

Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks

Jana Hoymann · Roland Goetzke

Eingegangen: 30. Juli 2013 / Angenommen: 22. April 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Zusammenfassung Vor dem Hintergrund der knapper werdenden Ressource Boden und den Herausforderungen des Klimawandels beschäftigt sich das Projekt „CC-LandStraD“ mit den Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Landnutzung. Es werden Szenarien der künftigen Landnutzung in Deutschland bis zum Jahr 2030 entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung. Dafür kommt ein Simulationsmodell zum Einsatz, das unterschiedliche Daten verarbeitet und miteinander kombiniert. Dazu zählen einerseits statistische Informationen der sozioökonomischen Entwicklung, aber auch zahlreiche räumliche Daten, die die aktuelle Landnutzung, natürliche Gegebenheiten, aber auch planerische Festlegungen beschreiben. Der Beitrag stellt die verwendeten Daten vor und beschreibt die Methodik, wie diese im Simulationsmodell „Land Use Scanner“ verwendet werden, um ein räumliches Landnutzungsszenario für Deutschland zu erstellen. Damit integriert das Modell Daten unterschiedlicher räumlicher, zeitlicher und thematischer Auflösung und führt Daten unterschiedlicher Skalenebenen konsistent zusammen. Die Ergebnisse des Modells zeigen, dass trotz demographischen Wandels in einigen Regionen Deutschlands ein hoher Siedlungsdruck bestehen bleibt.

Schlüsselwörter Landnutzung · Szenario · Simulation · Deutschland

The future of land use in Germany: a methodological framework

Abstract The research project CC-LandStraD analyses interactions between land use and climate change. It therefore contributes to the challenges of climate change and the availability of scarce land resources. Within the project, land use scenarios are developed for Germany until the year 2030. The focus of this study is on the development of settlement and transport area. The approach applies the simulation model Land Use Scanner that integrates and combines different types of data. This includes statistical information on the socio-economic development as well as numerous spatial data sets like current land use, physical properties or spatial planning regulations. The paper introduces the different data sets, describes the modeling approach and demonstrates how the various data sets are used in the simulation model Land Use Scanner to calculate a spatial land use scenario for Germany in 2030. The model therefore integrates data sets of different spatial, temporal and thematic resolutions and consistently merges the information of different scales. The results of the model show that despite demographic change some regions still face high pressure of urban density in Germany.

Keywords Land use · Szenario · Simulation · Germany

Dr. J. Hoymann (✉) · Dr. R. Goetzke
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung,
Deichmanns Aue 31–37,
53179 Bonn, Deutschland
E-Mail: jana.hoymann@bbr.bund.de

Dr. R. Goetzke
E-Mail: roland.goetzke@bbr.bund.de

1 Einleitung

Der anthropogen verursachte Klimawandel gehört seit einigen Jahren nicht nur zu den dringlichsten Handlungsfeldern der Umweltpolitik, sondern beschäftigt gleichermaßen die Wirtschaftspolitik und die Raumordnung. Mit der Energiewende, die sich nach 2011 mit dem Beschluss des Deutschen Bundestages zur Änderung des Atomgesetzes noch einmal beschleunigt hat, ergeben sich neue Fragen darüber, wie die zur Verfügung stehende Fläche in Deutschland genutzt werden kann, um die vielfältigen gesellschaftlichen Anforderungen an die Umweltpolitik zu erfüllen. Denn neben der Produktion von Nahrungsmitteln, Energie und Holz, der Bereitstellung von Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur sowie der Erholungsnutzung werden die Konkurrenzen um die begrenzten Landressourcen durch Ansprüche aus der Energiewirtschaft und der Notwendigkeit der Anpassung an den Klimawandel weiter verstärkt. Hieraus entstehen neue Herausforderungen auch für die Raumordnung (vgl. Kufeld 2013). Vor allem der Klimaschutz gewinnt an Bedeutung, denn 10% der in Deutschland emittierten Treibhausgase stammen direkt aus der Landnutzung, das heißt aus Forst, Landwirtschaft sowie Siedlung und Verkehr und deren Änderungen (Umweltbundesamt 2011: 58). Außerdem kann Kohlendioxid in Biomasse gebunden werden und somit dem Klimawandel entgegenwirken. Gleichzeitig nehmen Siedlungs- und Verkehrsflächen täglich 74 ha (2009 bis 2012) Fläche in Anspruch (Statistisches Bundesamt 2013: 22), die einer anderen Nutzung – und damit auch dem Zweck des Klimaschutzes – nicht mehr zur Verfügung stehen.

In diesem vielschichtigen Spannungsfeld ist das Forschungsprojekt „CC-LandStraD“ (Climate Change – Land Use Strategies, Strategien für ein nachhaltiges Landmanagement in Deutschland) angesiedelt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden Siedlungs- und Landnutzungsszenarien bis zum Jahr 2030 für eine klimawandeloptimierte Siedlungsentwicklung erstellt. Es wird untersucht, welche Maßnahmen einen Effekt auf die Erreichung von Klimaschutzziele haben und welche Maßnahmen geeignet sind, die Landnutzung und die Siedlungsstruktur an den Klimawandel anzupassen. Solche Maßnahmen haben Änderungen der Planungspraxis zur Folge und beeinflussen meist mehrere Ökosystemdienstleistungen in unterschiedlicher Art und Weise (Verburg/Koomen/Hilferink et al. 2012). Aus den Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel können Zielkonflikte oder auch Synergien resultieren. Diese werden im Rahmen des Projektes intensiv in einem nationalen und einem regionalen Beteiligungsprozess mit Entscheidungsträgern diskutiert.

In diesem Beitrag wird das mit dem GIS-basierten Simulationsmodell *Land Use Scanner* berechnete Szenario der Landnutzungsentwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2030 vorgestellt. Dieses Szenario dient als Referenz für weitere Szenarien, in denen Maßnahmen zum Klima-

schutz und zur Anpassung an den Klimawandel integriert werden. Es stellt eine Fortschreibung der in den letzten Jahren beobachteten Tendenz der Landnutzungsentwicklung in Deutschland dar. Szenarien beschreiben in sich konsistente und plausible mögliche zukünftige Entwicklungen unter bestimmten Rahmenbedingungen (vgl. Alcamo/Kok/Busch et al. 2006) und sind daher nicht als Vorhersagen zu interpretieren. Dennoch sind solche Modelle geeignet, um Handlungsoptionen aufzuzeigen, alternative Entwicklungspfade zu visualisieren und Regionen mit besonderem Druck auf die Landnutzung zu identifizieren (vgl. Verburg/Schot/Dijst et al. 2004; Couclelis 2005; Lambin 2005).

Zur Simulation der Landnutzungsänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2030 mit dem Modell *Land Use Scanner* (zur Funktionsweise vgl. Kap. 2) wird eine Vielzahl statistischer und räumlicher Daten miteinander kombiniert. Wie diese Datensätze für die Simulation von Landnutzungsänderungen konsistent genutzt werden können, wird in Kap. 3 erläutert. Die Ergebnisse für das Referenz-Szenario der Landnutzung in Deutschland im Jahr 2030 (Kap. 4) zeigen, dass auch künftig in einigen Regionen Deutschlands ein hoher Siedlungsdruck herrschen wird. In Kap. 5 werden erste Ergebnisse der Modellauswertung diskutiert.

2 Landnutzungsmodellierung mit dem *Land Use Scanner*

2.1 Landnutzungsmodellierung – eine Einführung

Weltweit sind in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Landnutzungsmodelle für unterschiedliche Fragestellungen entwickelt worden. Die Fragestellungen, auf die die unterschiedlichen Modelle zugeschnitten sind, beeinflussen die räumliche, thematische und zeitliche Auflösung der verwendeten Daten sowie die zugrunde liegenden Methoden und Modellansätze erheblich. Einen ersten Einblick in die Unterschiedlichkeit der Modelle geben beispielsweise Briassoulis (2000) oder Verburg/Schot/Dijst et al. (2004). Einen Überblick gibt Tab. 1.

Da ein vollständiger Überblick an dieser Stelle nicht möglich ist, beschränkt sich die Betrachtung auf Modelle, die sich methodisch in ihrem Vorgehen ähneln, auf Rasterebene arbeiten und in Europa häufig angewendet werden. In der Regel liegt allen aktuellen Analysen ein Multi-Modell-Ansatz zugrunde. Das bedeutet, dass einerseits globale Trends wie demographische und wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigt werden. Die Wirkweise der globalen Trends auf die Landnutzung wird dabei meist in externen sektoralen Modellen analysiert. Im Ergebnis führt diese Untersuchung zu Aussagen über die künftige Nachfrage nach Land der einzelnen Nutzungsarten. Dies geschieht oft (aber nicht ausschließlich) für administrative Einheiten wie Staaten, Pro-

Tab. 1 Übersicht über räumlich explizite Landnutzungsmodelle

Modell	Allokationsansatz	Inhaltliche Fragestellungen	Räumliches Anwendungsgebiet	Betrachtete Landnutzungstypen	Referenzen
CLUE Modellgruppe mit CLUE-S und Dyna-CLUE)	Optimierung	Wirkung von Brachen auf Erosionsgefahr Wirkung der Biokraftstoffpolitik	Z. B. Nordrhein-Westfalen, Deutschland Europa Spanien	Entwicklung der landwirtschaftlichen Flächen Entwicklung urbaner Flächen	Goetzke (2010); Verburg/Schulp/Witte et al. (2006)
MOLAND	Zellularer Automat	Anpassung an den Klimawandel Nachhaltige Siedlungsentwicklung	Z. B. Dublin Dresden-Prag-Korridor Tallinn	Entwicklung urbaner Flächen	Engelen/Lavalle/Barredo et al. (2007)
Land Use Scanner	Optimierung (discrete choice theory)	Ex-ante-Analyse planerischer Festlegungen Hochwasserschutz Nachhaltige Siedlungsentwicklung	Z. B. Niederlande Elbeinzugsgebiet-Deutschland Portugal	Alle Landnutzungstypen	Koomen/Hilferink/Borsboom-van Beurden (2011)
EU-Clue-Scanner	Optimierung	Hochwasserschutz Nachhaltigkeit	Europa	Alle Landnutzungstypen	Lavalle/Baranzelli/Batista e Silva et al. (2011)
ATEAM Methode	Regelbasiert und multinomiale logistische Regression	Landnutzungswandel Vulnerabilität	EU 15	Alle Landnutzungstypen	Rounsevell/Reginster/Araújo et al. (2006)
Environment Explorer (CA)	Zellularer Automat	Hochwasserschutz Nachhaltigkeit	Niederlande Pordenone, Italien	Alle Landnutzungstypen	Barredo/Engelen (2010)
Geomod	Entscheidungsregeln	Urbane Entwicklung Entwaldung	Brüssel/Flandern, Belgien	Unterscheidet genau zwei Landnutzungen	Poelmans/van Rompaey (2009); Pontius Jr./Cornell/Hall (2001)
SLEUTH	Zellularer Automat Induktiv, keine exogene Nachfrage	Siedlungsentwicklung	Niederlande Lissabon, Portugal Porto, Portugal	Entwicklung urbaner Flächen	Silva/Clarke (2002); Clarke/Gazulis/Dietzel et al. (2007); Tack (2000)

Agentenbasierte Modelle werden in dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt, da sie in der Regel nicht rasterbasiert arbeiten

vinzen oder Landkreise. Andererseits sind lokale Gegebenheiten von hoher Relevanz. In den dem Landnutzungsmodell vorgeschalteten Analysen wird der Einfluss einzelner lokaler Standorteigenschaften auf die Veränderung der Landnutzung untersucht. Dazu werden oft räumliche statistische Verfahren wie logistische Regressionen angewendet. Lokale Einflussfaktoren sind beispielsweise die aktuelle Landnutzung, die Erreichbarkeit von Infrastrukturen oder die physische Eignung für landwirtschaftliche oder forstliche Nutzung wie Bodenart, Erosionsgefahr, Hangneigung oder Wasserverfügbarkeit. Planerische Vorgaben wirken in der Regel lokal, werden aber auf kommunaler, regionaler oder nationaler Ebene definiert. Die Landnutzungsmodelle integrieren die Informationen von beiden Skalenebenen konsistent. Dabei kommen je nach Modell und inhaltlicher Fragestellung jeweils unterschiedliche Daten zum Einsatz.

Im anschließenden Kapitel wird das Funktionsprinzip des *Land Use Scanners* vorgestellt. Bei der Auswahl des Modells waren die folgenden Kriterien entscheidend: Das Modell soll alle relevanten Landnutzungsarten simultan verarbeiten können. Es soll räumlich hoch auflösend und flächendeckend für ganz Deutschland arbeiten. Außerdem soll eine regionalisierte Nachfrage der einzelnen Nutzungsarten Berücksich-

tigung finden, da es in Deutschland erhebliche strukturelle Unterschiede gibt, die sich auf die Landnutzungsänderung auswirken. Diese Anforderungen werden nicht von allen Modellen erfüllt. Schließlich ist in die aktuellen Entwicklungen des *Land Use Scanners* und des EU-CLUE-Scanners, die sich methodisch sehr stark ähneln, das Wissen aus weiteren Modellen wie CLUE¹ oder dem „Environment Explorer“ eingeflossen.

2.2 Der „Land Use Scanner“

2.2.1 Anwendungen des „Land Use Scanners“

Das Modell ist bereits 1997 an der Vrije Universiteit Amsterdam entwickelt worden und wurde seitdem insbesondere in den Niederlanden bei zahlreichen politikrelevanten Fragestellungen angewendet, wie beispielsweise bei der Evaluation für den Standort eines neuen nationalen Flughafens (Scholten/van de Velde/Rietveld et al. 1999) oder der Vorbereitung der Fünften Nationalen Raumstrategie (Scholten/Goetgeluk/Hilferink et al. 2001). Außerdem

¹CLUE = Climate Neutral Urban Districts.

wurde das Modell in einzelnen Regionen der Niederlande eingesetzt, um die Auswirkungen von Raum- und Fachplanungen auf die Flächennutzung *ex ante* zu diskutieren (Koomen/Rietveld/de Nijs 2008; Koomen/Koekoek/Dijk 2011; Jacobs/Bouwman/Koomen et al. 2011). In den Niederlanden, dem Rheineinzugsgebiet und im Elbeeinzugsgebiet wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf eine veränderte Landnutzung und den Wasserhaushalt untersucht (Dekkers/Koomen 2007; Koomen/Loonen/Hilferink 2008; Hoymann/Koomen/Dekkers 2014). Auf europäischer Ebene werden Auswirkungen politischer Entscheidungen analysiert (Lavallo/Baranzelli/Batista e Silva et al. 2011). Auch als Planungsunterstützung in Surinam und Honduras wird der *Land Use Scanner* angewendet. Dort werden der Einfluss des Infrastrukturausbaus auf die Landnutzung und die Auswirkung auf den Regenwald untersucht (vgl. Hilferink 2012).

Viele der bisherigen Studien, in denen der *Land Use Scanner* angewendet wurde, greifen Teile der Fragestellungen auf, die hier bearbeitet werden sollen. So ist beispielsweise die Möglichkeit, Regional- und Fachplanungen in das Modell zu integrieren und ihre Wirksamkeit zu untersuchen, von zentraler Bedeutung bei der Analyse von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Dabei geht es in der Regel nicht um eine pixelgenaue Verortung, sondern um das grundsätzliche Muster der Landnutzungsänderungen unter bestimmten Rahmenbedingungen. Dieses kann

dann für die Diskussion und Kommunikation mit Entscheidungsträgern genutzt werden. Auch weitere Szenarien mit der Frage „Was wäre wenn?“ können mit dem Modell beantwortet werden.

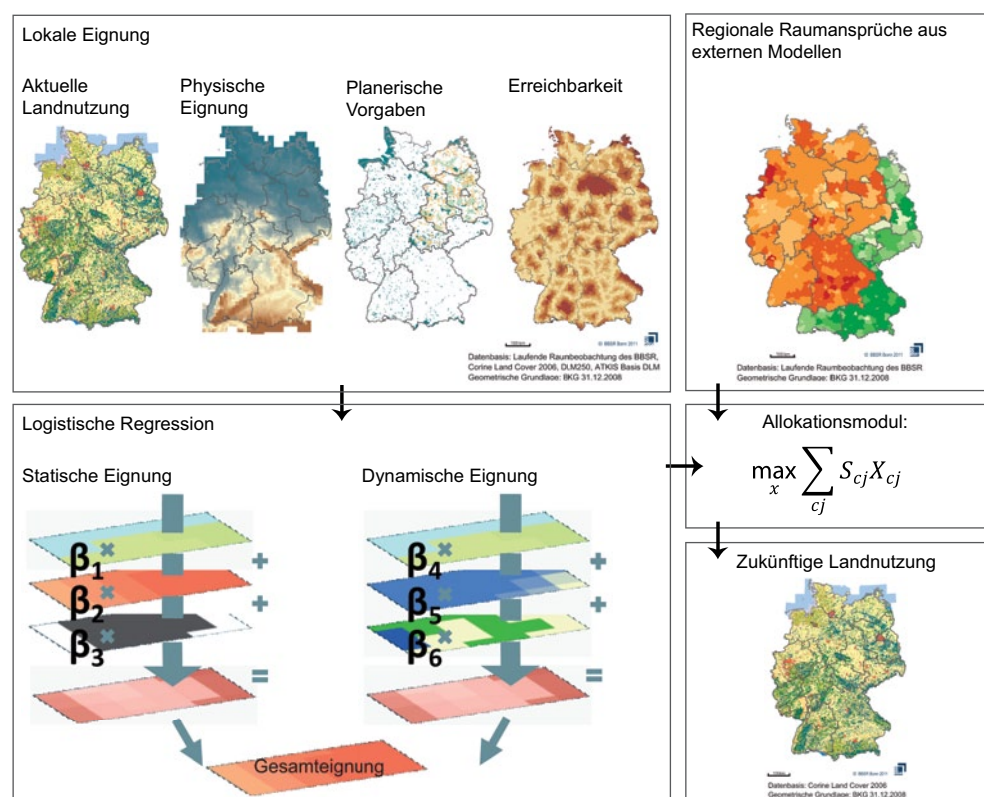
2.2.2 Funktionsprinzip

Für die Entwicklung des Landnutzungsszenarios 2030 für Deutschland wird das GIS-basierte Simulationsmodell *Land Use Scanner* verwendet (Hilferink/Rietveld 1999; Koomen/Hilferink/Borsboom-van Beurden 2011). Der *Land Use Scanner* ist ein operationelles, räumlich explizit arbeitendes Modell, welches mit einem Optimierungsalgorithmus die Nachfrage nach Land auf die dafür geeigneten Rasterzellen verteilt (vgl. Abb. 1).

Die Nachfrage wird in externen Modellen für Regionen, z. B. Landkreise, bestimmt. Die Identifikation geeigneter Rasterzellen geschieht, wie in Kap. 2.1 beschrieben, mithilfe von Eignungskarten, in denen Standortfaktoren wie aktuelle Landnutzung, physische Gegebenheiten, planerische Festlegungen oder Erreichbarkeit von Infrastrukturen zusammengefasst werden. Die einzelnen Landnutzungsarten stehen dabei in Konkurrenz zueinander.

Das Modell hat zahlreiche grundlegende Eigenschaften: Es arbeitet rasterbasiert mit einer Auflösung von derzeit 100 m. In das Modell kann eine beliebige Anzahl Landnutzungen, in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden

Abb. 1 Funktionsprinzip des *Land Use Scanners*



Datenbasis, integriert werden. Damit betrachtet es nicht ausschließlich urbane Landnutzungen. Im Modell sind zwei Allokationsalgorithmen implementiert. Im „Continuous Model“ werden die Ergebniskarten als Wahrscheinlichkeit angezeigt, mit welcher eine Rasterzelle einer bestimmten Landnutzung und Landbedeckung angehört. Eine Rasterzelle kann demnach Wahrscheinlichkeiten für mehrere Landnutzungen und Landbedeckungen besitzen. Im „Discrete Model“ wird jeder Rasterzelle genau eine Landnutzungsart zugeordnet. Im vorliegenden Fall wird das „Discrete Model“ genutzt. Die Ergebnisse des Modells sind bei gleicher Parametereinstellung reproduzierbar. Festgesetzte Planungen können im Modell integriert und bei der Simulation berücksichtigt werden. Zudem liefert das Modell Ergebnisse für aufeinanderfolgende Zeitschritte. In der hier genutzten Version wird für jeden 5-Jahres-Zeitraum eine Landnutzungskarte erzeugt.

Der diskrete Allokationsalgorithmus optimiert die Verortung der Landnutzungsarten so, dass die Summe der Eignungswerte der von Landnutzungswandel betroffenen Zellen maximiert wird. Drei Randbedingungen müssen dabei erfüllt werden (Koomen/Hilferink/Borsboom-van Beurden 2011: 14 ff.): Die Menge Land, die in einer Zelle verortet wird, darf nicht negativ sein, es kann nur 1 ha Land pro Zelle verortet werden und die Menge Land einer Landnutzungsart, die in einer Region verortet wird, muss zwischen dem angegebenen Minimum und Maximum der Nachfrage liegen.

Die mathematische Formulierung entstammt Koomen/Hilferink/Borsboom-van Beurden (2011: 14 ff.):

$$\max_x \sum_{cj} S_{cj} X_{cj}$$

unter der Bedingung, dass:

$$X_{cj} \geq 0$$

für jedes c und j ;

$$\sum_j X_{cj} = 1$$

für jedes c ;

$$L_{jr} \leq \sum_c X_{cj} \leq H_{jr}$$

für jedes j und jedes r für das regionale Raumanprüche definiert sind;

mit:

- X_{cj} ist die Menge Land, die in Zelle c für die Landnutzungsart j verortet wird;
- S_{cj} ist die Eignung für Zelle c und die Landnutzungsart j ;
- L_{jr} ist der minimale Raumanpruch für eine Landnutzungsart j in Region r ;
- H_{jr} ist der maximale Raumanpruch für eine Landnutzungsart j in Region r ;

3 Daten und Methodik

3.1 Lokale Eignung

3.1.1 Daten²

Aktuelle Landnutzung. Für die Beschreibung der aktuellen Landnutzung stehen verschiedene neuere räumliche Datensätze zur Verfügung. Ihre Eignung für die Anwendungen in der Landnutzungsmodellierung wurde von Hoymann (2013) untersucht. Für eine möglichst detaillierte räumliche Repräsentation wird eine Kombination aus zwei Datensätzen verwendet. Die Grundlage bildet das DLM-DE, ein digitales Landschaftsmodell für Deutschland, das für Zwecke des Bundes hergestellt wird. Das DLM-DE³ besitzt die Geometrie des ATKIS Basis-DLM⁴ in Kombination mit der Nomenklatur von „Corine Land Cover“⁵. In großen Stadtregionen wird zusätzlich der „Urban Atlas“⁶ verwendet, da in diesem die innerstädtischen Nutzungsarten besser differenziert werden können. Eine ähnliche Methodik wurde von Batista e Silva/Lavalle/Koomen (2013) für einen pan-europäischen Datensatz gewählt. Allerdings bildete dort *Corine Land Cover* die grundlegende Datenquelle. Da das DLM-DE aber eine geringere „Minimum Mapping Unit“ als *Corine Land Cover* besitzt, weist der hier vorgestellte Datensatz trotz gleicher thematischer Auflösung eine höhere inhaltliche Genauigkeit auf und beinhaltet weniger Probleme hinsichtlich seiner kartographischen Konsistenz.

Grundsätzlich werden in der hier dargestellten Landnutzungsmodellierung vier Hauptnutzungsarten betrachtet: Siedlungs- und Verkehrsflächen, Forstflächen, Natur- und Offenland sowie Landwirtschaftsflächen. Die Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie die Landwirtschaftsflächen werden noch weiter differenziert. Tabelle 2 zeigt die Nutzungsarten, die für die Landnutzungsmodellierung verwendet werden.

Die Erstellung der aktuellen Landnutzungskarte aus DLM-DE und *Urban Atlas* erfolgte in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten. In einem ersten Schritt wurden beide Datensätze auf eine einheitliche Nomenklatur reklassifiziert und aus den ursprünglich vorliegenden Vektordaten Rasterkarten mit einer räumlichen Auflösung von 1 ha erstellt (vgl. Tab. 2). Anschließend wurden in den Regionen, die im

²Eine vollständige Übersicht der verwendeten Datenquellen kann über die Autoren bezogen werden.

³Von Seiten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie ist dem Produkt ein neuer Name gegeben worden. Es wird nun unter dem Namen LBM-DE (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland) vertrieben.

⁴Digitales Basis-Landschaftsmodell.

⁵Vgl. http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_de.html (26.03.2014).

⁶Vgl. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas> (26.03.2014).

Tab. 2 (Fortsetzung)

ID	Vollständiger name	Aggregierte thematische Auflösung CC-LandStraD	Name für aggregierte Klassen CC-LandStraD	Zuordnung Flächenerhebung	Methodik: Zuordnung Flächenerhebung zu räumlichen Daten	Wird modelliert?	Methodik Nachfrageberechnung
41100	Inland marshes	411	Feuchtgebiete	Exogene Landnutzung	Keine Umrechnung notwendig	Nein	Keine Änderung im Zeitablauf
41200	Peat bogs						
42100	Salt marshes						
42200	Intertidal flats						
51100	Water courses	511	Wasser	Exogene Landnutzung	Keine Umrechnung notwendig	Nein	Keine Änderung im Zeitablauf
51200	Water bodies						
52100	Coastal lagoons						
52200	Estuaries						
52300	Sea and ocean						

GuF Gebäude- und Freifläche, PRR Panta Rhei Regio

^aS.L.: Sealing Layer. Der Anteil der versiegelten Fläche an der Nutzungsart basiert auf dem „Fast Track Service Soil Sealing Layer“ (FTS Soil Sealing)

Urban Atlas enthalten sind, alle Siedlungs- und Verkehrsflächen aus dem *Urban Atlas* importiert und die vorhandenen Siedlungs- und Verkehrsflächen damit überschrieben. In den Gebieten außerhalb der Urban-Atlas-Regionen wurden mithilfe des ATKIS-Straßennetzes die Verkehrsflächen erweitert. Die linienförmigen ATKIS-Straßenobjekte wurden hierfür anhand ihrer Kategorie mit Informationen zur durchschnittlichen Fahrbahnbreite für den jeweiligen Straßentyp ergänzt und auf die gleiche Weise wie die Landnutzungsdaten in ein Raster überführt. Im letzten Schritt wurden Flächen einer eindeutigen Nutzungsart zugeordnet, die in DLM-DE und *Urban Atlas* unterschiedlich interpretiert wurden (z. B. Friedhofsflächen als urbane Grünflächen respektive als Industrie-, Gewerbe- und öffentliche Flächen).

Neben der aktuellen Landnutzung, die aufgrund ihrer Persistenz einen Großteil der zukünftigen Landnutzung bestimmt, beeinflussen eine Reihe geo-biophysikalischer und sozioökonomischer Faktoren die Landnutzungsentscheidungen auf lokaler Ebene (Verbürg/van Eck/de Nijs et al. 2004; Geist/McConnell/Lambin et al. 2006). Die im Referenz-Szenario des Modells verwendeten Antriebskräfte werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

Physische Gegebenheiten. Das Muster der vorhandenen Landnutzung ist in hohem Maße von naturräumlichen Gegebenheiten abhängig. Der Einfluss durch das Relief wurde im Modell berücksichtigt, indem Daten zur Geländehöhe und Hangneigung integriert wurden – beide abgeleitet aus SRTM-Daten⁷. Die SRTM-Daten, die eine räumliche Auflösung von 90 m aufweisen, wurden auf die im Modell verwendete Auflösung von 100 m umgerechnet. Als Eignungsfaktor, der die Güte des Bodens für ackerbauliche Nutzung anzeigt, wurde das ackerbauliche Ertragspotenzial nach dem „Müncheberger Soil Quality Rating“ (Richter/

Hennings/Müller 2009) verwendet. Dieser Datensatz wird in einem späteren Schritt in die Berechnung von Klimaschutzmaßnahmen integriert und für die Bewertung der Maßnahmen verwendet. Ein weiterer Datensatz, der die Eignung von Böden für eine bestimmte Landnutzung anzeigt, beinhaltet die Leitbodentypen gegliedert nach Gruppen von Bodengesellschaften.

Planerische Festlegungen. In Deutschland werden mögliche Landnutzungsänderungen stark durch planerische Festlegungen gesteuert. Da in dieser Studie vor allem die räumliche Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Zentrum des Interesses steht, wurden vor allem negativ- und positivplanerische Festlegungen in das Modell implementiert, die eine steuernde Wirkung auf die Siedlungsentwicklung haben. Hierzu zählen einerseits die unterschiedlichen Schutzgebietskategorien, wie z. B. Naturschutzgebiete, Nationalparke oder Flora-Fauna-Habitat-Gebiete (FFH). Zusätzlich wurden zahlreiche Festlegungen aus den Regionalplänen in das Modell übernommen. Die Datengrundlage hierfür lieferte der Raumordnungsplan-Monitor (ROPLAMO) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (vgl. Zaspel/Einig 2012). Hieraus wurden Vorrang-, Vorbehalts-, Eignungs- und Ausschlussgebiete für unterschiedliche Nutzungen in das Modell integriert, so z. B. Festlegungen zum Hochwasser- und zum Freiraumschutz, Regionale Grünzüge und planerische Festlegungen zum Siedlungsbereich und zu Industrie- und Gewerbeflächen.

Infrastrukturausstattung. Neben planerischen Festlegungen und angebotsseitigen Faktoren richten sich Landnutzungsentscheidungen nach ökonomischen Faktoren. In diesem Zusammenhang wird oft mit Distanzen bzw. Erreichbarkeiten gearbeitet, um nach „von-Thünen’schem“-Vorbild die Entfernung zu Märkten in die Modellierung einzubeziehen.

⁷SRTM = Shuttle Radar Topography Mission.

hen (Mertens/Lambin 2000; Verburg/van Eck/de Nijs et al. 2004). Hier wurden Daten des Erreichbarkeitsmodells des BBSR verwendet. Diese beinhalten Erreichbarkeiten von Oberzentren, überregionalen Bahnhöfen, internationalen Flughäfen und Autobahnanschlussstellen.

Als weiterer ökonomischer Faktor floss ein auf Gemeindeebene berechneter Index zur Ausstattung mit sozialer und kultureller Infrastruktur ein. Die Berechnung des Index erfolgte in Anlehnung an van der Straaten/Rouwendaal (2010) und beinhaltet die Ausstattung der Gemeinden mit Versorgungseinrichtungen des Lebensmitteleinzelhandels, mit Kinos, Museen, Theatern und Hotels (gemessen an der Anzahl der Übernachtungsgäste).

Um die geringere Eignung von besiedelten Gebieten für land- und forstwirtschaftliche sowie naturnahe Nutzung abzubilden, wurde zudem ein Datensatz zur Einwohnerzahl in Deutschland implementiert. Für diesen Datensatz wurden die Einwohnerzahlen anhand der Siedlungsflächen (ATKIS) disaggregiert (vgl. Burgdorf 2010).

3.1.2 Erstellung der Eignungskarten/Methodik

Die in Kap. 3.1.1 vorgestellten Daten werden im Modell dazu verwendet, um für jede Rasterzelle die Eignung für jede Landnutzungsart zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden statische, dynamische und ökonomische Einflussfaktoren miteinander kombiniert. Die Bestimmung der Gewichte der Eignungsfaktoren ist ein wesentlicher Bestandteil der Modellkalibrierung.

*Statische Eignungsfaktoren.*⁸ Als Ausgangspunkt zur Bestimmung der statischen Eignungsfaktoren dient eine logistische Regression. Dies ist ein in der Landnutzungsmodellierung häufig genutztes Verfahren, um eine dichotome Verteilung anhand von erklärenden Variablen zu bestimmen (Mertens/Lambin 1997; Schneider/Pontius Jr. 2001; Verburg/van Eck/de Nijs et al. 2004). In die logistische Regression werden die Variablen aus den Bereichen physische Gegebenheiten und Infrastrukturausstattung einbezogen, da es sich bei ihnen um Faktoren handelt, die die Nachfrage nach einer bestimmten Landnutzung räumlich beeinflussen, ohne dabei durch planerische Instrumente gesteuert zu werden. Die Ergebnisse der logistischen Regression wurden mit der Methode der „Receiver Operating Characteristic“ (ROC) auf ihre Güte hin überprüft (vgl. Pontius Jr./Schneider 2001; Verburg/van Eck/de Nijs et al. 2004).

Die planerischen Festlegungen wurden nicht in die logistische Regression mit einbezogen, da sie nicht zur nachfrageseitigen Erklärung von Landnutzungsänderungen beitragen, sondern steuernd auf die angebotsbezogene Seite

einwirken. Außerdem liegen die Festlegungen in den Raumordnungsplänen nicht flächendeckend einheitlich vor, was zu Verzerrungen in ihrem Einfluss im Rahmen eines statistischen Modells führen würde. Die Gewichte der planerischen Festlegungen wurden anhand von Expertenwissen im Rahmen der Modellkalibrierung festgelegt.

Die Werte der einzelnen Eignungskarten werden mit Faktoren aus der logistischen Regression bzw. aus der Festlegung anhand von Expertenwissen multipliziert. Durch Addition dieser gewichteten Eignungskarten für jede Landnutzungsart ergeben sich hieraus die statischen Eignungsfaktoren für das Modell.

Dynamische Eignungsfaktoren/Nachbarschaften. Neben der statischen Eignung, die sich aus den lokal wirkenden Antriebskräften ergibt, werden auch dynamische Eignungsfaktoren berücksichtigt, die sich im Zeitverlauf mit dem sich verändernden Landnutzungsmuster ebenfalls verändern. Hierzu zählt in erster Linie der Effekt, den eine Landnutzung auf seine unmittelbare Umgebung hat, denn meist bedingt das Vorhandensein einer Landnutzung das Vorkommen derselben (oder gegebenenfalls einer bestimmten anderen) Landnutzung in seiner Nachbarschaft. Diese auf die Nachbarschaft einer Rasterzelle wirkenden Kräfte – auch „neighborhood enrichment factor“ genannt (Verburg/de Nijs/van Eck et al. 2004: 670 ff.) – werden mit jedem modellierten Zeitschritt an das neue Landnutzungsmuster angepasst. Die statistischen Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Nachbarschaftspotenzial werden ebenfalls mit einer logistischen Regression hergestellt.

Ökonomische Eignungsfaktoren. In die Berechnung der Eignungskarten fließen zusätzlich eine Reihe ökonomischer Eignungsfaktoren ein. Hierzu zählen „hypothetische Kosten“, die aufgewendet werden müssen, um eine Landnutzung in eine andere zu verändern, sowie Gewinne, die aus einer Landnutzung erzielt werden können. Einen wichtigen Bestandteil dieser Faktoren stellt eine Konversionsmatrix dar, die die landnutzungsspezifischen Änderungsmöglichkeiten beschreibt. Dafür wurden die Veränderungen zwischen 1990 und 2006 aus *Corine Land Cover* ausgewertet. Dies stellt einen Bruch mit dem eigentlich verwendeten Landnutzungsdatensatz dar. Allerdings ist für diesen noch keine Zeitreiheninformation verfügbar. Ein weiterer Faktor bildet das potenzielle Interesse an einer Landnutzungsart ab und ein anderer die Dauer, auf die eine bestimmte Landnutzungsart angelegt ist.

3.2 Nachfrage nach Land

Die Nachfrage nach Land, auch regionale Raumansprüche genannt, wird in sektoralen Modellen außerhalb des Landnutzungsmodells ermittelt. Grundsätzlich ist der *Land Use*

⁸Eine Übersicht über die Wirkrichtung der statischen Eignungsfaktoren kann über die Autoren bezogen werden.

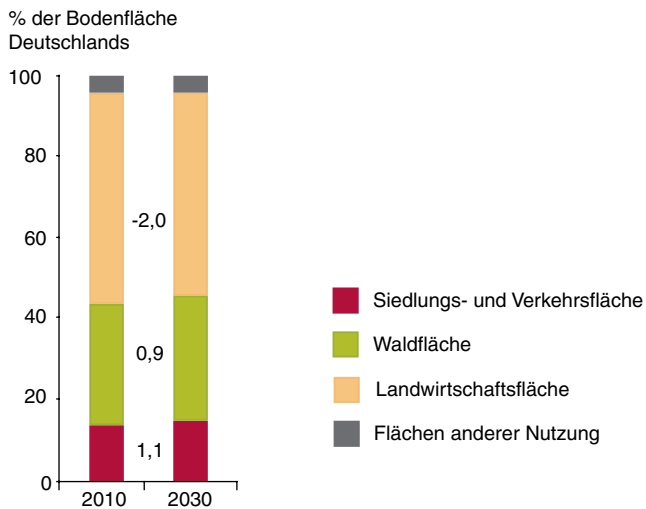


Abb. 2 Veränderungen der Nutzungsarten 2010 bis 2030. (Quellen: Flächenerhebung des Bundes und der Länder, GWS Osnabrück 2012, Berechnungen des BBSR)

Scanner in der Lage, die Raumansprüche für jede Landnutzungsart in einer anderen räumlichen Gliederung zu verarbeiten. Hier werden alle Raumansprüche für die 413 Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland ermittelt (Gebietsstand 2008). Abbildung 2 zeigt im Überblick die bundesweite Entwicklung der Nutzungsartenzusammensetzung im Zeitraum 2010 bis 2030.

Das Vorgehen für die Ermittlung der regionalen Raumansprüche der betrachteten Nutzungsarten ist im Folgenden beschrieben.

3.2.1 Siedlungs- und Verkehrsflächen

Für die Ermittlung der Siedlungs- und Verkehrsflächennachfrage wird das umweltökonomische Modell „Panta Rhei Regio“ (PRR) verwendet (vgl. BMVBS 2011). Es dient der Analyse und Projektion der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr in Deutschland. Die Analyse der Siedlungs- und Verkehrsfläche findet für die einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte sowie differenziert nach Nutzungsarten statt. Tabelle 3 zeigt die berücksichtigten Nutzungsarten im Bereich Siedlung und Verkehr.

Das Modell, das ausführlich in BMVBS (2011: 33 ff.) und Distelkamp/Großmann/Hohmann et al. (2009) beschrieben ist, analysiert zunächst überwiegend nachfragebezogene Einflussfaktoren der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in der Vergangenheit. Dafür werden Zeitreihendaten der Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder verwendet. Mithilfe von erklärenden Variablen zur regionalen und gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, demographischen, Wohnungs- und Haushaltsentwicklung werden

Tab. 3 Überblick über die Nutzungsarten der Siedlungs- und Verkehrsfläche. (Quelle: Statistisches Bundesamt (2011))

Nutzungsart	Anteil an der Siedlungs- und Verkehrsfläche 2010 in %	Anteil an der Bodenfläche Deutschlands 2010 in %
Gebäude- und Freifläche	51,5	6,9
Darunter Gebäude- und Freifläche Wohnen	25,3	3,4
Darunter Gewerbe und Industrie	6,9	0,9
Betriebsflächen ohne Abbau- und	1,8	0,2
Erholungsflächen	8,4	1,1
Darunter städtische Grünflächen	5,6	0,7
Verkehrsflächen	37,6	5,0
Siedlungs- und Verkehrsfläche gesamt		13,4

statistische Zusammenhänge für die einzelnen Nutzungsarten identifiziert. Auch diese Daten stammen überwiegend vom Statistischen Bundesamt. Planerische Festlegungen werden nicht explizit berücksichtigt. Davon ausgehend, dass Festlegungen in der Vergangenheit aber die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung bereits beeinflusst haben, wird dies implizit im Modell mit fortgeschrieben.

Für die Projektion der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2030 müssen dementsprechend auch Informationen über die erklärenden Variablen für den Projektionszeitraum vorliegen. Die wirtschaftliche Entwicklung wird mit dem makroökonomischen Modell INFORGE (Interindustry Forecasting Germany) und einem integrierten Regionalmodell abgebildet. Die Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung wird der Raumordnungsprognose 2030 des BBSR entnommen (Schlömer 2012).⁹

Die Ergebnisse der Projektion wurden bereits in Hoymann/Beckmann/Dosch et al. (2012) veröffentlicht. Da in der Flächenerhebung die Veränderung der Erholungsflächen allerdings überschätzt wird und dies somit auch in der Projektion der Fall ist, wurden die Projektionsergebnisse für Erholungsflächen korrigiert. Bisher werden in *Panta Rhei Regio* 0,54 m² Zuwachs an Grünflächen pro Einwohner und Jahr angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus der amtlichen Statistik bezogen auf Westdeutschland ohne Schleswig-Holstein. Allerdings weisen einige verdichtete Regionen eine größere Nachfrage nach Flächen auf, als innerhalb der Region zur Verfügung steht. Deshalb wurde der Wert für

⁹Die hier verwendete Bevölkerungsprognose ist eine Vorabversion der offiziellen Raumordnungsprognose und unterscheidet sich im angenommenen Wanderungssaldo. Die räumliche Verteilung der Bevölkerung und Haushalte ist aber nicht betroffen.

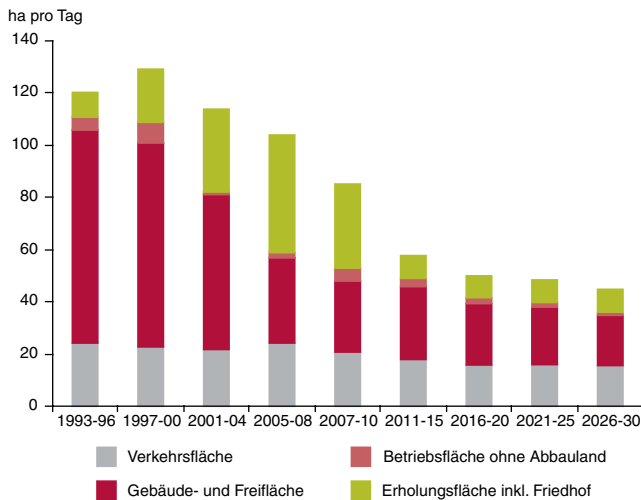


Abb. 3 Tägliche Flächenneuanspruchnahme durch Siedlungs- und Verkehrszwecke 1993 bis 2030 (in ha). (Quellen: Flächenerhebung des Bundes und der Länder, GWS Osnabrück 2012, Berechnungen des BBSR)

die Entwicklung der Erholungsflächen korrigiert. Für Westdeutschland einschließlich Berlin ergibt sich somit eine Zunahme an Grünflächen von 0,22 m² pro Einwohner und Jahr und für Ostdeutschland von 0,7 m² je Einwohner und Jahr. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Ergebnisse in Hoymann/Beckmann/Dosch et al. (2012) für die Erholungsflächen geringfügig von den hier gezeigten. Nach der beschriebenen Korrektur reduziert sich die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche von derzeit 74 ha pro Tag im Zeitraum 2009 bis 2012 auf 45 ha täglich im Jahr 2030 (vgl. Abb. 3).

Der deutliche Rückgang der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr wird einerseits durch die Entwicklung der Erholungsflächen bestimmt (Erklärung siehe oben) und andererseits durch die demographische Entwicklung. Danach geht die Bevölkerung bis 2030 auf 78,7 Mio. Einwohner zurück. Demgegenüber wird die Anzahl der Haushalte bis 2025 aber noch leicht auf 41,2 Mio. steigen und erst danach wieder sinken. Dies liegt vor allem im anhaltenden Trend zu kleineren Haushalten begründet.

3.2.2 Forstflächen

Die Nachfrage nach Forstflächen in den Landkreisen wird als Trendfortschreibung aus der Vergangenheit heraus ermittelt. Dies geschieht aufgrund eines in der Vergangenheit langfristig beobachteten Trends.¹⁰ Dabei liegt zunächst die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung des Statistischen Bundesamtes zugrunde (Statistisches Bundesamt 2013). Da laut Flächenerhebung im Zeitraum 1996

bis 2010 jährlich rund 15.000 ha Wald entstanden sind, wird die Fortsetzung dieser Entwicklung auch bis zum Jahr 2030 angenommen. Damit nimmt die Waldfläche bundesweit um knapp 3 % bzw. gut 300.000 ha zu.

3.2.3 Natur- und Offenland

Aus der Flächenerhebung – und damit auch aus der Projektion mit *Panta Rhei Regio* – wird nicht ersichtlich, in welche Richtung sich eine Nutzungsart verändert hat. Um dies zu analysieren, müssen räumliche Landnutzungsdaten hinzugezogen werden. Mit *Corine Land Cover* liegt ein Datensatz vor, in dem die Landnutzungsänderungen von 1990 bis 2006 konsistent abgebildet werden. Die Analyse von Corine-Land-Cover-Daten ergibt, dass Forstflächen in Deutschland nicht ausschließlich auf Landwirtschaftsflächen entstehen, sondern als Sukzessionsprozess in der Vergangenheit oft auf naturnahen und Offenlandflächen entstanden sind. Da sich die Nutzungsart „Natur- und Offenland“ somit auch künftig quantitativ ändern wird, muss für diese im Modell auch ein regionaler Raumanpruch definiert werden. Dabei wird angenommen, dass in dem Umfang Wald auf Natur- und Offenland entsteht, wie dies in der Vergangenheit der Fall war. Kann nicht die gesamte Forstflächennachfrage auf Natur- und Offenland realisiert werden, entstehen Forstflächen auch auf Landwirtschaftsflächen. Die Nutzungsart Natur- und Offenland besitzt somit eine negative Nachfrage. Im Projektionszeitraum 2009 bis 2030 gehen demnach knapp 13,2 % Natur- und Offenlandflächen verloren.

3.2.4 Landwirtschaftsflächen

Auch Landwirtschaftsflächen sind eine Nutzungsart, die künftig eine negative Nachfrage verzeichnet. Der Grund dafür ist, dass in vielen Regionen Siedlungs- und Verkehrsflächen fast ausschließlich auf Landwirtschaftsflächen entstehen und regional durch Sukzession auch Wald auf diesen entsteht. Diese Prämisse wird durch eine Veränderungsanalyse, basierend auf *Corine Land Cover* und dem Austausch mit dem agrarökonomischen Modell RAUMIS¹¹, bestätigt. Somit ergibt sich die Nachfrage nach Landwirtschaftsfläche aus der Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie der Forstentwicklung. Wie viel Fläche jeweils zu Lasten der Acker- bzw. Grünlandflächen geht, hängt davon ab, wo in der Vergangenheit Siedlungs- und Verkehrsflächen entstanden sind. Siedlungs- und Verkehrsflächen entstehen zu dem Teil auf Acker- bzw. Grünlandflächen, wie es für den Zeitraum 2000 bis 2006 in *Corine Land Cover* beobachtet wurde. Ist in der Vergangenheit Siedlungs- und Verkehrsfläche nicht auf Landwirtschaftsflächen entstanden, so wird im Modell vereinfachend angenommen, dass dies

¹⁰ Diese Annahme wurde in Gesprächen mit Forstökonominnen des Thünen-Instituts als plausibel bestätigt.

¹¹ RAUMIS = Regionalisiertes Agrar- und Umweltinformationssystem.

bis 2030 aber geschieht. Im Ergebnis nimmt die Landwirtschaftsfläche bundesweit um knapp 2 % im Zeitraum 2009 bis 2030 ab. Bezogen auf die Acker- bzw. Grünlandfläche bedeutet das jeweils einen Rückgang von gut 1,9 % bzw. knapp 3,8 %.

3.2.5 Konsistenz von Raumansprüchen und aktueller Landnutzung

Da die Modellierung der Landnutzungsänderung im *Land Use Scanner* auf den räumlichen Daten des DLM-DE und des *Urban Atlas* basiert und die regionalen Raumansprüche auf statistischen Daten beruhen, muss deren Konsistenz geprüft werden. Probleme beim Vergleich von Flächenerhebung und *Corine Land Cover* sind seit Langem bekannt (vgl. Meinel/Schubert/Siedentop et al. 2007; Einig/Jonas/Zaspel 2009). Da sich Flächenerhebung und flächenhafte Datensätze des DLM-DE und *Urban Atlas* allerdings ebenfalls unterscheiden, sind auch die jeweiligen Nutzungsartenanteile zum Startzeitpunkt der Modellierung unterschiedlich (Hoymann 2013: 8 ff.). Ziel ist es aber, die zukünftige, regional ermittelte Flächenneuinanspruchnahme auf Basis der Flächenerhebung (sektorales Modell) zu verwenden, um sie im Landnutzungsmodell genau zu verorten. Eine einfache Übertragung der absoluten nachgefragten Flächenzunahmen aus der Flächenerhebung auf die flächenhaften Daten führt daher zu einer anderen prozentualen Nutzungsänderung, als es auf der Basis der Flächenerhebungsdaten der Fall wäre.

Aus diesem Grund müssen die auf statistischen Daten basierenden regionalen Raumansprüche um einen Faktor korrigiert werden, um sie an die räumlichen Daten anzupassen. Danach wird die im sektoralen Modell ermittelte Nachfrage als prozentuale Änderung in das Landnutzungsmodell übertragen. Dies führt in beiden Modellen zu unterschiedlichen absoluten Veränderungswerten. Künftig könnte es möglich werden, die regionalen Raumansprüche direkt aus den räumlichen Landnutzungsdaten abzuleiten, wenn Flächenerhebung und ATKIS durch die Überführung in das AAA-Modell¹² angepasst werden und damit auch für die räumlichen Landnutzungsdaten eine Zeitreihe vorliegt.

4 Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über erste Ergebnisse zur Simulation der Landnutzung für Deutschland bis zum Jahr 2030. Abbildung 4 gibt einen auf Gemeindeebene aggregierten Überblick über die Siedlungs- und Verkehrs-

flächenentwicklung in Deutschland. Die Regionen mit künftig hoher Flächeninanspruchnahme sind vor allem die Regionen, die bereits heute einen hohen Anteil an Siedlungs- und Verkehrsfläche aufweisen. Im Besonderen sind das die Regionen um die großen Metropolen Hamburg, Berlin, München und Rhein-Main. Gleichzeitig sind auch die Regionen mit besonders geringer Flächeninanspruchnahme deutlich erkennbar. Vor allem in Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern sowie dem Schwarzwald und der Schwäbischen Alb sind aufgrund der demographischen Entwicklung nur noch geringe Zuwächse an Siedlungs- und Verkehrsfläche zu erwarten.

Es zeigt sich, dass im ersten Simulationszeitraum bis 2015 die Zunahme an Siedlungs- und Verkehrsfläche am größten ist. Dies entspricht der mit dem umweltökonomischen Modell *Panta Rhei Regio* ermittelten Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche (vgl. Abb. 3). Dieser Trend ist mehr oder weniger ausgeprägt in allen Regionen Deutschlands zu finden. Der Grund für die Verlangsamung der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung liegt auch hier in der demographischen Entwicklung begründet. Abbildung 5 illustriert die unterschiedlichen Wachstumsphasen der Zeitschritte des Modells anhand eines beispielhaften Ausschnittes.

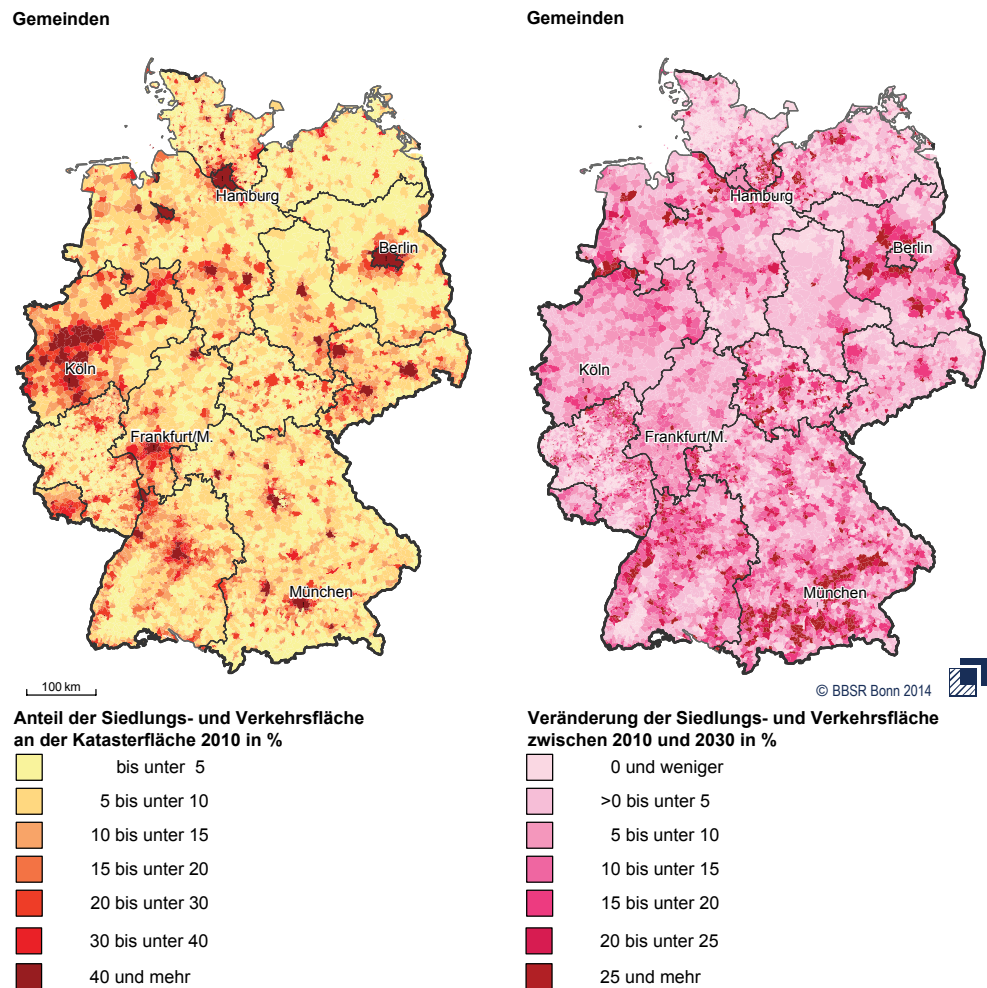
In Abb. 6 ist die Distanz neuer simulierter Siedlungsflächen zu bestehenden Siedlungsflächen im Jahr 2009 dargestellt. Im Vergleich zu der beobachteten Entwicklung im Zeitraum 2000 bis 2006 zeigt sich, dass mehr neue Siedlungsflächen in unmittelbarer Nachbarschaft zu bestehenden Flächen entstehen. Insgesamt nimmt die Entstehung neuer Flächen mit zunehmender Distanz stark ab. Das entspricht grundsätzlich der tatsächlich beobachteten Entwicklung im Zeitraum 2000 bis 2006.

Die räumliche Verortung der Landnutzungsänderung ermöglicht neben einem quantitativen Monitoring auch qualitative Aussagen zur Flächenentwicklung in Deutschland. So zeigt sich, dass trotz des Zuwachses an Siedlungs- und Verkehrsfläche die Anzahl der einzelnen Siedlungsflächen um 2,5 % abnimmt. Dafür werden die Flächen aber um 11,5 % größer. Das bedeutet, dass Einzelflächen zusammenwachsen. Besonders betroffen von diesen Entwicklungen sind die Regionen Rhein-Main, München, Nürnberg-Erlangen und das Umland von Berlin. Das sind die Regionen, die künftig auch noch ein relativ hohes Bevölkerungswachstum aufweisen und einem besonderen Siedlungsdruck ausgesetzt sind. Diese Entwicklung ist dann besonders kritisch, wenn dadurch zum Beispiel Lebensraumnetzwerke verloren gehen (vgl. Reck/Hänel/Jeffberger et al. 2008).

Die Ergebnisse ermöglichen auch Aussagen darüber, wie sich die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung auf schützenswerte Räume auswirkt. Dazu zählen unter anderem die verschiedenen Schutzgebietskategorien, planerisch festgesetzte Räume für den vorsorgenden Hoch-

¹²Anwendungsschema für verschiedene Informationssysteme wie ATKIS, durch die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland neu konzipiert.

Abb. 4 Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche 2010 bis 2030 auf Gemeindeebene.
(Quelle: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, GWS Osnabrück 2012, Berechnungen des BBSR, Geometrische Basis: BKG/BBSR, Gemeinden 31.12.2011)



Bearbeitung: R. Goetzke, J. Hoymann

Abb. 5 Exemplarische Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen in einem beispielhaften Ausschnitt Deutschlands 2009 bis 2030

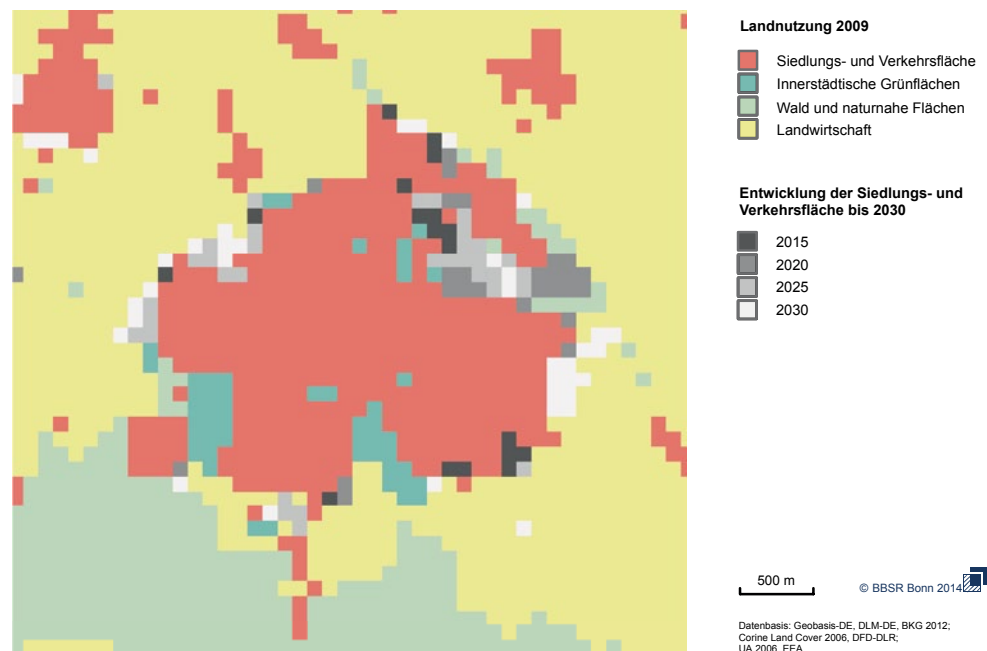


Abb. 6 Distanz neu entstandener Siedlungs- und Verkehrsflächen zu bestehenden

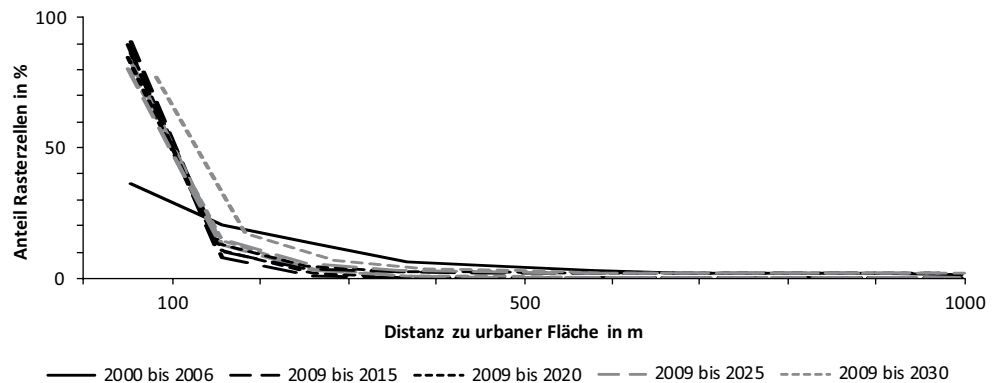
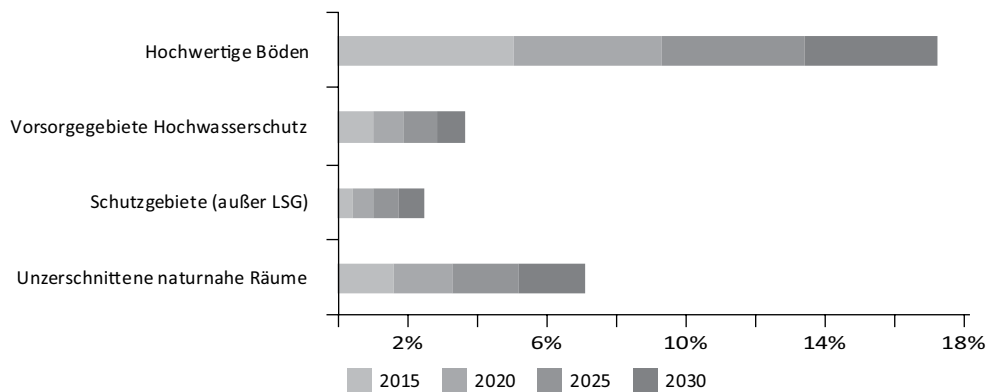


Abb. 7 Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in schützenswerten Räumen 2009 bis 2030. (Quelle: Daten des Bundesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe, des Bundesamtes für Naturschutz, ROPLAMO des BBSR, BKG ©GeoBasis-DE 2012, EEA, Berechnungen des BBSR)



wasserschutz oder auch qualitativ hochwertige Böden. Über die Eignungskarten werden zwar Regeln für die Verortung definiert. Aufgrund der regionalen Nachfrage nach Land und der Konkurrenzen der einzelnen Nutzungsarten untereinander ist das Simulationsergebnis nicht eindeutig vorhersehbar. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in einigen schützenswerten Räumen. Regional kann diese Entwicklung erheblich abweichen.

5 Diskussion und Ausblick

Die präsentierten Ergebnisse zeigen das erste deutschlandweite Landnutzungsszenario für das Jahr 2030. Das kalibrierte Modell liefert plausible Ergebnisse, die den tatsächlich zu beobachtenden Tendenzen der Landnutzungsentwicklung entsprechen. Trotz der insgesamt sehr vielversprechenden Ergebnisse, simuliert das Modell im Detail Landnutzungsänderungen, die auf den ersten Blick nicht plausibel erscheinen. Dies beinhaltet vor allem das Verschwinden von einzelnen Zellen der Siedlungsfläche und deren Auftauchen an einem anderen Ort. Der Grund dafür liegt im Modellalgorithmus begründet. Der *Land Use Scanner* optimiert die Verortung einzelner Landnutzungsarten. Ist eine Rasterzelle für eine andere Landnutzung besser geeignet, wird die ursprüngliche Landnutzung verdrängt.

Auch wenn dieser Effekt nicht erwünscht ist, so lässt er sich nicht vollständig vermeiden. Das Ergebnis der Allokation ist somit nicht vorhersagbar.

Mit den vorliegenden Ergebnissen ist eine große Anzahl unterschiedlicher räumlicher Datensätze zusammengeführt worden. Diese stammen aus unterschiedlichen Datenquellen und sind jeweils für unterschiedliche Zwecke entwickelt worden. Aus diesem Grund unterscheiden sie sich teilweise auch erheblich in ihrem Maßstab. Auch die Aktualität ist unterschiedlich, obwohl jeweils der aktuellste zur Verfügung stehende Datensatz eingesetzt wurde. Diese Einschränkung muss bei der Interpretation der Ergebnisse immer berücksichtigt werden. Da auch einzelne Datensätze regional unterschiedliche Qualitäten aufweisen, wirkt sich dies auch auf das Simulationsergebnis aus. Der mögliche regionale Qualitätsunterschied ist allerdings nicht messbar. Künftig wäre es wünschenswert, mehr Datensätze mit einer einheitlichen Aktualität und einem einheitlichen Maßstab nutzen zu können, um regionale Qualitätsunterschiede ausschließen zu können. Dies bleibt allerdings wegen der zahlreichen verschiedenen Datenhersteller schwierig.

In einigen Regionen Deutschlands ist mit weiterhin hohem Siedlungsdruck auf andere Landnutzungsarten (vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen) zu rechnen (vgl. Abb. 4). In anderen Regionen Deutschlands reduziert sich der Siedlungsdruck künftig. Allerdings kommt es auch hier

auf sinnvolle Standortentscheidungen an, um die Auswirkungen auf die verfügbare Freifläche gering zu halten.

Das entwickelte Landnutzungsszenario wird im weiteren Projektverlauf als Referenz genutzt. In den nächsten Arbeitsschritten werden Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz implementiert und ihre Klimawirksamkeit beurteilt. Aus den Ergebnissen werden schließlich Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger abgeleitet. Des Weiteren dienen die Ergebnisse als Rahmen für Analysen der forst- und landwirtschaftlichen Produktionsentwicklung. So werden die veränderten Flächeninformationen als Eingangsdatensätze eines agrar- und eines forstökonomischen Modells verwendet, um darin den möglichen Einfluss der Sektoren Landwirtschaft und Forst auf die Erreichung von Klimaschutzzielen zu simulieren.

Neben den hier gezeigten ersten Auswertemöglichkeiten ergeben sich zahlreiche weitere Ansatzpunkte zur Verwendung der Simulationsergebnisse. Gerade in Bezug auf die Evaluation von Vulnerabilität im Zeichen des Klimawandels und die Bewertung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen können die Simulationsergebnisse verwendet werden, z. B. bei der Analyse von Überschwemmungsrisiken und Schadenspotenzialen. Ansätze in diesem Bereich werden mit ähnlichen Modellverbünden von Koomen/Loonen/Hilferink (2008) und Verburg/Koomen/Hilferink et al. (2012) vorgestellt. Zusätzlich ließe sich mit einem Modell wie dem *Land Use Scanner* für Deutschland die steuernde Wirkung von Raumordnungsplänen visualisieren und evaluieren.

Wie die Landnutzung im Jahr 2030 aussieht, welche Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsmaßnahmen bis dahin umgesetzt wurden, wird die Zukunft zeigen, die bekanntlich voller Überraschungen und Diskontinuitäten sein kann. Nichtsdestotrotz können schon heute mit einem Modell wie dem *Land Use Scanner* zukünftige Entwicklungen im „Was wäre wenn“-Sinne untersucht und die räumlichen Konsequenzen von Entscheidungen bewertet werden. Vor allem durch die Kopplung mit weiteren Modellen (z. B. Klima- und hydrologischen Modellen) lassen sich umfassende Aussagen über die Wirkung von Mensch-Umwelt-Interaktionen auf die Landnutzung und umgekehrt treffen.

Literatur

- Alcamo, J.; Kok, K.; Busch, G.; Priess, J.A.; Eickhout, B.; Rounsevell, M.; Rothman, D.S.; Heistermann, M. (2006): Searching for the Future of Land: Scenarios from the Local to Global Scale. In Lambin, E.F.; Geist, H. (Hrsg.): *Land-Use and Land-Cover Change*. Berlin, Heidelberg, 137–155.
- Barredo, J.I.; Engelen, G. (2010): Land Use Scenario Modeling for Flood Risk Mitigation. In: *Sustainability* 2 (5), 1327–1344.
- Batista e Silva, F.; Lavalle, C.; Koomen, E. (2013): A procedure to obtain a refined European land use/cover map. In: *Journal of Land Use Science* 8 (3), 255–283.
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): 30-ha-Ziel realisiert. Konsequenzen des Szenarios Flächenverbrauchsreduktion auf 30 ha im Jahr 2020 für die Siedlungsentwicklung. Bonn. = *Forschungen* 148.
- Briassoulis, H. (2000): Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> (26.03.2014).
- 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.
- Clarke, K.C.; Gazulis, N.; Dietzel, C.K.; Goldstein, N.C. (2007): A Decade of SLEUTHing: Lessons Learned from Applications of a Cellular Automaton Land Use Change Model. In Fisher, P. (Hrsg.): *Classics from IJGIS. Twenty years of the International Journal of Geographical Information Science and Systems*. Boca Raton, 413–426.
- Couclelis, H. (2005): “Where has the future gone?” Rethinking the role of integrated land-use models in spatial planning. In: *Environment and Planning A* 37 (8), 1353–1371.
- Dekkers, J.; Koomen, E. (2007): Land-use simulation for water management. Application of the Land Use Scanner in two large-scale scenario studies. In Koomen, E.; Stillwell, J.; Bakema, A.; Scholten, H. (Hrsg.): *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications*. Dordrecht, 355–373.
- Distelkamp, M.; Großmann, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P.; Wolter, M.I. (2009): Panta Rhei Regio. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. Osnabrück. = gws Discussion Paper 2009/7.
- Einig, K.; Jonas, A.; Zaspel, B. (2009): Eignung von CORINE-Geodaten und Daten der Flächenerhebung zur Analyse der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in Deutschland. In: *Wirtschaft und Statistik* 4, 355–364.
- Engelen, G.; Lavalle, C.; Barredo, J.; Meulen, M.; White, R. (2007): The MOLAND modelling framework for urban and regional land-use dynamics. In Koomen, E.; Stillwell, J.; Bakema, A.; Scholten, H. (Hrsg.): *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications*. Dordrecht, 297–319.
- Geist, H.; McConnell, W.; Lambin, E.F.; Moran, E.; Alves, D.; Rudel, T. (2006): Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. In Lambin, E. F.; Geist, H. (Hrsg.): *Land-Use and Land-Cover Change*. Berlin, Heidelberg, 41–70.
- Goetzke, R. (2010): Entwicklung eines fernerkundungsgestützten Modellverbundes zur Simulation des urban-ruralen Landnutzungswandels in Nordrhein-Westfalen. Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Hilferink, M. (2012): Suriname New Infrastructure. <http://www.objectvision.nl/gallery/projects/new-infrastructure-suriname> (26.03.2014).
- Hilferink, M.; Rietveld, P. (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: *Journal of Geographical Systems* 1 (12), 155–177.
- Hoymann, J. (2013): Neuere Flächennutzungsdaten. Übersicht, Vergleich und Nutzungsmöglichkeiten. Bonn. = BBSR-Analysen KOMPAKT 2/2013.
- Hoymann, J.; Beckmann, G.; Dosch, F.; Distelkamp, M. (2012): Trends der Siedlungsflächenentwicklung. Status quo und Projektion 2030. Bonn. = BBSR-Analysen KOMPAKT 9/2012.
- Hoymann, J.; Koomen, E.; Dekkers, J. (2014): Szenarien der Siedlungsflächenentwicklung im Elbeinzugsgebiet. In Wechsung, F.; Hartje, V.; Kaden, S.; Venohr, M.; Hansjürgens, B.; Gräfe, P. (Hrsg.): *Die Elbe und ihr Einzugsgebiet im globalen Wandel*. Berlin, 197–240.

- Jacobs, C.; Bouwman, A.F.; Koomen, E.; van der Burg, A. (2011): Lessons learned from using land-use simulation in regional planning. In: Koomen, E.; Borsboom-van Beurden, J. (Hrsg.): Land-use modelling in planning practice. Dordrecht, 131–149.
- Koomen, E.; Hilferink, M.; Borsboom-van Beurden, J. (2011): Introducing Land Use Scanner. In Koomen, E. (Hrsg.): Land-use modelling in planning practice. Dordrecht, 3–21.
- Koomen, E.; Koekoek, A.; Dijk, E. (2011): Simulating Land-use Change in a Regional Planning Context. In: Applied Spatial Analysis and Policy 4 (4), 223–247.
- Koomen, E.; Loonen, W.; Hilferink, M. (2008): Climate-Change Adaptations in Land-Use Planning. A Scenario-Based Approach. In: Bernard, L.; Friis-Christensen, A.; Pundt, H. (Hrsg.): The European Information Society. Berlin, 261–282.
- Koomen, E.; Rietveld, P.; de Nijs, T. (2008): Modelling land-use change for spatial planning support. In: The Annals of Regional Science 42 (1), 1–10.
- Kufeld, W. (Hrsg.) (2013): Klimawandel und Nutzung von regenerativen Energien als Herausforderungen für die Raumordnung. Hannover. = Arbeitsberichte der ARL 7.
- Lambin, E.F. (2005): Modelling land-use change. In Wainwright, J.; Mulligan, M. (Hrsg.): Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity. Chichester, 245–254.
- Lavalle, C.; Baranzelli, C.; Batista e Silva, F.; Mubareka, S.; Rocha Gomes, C.; Koomen, E.; Hilferink, M. (2011): A High Resolution Land Use/Cover Modelling Framework for Europe: Introducing the EU-ClueScanner100 Model. In: Murgante, B.; Gervasi, O.; Iglesias, A.; Taniar, D.; Apduhan, B.O. (Hrsg.): Computational science and its applications. Berlin, 60–75.
- Meinel, G.; Schubert, I.; Siedentop, S.; Buchroithner, M. (2007): Europäische Siedlungsstrukturvergleiche auf Basis von CORINE Land Cover. Möglichkeiten und Grenzen. In: Schrenk, M.; Popovich, V.; Benedikt, J. (Hrsg.): To plan is not enough. REAL CORP 2007. Schwechat-Rannerdorf, 645–656.
- Mertens, B.; Lambin, E. (1997): Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. In: Applied Geography 17 (2), 143–162.
- Mertens, B.; Lambin, E. (2000): Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon. In: Annals of the Association of American Geographers 90 (3), 467–494.
- Poelmans, L.; van Rompaey, A. (2009): Detecting and modelling spatial patterns of urban sprawl in highly fragmented areas: A case study in the Flanders-Brussels region. In: Landscape and Urban Planning 93 (1), 10–19.
- Pontius Jr., R.; Cornell, J.; Hall, C. (2001): Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 85 (1–3), 191–203.
- Pontius Jr., R.; Schneider, L.C. (2001): Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 85 (1–3), 239–248.
- Reck, H.; Hänel, K.; Jeßberger, J.; Lorenzen, D. (2008): Unzerschnittene verkehrsarme Räume, Unzerschnittene Funktionsräume und Biologische Vielfalt. Landschafts- und Zerschneidungsanalysen als Grundlage für die räumliche Umweltplanung. Bonn-Bad Godesberg. = Naturschutz und Biologische Vielfalt 62.
- Richter, A.; Hennings, V.; Müller, L. (2009): Anwendung des Münchberger Soil Quality Ratings (SQR) auf bodenkundliche Grundlagenkarten. In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (Hrsg.): Böden – eine endliche Ressource. Bonn. http://eprints.dbges.de/243/1/Beitrag_RICHTER_HENNINGS_M%C3%9CLLER.pdf (17.04.2014).
- Rounsevell, M.; Reginster, I.; Araújo, M.; Carter, T.; Dendoncker, N.; Ewert, F.; House, J.; Kankaanpää, S.; Leemans, R.; Metzger, M.; Schmit, C.; Smith, P.; Tuck, G. (2006): A coherent set of future land use change scenarios for Europe. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 114 (1), 57–68.
- Schlömer, C. (2012): Raumordnungsprognose 2030. Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen. Stuttgart. = BBSR Analysen Bau.Stadt.Raum 9.
- Schneider, L.C.; Pontius Jr., R. (2001): Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 85 (1–3), 83–94.
- Scholten, H.; van de Velde, R.; Rietveld, P.; Hilferink, M. (1999): Spatial information infrastructure for scenario planning: the development of a Land Use Planner for Holland. In: Stillwell, J.; Geertman, S.; Openshaw, S. (Hrsg.): Geographical Information and Planning. Berlin, 112–134.
- Schotten, C.; Goetgeluk, R.; Hilferink, M.; Rietveld, P.; Scholten, H. (2001): Residential construction, land use and the environment. Simulations for the Netherlands using a GIS-based land use model. In: Environmental Modeling and Assessment 6 (2), 133–143.
- Silva, E.; Clarke, K. (2002): Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. In: Computers, Environment and Urban Systems 26 (6), 525–552.
- Statistisches Bundesamt (2011): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Ergebnisse der Flächenerhebung 2010. Wiesbaden. = Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Fachserie 3, Reihe 5.1.
- Statistisches Bundesamt (2013): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2012. Wiesbaden. = Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Fachserie 3, Reihe 5.1.
- Tack, F. (2000): Emulating the Future. http://www.classic.archined.nl/news/0007/bia_nl.html (01.04.2014).
- Umweltbundesamt (2011): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2011. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2009. Dessau-Roßlau.
- van der Straaten, J.; Rouwendal, J. (2010): Why are the commuting distances of power couples so short? An analysis of the location preferences of households. <http://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa10/ERSA2010finalpaper816.pdf> (01.04.2014).
- Verburg, P.H.; de Nijs, T.; van Eck, J.; Visser, H.; de Jong, K. (2004): A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. In: Computers, Environment and Urban Systems 28 (6), 667–690.
- Verburg, P.H.; Koomen, E.; Hilferink, M.; Pérez-Soba, M.; Lesschen, J.P. (2012): An assessment of the impact of climate adaptation measures to reduce flood risk on ecosystem services. In: Landscape Ecology 27 (4), 473–486.
- Verburg, P.H.; Schot, P.P.; Dijst, M.J.; Veldkamp, A.T. (2004): Land use change modelling: current practice and research priorities. In: GeoJournal 61 (4), 309–324.
- Verburg, P.H.; Schulp, C.; Witte, N.; Veldkamp, A. (2006): Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes. In: Agriculture, Ecosystems & Environment 114 (1), 39–56.
- Verburg, P.H.; van Eck, J.R.R.; de Nijs, T.; Dijst, M.J.; Schot, P. (2004): Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. In: Environment and Planning B 31 (1), 125–150.
- Zaspel, B.; Einig, K. (2012): Raumordnungsplan-Monitor (ROPLAMO) – ein Planinformationssystem für Deutschland. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin, 745–754.