendszenario werden die gesteckten Ziele verspätet erreicht, während sie im Dynamikszenario verfehlt werden.

Funktionsweise des Land Use Scanners

Zur Modellberechnung wird auf den Land Use Scanner der Firma object vision bv (Amsterdam) zurückgegriffen. Dem Land Use Scanner liegt ein Optimierungsmodell zugrunde, das basierend auf einer Vielzahl von Eignungskarten die projizierten Flächenveränderungen der Szenarien auf einem 100×100 m Raster nach bestmöglicher Eignung verteilt. Für den Land Use Scanner werden demnach zwei Arten von Eingangsdaten benötigt: (1) Daten mit deren Hilfe die Eignung von Flächen für bestimmte Landnutzungen bestimmt werden können und (2) Modelldaten zukünftiger regionaler Raumansprüche der verschiedenen Landnutzungsklassen.

Jede Rasterzelle weist eine spezifische Eignung für jede Landnutzungsklasse auf. Die Eignung wird durch die Kombination regionaler Faktoren (Eignungskarten) bestimmt. Mithilfe einer logistischen Regression auf vergangene beobachtete Landnutzungsveränderungen wird die Gewichtung berechnet, mit der die einzelnen Eignungskarten in die Gesamteignung eingehen. Der Allokationsalgorithmus verteilt die Nachfrage nach Land nach bestmöglicher Eignung. Dabei wird jeder Rasterzelle exakt eine Landnutzung zugeordnet. Die regionalen Raumansprüche der verschiedenen Landnutzungsklassen werden mithilfe von externen Modellen berechnet und in den Land Use Scanner eingelesen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des LUS für eine pixelgenaue Darstellung nicht geeignet sind, da nicht alle lokal relevanten Kriterien im Modell Berücksichtigung finden können. So arbeitet zwar das Modell mit der genannten Auflösung, um auch kleinteilige Strukturen (Bestand) berücksichtigen zu können, doch die Ergebnisse sind auf einer höheren Aggregations-

ebene darzustellen (Gemeinde, 1km-Raster). Die Ergebnisse des LUS zeigen plausible Muster der Landnutzungsentwicklung auf, jedoch nicht immer plausible Pixelwerte.

Räumliche Ausgangsdaten

Für die Berechnung der Eignung einer Rasterzelle für eine bestimmte Landnutzung bedarf es zwei Arten von räumlichen Ausgangsdaten, die als Raster vorliegen müssen: (1) die aktuelle Landnutzung als persistenter Ausgangspunkt sowie (2) geologische, ökonomische, soziale und planerische Einflussfaktoren, die Veränderungen begünstigen, erschweren oder verhindern. Das Zusammenspiel von bestehender Landnutzung und den lokalen Faktoren bestimmt darüber, an welchen Orten Landnutzungsänderungen projiziert werden (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 217).

Modellierung regionaler Raumansprüche

Es werden für die vorliegende Arbeit insgesamt zwölf Landnutzungsklassen unterschieden. Für jede dieser Landnutzungsklassen muss für jeden Fünf-Jahres-Schritt der regionale Raumanspruch bestimmt werden. Wobei unter regionalem Raumanspruch diejenige Fläche verstanden wird, die eine bestimmte Landnutzungsklasse in einer Region (Kreisebene) einnimmt. Die Modellierung der regionalen Raumansprüche erfolgt mithilfe von externen Modellen, die sich für die verschiedenen Landnutzungsklassen in ihrer Komplexität stark unterscheiden.

Ein zentrales Modell sind die sozioökonomischen Szenarien der GWS. Die GWS hat unter Einbeziehung u.a. von Bevölkerungs-, Wirtschafts-, Verkehrs- und Energiewendeentwicklung drei mögliche sozioökonomische Szenarien für Deutschland (Stabilität, Trend, Dynamik) berechnet. Mit dem PANTA RHEI Regio Modell hat die GWS diese Szenarien auf Landkreisebene regionalisiert und die Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr ermittelt (vgl. Lutz et al. 2019). Die Szenarien bilden die Grundlage für die folgenden vier Landnutzungsklassen: „Flächen städtischer Prägung“, „Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude“, „Verkehrsflächen“ und „Städtische Grün- und Erholungsflächen“.

Die Landnutzungsklassen „Wald“ und „Naturnahe Flächen und Offenland“ werden für die Siedlungsflächenprojektion 2045 neu modelliert. „Wald“ wird mithilfe einer Trendfortschreibung (Median) auf Basis der Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung von Destatis von 1992-2013 ermittelt. Da ein Zeitvergleich bei der Flächenerhebung nur mit Einschränkungen möglich ist, wird die Trendfortschreibung um unplausible Werte bereinigt. „Naturnahe Flächen und Offenland“ wird mithilfe der Waldflächenentwicklung modelliert. So entsteht Wald zuvorderst auf naturnahen Flächen. Damit bei starker Waldentwicklung nicht sämtliche naturnahen Flächen verschwinden, wird eine regional differenzierte Begrenzung eingezogen, unter die die naturnahen Flächen und Offenland nicht fallen können. Die landwirtschaftlichen Flächen (Landnutzungsklassen: „Ackerland“, „Grünland“) werden mithilfe der Siedlung-, Verkehrsflächen- und Waldflächenentwicklung modelliert. So wird die Summe der genannten Entwicklungen von den landwirtschaftlichen Landnutzungsklassen, aliquot ihres Anteiles, abgezogen.

Für die Landnutzungsklassen „Wasser“, „Feuchtgebiete“ und „Abbauflächen und Deponien“ wird die regionale Flächeninanspruchnahme des Ausgangsjahres unverändert für alle folgenden Zeitscheiben übernommen. Die Landnutzungsklasse „Baustellen“ wird für alle folgenden Zeitscheiben auf null gesetzt. Diese vier Landnutzungsklassen haben gemeinsam, dass sie sich kaum bzw. nicht modellieren lassen und sie sich gleichzeitig, bis auf wenige regionale Ausnahmen, im Zeitverlauf nur gering verändern.

Ergebnisse der Siedlungsflächenprojektion 2045

Für die Siedlungsflächenprojektion 2045 werden drei Szenarien (Stabilität, Trend, Dynamik) berechnet. Die Szenarien unterscheiden sich ausschließlich in der Modellierung der regionalen

Raumansprüche. Die räumlichen Eignungskarten bleiben über die drei Szenarien hinweg unangetastet.

Für die Landnutzung bis zum Jahr 2045 zeichnen sich in den drei Szenarien ähnliche Entwicklungen ab, die sich jedoch in ihrer Intensität unterscheiden. So nimmt die Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2045 deutschlandweit je nach Szenario um 8 % (Stabilität) bis 15 % (Dynamik) zu. Im selben Zeitraum nehmen die landwirtschaftlichen Flächen leicht ab (Stabilität 2 %, Dynamik 3 %). Wald und naturnahe Flächen nehmen zusammengerechnet in allen drei Szenarien bis 2045 um ein Prozent zu.

Je nach Region und Gemeinde unterscheidet sich die projizierte Entwicklung der Landnutzung erheblich. In allen drei Szenarien wächst die Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2045 insbesondere in den Gemeinden im Umland der großen Metropolen deutlich, während die eigentlichen Metropolen nur ein moderates und die ländlichen Gemeinden in Mittel- und Ostdeutschland nur ein geringes Wachstum verzeichnen.

Im Stabilitätsszenario ist die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen in weiten Teilen Deutschlands nur gering ausgeprägt. Nur im Umland der Metropolregionen – insbesondere im Süden Deutschlands, Berlin und Hamburg – zeigt sich eine starke Zunahme. Im Trendszenario ist die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in annähernd allen Regionen stärker ausgeprägt. Starkes Wachstum zeigt sich nun im Umland sämtlicher Metropolen in Deutschland und zusätzlich weisen im Umland der Metropolen deutlich mehr Gemeinden eine starke Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf. Im Dynamikszenario sind die genannten Entwicklungen nochmals stärker ausgeprägt. Insbesondere das Umland der Metropolen ist weiträumig von einer starken Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche betroffen.

Grenzen der Modellierung und Ausblick

Die Ergebnisse der Siedlungsflächenprojektion 2045 sind abhängig von den im Modell getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Algorithmus und der Auflösung. Jeder dieser Bereiche ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden. In einem Zeitraum von annähernd 30 Jahren können sich u.a. durch neue Technologien und Innovationen, sozialen Veränderungen und politischen Entscheidungen die Entwicklungsbedingungen der Landnutzung entscheidend verändern. Trotz dieser Unsicherheit ist es wichtig, gegenwärtige Entwicklungstrends weiterzudenken, um die langfristigen Auswirkungen verschiedener Handlungsperspektiven abzuschätzen.

Verbesserungspotenzial besteht u.a. durch die zusätzliche Einbeziehung von weiteren Eignungskarten und der Modellierung der Gesamteignung, insbesondere für die Landnutzungsklassen, die nicht dem Siedlungs- und Verkehrsbereich zuzuordnen sind.

Summary

The "Siedlungsflächenprojektion 2045" (settlement area projection 2045) risks a glimpse into the future of land use in Germany. For this purpose, three scenarios (stability, trend, dynamics) calculated by the Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) at district level are projected onto a 100x100 m grid on the basis of an optimization model. High-resolution land use projections with a focus on settlement area projection in five-year steps up to 2045 are the result. They enable a small-scale analysis independent of administrative boundaries.

The present work is based on the methodology of the land use projection of the CC-LandStraD project (01/11/2010 to 20/04/2016) by Hoymann and Goetzke. This model provided high-resolution land use projections in five-year steps until the year 2030 for the CC-LandStraD project (cf. Hoymann/Goetzke 2014). For the settlement area projection 2045, the existing model is updated and some adjustments are made: (1) the time frame up to 2045 is extended, (2) the basic spatial statistics data (suitability maps) is updated and (3) the current status of the administrative boundaries (401 districts) is entered. Three scenarios (stability, trend, dynamics) of the PANTA RHEI Regio Model of the GWS form the basis for the modelling of regional spatial claims. Land use categories that are not covered by the PANTA RHEI Regio Model are modelled in the course of this work.

The scenarios of the PANTA RHEI Regio Model differ in five key parameters: population development, development of gross domestic product, achievement of energy transition and climate protection goals, development of transport and achievement of land consumption goals (30 ha per day). The stability scenario is characterised by the achievement of climate, energy transition and land use goals. In the trend scenario, the targets set are achieved late, while in the dynamic scenario they are missed.

How the Land Use Scanner works

The Land Use Scanner, from object vision bv (Amsterdam), is used to calculate the model. The Land Use Scanner is based on an optimization model which distributes the land-use changes of the scenarios on a 100×100 m grid based on a multitude of suitability maps according to the best possible suitability. For the Land Use Scanner, two types of input data are required: (1) data that can be used to determine the suitability of land for specific land uses and (2) model data of future regional spatial claims of the different land use classes.

Each grid cell has a specific suitability for each land use class. Suitability is determined by the combination of regional factors (suitability maps). A logistic regression of past observed land use changes is used to calculate the weight with which the individual suitability maps are included in the overall suitability. The allocation algorithm distributes the claim for land according to best suitability. Each grid cell is assigned exactly one land use. The regional spatial claims of the different land use classes are calculated using external models and imported into the Land Use Scanner.

It should be noted that the results of the LUS are not suitable for pixel-accurate representation, as not all locally relevant criteria can be taken into account in the model. The model works with the mentioned resolution in order to be able to consider small structures (existing structures), but the results have to be presented on a higher aggregation level (municipality, 1km grid). The results of the LUS show plausible patterns of land use development, but not always plausible pixel values.

Spatial source data

To calculate the suitability of a grid cell for a specific land use, two types of spatial source data are required, which must be available as a grid: (1) the current land use as a persistent starting point and (2) geological, economic, social and planning influencing factors that favour, complicate or prevent changes. The interaction between existing land use and local factors determines where land use changes are projected (cf. Hoymann/Goetzke 2014: 217).

Modelling of regional spatial claims

For the present study, twelve land use classes are distinguished. For each of these land use classes, the regional spatial claims must be determined for each five-year step. Regional spatial claim is defined as the area occupied by a specific land use class in a region (district level). The modelling of regional spatial claims is carried out with the aid of external models, which differ greatly in their complexity for the various land use classes.

A key model is the socio-economic scenarios by the GWS. The GWS has calculated three possible socio-economic scenarios for Germany (stability, trend, dynamics) taking into account population, economic, transport and energy transition trends. Using the PANTA RHEI Regio Model, GWS has regionalized these scenarios at the district level, and determined the land consumption for settlements and transport (cf. Lutz et al. 2019). The scenarios form the fundament for the following four land use classes: “urban land”, “Industry, commercial and public buildings”, “transport areas” and “urban green and recreational areas”.

The land use classes “forest” and “near-natural areas and open areas” will be remodelled for the settlement area projection 2045. “Forest” is determined using a trend extrapolation (median), based on the “Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung” (Land-use survey by type of actual use) by Destatis for 1992-2013. Since a time comparison in the land-use survey is limited, the trend update is adjusted for implausible values. “Near-natural areas and open areas” are modelled with the aid of forest area development. Forests are created first and foremost on near-natural areas. In order to prevent all near-natural areas from disappearing in the event of strong forest development, a regionally differentiated limitation is drawn in, under which the near-natural areas and open areas cannot drop. The agricultural areas (land use classes: “arable land”, “pasture land”) are modelled with the aid of settlement, transport and forest area development. The sum of these developments is subtracted from the agricultural land use classes in proportion to their share.

For the land use classes “water”, “wetlands” and “extraction areas and landfills”, the regional land use of the starting year is taken over unchanged for all subsequent time slices. The land use class “construction sites” is set to zero for all subsequent time slices. These four land use classes have in common that they can hardly or not at all be modelled and that, apart from a few regional exceptions, they change only slightly over the course of time.

Results of the settlement area projection 2045

For the settlement areas projection 2045, three scenarios (stability, trend, dynamics) are calculated. The scenarios differ exclusively in the modelling of regional spatial claims. The spatial suitability maps remain untouched across the three scenarios.

For land use up to the year 2045, similar developments can be observed in the three scenarios, though these differ in their intensity. Depending on the scenario, the settlement and transport area in Germany will increase by 8 % (stability) to 15 % (dynamics) by 2045. In the same period, agricultural land will decline slightly (stability 2 %, dynamics 3%). In all three scenarios, forest and near-natural areas combined will increase by one percent by 2045.

Depending on the region and municipality, the projected development of land use varies considerably. In all three scenarios, the settlement and transport area will grow significantly by 2045, particularly in the municipalities in the surrounding areas of the large metropolises, while the actual metropolises will show only moderate growth and the rural municipalities in central and eastern Germany will show only slight growth.

In the stability scenario, the increase in settlement and transport areas is only slightly pronounced in large parts of Germany. Only in the surrounding areas of metropolitan regions – especially in southern Germany, Berlin and Hamburg – does a strong increase occur. In the trend scenario, the increase in settlement and transport areas is more pronounced in almost all regions. Strong growth is now evident in the surroundings of all metropolises in Germany and, in addition, significantly more municipalities in the surroundings of the metropolises are showing a strong increase in settlement and transport areas. These developments are even more pronounced in the dynamic scenario. In particular, the surrounding areas of the metropolises are affected by a large increase in settlement and transport areas.

Limits of modelling and outlook

The results of the settlement area projection 2045 depend on the assumptions made in the model, the initial data, the algorithm and the resolution. Each of these aspects is associated with specific uncertainties. Over a period of almost 30 years, new technologies and innovations, social changes and political decisions, to name just a few, can significantly change the development conditions of land use. Despite this uncertainty, it is important to continue thinking about current development trends in order to estimate the long-term effects of different perspectives for action.

Potential for improvement exists, among other things, through the additional inclusion of further suitability maps and the modelling of overall suitability, in particular for land use classes that cannot be assigned to the settlement and transport sector.

1 Einleitung

Der heiße und trockene Sommer 2018 in weiten Teilen Mitteleuropas hat den Klimawandel erneut ins Zentrum der öffentlichen Aufmerksamkeit gebracht. 2018 war dabei nach Messungen des DWD (2018) ein ganz besonderes Jahr mit vielen Rekorden. Seit Beginn von regelmäßigen Wetteraufzeichnungen war es in Deutschland mit einem Temperaturdurchschnitt von 10,4 °C das wärmste (seit 1881) und das sonnenreichste (seit 1951) Jahr. Darüber hinaus war das Jahr 2018 gekennzeichnet durch extreme Trockenheit und stellte nicht nur in einigen Bundesländern neue Rekorde auf (Brandenburg, Berlin), sondern war durch das Austrocknen einiger Flüsse, dem Aufstellen neuer Allzeitniedrigstände (zum Beispiel am Rhein) und dem Auftreten von Waldbränden allgemein sichtbar. Die Wetterkapriolen eines einzelnen Jahres bedeuten jedoch nicht zwangsläufig Klimawandel. Doch insbesondere beim Anstieg der Temperatur besteht sowohl für Deutschland wie auch global ein langfristiger Trend. Der aktuelle Bericht des IPCC (2018) ist eindeutig. Der Klimawandel ist real, der Klimawandel ist anthropogen verursacht und die Erwärmung beträgt global im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter mehr als 1 °C. Die Auswirkungen eines unbegrenzten Klimawandels sind katastrophal und es bedarf erheblicher Anstrengungen, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen.

In der Wissenschaft besteht weitestgehend Einigkeit über den Klimawandel und seine Folgen für Ökosystem und Kulturraum. Doch der Klimawandel ist ein globales Problem und bedarf globaler Anstrengungen unter Einbeziehung von über 200 Staaten mit partikularen Interessen. Mit den Übereinkommen von Paris wurde 2015 ein wichtiger internationaler Vertrag zum Schutz des Klimas initiiert, der inzwischen von 184 Staaten (Stand: 03.01.2019) unterschrieben und ratifiziert wurde (vgl. UN 2019). Klimaskeptizismus im Kontext wiederkehrender Nationalismen wurde und wird in einigen Staaten als Wahlkampfthema missbraucht.

Um Klimaskeptizismus entgegen zu wirken, helfen nur verstärkte Anstrengungen, Ursachen und Folgen des Klimawandels weiter zu erforschen und öffentlichkeitswirksam zu vertreten. Dabei gilt besonders zu berücksichtigen, dass der Klimawandel sich regional höchst unterschiedlich auswirkt. Sowohl global wie auch auf Deutschland bezogen sind einige Regionen besonders gefährdet, während andere Regionen möglicherweise gar profitieren. Im öffentlichen Diskurs ist es wichtig, regionale Unterschiede darzustellen, um zu verhindern, dass fehlende regionale Betroffenheit zu allgemeinem Skeptizismus führt. Für Gefahrenvorsorge und die frühzeitige Entwicklung von Gegenstrategien ist es wichtig, zu wissen, welche Regionen besonders gefährdet gegenüber dem Klimawandel sind. Dabei ist es nicht nur der Klimawandel, der regional unterschiedliche Gefährdungen verursacht. Auch die anhaltende Ausdehnung von Siedlungs- und Verkehrsflächen, freilich in regional unterschiedlichem Maße, erhöht in vielen Regionen die Vulnerabilität gegenüber den Klimafolgen.

Im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel und im Auftrag der Bundesregierung (2011) haben sich daher 2011 insgesamt 16 verschiedene Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen zum „Netzwerk Vulnerabilität“ zusammengeschlossen, um regionale Betroffenheiten zu untersuchen. Aus dieser Zusammenarbeit ist 2015 die Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (adelphi/PRC /EURAC 2015) entstanden, welche sich u. a. auch mit den kleinräumigen Auswirkungen des Klimawandels beschäftigt. Im Zuge dieser Studie werden Ergebnisse des im Rahmen des Projekts CC-LandStraD (01.11.2010 bis 20.04.2016) von Hoymann und Goetzke entwickelten Methodik zur Siedlungsflächenprojektion verwendet. Dieses Modell liefert hochauflösende Landnutzungsprojektionen mit Schwerpunkt Siedlungsflächenentwicklung in 5-Jahresschritten bis zum Jahr 2030. Das Ergebnis liegt dabei in einem 100x100 m Raster für Deutschland vor und bildet damit die Grundlage für kleinräumige Analysen unabhängig von administrativen Grenzen (vgl. Hoymann/Goetzke 2014).

Im Auftrag der Bundesregierung werden im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) regelmäßig Fortschrittsberichte erstellt. Als Bestandteil dieser Fortschrittsberichte ist auch eine Aktualisierung der Vulnerabilitätsanalyse vorgesehen, die unter Federführung des Umweltbundesamtes (UBA) seit 2017 erstellt wird und 2021 erscheinen soll (vgl. UBA 2017).

Mit der Aktualisierung der Vulnerabilitätsanalyse wird auch eine Überarbeitung der Siedlungsflächenprojektion des BBSR notwendig. Dabei dient die bestehende Methodik und Modellierung des CC- LandStraD-Projekt als Grundlage. Das Modell muss jedoch an einigen wichtigen Stellen angepasst werden:

- Erweiterung des Zeitrahmens bis 2045
- Anpassung der administrativen Grenzen (401 Kreise)
- Aktualisierung der raumstatistischen Ausgangsdaten
- Einpflegen von drei aktuellen Szenarien (Stabilität, Trend, Dynamik) aus PANTA RHEI Regio und Modellierung und Berechnung der fehlenden Landnutzungskategorien

Zur Modellberechnung wird, wie bereits beim Projekt CC-LandStraD, auf den Land Use Scanner der Firma object vision bv (Amsterdam) zurückgegriffen. Dem Land Use Scanner liegt ein Optimierungsmodell zugrunde, das basierend auf einer Vielzahl von Eignungskarten die projizierten Flächenveränderungen der Szenarien auf einem 100×100 m Raster nach bestmöglicher Eignung verteilt. In dieser kleinräumigen Betrachtung der projizierten Veränderungen liegt die Stärke des Land Use Scanners. Bestehende alternative Modelle, mit denen ebenfalls Landnutzungsprojektionen erstellt werden können, beispielsweise PANTA RHEI Regio, besitzen eine landkreisscharfe Auflösung. Für die Erstellung von Siedlungsflächenprojektionen und deren Kombination mit Klimaprojektionen ist eine solche Auflösung in vielen Fällen nicht ausreichend. Ein Grund dafür ist, dass sich die Größe der Landkreise in Deutschland um mehr als den Faktor 100 unterscheidet. In Ostdeutschland gibt es auf Grund zahlreicher Gebietsreformen sehr große Landkreise, wie zum Beispiel den Landkreis Mecklenburgische Seenplatte, der mit seinen 5.470 km^2 mehr als doppelt so groß ist wie das Bundesland Saarland. Demgegenüber steht eine große Zahl kreisfreier Städte, deren Größe 100 km^2 jeweils nicht überschreitet. Die kreisscharfen Projektionen stoßen insbesondere bei sehr großen Landkreisen an ihre Grenzen, denn die prognostizierten Landnutzungsveränderungen werden nicht kleinräumig verortet und Unterschiede innerhalb der Landkreise werden daher nicht ausgewiesen. Die Landnutzungsprojektion mit dem Land Use Scanner schließt diese Lücke. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des LUS für eine pixelgenaue Darstellung nicht geeignet sind, da nicht alle lokal relevanten Kriterien im Modell Berücksichtigung finden können. So arbeitet zwar das Modell mit der genannten Auflösung, um auch kleinteilige Strukturen (Bestand) berücksichtigen zu können, doch die Ergebnisse sind auf einer höheren Aggregationsebene darzustellen (Gemeinde, 1km-Raster). Die Ergebnisse des LUS zeigen plausible Muster der Landnutzungsentwicklung auf, jedoch nicht immer plausible Pixelwerte.

Im folgenden 2. Kapitel wird eine kurze Einführung in das Konzept der Landnutzungsmodellierung mit dem Land Use Scanners gegeben. Es wird sich zusätzlich mit den raumstatistischen Ausgangsdaten und ihren Besonderheiten beschäftigt, ebenso werden die Raumansprüche und die dahinterstehende Modellierung beschrieben. Im 3. Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen für jedes der drei Szenarien des PANTA RHEI Regio (Stabilität, Trend, Dynamik) dargestellt, während im 4. Kapitel ein kurzer Ausblick auf eine mögliche zukünftige Modellierung gegeben wird. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass sich dieser Bericht auf die Unter-

schiede zum Ausgangsmodell von Hoymann/Goetzke konzentriert. Das grundlegende Konzept wird im Artikel „Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks“ (Hoymann/Goetzke 2014) ausführlich beschrieben.

2 Konzept und Methode der Landnutzungsmodellierung

In diesem Kapitel geht es um Begriffe und Konzepte, um Modelle und Funktionen sowie um die notwendigen Hintergründe, um die Ergebnisse der vorliegenden Studie verstehen und interpretieren zu können. Details, die für das Verständnis nicht zwingend erforderlich sind, werden an dieser Stelle nicht behandelt. Für eine tiefergehende Auseinandersetzung, insbesondere zum Land Use Scanner, seien die Werke von Koomen et al. (2011) und Hoymann/Goetzke (2014) empfohlen.

2.1 Land Use Scanner

Die Landnutzungsmodellierung der *Siedlungsflächenprojektion 2045* darf nicht als ein in sich kohärentes Modell verstanden werden. Es handelt sich stattdessen um verschiedene Modelle, die mithilfe des Land Use Scanners zu einer Modellierung zusammengefasst werden (vgl. Abb. 1). Insbesondere die Nachfrage nach Land wird außerhalb des Land Use Scanners berechnet. Die Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung stellt mit ihren Modell PANTA RHEI Regio die Eckdaten für die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen auf Kreisebene bis 2045 in 5-Jahres Zeitscheiben zur Verfügung. Wald, naturnahe Flächen und landwirtschaftliche Flächen werden im BBSR modelliert. Im Land Use Scanner werden diese Daten mit räumlichen Daten, wie beispielsweise planerische Restriktionen, Erreichbarkeiten oder Relief, verknüpft um Entwicklungen kleinräumig abbilden zu können.

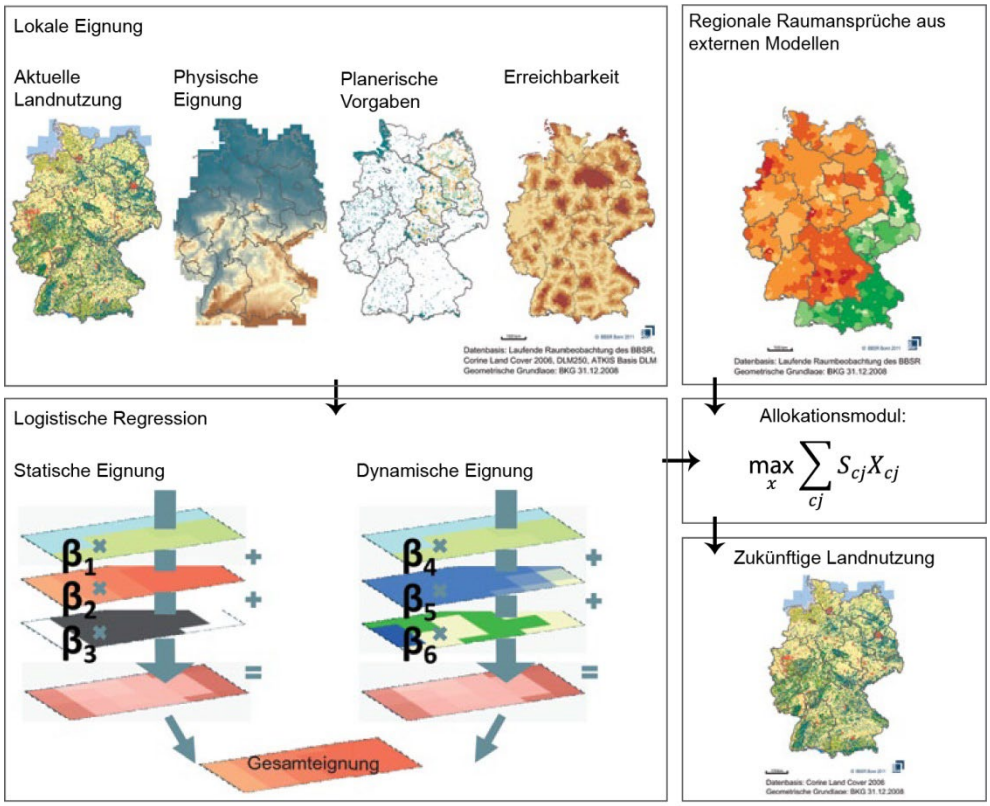
Der Land Use Scanner wurde 1997 an der Vrije Universiteit Amsterdam entwickelt und von der Ausgründung object vision bv weitergeführt. Beim Land Use Scanner handelt es sich um ein Rahmenmodell zur Landnutzungsmodellierung. Abstrakt beschrieben ist es ein „operationelles, räumlich explizit arbeitendes Modell, welches mit einem Optimierungsalgorithmus die Nachfrage nach Land auf die dafür geeigneten Rasterzellen verteilt“ (Hoymann/Goetzke 2014: 214). Der LUS ist also ein auf GIS-basiertes Simulationsmodell, welches auf Rasterbasis mit einer Auflösung von 100 m arbeitet. Er benötigt zwei Arten von Eingangsdaten. Einerseits die in externen, sektoralen Modellen erstellte Nachfrage nach Land auf Kreisebene, andererseits räumliche Ausgangsdaten, die die lokale Eignung auf Rasterebene darstellen. Unter der Nachfrage nach Land versteht man den Raumanspruch jeder Landnutzungsklasse in ha je Kreis für jede Zeitscheibe (2016, 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045). Die Daten zur Nachfrage bilden somit Veränderungen im Zeitverlauf ab und unterscheiden sich je nach gewähltem Szenario. Bei den räumlichen Ausgangsdaten handelt es sich stattdessen um Eignungskarten, die die Standortfaktoren für die verschiedenen Arten der Landnutzung berücksichtigen.

Der Land Use Scanner beinhaltet zwei Modellvarianten, wobei nur das „Discrete Model“ in dieser Arbeit angewendet und beschrieben wird. Bei dieser Variante wird jeder Rasterzelle exakt eine, nämliche die dominante Landnutzung zugeordnet. Der Allokationsalgorithmus verteilt die Nachfrage nach Land so, dass die „Summe der Eignungswerte der von Landnutzungswandel betroffenen Zellen maximiert wird“ (Hoymann/Goetzke 2014: 215). Das heißt, für jede Zelle wird mithilfe der Ausgangssituation (aktuelle Landnutzung nach LBM-DE) und den Eignungskarten ein individueller Eignungswert für jede Landnutzungsart berechnet. Die Eignungskarten gehen dabei, je nach Landnutzungsart, mit unterschiedlichen Gewichtungen ein, die mithilfe einer Regressionsanalyse aus vergangenen beobachteten Landnutzungsveränderungen bestimmt werden. Insgesamt gilt zu beachten, dass die Summe der Nachfrage aller Landnutzungsklassen die Fläche der Region weder unter- noch überschreitet, jeder Zelle nur 1 ha Land zugeordnet wird und alle zugeordneten Werte positiv sind (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 215; Koomen et al. 2011: 14ff.).

Der LUS unterscheidet weiterhin zwischen ökonomischen, statischen und dynamischen Eignungsfaktoren. Mit den ökonomischen Eignungsfaktoren wird berücksichtigt, dass der Wandel

von einer Landnutzungsart in eine andere nicht in jeder Kombination gleich wahrscheinlich ist. So ist eine Transformation von Siedlungsfläche zu Landwirtschaftsfläche sehr viel seltener als der umgekehrte Fall, eine Transformation von Landwirtschaftsfläche zu Siedlungsfläche. Hierzu werden jeder Veränderung hypothetische Kosten zugewiesen und die aus einer Landnutzung erzielbaren Gewinne berücksichtigt, um daraus eine Konversionsmatrix mit jeder Transformationskombination zu erstellen. Dem zu Grunde liegen auch Beobachtungen zur Veränderung mit dem CORINE Land Cover Datensatz (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 218). Bei den statischen Eignungsfaktoren handelt es sich um die bereits beschriebenen Gewichtungsfaktoren der Eignungskarten für die jeweilige Landnutzung, die mit Hilfe einer Regressionsanalyse aus mit CORINE Land Cover beobachteten Veränderungen der Landnutzung erstellt werden. Für die Berechnung wurden die planerischen Festlegungen ausgeklammert. Die dynamischen Eignungsfaktoren berücksichtigen das Umfeld einer Rasterzelle und werden im Gegensatz zur statischen Eignung mit jeder modellierten Zeitscheibe an das veränderte Landnutzungsmuster angepasst. Die Landnutzung einer Rasterzelle hat Einfluss auf die benachbarten Rasterzellen, die tendenziell dazu neigen, dieselbe Landnutzung aufzuweisen. Dieses Nachbarschaftspotenzial wird vom LUS berücksichtigt und mit Hilfe einer logistischen Regression der bestehenden Landnutzung ermittelt (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 218).

Abbildung 1 Funktionsprinzip des Land Use Scanners



Quelle: Hoymann/Goetzke (2014): 214.

In Abbildung 1 wird das Funktionsprinzip des Land Use Scanners grafisch zusammengefasst. Die lokale Eignung ergibt sich aus der aktuellen Landnutzung und den verschiedenen Eignungskarten. Diese werden je nach Landnutzungsklasse unterschiedlich gewichtet und ergeben für jede Zelle und jede Landnutzung eine Gesamteignung. Die regionalen Raumansprüche (Nachfrage nach Land) werden anhand dieser Gesamteignung mit einem Allokationsalgorithmus, der auf Optimierung ausgelegt ist, auf die einzelnen Zellen verteilt. Für jede Zeitscheibe entsteht dabei

eine Rasterkarte der zukünftigen Landnutzung, die wiederum die Grundlage für die Berechnung der nächsten Zeitscheibe bildet.

Grundsätzlich sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des Land Use Scanners nicht dafür gedacht sind, zellscharfe Analysen der Zukunft zu liefern. Stattdessen geht es, wie bereits Hoymann/Goetzke (2014: 214) deutlich gemacht haben, darum, „das grundsätzliche Muster der Landnutzungsänderung unter bestimmten Rahmenbedingungen" darzustellen. Der Land Use Scanner arbeitet mit einem Optimierungsmodell, doch in der Realität werden Entscheidungen über Landnutzungsänderungen häufig nicht rein rational getroffen. Außerdem sollte man sich bei Zukunftsprojektionen (-szenarien) immer bewusst sein, dass zukünftige Entwicklungen und Entscheidungen durch Variablen beeinflusst werden, die heute möglicherweise noch nicht bekannt sind. Zentral hierfür sind die globale Wirtschaftsentwicklung und –verflechtung, sowie Sonderereignisse wie die Fluchtzuwanderung seit 2015, bei der mehr als eine Million Menschen innerhalb von zwei Jahren netto nach Deutschland zugewandert sind. Dieses Erreignis konnte von den bestehenden Bevölkerungsprognosen (und darauf aufbauenden Prognosen) nicht vorhergesehen werden und dementsprechend mussten diese überarbeitet werden. Die Zukunft der Landnutzung hängt von vielen Variablen ab. Manche davon sind bekannt und werden bei der Nachfragemodellierung oder durch Eignungskarten vom LUS berücksichtigt, bei anderen liegen keine (flächendeckenden) Daten vor; wiederum andere sind weder bekannt noch liegen Daten vor. Der LUS zeigt Muster möglicher räumlicher Veränderung unter rationalen Gesichtspunkten unter Vorgabe bestimmter Rahmenbedingungen.

2.2 Räumliche Ausgangsdaten

Für die Landnutzungsprojektion bedarf es zwei Arten von räumlichen Ausgangsdaten auf Rasterebene. Die aktuelle Landnutzung als persistenter Ausgangspunkt sowie geologische, ökonomische, soziale und planerische Einflussfaktoren, die Veränderungen begünstigen, erschweren oder verhindern. Das Zusammenspiel von bestehender Landnutzung und den lokalen Faktoren bestimmt darüber, an welchen Orten Landnutzungsänderungen projiziert werden (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 217).

2.2.1 Aktuelle Landnutzung

Zur Feststellung räumlicher Veränderungen bedarf es eines Ausgangspunktes, der den Status quo der gegenwärtigen Raumnutzung zeigt. Dabei wird in der vorliegenden Siedlungsflächenprojektion auf einen anderen Datensatz zurückgegriffen, als es beim CC-LandStraD-Projekt der Fall gewesen ist. So wurde beim ursprünglichen CC-LandStraD-Projekt eine Kombination aus dem DLM-DE und für die zur Verfügung stehenden Stadtregionen des besser auflösenden Urban Atlas 2012 verwendet. Dieser kombinierte Datensatz wurde ergänzt um errechnete Verkehrsflächen aus ATKIS (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 215). Für die vorliegende Siedlungsflächenprojektion 2045 wird hingegen ausschließlich auf den Datensatz LBM-DE 2015 zurückgegriffen. Beim LBM-DE handelt es sich um die Weiterentwicklung und Aktualisierung des DLM-DE des BKG, der seit 2012 unter neuem Namen firmiert. Auf die Kombination mit dem Urban Atlas wird verzichtet, da er zum gegenwärtigen Stand (Januar 2019) leider noch immer nur in der Version 2012 verfügbar ist[1]. Eine bessere Aktualität der Daten wird somit einer etwas besseren Differenzierung innerhalb der Stadtregionen vorgezogen. Durch die kontinuierliche Verbesserung des LBM-DE Datensatzes, auch im Hinblick auf die Kartierung der Verkehrsflächen, ist die manuelle Hinzufügung von Verkehrsflächen mit ATKIS-Daten nicht mehr notwendig.

[1] Nach Aussage des BKG soll eine aktuelle Version des Urban Atlas und LBM-DE mit Datenstand 2018 zu einem unbestimmten Zeitpunkt im ersten Quartal 2019 erscheinen. Für die vorliegende Arbeit kommt diese Aktualisierung jedoch zu spät.

Die Landnutzung wird dabei mit einer Auflösung von einem Hektar dargestellt. Sehr kleinräumige Landnutzungen und insbesondere lineare Landnutzungen (z. B. Verkehrswege) können bei einer solchen Auflösung nicht ideal repräsentiert werden. So wird bei einem Raster mit einer Auflösung von einem Hektar eine geringere Verkehrsfläche dargestellt, als in der Realität vorhanden ist.

Tabelle 1 Übersicht über die 12 modellierten Landnutzungsarten

CORINE Land Cover LBM-DE		Siedlungsflächenprojektion 2045		Umrechnung aus Nachfragemodell	Methodik Nachfrageberechnung
ID	Name	ID	Name		
111 112	Durchgängig städtische Prägung Nicht durchgängig städtische Prägung	111	Flächen städtischer Prägung	111/(111+121)* GuF	Ergebnisse aus PRR
121	Industrie-und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	121	Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude	121/(111+121)* GuF	Ergebnisse aus PRR
122 123 124	Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen Hafengebiete Flughäfen	131	Verkehrsflächen		Ergebnisse aus PRR
131 132	Abbauflächen Deponien und Abraumhalden	141	Abbauflächen und Deponien		Keine Änderung im Zeitverlauf
133	Baustellen	151	Baustellen		Keinezusätzliche Nachfrage
141 142	Städtische Grünflächen Sport-und Freizeitanlagen	161	Städtische Grün- und Erholungsflächen		Ergebnisse aus PRR
211 221 222 242	Nicht bewässertes Ackerland Weinbauflächen Obst-und Beerenobstbestände Komplexe Parzellenstrukturen	211	Ackerland	211/(211+221)* (211+221-111-121-131-151-161-311)	Heutige Flächen abzüglich Nachfrage nach urbanen Flächen und Wald
231 243	Wiesen und Weiden Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	221	Grünland	221/(211+221)* (211+221-111-121-131-151-161-311)	Heutige Flächen abzüglich Nachfrage nach urbanen Flächen und Wald
311 312 313	Laubwälder Nadelwälder Mischwälder	311	Wald		Korrigierte Trendfortschreibung (Median)

CORINE Land Cover LBM-DE		Siedlungsflächenprojektion 2045		Umrechnung aus Nachfrage-modell	Methodik Nachfrageberechnung
ID	Name	ID	Name		
321 322 324 331 332 333 334 335	Natürliches Grünland Heiden und Moorheiden Wald-Strauch-Übergangsstadien Strände, Dünen und Sandflächen Felsflächen ohne Vegetation Flächen mit spärlicher Vegetation Brandflächen Gletscher und Dauerschneegebiete	321	Naturnahe Flächen und Offenland		Heutige Flächen abzüglich verwirklichbare Nachfrage nach Wald
411 412 421 423	Sümpfe Torfmoore Salzwiesen In der Gezeitenzone liegende Flächen	411	Feuchtgebiete		Keine Änderung im Zeitverlauf
511 512 521 522 523	Gewässerläufe Wasserflächen Lagunen Mündungsgebiete Meere und Ozeane	511	Wasser		Keine Änderung im Zeitverlauf

Quelle: Eigene Darstellung, vgl. Hoyman/Goetzke 2014: 216f. GuF = Gebäude und Freifläche, PRR = PANTA RHEI Regio.

Die aktuelle Landnutzung wird mithilfe von 12 Landnutzungsklassen dargestellt, die sich grob an der Nomenklatur von CORINE Land Cover orientieren. Tabelle 1 zeigt die Zuordnung der CORINE Land Cover Klassen zu den 12 zusammengefassten Landnutzungsklassen und beschreibt darüber hinaus mit welcher Modellierung die Nachfrage nach Land berechnet wird und gegebenenfalls wie diese Modellierungsergebnisse auf die einzelnen Landnutzungsklassen umgelegt werden. Die Zuordnung ist weitestgehend identisch mit der Zuordnung in der Siedlungsflächenprojektion 2035 bis auf eine größere Ausnahme, nämlich das auf die Landnutzungsklasse „Brachen“ verzichtet wurde, da diese nur im Urban Atlas ausgewiesen wird. „Brachen“ waren, mit bundesweit ca. 7.400 ha, die kleinste Landnutzungsklasse, wodurch es bei der Streichung zu keinen größeren Verschiebungen gekommen ist.

2.2.2 Physische Faktoren

Zu den physischen Einflussfaktoren gehören grundlegende naturräumliche Gegebenheiten, die von Menschen im Normalfall nicht oder kaum beeinflusst werden. Mit Geländehöhe und Hangneigung geht das Relief ebenso in diese Kategorie ein wie Art und Qualität der Böden. Tabelle 2 sind die einzelnen Eignungskarten zu entnehmen. Auf Grund der langfristigen Stabilität dieser Faktoren werden sie im Zuge der Siedlungsflächenprojektion 2045 nicht aktualisiert.

Hangneigung und Geländehöhe wurden aus den SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)-Daten der NASA gewonnnen. Für die Verwendung im LUS wurden sie von einer Auflösung von 90 m auf 100 m umgerechnet (vgl. Hoymann/Goetzke 2014:217; NASA 2014). Die Landnutzung wird vom Relief geprägt. Je nach Ausprägung von Geländehöhe und Hangneigung sind bestimmte Landnutzungsarten ausgeschlossen oder sehr erschwert. So benötigen Siedlungsgebiete und Ackerbau meist Gebiete mit geringer Hangneigung und gemäßigter Geländehöhe.

Die Art und Qualität des Boden ist insbesondere für die Landwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Dafür werden im LUS drei bodenspezifische Eignungskarten mit Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) verwendet, die verschiedene Aspekte des Bo-

dens abdecken (BGR 2018a, b, c). Humusgehalt und Ertragspotential (Müncheberger Soil Quality Rating) zeigen die Rentabilität und Nutzbarkeit der Böden für landwirtschaftliche Zwecke. Der Leitbodentyp beschreibt den dominierenden Bodentyp in einer Bodengesellschaft und gibt damit Auskunft über die generelle Verwendbarkeit der Böden.

Tabelle 2 Eignungsfaktoren: Physische Gegebenheiten

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Geländehöhe	NASA	2000	2000
Hangneigung	NASA	2000	2000
Ertragspotenzial	BGR	2013	2013
Leitbodentypen	BGR	2013	2013
Bodenqualität: Humusgehalt	BGR	2013	2013

Quelle: Eigene Darstellung.

2.2.3 Planerische Festlegungen

Schutzgebiete sind planerische Festlegungen, die auf die Nutzung von Land starke Auswirkungen haben. Es ist eines der zentralen Instrumente des Naturschutzes und für den Erhalt natürlichen Lebensräume der heimischen Flora und Fauna. Der Erhalt bestehender Naturräume spiegelt sich auch in der Persistenz der Landnutzung wieder. Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) erstellt in Zusammenarbeit mit den Bundesländern einen bundesweiten Daten- und Kartensatz zu den „Schutzgebieten in Deutschland“, wozu sämtliche in der Tabelle 3 aufgezählten Schutzgebietstypen gehören. Die verschiedenen Schutzgebietstypen unterscheiden sich in ihrer Auswirkung auf die zukünftige Landnutzung. So schließt ein Nationalpark Siedlungsentwicklung, aber auch Land- und Forstwirtschaft weitestgehend aus, während es in Landschaftsschutzgebieten nur geringe Einschränkungen für die Landwirtschaft gibt, solange das vorherrschende Landschaftsbild erhalten bleibt. Die unterschiedliche Schutzwirkung der verschiedenen Schutzgebietstypen wird im LUS berücksichtigt (vgl. BfN 2019). Für den LUS 2045 wurden alle Schutzgebietstypen auf Aktualität geprüft und wenn notwendig auf den aktuellen Stand gebracht. So gab es bei Ramsar-Gebieten 2013 letztmalig Veränderungen, während Nationalparks und Biosphärenreservate 2018 angepasst wurden.

Tabelle 3 Eignungsfaktoren: Restriktionen durch Naturschutz

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Naturschutzgebiete	BfN	2011	2016
Nationalparke	BfN	2011	2018
Biosphärenreservate Kern	BfN	2011	2018
Biosphärenreservate Erweiterung	BfN	2011	2018
Landschaftsschutzgebiete	BfN	2011	2016
FFH-Gebiete	BfN	2011	2017
SPA-Gebiete	BfN	2011	2017
Ramsar-Gebiete	BfN	2011	2013

Quelle: Eigene Darstellung.

Das BBSR betreibt mit dem Raumordnungsplan-Monitor (ROPLAMO) eine weitere wichtige Quelle für planerische Festlegungen. Darin werden die Pläne der Landes- und Regionalplanung in einer Geo- und Sachdatenbank zusammengefasst und bieten einen gesamtdeutschen Überblick über die rechtsverbindlichen Festlegungen. Es werden dabei drei Festlegungsformen (Vorranggebiete, Vorbehaltsgebiete und Vorrang-/Eignungsgebiete) unterschieden, die auch im LUS berücksichtigt werden. Die ROPLAMO-Daten wurden einheitlich auf den Stand 31.12.2017 aktualisiert und umfassen alle zu diesem Zeitpunkt gültigen Landes- und Regionalpläne. Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass Landes- und Regionalpläne weder jährlich noch bundesweit gleichzeitig aktualisiert werden und in bestimmten Regionen zeitweise durch Ablaufen oder Klagen keine gültigen Pläne vorliegen. So haben die ROPLAMO-Daten eine unterschiedliche Entstehungsaktualität und haben sich seit 2013 teilweise großflächig durch Wegfall von gültigen Plänen oder Neugestaltung geändert (vgl. BBSR 2019).

ROPLAMO umfasst ein großes Spektrum an Festlegungen, die der Sicherung allgemeiner Ziele der Raumplanung dienen. Im LUS werden 15 verschiedene Arten von planerischen Festlegungen aus ROPLAMO (Objektarten) verwendet. Darunter fallen gänzlich unterschiedliche Festlegungen;, so sind katastrophenvorbeugende Vorbehalts- und Vorranggebiete zum Hochwasserschutz ebenso enthalten wie ebensolche Gebiete zum Schutz des Einzelhandels oder der Sicherung von Rohstoffen. Bodenschutz ist eine Objektart, die überwiegend in Raumordnungsplänen Baden-Württembergs anzutreffen ist und erosionsgefährdeten Boden vor Übernutzung schützen soll. Grund- und Oberflächenwasserschutz ist in ganz Deutschland in Regional- und Landesplänen zu finden und ist ein wichtiges Instrument zum Schutz des ökologischen Gleichgewichts und der Sicherstellung der Grundwasserversorgung. Unter sonstigem Freiraumschutz ist der Schutz von Naturgütern mit wichtigen ökologischen Funktionen verstanden, die nicht in eine der anderen Kategorien fällt. Die Kategorie Sonstiger Siedlungsbereich umfasst Vorranggebiete für Siedlungsfunktionen, während die Kategorie Sport Flächen zur sportlichen Nutzung umfasst. Neben Natur- und freiraumbewahrenden Festlegungen gibt es mit Land- und Forstwirtschaft auch Schutzkategorien zur Bewahrung landbewirtschaftender Nutzung. Nicht alle Objektarten werden deutschlandweit verwendet; so gibt es beispielsweise in Bayern keine Vorranggebiete für Landwirtschaft. Andere Kategorien wie beispielsweise Sport, Einzelhandel oder Lärmschutz werden spärlich und nur in einzelnen Regionen verwendet.

Tabelle 4 Eignungsfaktoren: Restriktionen durch Landesplanung (ROPLAMO)

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Bodenschutz	BBSR	2013	2017
Grund- und Oberflächenwasserschutz	BBSR	2013	2017
Hochwasserschutz	BBSR	2013	2017
Lärmschutzbereich	BBSR	2013	2017
Sonstiger Freiraumschutz	BBSR	2013	2017
Grzz üge, Grzz äsuren	BBSR	2013	2017
Einzelhandel	BBSR	2013	2017
Industrie und Gewerbe	BBSR	2013	2017
Rohstoffsicherung	BBSR	2013	2017
Sonstiger Siedlungsbereich	BBSR	2013	2017

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Sport	BBSR	2013	2017
Wohnbereich	BBSR	2013	2017
Forstwirtschaft	BBSR	2013	2017
Landwirtschaft	BBSR	2013	2017
Natur und Landschaft	BBSR	2013	2017

Quelle: Eigene Darstellung.

2.2.4 Erreichbarkeiten

Die Erreichbarkeit von wichtigen Einrichtungen ist für die Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung ein gewichtiger Standortfaktor. Als Berechnungsgrundlage dient dabei das Erreichbarkeitsmodell des BBSR. Für den LUS wurden damit die Pkw-Fahrzeit in Minuten zum nächstgelegenen Autobahnanschluss, internationalen Flughafen, IC-Bahnhof oder Oberzentrum berechnet. Die schnelle Erreichbarkeit von Autobahnanschluss und internationalen Flughafen ist besonders für die Wirtschaft ein wichtiger Faktor, da damit unter anderem die Distribution von Waren erleichtert wird. IC-Bahnhöfe und Oberzentren (und damit die Erreichbarkeit vieler hochwertiger Daseinsvorsorgeeinrichtungen) sind sowohl für die Wirtschaft ein wichtiger Faktor, wie auch für die generelle Siedlungsentwicklung (vgl. BBSR 2018).

Neben den Erreichbarkeiten geht auch die euklidische Distanz zur nächsten Straße(-ntyp) als Eignungskarte in den LUS ein. Als Ausgangsdatensatz wird der Straßenlayer von ATKIS (BKG) verwendet. Für den LUS werden dabei, wie in der Tabelle 5 ersichtlich, drei Straßenkategorien unterschieden. Unter der Kategorie „Regionalstraßen“ werden Bundes-, Landes-/Staats- und Kreisstraßen zusammengefasst. Die Kategorie „Lokalstraßen“ enthält die Gemeindestraßen und die Kategorie „Straßen“ ist eine Zusammenfassung aus den bereits beschriebenen Kategorien, also alle Straßen ohne Autobahn.

Von jeder Rasterzelle wird die Distanz zur nächstgelegenen Straße der entsprechenden Kategorie berechnet. Das Ergebnis ist eine Eignungskarte, die aufzeigt, wie gut ein Raum mit den entsprechenden Straßen erschlossen ist bzw. auch inwieweit ein Gebiet durch Verkehrswege zerschnitten ist. Für die Siedlungsentwicklung ist eine bestehende Erschießung von Vorteil, für Wald und naturnahe Flächen ist ein hoher Erschließungsgrad demgegenüber ein Entwicklungshemmnis.

Tabelle 5 Eignungsfaktoren: Erreichbarkeiten und Straßennetz

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Erreichbarkeiten Internationale Flughäfen	BBSR	2012	2018
Erreichbarkeiten Autobahnanschlussstellen	BBSR	2012	2018
Erreichbarkeiten Fernbahnh fe	BBSR	2012	2018
Erreichbarkeiten Oberzentren	BBSR	2012	2018
Distanz Straßen	BKG /BBSR	2009/2012	2017
Distanz Regionalstraßen	BKG /BBSR	2009/2012	2017
Distanz Lokalstraßen	BKG /BBSR	2009/2012	2017

Quelle: Eigene Darstellung.

2.2.5 Gunstfaktoren und Restriktionen für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung

Für die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung sind Einwohnerzahl und Bevölkerungspotenzial wichtige Faktoren. Im LUS wird einer Rasterzelle immer die dominante Landnutzung zugewiesen und so ist es möglich, dass beispielsweise eine Rasterzelle, die als Landwirtschaft ausgewiesen ist, trotzdem Wohnbevölkerung aufweist. Rasterzellen, die bereits teilweise bebaut sind, werden sich zukünftig mit höherer Wahrscheinlichkeit zu Siedlungsfläche ändern als Rasterzellen die keinerlei Bevölkerung aufweisen. Die Einwohnerzahl deutet also auf bereits bestehende Keimzellen für zukünftige Siedlungsflächenentwicklung hin. Die Berechnung erfolgt mithilfe einer Disaggregation von Bevölkerungszahlen (Gemeinde) auf Siedlungsflächen (vgl. Burgdorf 2010).

Das Bevölkerungspotenzial berücksichtigt die größere Umgebung. Es ist ein Indikator für räumliche Interaktionsmöglichkeiten, aber auch Marktpotenzial beispielsweise für den Einzelhandel. Beim Bevölkerungspotenzial wird nicht allein die Bevölkerung einer einzelnen Rasterzelle betrachtet, sondern die Bevölkerung im Radius von 100 km. Die Bevölkerung geht dabei jedoch nicht gleichmäßig ein, sondern ihre Berücksichtigung nimmt mit steigender Entfernung ab. Ein geringes Bevölkerungspotenzial ist sowohl für die Siedlungs- wie auch die Wirtschaftsentwicklung unattraktiv, ein hohes hingegen attraktiv (vgl. Spangenberg 2003).

Tabelle 6 Eignungsfaktoren: Gunstfaktoren für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Einwohnerzahl	BBSR	2011	2016
Bevölkerungspotenzial	BBSR	2011	2016
Urban Attractivity (Soziale Infrastruktur)	BBSR	2013	2013

Quelle: Eigene Darstellung.

Bestimmte Flächen sind durch ihre gegenwärtige Nutzung auch zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit für die Siedlungsentwicklung nicht geeignet. Diese Flächen werden aus ATKIS (BKG) entnommen und gegebenenfalls um eine Pufferzone ergänzt.

Bei Truppenübungsplätzen gibt es zwar einen anhaltenden Flächenrückgang, doch sind diese Flächen häufig durch Munition, etc. kontaminiert. Bei Rieselfeldern gibt es einen ähnlichen Trend, doch auch hier wird eine Nutzung für Siedlungsflächen durch die Kontamination der Böden verhindert. Friedhöfe sind langfristig gewidmet und sozio-religiöse Gründe verhindern im Prognosezeitraum eine andere Landnutzung.

Tabelle 7 Eignungsfaktoren: Restriktionen für Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Truppenung splätze	BKG	2009	2017
Friedhöfe	BKG	2009	2017
Rieselfelder	BKG	2009	2017
Kraftwerke	BKG/BBSR	2009	2017
Freileitungen (100m Abstand)	BKG/BBSR	2009	2017
Solaranlagen	BKG	2009	2017

Eignungkarten	Quelle	LUS 2035	LUS 2045
Windkraftanlagen (500m Abstand)	BKG/BBSR	2009	2017

Quelle: Eigene Darstellung.

Kraftwerke sind Großprojekte, die für gewöhnlich langfristig Bestand haben und auch in ihrer direkten Umgebung eine Siedlungsnutzung verhindern. Je nach Kraftwerksart wird um das Kraftwerk herum eine Pufferzone gelegt (zum Beispiel Kernenergie 1.700 m, Biomasse <20 MW Nennleistung 100 m), die von einer Siedlungsnutzung ebenfalls freigehalten wird. Bei bestehenden Solaranlagen wird ebenfalls auf Grund der Investitionskosten eine langfristige Nutzung angenommen. Bei Windenergieanlagen wird auf Grund des Schattenschlags eine Pufferzone von 500 m festgesetzt. Eine genauere Differenzierung nach Nabenhöhe ist auf Grund fehlender bundesweit flächendeckender Daten nicht möglich. Bei Freileitungen wird ebenfalls von einer Pufferfläche von 100 m ausgegangen, auf der keine Siedlungsentwicklung stattfindet.

2.3 Entwicklung der regionalen Raumansprüche

Neben den Eignungskarten sind die regionalen Raumansprüche notwendige Ausgangsdaten für den Land Use Scanner. Der Land Use Scanner beinhaltet kein eigenes Prognosemodell für die Nachfrage nach den verschiedenen Landnutzungsklassen, sondern verwendet in externen Modellen erstellte Szenarien. Theoretisch kann der Land Use Scanner Daten für sämtliche räumliche Aggregationsstufen verarbeiten (vgl. Hoymann/Goetzke 2014: 218f). Im vorliegenden Fall wird jedoch ausschließlich die Kreisebene (Gebietsstand 2016: 401 Kreise) verwendet.

Für jede verwendete Landnutzungsklasse bedarf es einer eigenen Modellierung. Die Daten werden in 5-Jahresschritten für den Zeitraum 2015 bis 2045 benötigt. Die Modellierung der Siedlungs- und Verkehrsflächen (SuV) sowie der Waldflächen erfolgt unabhängig voneinander. Nutzungsklassen wie Ackerflächen oder Grünland gleichen die Entwicklungen von SuV und Wald aus und sind damit direkt von der Modellierung der Siedlungs- und Verkehrsflächen und der Waldflächen abhängig. Dies ist notwendig, da andernfalls die Nachfrage möglicherweise die vorhandene Fläche unter- oder überschreiten würde.

Für die Vulnerabilitätsanalyse 2021 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes von der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) drei sozioökonomische Szenarien (Lutz et al. 2019) entwickelt. Die Ergebnisse der drei Szenarien bilden die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung auf Kreisebene ab. Die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche wird somit extern in das Modell eingespeist und mit dem Land Use Scanner auf Rasterebene verteilt bzw. dargestellt. Die Modellierung der Nicht-Siedlungs- und Verkehrsflächen erfolgt, wie auf den folgenden Seiten dargestellt, über alle drei Szenarien identisch.

2.3.1 Siedlungs- und Verkehrsflächen

Die sozioökonomischen Szenarien der GWS decken drei mögliche Entwicklungsrichtungen Deutschlands für den Zeitraum bis 2045 ab. Diese Szenarien basieren unter anderem auf Annahmen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung sowie der Entwicklung des Energie- und Ressourcenverbrauchs. Die nationalen Szenarien werden mit dem Modell PANTA RHEI Regio auf die einzelnen Kreise umgelegt. In einem weiteren Schritt wird daraus die Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr berechnet (vgl. Lutz et al. 2019: 111ff).

Die drei Szenarien der GWS bilden so die Grundlage für alle Nutzungsklassen des Land Use Scanners, die den Siedlungs- und Verkehrsflächen zuzuordnen sind: 1) Flächen städtischer Prägung; 2) Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude; 3) Verkehrsflächen; 4) Städtische Grün- und Erholungsflächen. Die Flächendaten der drei Szenarien können jedoch nicht eins-zu-eins

übernommen werden, da ihre Berechnungen nicht auf Rasterdaten beruhen (vgl. Lutz et al. 2019: 111ff). Im Land Use Scanner weist jede Rasterzelle nur eine (dominante) Nutzung auf, obwohl in der Realität auf 100 x 100 m häufig unterschiedliche Landnutzungsarten anzutreffen sind. Insbesondere Verkehrsflächen werden dabei auf Rasterebene systematisch unterschätzt. So sind sie beispielsweise im städtischen Bereich allgegenwärtig, jedoch wird eine 100 m-Rasterzelle trotzdem nur selten vom Verkehr dominiert. Die Unterschätzung der Verkehrsflächen führt gleichzeitig zu einer Überschätzung der anderen Nutzungsklassen. Werden die Rasterzellen nun für jede Nutzungsklasse ausgezählt, stimmen die absoluten Werte, auf Grund der beschriebenen Probleme, nicht mit den offiziellen Daten von Destatis und somit auch nicht mit den Ausgangsdaten von GWS überein. Somit werden auf Grund der unterschiedlichen Ausgangsflächen nicht die von GWS berechneten absoluten Veränderungen für den LUS verwendet, sondern die prozentualen Veränderungen berechnet. Die prozentualen Veränderungen werden letztlich mit den ausgezählten Nutzungsklassen aus dem Ausgangsraster (LBM-DE) verrechnet.

In Tabelle 8 werden die Unterschiede zwischen den sozioökonomischen Szenarien Stabilität, Trend und Dynamik zusammengefasst. Das Dynamikszenario zeichnet sich durch eine deutlich höhere Nettozuwanderung und höheres Wirtschaftswachstum aus. Ziele zum Klimaschutz und zur Reduktion der Flächeninanspruchnahme werden verfehlt. Das Trend- und Stabilitätsszenario unterscheiden sich nur im Bereich des Klimaschutzes und der Flächeninanspruchnahme. Während im Stabilitätsszenario die Ziele erreicht werden, werden im Trendszenario die Ziele nur verspätet erreicht oder gar verfehlt (vgl. Lutz et al. 2019: 94ff).

Tabelle 8 Zusammenfassung der drei Szenarien von GWS

	Stabilität	Trend	Dynamik
Bevölkerungsentwicklung (jährliche Nettozuwanderung ab 2020)	Konstanz (200 T)	Konstanz (200 T)	Zunahme (300 T)
BIP	1,3 % bis 2020 1 % bis 2025 0,8 % ab 2026	1,3 % bis 2020 1 % bis 2025 0,8 % ab 2026	1,7 % bis 2020 1,3 % bis 2025 1,2 % ab 2026
Energiewende/ Klimaschutz	Zielerreichung	Zielerreichung verspätet	Deutliche Zielverfehlung
Verkehr	Verkehr in 2045 weitgehend THG-neutral, Begrenzung der Verkehrsleistung	Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele deutlich verspätet	hohe Transportleistung, Umwelt- und Klimaschutzziele nachrangig
Landnutzung (vgl. Regionalmodellierung)	SuV-Ziel erreicht (30 ha minus x/Tag 2030)	Flächenziel verfehlt	Eher zunehmender Anstieg der Flächeninanspruchnahme

Quelle: Lutz et al. (2019): 94.

2.3.2 Baustellen

Für Baustellen wird keine zusätzliche Nachfrage modelliert und wird bereits für 2020 auf Null gesetzt. Die Baustellenflächen aus den Ausgangsdaten (LBM-DE 2015) werden entsprechend des Anteils an der absoluten Veränderung auf die drei Nutzungsarten 1) Flächen städtischer Prä-

gung; 2) Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude; 3) Verkehrsflächen verteilt. Damit werden im LUS keine Baustellenflächen modelliert.

2.3.3 Wald- und Forstflächen

Die Berechnung dieser Nutzungskategorie erfolgte mit Hilfe eines einfachen Modells, welches auf Entwicklungstendenzen der Vergangenheit aufbaut. Ausgangspunkt ist die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung von Destatis von 1992 bis 2013 (Veröffentlichungsrhythmus 1992-2008: 4-jährig; 2009-2013: 1-jährig). Bei der Flächenerhebung gilt jedoch zu berücksichtigen, dass ein Vergleich über den Zeitverlauf nur mit Einschränkungen möglich ist. Digitalisierung, Neuvermessungen, Flurbereinigungen, großflächige Umwidmungen von Truppenübungsplätzen stellen nur einige der Gründe dar, durch die einige Veränderungen der Flächenstatistik nicht auf reale Nutzungsänderungen zurückzuführen sind. Gleichzeitig werden Modellberichtigungen und Neuzuordnungen in der Flächenerhebung nicht gesondert ausgewiesen und treten weder zum selben Zeitpunkt noch in allen Kreisen gleichermaßen auf. Da jedoch ab dem Jahr 2014 u.a. auch wegen der Umstellung der Datengrundlage von ALB auf ALKIS die Probleme beim Zeitvergleich zunehmen, werden für die Berechnung der Wald-und Forstflächenprognose die Flächenerhebung bis einschließlich 2013 verwendet (vgl. Destatis 2018: 7f).

Aus den genannten Gründen ist eine lineare Fortschreibung der vergangenen Entwicklung nicht möglich. Ebenso wenig ist das arithmetische Mittel des Gesamtzeitraumes geeignet, da es anfällig gegenüber Ausreißern durch Umstellungen der Flächenstatistik ist. Als Alternative wurde stattdessen der Median der jährlichen Veränderung auf Kreisebene von 1992 bis 2013 gewählt und als konstante Veränderungrate bis 2045 festgelegt. Der Median hat den Vorteil, dass er gegenüber einzelnen Ausreißern stabil ist. Da jedoch für den Zeitraum von 1992 bis 2008 für die Waldentwicklung nur 4-Jahres-Durchschnitte vorliegen, ergeben sich durch die oben genannte Neuzuordnungen der Daten für einige Keise unplausible Werte, die für das Modell angepasst werden müssen. In einem ersten Schritt wurden dazu alle Kreise mit einem negativen Median auf null gesetzt. Da in Deutschland Wald u. a. durch das Bundeswaldgesetz und den entsprechenden Landeswaldgesetzen unter Schutz steht und im langfristigen Bundestrend Waldflächen zunehmen, ist ein Rückgang von Waldflächen, auch auf Kreisebene, die absolute Ausnahme (vgl. BMEL 2018: 4ff). Von den 42 (ca. 10 % der Grundgesamtheit) betroffenen Landkreisen und kreisfreien Städten, deren Median der Waldflächenentwicklung negativ ist, handelt es sich bei der Mehrheit um kreisfreie Städte. In einem zweiten Schritt wurden unplausibel hohe jährliche Wachstumsraten auf einen Maximalwert von 0,5 % bei Landkreisen und 0,2 % pro Jahr bei kreisfreien Städten begrenzt, das bedeutet über den Gesamtzeitraum bis 2045 ein maximales Gesamtwachstum von 14,5 % in Landkreisen und 5,8 % in kreisfreien Städten. In kreisfreien Städten ist eine langfristig starke Zunahme von Wald auf Grund der dafür fehlenden Flächen bzw. hohen Flächenkonkurrenz sehr unwahrscheinlich, denn selbst bei Bevölkerungsrückgang und einem möglicherweise damit einhergehenden Rückgang von Siedlungs- und Verkehrsflächen ist es ein sehr langwieriger Prozess, bis aus Brachflächen Waldflächen werden, da verschiedene Sukzessionsstufen dazwischenliegen. Die in der Vergangenheit beobachteten hohen Wachstumsraten in kreisfreien Städten lassen sich u. a. dadurch erklären, dass bei einem geringen Waldanteil bereits kleine absolute Veränderungen der Waldflächen sich in einer hohen Wachstumsrate widerspiegeln. Von dieser Anpassung waren 59 Kreise (ca. 15 % der Grundgesamtheit) betroffen, davon 38 kreisfreie Städte und 21 Landkreise. Sättigungseffekte werden darüber hinaus nicht berücksichtigt, da keine kreisübergreifenden Parameter bekannt sind, die einen Hinweis darüber geben, ab wann Sättigungseffekte in einem Kreis auftreten (wenngleich in der Literatur vereinzelt von einem Waldflächenmaximum von 80 % der Kreis- respektive Bezugsfläche gesprochen wird).

2.3.4 Naturnahe Flächen und Offenland

Die Annahmen zur Modellierung der naturnahen Flächen gehen von einer engen Verknüpfung der naturnahen Flächen mit den Wald- und Forstflächen aus. Betrachtet man mithilfe der CORINE Land Cover Daten Landnutzungsveränderungen über den Zeitraum von 1990 bis 2018, so stellt man fest, dass Waldflächenzuwachs häufig auf Flächen der Nutzungsklasse „Naturnahe Flächen und Offenland“ stattfindet. Diese Beobachtung spiegelt sich in der Modellierung insofern wieder, als dass die Waldflächenzunahme zuvorderst von dieser Nutzungskategorie abgezogen wird. Dabei wurde jedoch – wie im Folgenden beschrieben – eine Untergrenze eingezogen, denn ohne Begrenzung würden „Naturnahe Flächen und Offenland“ in vielen Kreisen vollständig verschwinden bzw. sehr stark abnehmen.

Die Nutzungsklasse „Naturnahe Flächen und Offenland“ ist in ihrer Zusammensetzung sehr heterogen, so fallen darunter „Wald-Strauch-Übergangsstadien“ ebenso wie „Felsflächen ohne Vegetation“. Stellt das erste bereits ein Übergangsstadium zum Wald dar, so ist letzteres häufig blanker Felsen im Hochgebirge, auf dem wegen der naturräumlichen Vorrausetzungen keine Entwicklung von Wald zu erwarten ist. Für die Nachfrageberechnung wird dieser höhere Detailierungsgrad herangezogen, um Flächen zu unterscheiden, bei denen einerseits eine Entwicklung zu Wald plausibel ist und bei denen andererseits eine Transformation zu Wald nicht zu erwarten ist. Neben der bereits erwähnten Nutzungsunterklasse „Felsfläche ohne Vegetation“ wird postuliert, dass bei folgenden weiteren drei Klassen kaum/keine Entwicklung zu Waldflächen zu erwarten ist: „Gletscher und Dauerschneegebiete“ (hochalpines Gelände) sowie „Strände, Dünen und Sandflächen“. Die Bewertung der Nutzungsklasse „Heiden und Moorheiden“ ist weniger eindeutig. Diese Flächen würden natürlicherweise bewalden, doch auf Grund ihrer Bedeutung als historische Kultur- und Naturlandschaft sind sie weitestgehend geschützt und werden erhalten. Alle oben genannten Flächen stehen daher für Waldentwicklung im Modell nicht zur Verfügung und bilden eine Untergrenze (Minimum des regionalen Raumanspruchs der „Naturnahe Flächen und Offenland“), die nicht unterschritten werden kann.

Für diese Untergrenze wird jedoch noch eine weitere Überlegung berücksichtigt und die daraus resultierende Fläche auf den gerade beschriebenen Basiswert addiert. So ist auch eine vollständige Waldtransformation aller naturnahen Flächen, die nicht zu den oben beschriebenen Nutzungsunterklassen gehören, unplausibel: So sind beispielsweise einige dieser Flächen geschützt oder es fehlen die naturräumlichen Vorrausetzungen für Wald (bspw. Höhenlage) oder es entstehen durch das Einstellen der landwirtschaftlichen Nutzung von Grenzertragsflächen neue Sukzessionsflächen. Aus diesem Grund wird postuliert, dass auch von diesen restlichen naturnahen Flächen auf Kreisebene nur maximal 50 % sich zu Wald verändern. Die Untergrenze bildet sich somit aus der oben beschriebenen stabilen Basis und 50 % der restlichen naturnahen Flächen. Zusammen ergibt das die Mindestflächennachfrage (Untergrenze), die nicht unterschritten werden darf. Kreise in Küstenregionen (z. B. Wittmund, Aurich) oder Kreise im Hochgebirge (z. B. Berchtesgadener Land) haben mit teilweise über 80 % an den gesamten naturnahen Flächen die höchsten Untergrenzen. Für Deutschland insgesamt bedeutet diese Herangehensweise einen Rückgang der „Naturnahen Flächen und Offenland“ bis 2045 um 22,5 %.

2.3.5 Landwirtschaftliche Flächen

Die landwirtschaftlichen Flächen sind abhängig von der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und der Waldflächenentwicklung. Ihre Entwicklung wird somit im Modell durch die zusätzliche Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie durch die Waldzunahme bestimmt, die nicht auf naturnahen Flächen verwirklicht werden kann. Landwirtschaftliche Flächen gehen somit im Prognosezeitraum bis 2045 in fast allen Kreisen, mit wenigen Ausnahmen bundesweit, zurück.

Der Rückgang landwirtschaftlicher Flächen steht im Einklang mit der Beobachtung der langfristigen Flächenentwicklung mit Corine Land Cover Daten. Neue Siedlungsgebiete entstehen hauptsächlich auf landwirtschaftlichen Flächen, wobei Siedlungsflächenausweisung auf landwirtschaftlichen Flächen in der Regel zu hohen Bodenwertsteigerung führt, was die Anreize zur Veräußerung hinsichtich hoher Veräußerungsgewinne verstärkt. Zusätzlich wird landwirtschaftliche Nutzung auf Grenzertragsflächen aufgegeben. Durch Sukzession entstehen darauf naturnahen Flächen oder Wald.

2.3.6 Abbauflächen und Deponien, Feuchtgebiete und Wasser

Diese Landnutzungskategorien werden im Zuge der Siedlungsflächenprojektion 2045 nicht modelliert. Es ist zwar anzunehmen, dass es im Zeitraum bis 2045, insbesondere durch die Renaturierung von Braunkohle- sowie Kiestagebauflächen, zu einer Zunahme an Wasserflächen und Abnahme an Abbauflächen kommt, doch liegen dem BBSR weder flächendeckende exakte räumliche Daten noch genaue Hinweise ewa zum möglichen Zeitverlauf des Kohleausstiegs vor. Die Veränderungen sind u. a. abhängig von politischen Entscheidungen sowie Renaturierungsprozessen. Der Abschlussbericht der im Jahr 2018 eingesetzten Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung (umgangssprachlich Kohlekommission) wurde zum 25.01.2019 vorgelegt (vgl. Kommission WSB 2019), konnte aber für den Bericht hier nicht mehr in seiner räumlichen Auswirkung ausgewertet werden. Kleinere Veränderungen wie geflutete Kiesgruben oder die Änderung des Laufes von Flüssen oder Bächen sind mangels geeigneter Daten ebenfalls nicht prognostizierbar.

2.3.7 Diskussion: Zusätzliche Landnutzungsklassen

An das BBSR wurde der Wunsch herangetragen, zu prüfen, inwieweit es möglich wäre, die Landnutzungsprojektion um zusätzliche Landnutzungsklassen zu erweitern, die für die Beurteilung von Klimavulnerabilität nützlich wären. Grundsätzlich lassen sich mit dem Land Use Scanner beliebig viele Landnutzungsklassen berechnen, jedoch bedarf es für jede zusätzliche Landnutzungsklasse einer eigenen Nachfragemodellierung auf regionaler Ebene sowie eines eigenen Verteilungsmodells und brauchbarer Eignungskarten.

Am Beispiel der CLC-Klasse Obst-und Beerenobstbestände sollen einige der Schwierigkeiten erläutert werden. Grundbedingung ist ein regionales Nachfragemodell für zukünftige Raumnutzung über einen Zeitraum von 30 Jahren. Landwirtschaftliche Flächenansprüche sind u. a. abhängig von der Nachfrage nach den darauf produzierten Gütern, den Weltmarktpreisen, den staatlichen Subventionen, der Zollpolitik und dem Ertragspotential. Über einem Zeitraum von 30 Jahren verändern sich Konsumgewohnheiten und gesetzliche Regularien. Die Fortsetzung und Verstärkung des Trends nach biologischer Landwirtschaft und regionalen Produkten erzeugt andere Raumansprüche als der Abbau von internationalen Handelsbarrieren und staatlichen Subventionen. Die mögliche Entwicklung neuer Hochertragssorten, hocheffizienter Dünger und klimatische Veränderungen könnten trotz steigender Güternachfrage zu sinkenden Raumansprüchen führen. Die Vielzahl an Einflussfaktoren macht bereits auf nationaler Ebene eine vernünftige Abschätzung sehr schwierig und es bedarf zusätzlich noch einer Regionalisierung.

Zusätzlich muss ein passendes Eignungs- und Verteilungsmodell auf Rasterebene entwickelt werden. Nun haben aber unterschiedliche Obstsorten jeweils spezifische Standortansprüche, so stellt ein Walnussbaum andere Ansprüche an Boden, Lage und Klima als ein Apfelbaum oder gar Beerenkulturen. Zusätzlich gibt es je nach Region unterschiedliche Anbautraditionen und Erfahrungsschätze. Eine für das Modell notwendige Generalisierung ist damit kaum möglich. Dem Land Use Scanner liegt ein Optimierungsmodell zugrunde, welches durch die Gewichtung unterschiedlicher Kriterien die optimale Nutzung einer Rasterzelle festlegt und sie dementsprechend

verteilt. Da allgemein gültige Kriterien(-gewichtungen) nicht für alle Obstbestände entwickelt werden können, besteht nur die Möglichkeit, die einzelnen Obstorten getrennt voneinander zu betrachten. Doch dann benötige man für jede in Deutschland angebaute Obstsorte ein eigenes Nachfragemodell und spezifische Eignungsmodelle (Boden, Lage, Klima, etc.), das zudem stark von Annahmen zur Entwicklung des Obstanbaus auf konkurrierenden Weltmärkten abhängig wäre. Diese Eignungsmodelle wären in einem solchen Fall zwar denkbar, doch würde sich die Komplexität der Gesamtberechnung massiv erhöhen und den Rahmen des Projekts sprengen. Als weiteres Problem kommt hinzu, dass nicht für jedes Eignungskriterium flächendeckend Daten vorhanden sind.

Die theoretische Möglichkeit, dem Modell neue Nutzungsklassen hinzuzufügen, besteht. In der Praxis stellt sich jedoch die Frage, inwieweit der enorme Aufwand gerechtfertigt ist und ob das Gesamtmodell dadurch verbessert würde. Mit jeder zusätzlichen Modellierung kommen weitere Unsicherheitsfaktoren in das Gesamtmodell. Über einen Prognosezeitraum von annähernd 30 Jahren können bereits kleine Fehlannahmen große Auswirkungen haben. Eine scheinbare Genauigkeit und Unterscheidungsschärfe wird somit schnell zu einer Scheingenauigkeit, bei der die Prognoseunsicherheit die dargestellte Genauigkeit zum Teil bei weitem übersteigt.

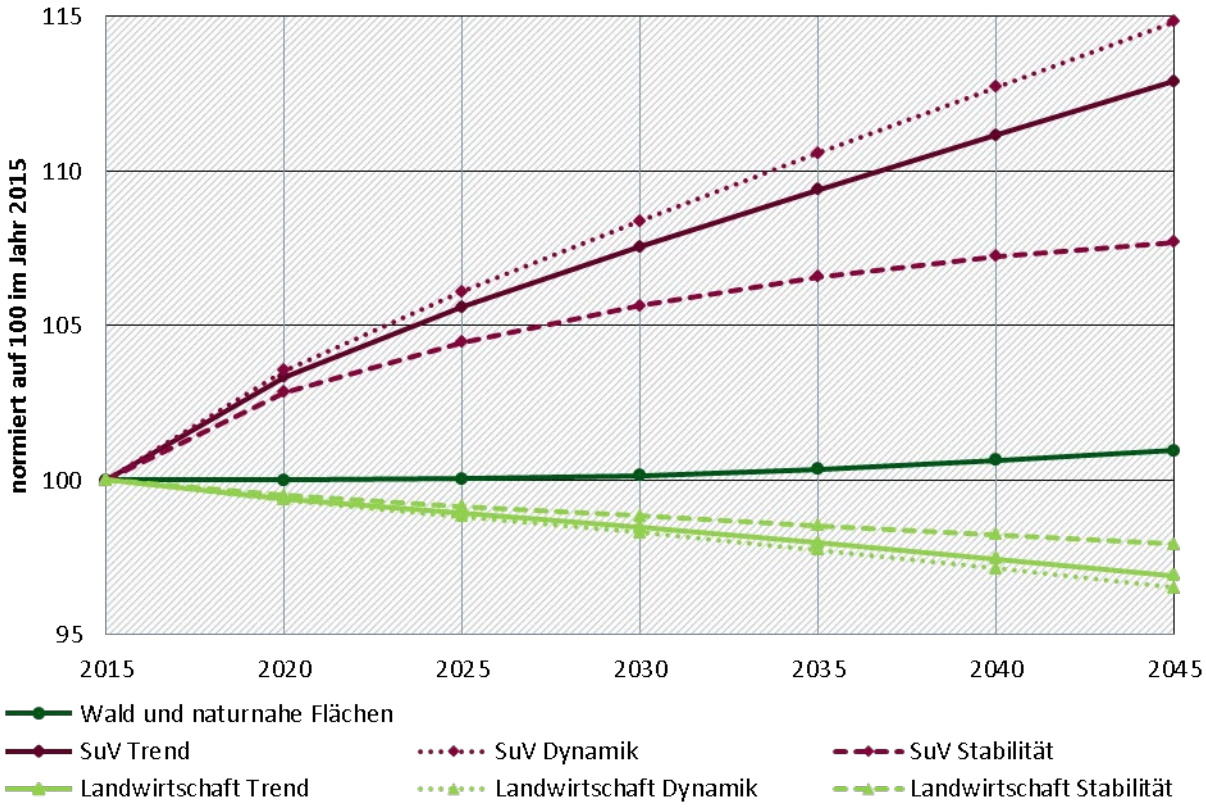
3 Ergebnisse

Für die Vulnerabilitätsanalyse 2021 werden drei Szenarien der Raumentwicklung unterschieden: Trendszenario, Dynamikszenario und Stabilitätsszenario. Eine Unterscheidung findet dabei ausschließlich in der Modellierung der regionalen Raumansprüche statt. Die räumlichen Eignungskarten und die ökonomischen Faktoren (Änderungswahrscheinlichkeiten) bleiben über die drei Szenarien hinweg unangetastet.

Grundlage bilden die sozioökonomischen Szenarien der GWS, die mit dem Modell PANTA RHEI Regio regionale Szenarien (Kreisebene) der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung erstellt haben. Im Modell der GWS werden unter anderem Bevölkerungs- und BIP-Entwicklung, Klimaschutz- und Verkehrsziele berücksichtigt und in eine regionalisierte Landnutzungsmodellierung szenarioabhängig übertragen. In Tabelle 8 (S. 29) werden die grundlegenden Annahmen der Szenarien dargestellt. Nähere Informationen zu den Szenarien, den getätigten Annahmen und die sich daraus ergebenden Entwicklungen sind in der Studie von GWS (Lutz et al. 2019) nachzulesen.

Die Modellierung der Waldflächen und naturnahen Flächen wurde davon unabhängig erstellt und wird in allen drei Szenarien identisch verwendet. Die Entwicklung der Landwirtschaftsflächen ist neben der Waldentwicklung auch von der Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen abhängig und unterscheidet sich demnach in den Szenarien.

Abbildung 2 Projektion der Landnutzungsentwicklung 2015 – 2045 (2015 = 100 %)



*SuV Siedlungs- und Verkehrsfläche

Quelle: BBSR Behmer, eigene Berechnung

In Abbildung 2 und Tabelle 13-15 (Anhang) ist die Entwicklung der Landnutzung in den verschiedenen Szenarien dargestellt. Naturnahe Flächen und Waldflächen nehmen demnach bis zum Jahr 2045 leicht zu, während Landwirtschaftsflächen in allen drei Szenarien abnehmen und Siedlungs- und Verkehrsflächen teilweise stark zunehmen. Die dargestellte Entwicklung zeigt

auch, dass sich das absolute Ausgangsniveau der verschiedenen Landnutzungsklassen stark unterscheidet. Ein starker Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsflächen und ein leichter Anstieg der Waldflächen spiegeln sich nur in einem moderaten Rückgang der Landwirtschaftsflächen wider.

Abbildung 3 Modellierung des LUS für Hamburg: Entwicklung der SuV bis 2045

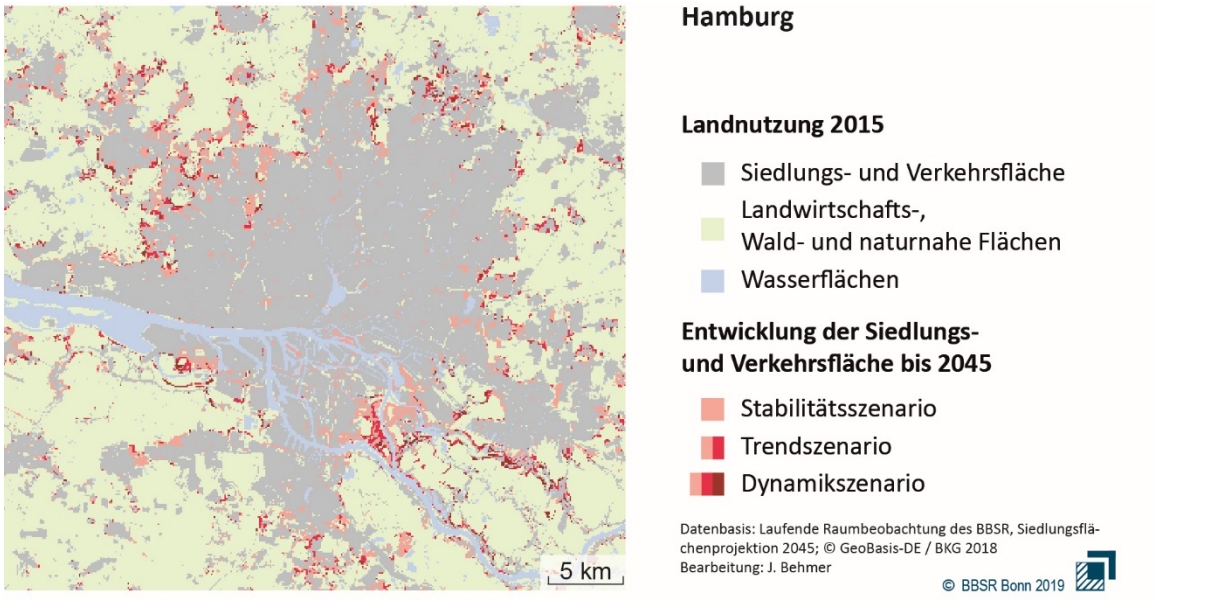


Abbildung 3 zeigt am Beispiel Hamburg das Ergebnis der Modellierung mit dem LUS auf Rasterebene. Ausgangspunkt ist die stark vereinfachte Landnutzung 2015. Die drei Szenarien bauen in dieser Darstellung aufeinander auf. Das Stabilitätsszenario bildet dabei die Basis. Das Dynamikszenario ist die Kombination aus allen dargestellten Szenarien. Wie man gut erkennen kann, findet die Zunahme der SuV überwiegend am Stadtrand von Hamburg statt. Innerstädtische Freiflächen sind kaum vorhanden und können dementsprechend auch nicht entwickelt werden.

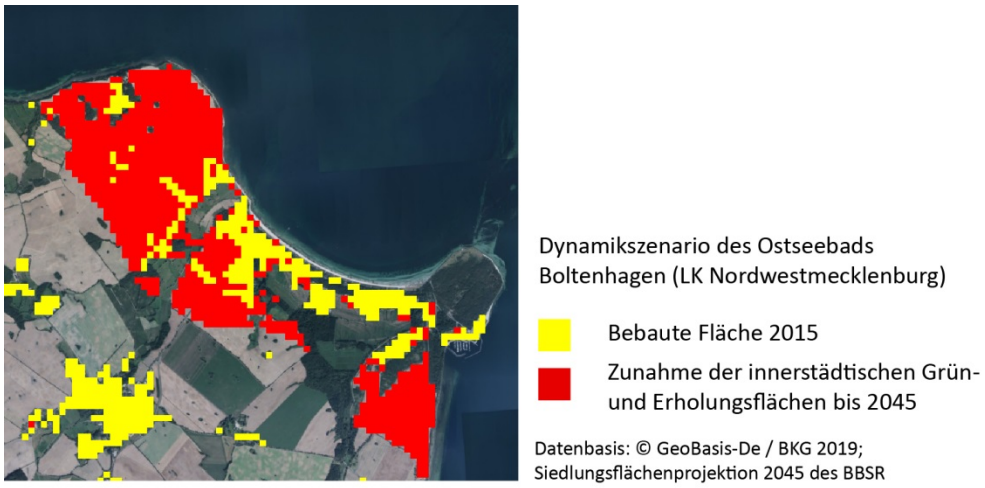
3.1 Grenzen der Modellierung des Land Use Scanners

Für die Interpretation der Ergebnisse des LUS ist es wichtig, sich der Grenzen der Modellierung bewusst zu werden. Das Modell ist nicht perfekt. Es ist wie jedes Prognose- oder Szenarienmodell abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Algorithmus und der Auflösung. Jeder dieser Bereiche ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden, die sich im Modell fortsetzen. Die Ausgangsdaten sind von unterschiedlicher Qualität und Aktualität, die Auflösung lässt geringe Veränderungen insbesondere linearer Elemente (beispielsweise Straßen) unberücksichtigt und der Algorithmus beruht auf einem Optimierungsmodell, das der Komplexität und Emotionalität von realen Entscheidungsprozessen wohl nicht in jedem Fall gerecht wird. Auch die getätigten Annahmen können sich in der Zukunft als falsch herausstellen, so hätten eine neue Zuwanderungswelle oder ein starker Geburtenanstieg Einfluss auf die Bevölkerungsprognose, die Durchsetzung neuer Technologien auf das Mobilitätsverhalten und/oder das BIP, die Veränderung der politischen Rahmenbedingungen auf Handel und Wohlstand und nicht zuletzt verändert auch der Klimawandel die Bedingungen für Landwirtschafts- und Siedlungsflächen. Menschliches Verhalten ist komplex und lässt sich auch mit bester Methodik nicht perfekt vorhersagen, doch gleichzeitig ist menschliches Verhalten nicht beliebig. Die Antriebsfedern für Verhalten und Entscheidungen werden sich auch in Zukunft nicht grundlegend verändern. So ist trotz aller Unsicherheiten eine Modellierung künftiger Raumnutzungen grundsätzlich möglich, jedoch immer unter dem Vorbehalt der getätigten Annahmen.

Mit dem heutigen Wissen und Datenbestand lassen sich die meisten genannten Unsicherheitsfaktoren nicht grundlegend verbessern. Doch daneben gibt es auch modellbedingte Ungenauigkeiten, die sich mit entsprechenden Zeit- und Ressourcenaufwand verbessern und korrigieren ließen. Im Rahmen der Aktualisierung des LUS war es jedoch aufgrund des knappen Zeitbudgets nicht möglich alle Ungenauigkeiten auszubessern. So sind bei der Sichtung und Prüfung der Ergebnisse zwei größere und einige kleinere Unplausibilitäten aufgefallen, die langfristig ausgebessert werden sollten. Für die Vulnerabilitätsanalyse haben die gefundenen Ungenauigkeiten nur eine geringe Bedeutung.

Bei dem ersten Problem handelt es sich um die Verteilung von innerstädtischen Grün- und Erholungsflächen in ländlichen Landkreisen. Bei der Verteilung von diesen Flächen wird unter anderem berücksichtigt, wie gut eine Gemeinde mit Freizeit und Erholungseinrichtungen je Einwohner ausgestattet ist, wobei auch Tourismus und Einkaufsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieses Faktors ist grundsätzlich sinnvoll und deckt sich mit den bisherigen Entwicklungen, doch führt es in bestimmten Landkreisen mit einer oder wenigen Gemeinden mit hohem Tourismusaufkommen (zum Beispiel Seebäder an der Ostsee oder Kurorte) zu unplausiblen Ergebnissen. Durch die besonders gute Ausstattung mit sozialen und kulturellen Infrastruktureinrichtungen und den hohen Tourismus bei geringer Bevölkerung weisen diese Gemeinden besonders hohe Eignungswerte für innerstädtische Grün- und Erholungsflächen auf. Da der Optimierungsalgorithmus des LUS allein die Eignung berücksichtigt und Sättigungseffekte modellseitig nicht berücksichtigt werden können, kommt es in einigen Landkreisen zu einer Konzentration des Flächenzuwachses in einzelnen Gemeinden. Am Beispiel des Seebads Boltenhagen (Abb. 4) wird der Effekt besonders deutlich. Nach der Modellierung des LUS soll im Jahr 2045 (Dynamikszenario) die gesamte Gemeinde von einer Erholungsfläche eingerahmt werden, die zweimal so groß ist wie die bebaute Fläche. Eine solche Entwicklung wird nicht eintreten!

Abbildung 4 Entwicklung der innerstädtischen Grün- und Erholungsflächen im Dynamikszenario bis 2045 in Boltenhagen



Für die Vulnerabilitätsanalyse hat dieses Problem keinen großen Einfluss, denn es sind nur innerstädtische Grün- und Erholungsflächen im ländlichen Raum betroffen. Innerstädtische Grün- und Erholungsflächen sind für die Vulnerabilitätsanalyse im Zusammenhang mit dem Stadtklimaeffekt von Bedeutung, da sie dort klimatisch ausgleichend auf die bebaute Fläche wirken. Der Stadtklimaeffekt betrifft überwiegend große Mittelstädte und Großstädte. In kleineren Städten und Gemeinden spielt die ausgleichende Wirkung der innerstädtischen Grün- und Erholungsflächen gegenüber den umgebenden Landwirtschafts- und Waldflächen eine untergeordnete Rolle. Bei den betroffenen Flächen handelt es sich überwiegend um landwirtschaftliche Flä-

chen, die sich dem Modell nach bis 2045 zu innerstädtischen Grün- und Erholungsflächen entwickeln werden. Die kleinräumige Klimawirkung dieser beiden Flächennutzungsarten ist zwar nicht identisch, unterscheidet sich aber auch nicht gravierend.

Das zweite Problem ergibt sich aus einer fehlenden Einbindung des niederrangigen öffentlichen Verkehrs. Von LUS werden zwar IC-Haltestellen berücksichtigt, nicht jedoch S- und U-Bahnen, Straßenbahnen und Busverbindungen. Hintergrund ist, dass derzeit keine aufbereiteten flächendeckenden Daten vorliegen, die eine der Bedeutung der Anbindung entsprechende Gewichtung ermöglichen würden. Ein zusätzliches Modell zur fußläufigen Erreichbarkeit von Haltestellen liegt ebenfalls nicht vor. Erschwerend kommt hinzu, dass die Einbindung neuer Eignungskarten mit einem hohen Aufwand verbunden ist, da der Algorithmus angepasst und neu kalibriert werden muss. Die Konsequenz der fehlenden Berücksichtigung zeigt sich besonders in Metropolregionen außerhalb der Kernstädte. So werden Städte und Gemeinden mit S-Bahnhaltestellen gegenüber Gemeinden mit Autobahnanschluss in ihrer Eignung benachteiligt. Die Modellierung des LUS überschätzt damit das Wachstum von Gemeinden mit nahem Autobahnanschluss und unterschätzt das Wachstum von Gemeinden mit einer hochwertigen öffentlichen Verkehrsanbindung. Da in Metropolregionen die meisten größeren Gemeinden sowohl einen guten Anschluss an die Autobahn wie auch an den Öffentlichen Verkehr besitzen und darüber hinaus eine Vielzahl an weiteren Faktoren in die Modellierung der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung miteingeht, wirkt sich die fehlende Berücksichtigung nur in Ausnahmefällen stärker auf die Modellierung aus. Ein Beispiel hierfür ist der Landkreis Ebersberg (Metropolregion München), bei dem der nördliche Teil des Landkreises durch Autobahn und S-Bahn gut erschlossen ist, die Mitte des Landkreises u. a. mit der Kreisstadt Ebersberg jedoch nur durch eine Bundesstraße und S-Bahn erschlossen ist. Ein großes gemeindefreies Gebiet trennt den Nordteil von der Mitte. Der LUS überschätzt in diesem Fall die Entwicklung des Nordteils, während die Entwicklung der Gemeinden im Zentrum des Landkreises unterschätzt wird. Da eine solche Konstellation jedoch nur selten Auftritt, ist die Auswirkung auf die Vulnerabilitätsanalyse als gering einzuschätzen. Nichtsdestotrotz ist die die Berücksichtigung des ÖV-Verkehrs als zusätzliche Eignungskarte perspektivisch ein wichtiger Punkt, der im LUS verbessert werden sollte.

Es gibt noch einige kleine Ungenauigkeiten, die sich nur auf sehr kleine Gebiete auswirken und bei Berücksichtigung zu geringen Verschiebungen, meist innerhalb einer Gemeinde, führen würden. So werden beispielsweise Kläranlagen bei der Eignung von Siedlungsgebiet nicht berücksichtigt, obwohl die direkte Nachbarschaft einer solchen Anlage für Wohnbebauung auf Grund fehlender Attraktivität ein Ausschlussgrund sein dürfte. Ähnliches gilt für Autobahnen, deren direkte Nachbarschaft für Wohnbebauung eher unattraktiv ist. Ein weiteres Beispiel ist die Insel Reichenau im Bodensee. Sie ist UNESCO-Weltkulturerbe und somit ist eine flächendeckende Bebauung wohl weitestgehend ausgeschlossen. Doch UNESCO-Welterbe ist bisher keine Eignungskarte und Konstanz eine Stadt mit hohem Siedlungsdruck und so wird sie im Modell teilweise bebaut. In allen Fällen bedarf es weiterer Eignungskarten, die zukünftig berücksichtigt werden sollten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des LUS für alle drei Szenarien plausible Veränderungen der Landnutzung. Die Plausibilität der Rasterzellenverteilung lässt sich dabei nicht durch mathematische Formeln und Methoden bestimmen, sondern bedarf einer qualitativen Experteneinschätzung. Dazu wurde sich intensiv mit den Ergebnissen auseinandergesetzt und an vielen Stellen im gesamten Bundesgebiet (wie zum Beispiel die Region Köln-Bonn, Metropolregion München, Region Mainz-Wiesbaden, Regensburg, LK Nordwestmecklenburg) geprüft, ob die modellierte Entwicklung raumplanerisch nachvollziehbar ist und bereits heutigen Entwicklungstendenzen entspricht. Mit Ausnahme der oben genannten Probleme sind die modellierten Muster der Landnutzungsentwicklung sowohl in städtischen Raum mit starken Wachstumstendenzen der

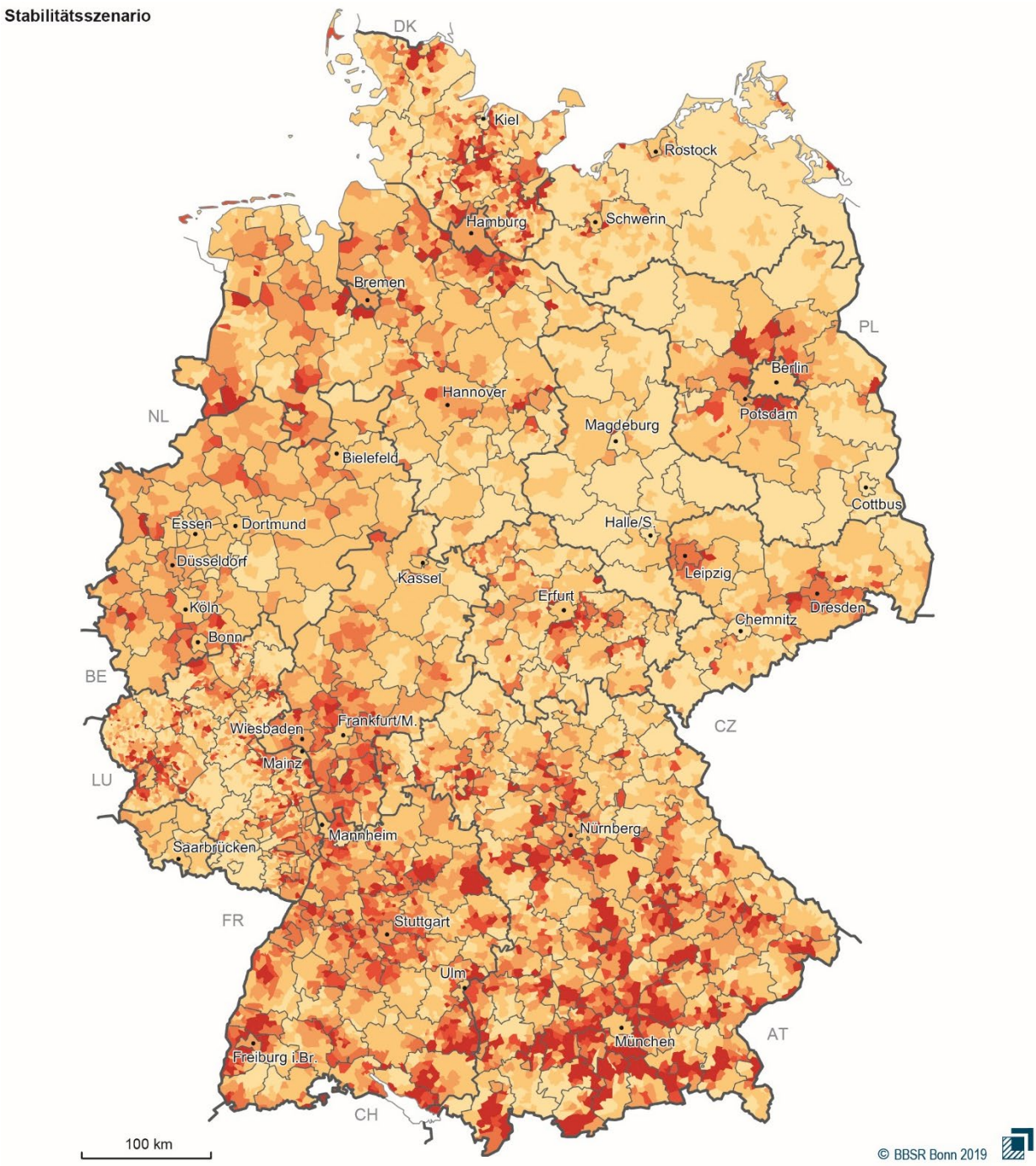
Siedlungs- und Verkehrsfläche wie auch im peripher ländlichen Raum mit Stagnation der SuV und Zunahme von Waldflächen nachvollziehbar. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des LUS für eine pixelgenaue Auswertung nicht geeignet sind, sondern sie zeigen Muster der Landnutzungsentwicklung auf.

3.2 Stabilitätsszenario

Das Stabilitätsszenario der GWS geht von einer konstanten jährlichen Nettozuwanderung von 200.000 Personen aus und einem geringen und zunehmend abschwächenden Wirtschaftswachstum. In dem Szenario werden sowohl die gesteckten Ziele für Klimaschutz und Energiewandel, wie auch für den Flächenverbrauch (30 ha /Tag) erreicht (vgl. Tabelle 8). Für das Szeanrio wird von einer starken Zunahme des Anteils an erneuerbarer Energie an der Bruttostromerzeugung (2045: 84 %), einer Zunahme des Güterverkehrs um 39 % bis 2045 und einem Rückgang des Personenverkehrs um 13 % ausgegangen(vgl. Lutz et al. 2019: 101ff). Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der gesamten Katasterfläche steigt moderat von 14 % im Jahr 2015 auf 14,7 % im Jahr 2045, dabei wird die stärkste Zunahme für die kreisfreien Großstädte und städtischen Kreise postuliert (vgl. Lutz et al. 2019: 140).

Die Karte in Abbildung 5 zeigt die von LUS modellierte Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Gemeindeebene auf Basis des Stabilitätsszenarios von GWS. Die großen Metropolregionen verzeichnen mit Ausnahme von Rhein-Ruhr starkes Flächenwachstum, wobei die Kernstädte davon nicht betroffen sind. Besonders stark ist das Flächenwachstum im Süden und im Umland von Hamburg und Berlin ausgeprägt. Auffällig ist die Metropolregion München, die sich durch eine starke Zunahme im Umland gekennzeichnet ist. Durch Flächenmangel, aber auch die wachsende Beschäftigtensuburbanisierung und die hohen Wohnkosten in München verlagert sich das Wachstum in die Außenbereiche und zieht sich entlang der wichtigen Verkehrswege bis weit ins bayerische Hinterland. Weniger stark ausgeprägt findet man diesen Effekt auch in Stuttgart, Frankfurt a. M., Hamburg und Berlin. Im peripheren ländlichen Raum stagniert die SuV-Entwicklung bzw. weist nur ein schwaches Wachstum auf.

Abbildung 5 Stabilitätsszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene



Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Stabilitätsszenario zwischen 2015 und 2045 in %

- 0 und weniger
- >0 bis unter 6
- 6 bis unter 12
- 12 bis unter 18
- 18 bis unter 24
- 24 und mehr

Hinweis: Die Modellierung basiert auf Eckdaten der sozio-ökonomischem Szenarien 2018 der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Drei mögliche Entwicklungsszenarien der Siedlungs- und Verkehrsflächen für die Kreise Deutschlands bis 2045 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Modell PANTA RHEI Regio berechnet und in einem weiteren Schritt mit dem Land Use Scanner (LUS) von object vision bv nach einem Optimierungsmodell unter Nutzung von Eignungskarten kleinräumig verteilt.
Obwohl die Verteilungsmuster weitestgehend plausibel sind, gilt zu beachten, dass jede Modellierung abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Allokationsalgorithmus und der Auflösung ist.

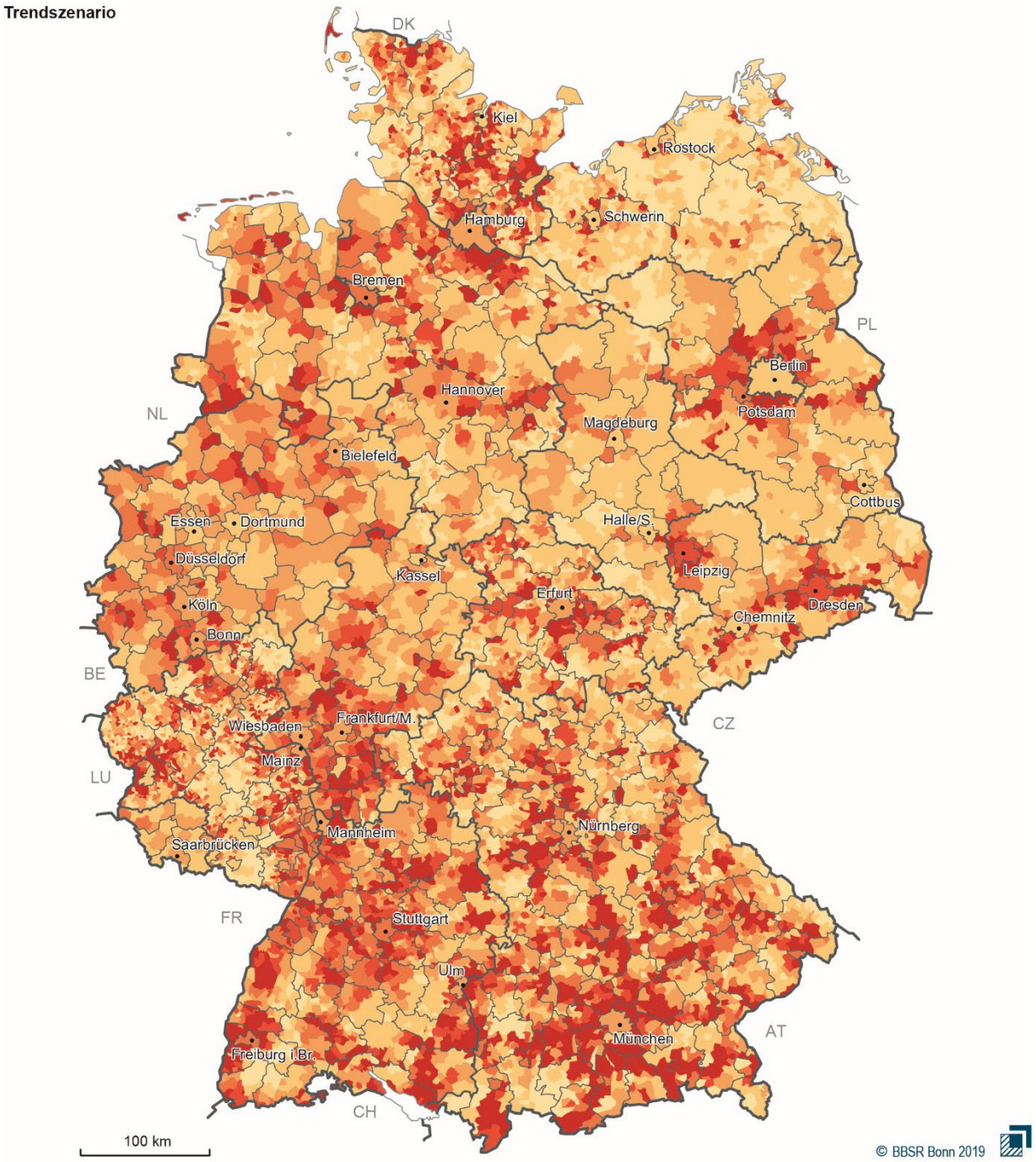
Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Siedlungsflächenprojektion 2045; Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2016 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: J. Behmer

3.3 Trendszenario

Im Trendszenario der GWS werden die Entwicklungen der Vergangenheit in die Zukunft fortgeschrieben. Die Ausgangsannahmen der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung sind mit dem Stabilitätsszenario identisch. Im Unterschied zum Stabilitätsszenario werden jedoch die Ziele zum Klimaschutz und Energiewende erst verspätet erreicht und das Flächenverbrauchsziel von 30 ha / Tag verfehlt (vgl. Tabelle 8). In diesem Szenario sinkt der Flächenverbrauch kontinuierlich auf etwa 40 ha / Tag im Jahr 2045. Damit steigt der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche deutlich stärker als im Stabilitätsszenario von 14,0 % (2015) auf 15,4 % (2045) (vgl. Lutz et al. 2019: 140). In diesem Szenario wird von einem starken Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energie an der Bruttostromerzeugung von 27,2 % (2015) auf 65,2 % (2045) und im Gegensatz zum Stabilitätsszenario von einem Anstieg des Personenverkehrs um 6 % bis 2045 und des Güterverkehrs um 47 % ausgegangen (vgl. Lutz et al. 2019: 94ff).

Die Karte in Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des LUS auf Gemeindeebene für das Trendszenario der GWS. Im Gegensatz zum Stabilitätsszenario sind weitestgehend alle Regionen von Flächenwachstum betroffen und alle Metropolregionen weisen ein starkes Wachstum auf. Die beim Stabilitätsszenario beschriebenen Muster verstärken sich im Trendszenario. So findet Flächenwachstum überwiegend in Metropolregionen statt, jedoch nur gering in den eigentlichen Metropolen. Von besonders starkem Wachstum sind der Süden mit Bayern, Baden-Württemberg und Hessen und die Region um Hamburg und Berlin betroffen. Aber auch in Ostdeutschland weisen insbesondere Thüringen und die Region um Dresden und Leipzig starkes Wachstum auf. Nur Mecklenburg-Vorpommern verzeichnet mit wenigen Ausnahmen flächendeckend eine geringe Zunahme an SuV.

Abbildung 6 Trendszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene



Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Trendszenario zwischen 2015 und 2045 in %

- 0 (keine Veränderung)
- >0 bis unter 6
- 6 bis unter 12
- 12 bis unter 18
- 18 bis unter 24
- 24 und mehr

Hinweis: Die Modellierung basiert auf Eckdaten der sozio-ökonomischem Szenarien 2018 der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Drei mögliche Entwicklungsszenarien der Siedlungs- und Verkehrsflächen für die Kreise Deutschlands bis 2045 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Modell PANTA RHEI Regio berechnet und in einem weiteren Schritt mit dem Land Use Scanner (LUS) von object vision bv nach einem Optimierungsmodell unter Nutzung von Eignungskarten kleinräumig verteilt.
Obwohl die Verteilungsmuster weitestgehend plausibel sind, gilt zu beachten, dass jede Modellierung abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Allokationsalgorithmus und der Auflösung ist.

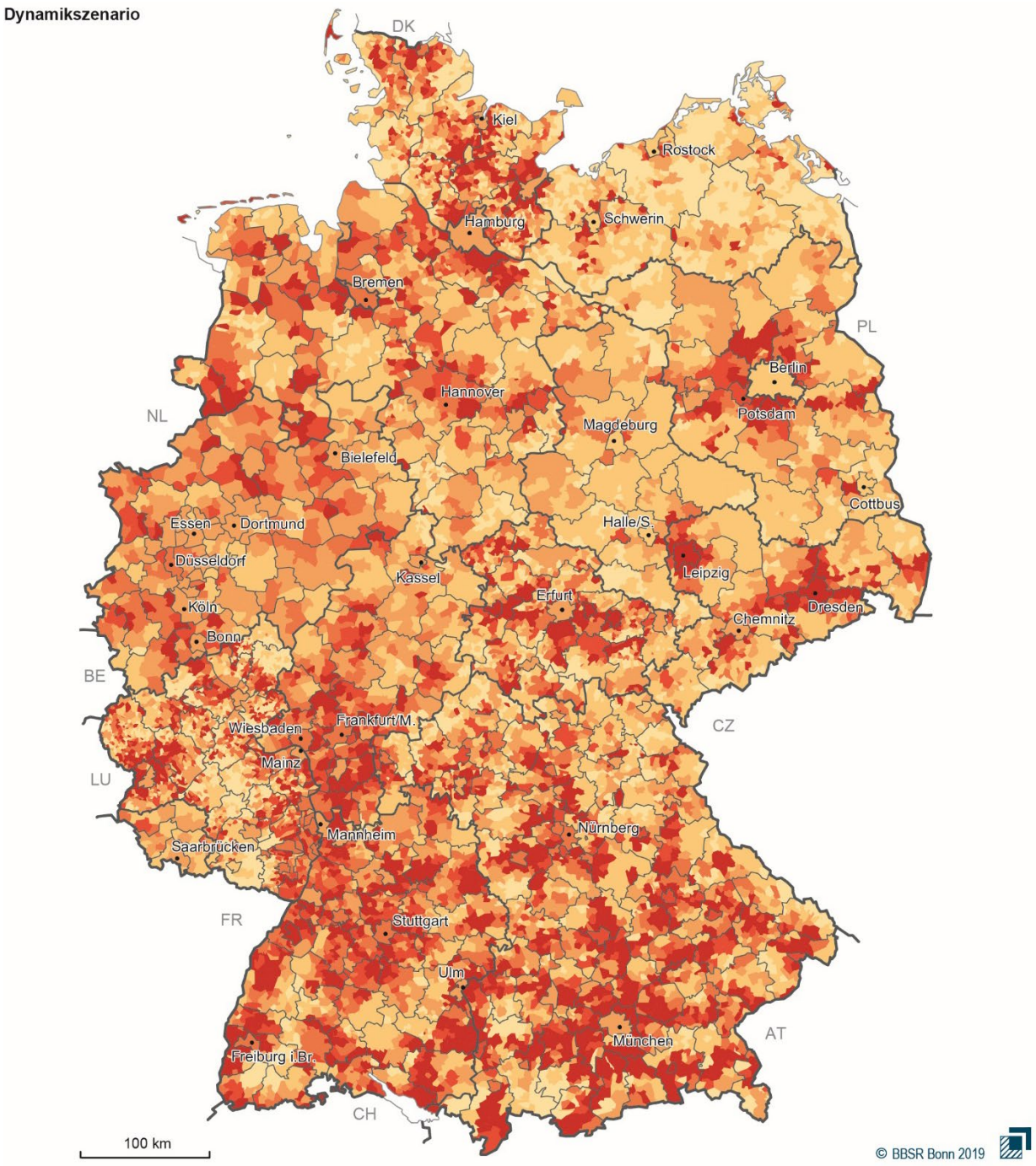
Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Siedlungsflächenprojektion 2045; Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2016 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: J. Behmer

3.4 Dynamikszenario

Im Dynamikszenario von GWS wird eine deutlich dynamischere Entwicklung postuliert. So beträgt in diesem Szenario die jährliche Nettozuwanderung 300.000 Personen und auch das Wirtschaftswachstum ist stärker ausgeprägt. Die Ziele zum Klimaschutz und Energiewende werden deutlich verfehlt, die Ziele zur Flächeninanspruchnahme können ebenfalls nicht erreicht werden (vgl. Tabelle 8). So sinkt die tägliche Flächeninanspruchnahme auf ca. 45 ha. Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche steigt etwas stärker als im Trendszenario von 14,0 % (2015) auf 15,6 % (2045) (vgl. Lutz et al. 2019: 140). Im Dynamikszenario wird ein massiver Anstieg von Import und Export postuliert und so wird auch massiver Anstieg des Güterverkehrs um 75 % und des Personenverkehrs um 14 % bis zum Jahr 2045 angenommen. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung ist vergleichbar mit dem Trendszenario und soll im Jahr 2045 61,5 % betragen (vgl. Lutz et al. 2019: 98ff).

Die Karte in Abbildung 7 zeigt mit dem Dynamikszenario der GWS eine weitere Variante der SuV-Entwicklung auf Gemeindeebene. Im bundesweiten Muster findet man keine großen Unterschiede zum Trendszenario, nur ist die Entwicklung stärker ausgeprägt. Annähernd im gesamten Bundesgebiet nimmt die SuV zu und insbesondere ausgehend von Metropolregionen findet starkes Wachstum statt. Im Vergleich mit dem Trendszenario ist das weite Umland stärker von Wachstum betroffen.

Abbildung 7 Dynamikszenario: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene



Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Dynamikszenario zwischen 2015 und 2045 in %

- 0 (keine Veränderung)
- >0 bis unter 6
- 6 bis unter 12
- 12 bis unter 18
- 18 bis unter 24
- 24 und mehr

Hinweis: Die Modellierung basiert auf Eckdaten der sozio-ökonomischem Szenarien 2018 der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Drei mögliche Entwicklungsszenarien der Siedlungs- und Verkehrsflächen für die Kreise Deutschlands bis 2045 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Modell PANTA RHEI Regio berechnet und in einem weiteren Schritt mit dem Land Use Scanner (LUS) von object vision bv nach einem Optimierungsmodell unter Nutzung von Eignungskarten kleinräumig verteilt.
Obwohl die Verteilungsmuster weitestgehend plausibel sind, gilt zu beachten, dass jede Modellierung abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Allokationsalgorithmus und der Auflösung ist.

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Siedlungsflächenprojektion 2045; Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2016 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: J. Behmer

3.5 Die Szenarien im Vergleich

In den Karten der drei Szenarien Stabilität, Trend und Dynamik wird ein grundlegendes Entwicklungsmuster deutlich. Die Metropolregionen sind der Ausgangspunkt des Wachstums der SuV. Das Umland um die meisten Metropolen wächst stark, die eigentlichen Zentren jedoch meist nur moderat. Die Tabelle 9 zeigt eine Auswertung der Gemeinden nach ihrer Lage im Raum (BBSR: Raumtyp Lage). Die Auswertung bestätigt den beschriebenen Prozess. In allen drei Szenarien ist die SuV-Entwicklung in zentralen Gemeinden, also im weiteren Umland von Großstädten am stärksten ausgeprägt. Die sehr zentralen Orte, also die Großstädte und ihre direkte Umgebung wachsen ebenfalls stark. Zieht man zusätzlich Tabelle 10 hinzu wird deutlich, dass das enge Umland stärker wächst wie die Großstädte, denn das Wachstum sehr zentraler Gemeinden ist durchgehend höher wie die Zunahme der Großstädte (Stabilitätsszenario: 8,9 % zu 5,1 %) und kann somit nur im engen Umland generiert werden. Alle drei Szenarien zeigen somit eine Flächensuburbanisierung. Periphere und sehr periphere Gemeinden zeigen in allen Szenarien ein deutlich schwächeres Wachstum wie die zentralen Gemeinden. Doch selbst in Stabilitätsszenario nehmen die SuV zu, obwohl die meisten sehr peripheren Gemeinden in Regionen mit prognostiziertem Bevölkerungsrückgang liegen.

Tabelle 9 Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Lage der Gemeinde in Prozent

	Stabilitätsszenario	Trendszenario	Dynamikszenario
Sehr Zentral	8,9	13,4	15,5
Zentral	10,3	16,6	18,9
Peripher	4,9	9,9	11,6
Sehr Peripher	1,2	5,2	6,1

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tabelle 10 zeigt die unterschiedliche Entwicklung der SuV in den verschiedenen Gemeindetypen. In allen Szenarien verzeichnen die Mittel- und Kleinstädte das stärkste SuV-Wachstum, wobei im Stabilitätsszenario die Mittelstädte etwas stärker wachsen, während im Trend- und Dynamikszenario die größeren Kleinstädte das stärkste Wachstum verzeichnen. Damit setzt sich eine bereits heute beobachtbare Entwicklung zum Flächenwachstum von Mittel- und Kleinstädten fort. Während in Großstädten nur mehr wenige Flächen zur weiteren Außenentwicklung zur Verfügung stehen, verlagert sich die Entwicklung in kleinere Städte, die die entsprechenden Flächen zur Verfügung stellen können. Dies ist auch deswegen plausibel, da Mittel- und große Kleinstädte auch einer alternden Gesellschaft die notwendigen sozialen Einrichtungen und Familien den notwendigen leistbaren Wohnraum bieten.

Tabelle 10 Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Typ der Gemeinde in Prozent

	Stabilitätsszenario	Trendszenario	Dynamikszenario
Großstadt	5,1	8,9	11,1
Mittelstadt	8,9	14,1	15,9
Größere Kleinstadt	8,7	14,2	16,1
Kleine Kleinstadt	7,3	12,9	14,8
Landgemeinde	5,9	11,5	13,4

Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man sowohl die Auswertungen der Tabellen wie auch das Kartenbild aller drei Szenarien wird deutlich, dass sich das Trend- und Dynamikszenario in Bezug auf die Flächenentwicklung sehr stark ähneln. Beide Szenarien weisen eine flächendeckende Zunahme der SuV auf, mit starkem Wachstum in zentralen Regionen. Das Stabilitätsszenario zeichnet sich hingegen durch eine weitgehend moderate SuV-Zunahme aus. Die räumlichen Verteilungsmuster der drei Szenarien unterscheiden sich nicht wesentlich. Dies liegt auch daran, dass in allen Kreisen die Nachfrage nach SuV-Fläche im Trendszenario mindestens so groß wie im Stabilitätsszenario und im Dynamikszenario mindestens so groß wie im Stabilitätsszenario ist. Die Szenarien bauen also gewissermaßen aufeinander auf. Für jedes Szenario verteilt der LUS dann die unterschiedlichen Raumansprüche in den einzelnen Kreisen auf Rasterzellen, wobei der Algorithmus und die Eignungskarten in allen Szenarien gleich sind. Daher sind im Szenario mit den größten Raumansprüchen für SuV dieselben Flächen von Umwandlung betroffen wie in den beiden anderen Szenarien sowie zusätzlich weitere Flächen mit der jeweils bestmöglichen Eignung. Die Ergebnisse der Szenarien unterscheiden sich somit hinsichtlich der Intensität der Entwicklung von SuV-Flächen in einzelnen Kreisen und insbesondere dahingehend, dass mit zunehmender Flächeninanspruchnahme weitere Gemeinden von einer Zunahme der SuV-Flächen betroffen sind.

Während bei der Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen die zentrale Lage und die Mittel- und Kleinstädte dominieren, so zeigt sich beim Verlust von landwirtschaftlichen Flächen ein etwas anderes Bild. Tabelle 11 zeigt, dass Landwirtschaftsflächen mit Abstand am stärksten in den Großstädten abnehmen. Umso kleiner die Gemeinde umso geringer ist der Verlust an Landwirtschaftsflächen.

Tabelle 11 Veränderung der Landwirtschaftsfläche nach Typ der Gemeinde in Prozent

	Stabilitätsszenario	Trendszenario	Dynamikszenario
Großstadt	-8,6	-14,7	-18,2
Mittelstadt	-3,7	-5,5	-6,2
Größere Kleinstadt	-2,3	-3,4	-3,8
Kleine Kleinstadt	-1,3	-2,1	-2,4
Landgemeinde	-1,0	-1,6	-1,8

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 12 zeigt ein ähnliches Bild für die Lage der Gemeinde. So ist der Verlust von Landwirtschaftsflächen umso stärker ausgeprägt umso zentraler eine Gemeinde liegt. Dies ist auf den ersten Blick überraschend, da wie bereits festgestellt wurde SuV-Entwicklung zumeist auf landwirtschaftlichen Flächen stattfindet. Die Entwicklung wird jedoch plausibel, wenn man die absoluten Zahlen betrachtet (siehe Anhang Tabelle 16-19). In Großstädten gibt es nur noch wenige landwirtschaftliche Flächen. Wird nun ein Teil davon bebaut, spiegelt sich der Verlust dieser Fläche als starke relative Abnahme wider. In peripherer Lage und in kleinen Gemeinden ist der Anteil an Landwirtschaftsfläche zumeist sehr hoch und so verursacht selbst eine starke Zunahme der SuV nur eine geringe Abnahme der landwirtschaftlichen Fläche.

Tabelle 12 Veränderung der Landwirtschaftsfläche nach Lage der Gemeinde in Prozent

	Stabilitätsszenario	Trendszenario	Dynamikszenario
Sehr Zentral	-5,6	-8,3	-9,6
Zentral	-2,9	-4,3	-4,9

	Stabilitätsszenario	Trendszenario	Dynamikszenario
Peripher	-1,1	-1,8	-2,0
Sehr Peripher	-0,5	-0,9	-1,0

Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Wald und naturnahen Flächen macht eine entsprechende Differenzierung nach Lage und Gemeindetyp nur wenig Sinn. Bei der Modellierung der Waldflächen wurde bei kreisfreien Städten stärker korrigiert als in Landkreisen. Trotzdem sind die Unterschiede gering, so bewegt sich die Zunahme an Waldflächen je nach Gemeinde- und Lagetyp zwischen 2,5 % und 3,2 %. Naturnahe Flächen sind bereits im Bestand sehr ungleich verteilt und unterscheiden sich auch in ihrer Beschaffenheit regional stark. Für eine sinnvolle differenzierte Auswertung fehlen damit die Vorrausetzungen.

4 Ausblick

Der Blick in die Zukunft ist immer verbunden mit einem großen Maß an Unsicherheit. Überraschende Entwicklungen, neue Technologien und Innovationen, politische und soziale Umwälzungen verändern und gestalten die Zukunft. Doch trotz der damit verbundenen Unsicherheiten ist es wichtig, sich mit gegenwärtigen Entwicklungstrends zu beschäftigen und diese in Szenarien in die Zukunft weiterzudenken. Diese Szenarien erheben nicht den Anspruch darauf, exakt einzutreten, sondern zeigen verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten und mögliche Risiken und Belastungen auf. Bedenkt man, dass politische Entscheidungen Folgen für Jahrzehnte haben können und Zukunft immer auch gestaltet werden kann, so sind Szenarien ein wichtiges Instrument, um langfristige Auswirkungen verschiedener Handlungsoptionen abzuschätzen.

Der LUS projiziert die Landnutzung bis zum Jahr 2045 auf Basis von drei Szenarien der GWS. Das Ergebnis sind kleinräumige Entwicklungsmuster, die innerregionale Unterschiede aufzeigen. Für die Vulnerabilitätsanalyse ist diese kleinräumige Auflösung, insbesondere in sehr großen Landkreisen, nützlich, um die ebenfalls auf Raster basierende Klimamodellierung entsprechend interpretieren zu können. Bei Zunahme der SuV macht es einen großen Unterschied, ob diese kompakt an bestehende Städte anschließt oder ob eine großflächige Zersiedlung stattfindet.

Wie im Kapitel „Grenzen der Modellierung des Land Use Scanner“ bereits dargestellt, sind einige Verbesserungsmöglichkeiten bereits bekannt. Perspektivisch muss darüber nachgedacht werden, um welche Eignungskarten der LUS ergänzt werden sollte. Gesellschaftliche und technische Veränderungen bringen neue Einflussfaktoren für die Landnutzung mit sich. Die Diskurse um beispielsweise gleichwertige Lebensverhältnisse, Mindeststandards der Daseinsvorsorge oder Post-Growth-Gesellschaft erzeugen verschiedene Ansprüche an Landnutzung und können künftig modelimmanente Gewichtungen verschieben und weitere Eignungskriterien notwendig machen. Die zusätzliche Einbeziehung von weiteren Eignungskarten zum öffentlichen Verkehr, zur Nahversorgung oder auch zur Breitbandversorgung ist notwendig.

Für künftige Landnutzungsmodellierungen gilt ebenfalls zu überlegen, ob der LUS langfristig das richtige Instrument darstellt. Nachteile des LUS sind, dass die programmeigene Skriptsprache die Einarbeitung weiterer Beteiligter erheblich erschwert und dass bisher keine Möglichkeit besteht, Cloud-Computing oder Supercomputer einzusetzen. Für mögliche künftige Anforderungen an eine höhere Auflösung oder um eine Vielzahl an Entwicklungsvarianten zu vergleichen, ist eine höhere Rechenleistung notwendig.

Insgesamt sind die Ergebnisse des LUS auf einem hohen Niveau. Bedenkt man, dass im Kontext der Vulnerabilitätsanalyse 2021 mit Klimadaten mit 5 km-Raster gearbeitet wird und die Ergebnisse der Landnutzungsmodellierung entsprechend aggregiert werden, so ist die Genauigkeit und Plausibilität der Modellierung bereits jetzt ausreichend. Nichtsdestotrotz ist eine weitere Verbesserung der kleinräumigen Landnutzungsmodellierung, insbesondere der bereits bekannten Herausforderungen, langfristig notwendig.

5 Quellenverzeichnis

Monografien

adelphi / PRC / EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Climate Change 24/2015. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

BMEL (2018): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. BMEL, Berlin

Buthe, B.; Pütz, T.; Staats, J. (2018): Verkehrsbild Deutschland. Raumordnerische Beurteilung von Verkehrsinfrastrukurprojekten. BBSR-Analysen KOMPAKT 04/2018. BBSR, Bonn

Destatis (2018): Qualitätsbericht. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

Lutz, C.; Becker, L.; Ulrich, P.; Distelkamp, M. (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung“. CLIMATE CHANGE 25/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

IPCC (2018): Special Report: Global Warming of 1.5 °C. IPCC, Genf

Beiträge aus Sammelbänden

Koomen, E.; Hilferink, M.; Borsboom-van Beurden, J. (2011): Introducing Land Use Scanner. In Koomen, E. (Hrsg.): Land-use modelling in planning practice. Dordrecht, 3-2

Burgdorf, M. (2010): Disaggregation von Bevölkerungsdaten mittels ATKIS Basis DLM. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin, 474-483

Zeitschriftenaufsatz

Hoymann, J.; Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks. In: Raumforschung und Raumordnung, 2014, 3, Springer Spektrum, Wiesbaden, S. 211– 225

Spangenberg, M. (2003): Regionales Bevölkerungspotenzial. In: Informationen aus der Forschung des BBR – Nr. 6/Dezember 2003, BBR, Bonn

Internetadresse

BBSR (2019): Vergleichende Plananalyse. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/RaumentwicklungDeutschland/Projekte/Plananalyse/plananalyse.html?nn=391978 (29.01.2019)

BfN (2019): Gebietsschutz/Großschutzgebiete. https://www.bfn.de/themen/gebietsschutz-grossschutzgebiete.html (29.01.2019)

BGR (2018a): BGR-Produktcenter. Ackerbauliches Ertragspotential der Böden in Deutschland 1:1.000.000. https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=3DBC11EE-81E9-41A2-916E-1281DDD6C7A8 (25.01.2019)

BGR (2018b): BGR-Produktcenter. Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands 1:1.000.000. https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=02F23B5B-5FB8-48BA-ADDA-7ECA7481C4DE (25.01.2019)

BGR (2018c): BGR-Produktcenter. Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000. https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=154997F4-3C14-4A53-B217-8A7C7509E05F (25.01.2019)

DWD (2018): Deutschlandwetter im Jahr 2018. 2018 – ein außergewöhnliches Wetterjahr mit vielen Rekorden (Pressemitteilung vom 28.12.2018) https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (03.01.2019)

Kommission WSB 2019: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile (13.08.2019)

NASA (2014): U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ (22.01.2019)

UBA (2017): Vulnerabilitätsanalyse 2021. https://www.umweltbundesamt.de/vulnerabilitaetsanalyse-2021 (04.01.2019)

UN (2019): United Nation Treaty Collection: Paris agreement. https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en (03.01.2019)

A ANHANG

A.1 Landnutzungsentwicklung

Tabelle 13 Landnutzung Stabilitätsszenario 2015 – 2045 in km²

Jahr	SuV	Ackerland	Grünland	Wald	Naturnahe Flächen
2015	38.121	126.852	64.518	109.268	9.881
2020	39.075	126.251	64.164	109.723	9.427
2025	39.692	125.830	63.920	110.295	8.903
2030	40.141	125.456	63.714	110.875	8.455
2035	40.490	125.065	63.506	111.461	8.118
2040	40.743	124.679	63.311	112.054	7.853
2045	40.920	124.301	63.123	112.654	7.643

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 14 Landnutzung Trendszenario 2015 – 2045 in km²

Jahr	SuV	Ackerland	Grünland	Wald	Naturnahe Flächen
2015	38.121	126.852	64.518	109.268	9.881
2020	39.266	126.131	64.093	109.723	9.427
2025	40.126	125.557	63.760	110.295	8.903
2030	40.861	125.001	63.448	110.875	8.455
2035	41.560	124.388	63.112	111.461	8.118
2040	42.236	123.734	62.763	112.054	7.853
2045	42.895	123.050	62.399	112.654	7.643

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 15 Landnutzung Dynamikszenario 2015 – 2045 in km²

Jahr	SuV	Ackerland	Grünland	Wald	Naturnahe Flächen
2015	38.121	126.852	64.518	109.268	9.881
2020	39.340	126.084	64.067	109.723	9.427
2025	40.311	125.439	63.692	110.295	8.903
2030	41.175	124.801	63.334	110.875	8.455
2035	42.010	124.103	62.948	111.461	8.118
2040	42.826	123.360	62.547	112.054	7.853
2045	43.629	122.584	62.130	112.654	7.643

Quelle: Eigene Darstellung.

A.2 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Typ und Lage

Tabelle 16 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Stadt- und Gemeindetyp in km²

	2015	Stabilitätsszenario 2045	Trendszenario 2045	Dynamikszenario 2045
Großstadt	6.254	6.575	6.810	6.947
Mittelstadt	9.900	10.785	11.291	11.473
Größere Kleinstadt	7.067	7.679	8.072	8.207
Kleine Kleinstadt	7.641	8.201	8.628	8.773
Landgemeinde	7.259	7.689	8.094	8.229

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 17 Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Lage in km²

	2015	Stabilitätsszenario 2045	Trendszenario 2045	Dynamikszenario 2045
Sehr Zentral	11.221	12.217	12.730	12.958
Zentral	11.539	12.733	13.453	13.721
Peripher	11.849	12.428	13.020	13.227
Sehr Peripher	3.511	3.552	3.692	3.723

Quelle: Eigene Darstellung.

A.3 Landwirtschaftsflächen nach Typ und Lage

Tabelle 18 Landwirtschaftsfläche nach Stadt- und Gemeindetyp in km²

	2015	Stabilitätsszenario 2045	Trendszenario 2045	Dynamikszenario 2045
Großstadt	3.881	3.547	3.312	3.175
Mittelstadt	27.957	26.911	26.408	26.227
Größere Kleinstadt	34.883	34.085	33.696	33.561
Kleine Kleinstadt	55.021	54.288	53.861	53.715
Landgemeinde	69.629	68.932	68.528	68.392

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 19 Landwirtschaftsflächen nach Lage in km²

	2015	Stabilitätsszenario 2045	Trendszenario 2045	Dynamikszenario 2045
Sehr Zentral	18.595	17.555	17.044	16.816
Zentral	49.791	48.357	47.639	47.371
Peripher	85.362	84.414	83.824	83.617
Sehr Peripher	37.623	37.437	37.297	37.266

Quelle: Eigene Darstellung.