

Szenarien zur Landnutzung in dynamischen Stadtregionen – Ansätze und Potenziale für agri-urbane Entwicklungen am Beispiel der Region Köln

Scenarios for Land Use in Dynamic Urban Regions – Approaches and Potentials for Agri-urban Developments Using the Example of the Cologne Region

Mirko Blinn | Anne Fischer | Sven Lautenbach | Dominik Weiß | Jan Grade |
Timo Heyn | Thomas Abraham | Fred Lennartz | Theo Kötter

Zusammenfassung

Das anhaltende Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsflächen vollzieht sich in den dynamischen Stadtregionen weiterhin vor allem zulasten der Landwirtschaftsflächen. Im dem vom BMBF geförderten Projekt NACHWUCHS werden für die Metropole Köln und ihr linksrheinisches Umland die Möglichkeiten für einen Perspektiven- und Paradigmenwechsel in der Entwicklung untersucht. Im Fokus stehen alternative Szenarien für eine nachhaltige, flächeneffiziente und klimasensible Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung der Landwirtschaftsflächen und ihrer vielfältigen strategischen Bedeutungen und Funktionen. Dafür kommt das neue Landnutzungsmodell NACHWUCHS zur Modellierung der Siedlungsflächenentwicklung in den Städten und Gemeinden der Region zum Einsatz. Anhand verschiedener Szenarien werden potenzielle Entwicklungspfade für die gesamte Region aufgezeigt und mit einem konsistenten Indikatorensystem aus den Bereichen Wohnen, Landwirtschaft sowie Natur und Landschaft auf Basis von rasterbasierten raumbezogenen Daten analysiert und bewertet. Der Ansatz liefert damit valide Grundlagen für Flächennutzungsentscheidungen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen.

Schlüsselwörter: Flächeninanspruchnahme, dynamische Stadtregionen, Landnutzungsmodellierung, Landnutzungsindikatoren, agri-urbane Entwicklung, Stadtregion Köln

Summary

The continuing growth of settlement and traffic areas in the dynamic urban regions continues to take place primarily at the expense of agricultural areas. In the BMBF funded project NACHWUCHS, the possibilities for a change of perspective and paradigm in development are being investigated for the metropolis of Cologne and its surrounding area on the left bank of the Rhine. The focus is on alternative scenarios for sustainable, land-efficient and climate-sensitive land use with special consideration of agricultural land and its diverse strategic significance and functions. For this purpose, the new land use model NACHWUCHS is used to model the development of settlement

areas in the cities and municipalities of the region. Using different scenarios, potential development paths for the entire region are shown, analyzed and evaluated with a consistent indicator system from the areas of housing, agriculture as well as landscape ecology on the basis of raster-based spatial data. The approach thus provides valid bases for land use decisions on different spatial and temporal scales.

Keywords: land use, dynamic urban regions, land use modeling, land use indicators, agri-urban development, Cologne urban region

1 Landwirtschaftsflächen in Stadtregionen unter Stress

Stadtregionen sind unter dem Gesichtspunkt des Urban Sprawl seit Jahren intensiv beforscht worden (vgl. z. B. Siedentop 2005), während die Bedeutung und die Rolle der Landwirtschaft und der rasant fortschreitende Verlust an Landwirtschaftsflächen dabei bislang kaum thematisiert wurde.

Der Anteil der Landwirtschaftsflächen an der Landnutzung in Deutschland beträgt derzeit 50,6 %, nimmt allerdings kontinuierlich ab. Der Rückgang vollzieht sich überwiegend zugunsten der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) einschließlich des erforderlichen naturschutzrechtlichen Ausgleichsflächenbedarfs (BMEL 2022). Die SuV wächst derzeit um ca. 54 ha pro Tag, sodass bis zur Erreichung des 30-X ha-Ziels für das Jahr 2030 noch erheblicher Handlungsbedarf besteht (UBA 2022, Bundesregierung 2021). Die Flächeninanspruchnahme konzentriert sich zunehmend auf hochverdichtete Stadtregionen mit ihren hochwertigen Landwirtschaftsflächen (Goetzke et al. 2014). Die aktuelle Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland sieht zwar eine Erhaltung von Agrarflächen als eine zentrale Voraussetzung für die Ernährungssicherheit an, in dessen fehlt es derzeit an einem z. B. dem Naturschutz vergleichbaren Schutzregime für landwirtschaftliche Flächen.

Aufgrund der geltenden Regelungen des BauGB haben die Landwirtschaftsflächen in der räumlichen Planung bei Entscheidungen über Flächennutzungskonflikte eine eher schwache Position. Nach § 1a Abs. 1 BauGB soll mit »Grund und Boden sparsam und schonend umgegangen werden« und landwirtschaftlich genutzte Flächen sollen nur »im notwendigen Umfang umgenutzt« werden. Landnutzungsentscheidungen unterliegen daher in Konkurrenz zu anderen Landnutzungsansprüchen der Abwägung. Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) ist vor allem auf die Sicherung und Wiederherstellung der Bodenfunktionen ausgerichtet. Nachsorgend werden u. a. betriebliche Einwirkungen auf die natürlichen Bodenfunktionen und die Archivfunktion für die Natur- und Kulturgeschichte geregelt.

Derzeit weisen Landwirtschaftsflächen im Rahmen der Regional- und Bauleitplanung eine geringe Bedeutung auf, wie auch eine aktuelle Erhebung in der Stadtregion Köln zeigt. Im Rahmen von Planungsprozessen werden landwirtschaftlichen Belangen im Vergleich zu Belangen von Natur und Landschaft, Wohnen und Wirtschaft eine deutlich geringere Bedeutung beigemessen (Weiß et al. 2019, Müller und Verhaag 2022).

Die Verknappung und spekulative Käufe von Agrarland führen zu enormen Bodenpreissteigerungen und erschweren es Landwirten, die Flächen für die betrieblich notwendigen Erweiterungen zu wirtschaftlich tragfähigen Preisen zu erwerben oder zu pachten. So sind in der Kölner Wachstumsregion die Pachtpreise inzwischen bis auf 1000 €/ha angestiegen (Müller und Verhaag 2022).

Der Landwirtschaft wird in den Stadtregionen und in der Zwischenstadt künftig eine wachsende strategische Bedeutung als (Mit-)Produzent von multicodierten Kulturlandschaften zukommen (vgl. Sieverts 1997, Lohrberg 2001). Trotz der bekannten vielfältigen Serviceleistungen der Landwirtschaftsflächen haben die Nutzungskonflikte um die knappe Ressource »Fläche« in prosperierenden Stadtregionen an Schärfe zugenommen (vgl. Schmidt 2017). Deshalb gewinnen innovative Konzepte für den Schutz, die Vernetzung, die Zugänglichkeit und das Erleben von Freiräumen und Grünflächen an Bedeutung. Agri-urbane Siedlungsmodelle können diese Ansätze fördern, sodass die landwirtschaftliche Flächennutzung eine höhere Wertschätzung und der Schutz landwirtschaftlicher Flächen zugleich eine höhere gesellschaftliche Bedeutung erlangen (Pszola et al. 2022).

Für die systematische Erfassung, Analyse und Bewertung der Leistungen von Landwirtschaftsflächen als Basis für Planungsentscheidungen ist daher eine Modellierung alternativer Landnutzungsszenarien als Grundlage für rationale Landnutzungsentscheidungen unverzichtbar.

2 Die Stadtregion Köln – demografische und ökonomische Trends

Die Stadtregion Köln ist eine wirtschaftliche und demografische Wachstumsregion. Von den rd. 761.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (30.6.2021) in der Region arbeiten 78 % in der Stadt Köln (Bundesagentur für Arbeit 2022), während 67 % der rund 1,63 Mio. Einwohner (31.12.2020) auch in Köln lebt (IT.NRW 2022). Zwischen 2011 und 2021 stieg die Beschäftigtenzahl in der Region um 142.000 Personen (+23 %). Das wirtschaftliche Wachstum hat maßgeblich dazu beigetragen, dass neue Bewohner in die Region gezogen sind. Zwischen 2011 und 2020 nahm die Bevölkerungszahl um 90.000 Personen zu (+6 %). Die Zahl der Haushalte, als maßgebliche Größe der Wohnungsnachfrage, stieg in diesem Zeitraum um etwa 40.000 (empirica regio 2022). In ähnlichem Umfang wurden auch neue Wohnungen gebaut.

Zwischen dem unmittelbaren Kölner Umland und der übrigen Region gibt es ein deutliches Gefälle in der durchschnittlichen Bebauungsdichte bei Neubaumaßnahmen der jüngeren Vergangenheit. Eine systematische Auswertung von Bebauungsplangebieten fördert signifikante Unterschiede zwischen den Siedlungsflächen im dynamischen Stadtring um die Metropole Köln (34 WE/ha SuV) einerseits sowie im Erftauenkorridor (21 WE/ha) und in der Agrikulturlandschaft (19 WE/ha) andererseits zutage (vgl. Pszola et al. 2022). Erwartungsgemäß nimmt die Dichte mit der Entfernung zur Metropole Köln ab. Die Erfassung und Analyse der Neubaugebiete in den verschiedenen Handlungsregionen dienen als Grundlage für plausible Annahmen der Modellparameter für die Landnutzungsmodellierung.

Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass die Bevölkerungszahl und der Arbeitsmarkt in der Region weiter steigen werden. Aus den vorliegenden Prognosen zur zukünftigen Bevölkerungsentwicklung und zum Wohnungsneubaubedarf ergibt sich angesichts der unterschiedlichen Annahmen eine erhebliche Bandbreite für den zukünftigen Wohnungsneubaubedarf von ca. 95.000 bis 172.000 Wohnungen (Abraham et al. 2020, S. 32 ff.). Im Mittel zwischen der unteren und der oberen Variante sind daher ca. 134.000 zusätzliche Wohnungen im Zeitraum von 2018 bis 2040 erforderlich.

3 Das Landnutzungsmodell NACHWUCHS

3.1 Landnutzungsmodellierung und Indikatoren

Grundsätzlich dienen Landnutzungsmodelle sowohl zur Erklärung aktueller und historischer Landnutzungen und ihrer Veränderungen als auch zur Prognose möglicher zukünftiger Landnutzungsentwicklungen. Durch Variation der Modellparameter vor allem von Restriktions-, Eignungs-, Dichte- und Bedarfsparametern können verschiedene Szenarien für zukünftige Landnutzungen modelliert

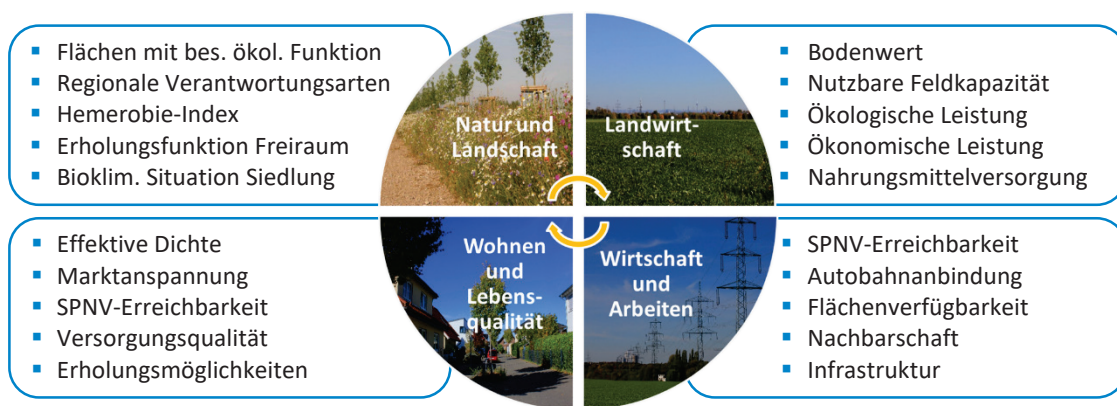


Abb. 1:
Handlungsfelder und Indikatoren im NACHWUCHS-Projekt

werden. Zur Simulation historischer und zukünftiger Entwicklungen von Siedlungsflächen werden Landnutzungsmodelle seit den 1990er Jahren eingesetzt (z. B. Clarke et al. 1997).

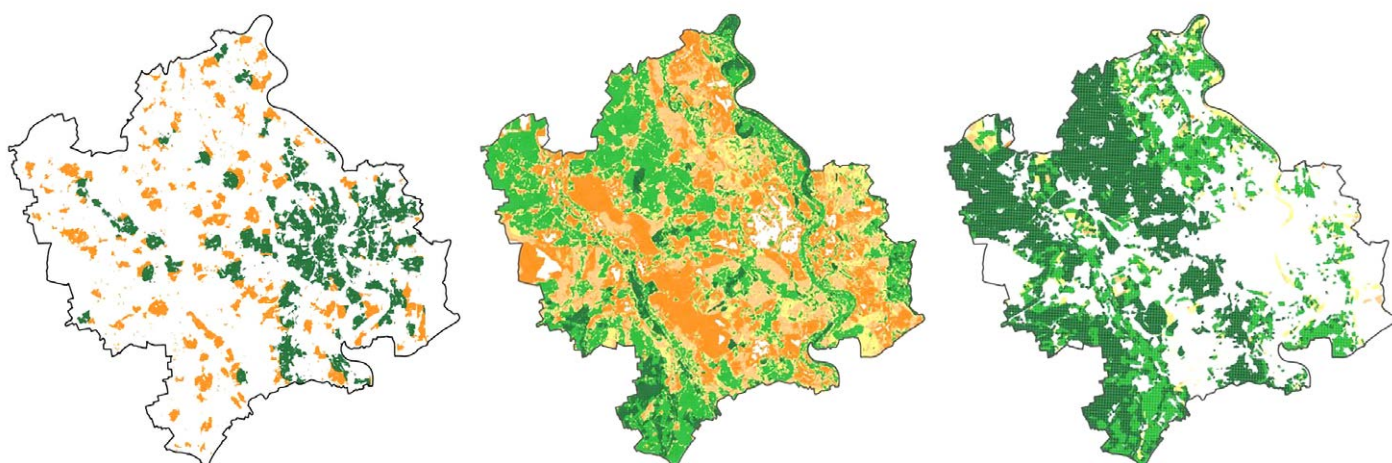
Im Rahmen des Projektes wird die Modellierung von Landnutzungsentwicklungen mittels des eigens entwickelten Landnutzungsmodells NACHWUCHS durchgeführt, das Schnittstellen zu freien Geodatenbanken und aktuellen Machine Learning Software-Bibliotheken nutzt (vgl. Pedregosa et al. 2011).

Dazu wird ein eigenes Indikatorenset entwickelt, da vorliegende Indikatoren sich vor allem für großräumige Anwendungen eignen und für eine kleinräumige Analyse und Modellierung in Stadtregionen nur bedingt einsetzbar und aussagefähig sind. Eine Skalierung auf eine Regionsebene ist beispielsweise für Indikatoren zum Anteil der Agrarumweltmaßnahmen oder zu unzerschnittenen Freiräumen möglich. Dagegen beziehen sich die Indikatoren zur Biodiversität auf großräumige Landschaftstypen, die für die Bewertung eher kleinräumig ablaufender Siedlungsentwicklungen weniger geeignet sind.

Die entwickelten Indikatoren NACHWUCHS, mit denen kleinräumige Veränderungen der Flächennutzung im stadtreionalen Kontext gemessen und abgebildet werden können, werden nachfolgend beschrieben.

Die für die Analyse und Bewertung der Flächennutzung erforderlichen Indikatoren sind in einem partizipativen Verfahren mit den Kommunen der Region entwickelt worden. Die Indikatoren sollten praxisrelevant und zugleich wissenschaftlich valide sein und die vier Handlungsfelder einer nachhaltigen Landnutzung abdecken (vgl. Abb. 1). Alle relevanten Daten und Indikatorenwerte stehen auf einem 100 m × 100 m-Raster für die gesamte Region zur Verfügung, sodass sich z. B. Nutzungsänderungen gegenüber einem definierten Ausgangszustand quantitativ messen und abbilden lassen.

Die Indikatoren sind technisch in einer PostgreSQL-Datenbank mit Anbindung an QGIS-Desktop hinterlegt. Alle Projektpartner und Kommunen können die Indikatoren als einheitliche Basis kostenfrei und für Zwecke der Flächennutzungsentscheidungen nutzen.



Legende

- | | | |
|--|---------|------------------------|
| | Stufe 5 | Sehr hohe Bedeutung |
| | Stufe 4 | Hohe Bedeutung |
| | Stufe 3 | Mittlere Bedeutung |
| | Stufe 2 | Geringe Bedeutung |
| | Stufe 1 | Sehr geringe Bedeutung |

Abb. 2: Status-quo-Analyse der Region anhand ausgewählter Indikatoren: Links: SPNV-Erreichbarkeit der vorhandenen Wohnstandorte. Mitte: Flächen mit besonderer ökologischer Funktion. Rechts: Gesamtindikator Landwirtschaft.

(Hinweis: Flächen, für die der jeweilige Indikator nicht anwendbar ist, sind in Weiß dargestellt.)

Zur Modellierung potenzieller Wohnbauflächen und zur Bewertung der Auswirkungen auf die Landwirtschaftsflächen sowie auf Natur und Landschaft in der Region werden von den 20 Indikatoren nachfolgend lediglich diejenigen genutzt, mit denen sich einerseits die Auswirkungen der Flächenumwidmung auf die Landwirtschaft und auf Natur und Landschaft sowie andererseits die Qualität der neuen Wohnbauflächenstandorte analysieren und beurteilen lassen. Dazu werden neben den fünf Einzelindikatoren des Handlungsfeldes Landwirtschaft zwei Indikatoren aus dem Bereich Natur und Landschaft (s. Kap. 3.3) sowie die SPNV-Erreichbarkeit und die Versorgungsqualität von Siedlungsflächen ausgewählt (s. Kap. 3.4). Sie werden nachfolgend erläutert und teilweise visualisiert (vgl. Abb. 2).

3.2 Indikatoren für das Handlungsfeld »Landwirtschaft«

Die fünf Indikatoren der Landwirtschaft bewerten die Agrarflächen in der Region aus agrarökonomischer sowie agrarökologischer Perspektive. Die Indikatoren werden zunächst jeweils für die einzelnen Feldblöcke berechnet und sodann auf die Rasterzellen übertragen. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Indikatoren:

- **Bodenwert**
Der Indikator repräsentiert die natürliche Ertragsfähigkeit des Bodens und somit seine Fähigkeit zur Biomasseproduktion auf Grundlage der amtlichen Bodenwertzahl.
- **Nutzbare Feldkapazität**
Der Indikator bestimmt auf Basis der klimatischen Bedingungen die Häufigkeit von Wassermangel. Er liefert somit Hinweise zur Ertragssicherheit von Anbaukulturen.
- **Ökologische Leistungen**
Die ökologische Wertigkeit einer Agrarlandschaft ergibt sich im Wesentlichen aus dem Anteil an Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen. Der Indikator quantifiziert deshalb u. a. den Anteil von Uferrand- und Erosionsschutzstreifen, Blüh- und Schonstreifen, Vertragsnaturschutzflächen und Vorrangflächen des Typs Brachen und Streifen.
- **Ökonomische Leistungen**
Der Indikator bewertet den Hektarertrag des Hauptprodukts sowie eventueller Nebenprodukte, die Anbaufläche und die daraus abgeleitete Erntemenge.
- **Nahrungsmittelversorgung**
Die Grundlage des Indikators bildet die Fläche der in den letzten drei Jahren angebauten Kulturen. In Verbindung mit den kulturspezifischen Erträgen und den erzeugten Kilokalorien je Hektar wird das Potenzial hinsichtlich der Nahrungsmittelversorgung von x Personen je Jahr und Hektar abgebildet.

Der Gesamtindikator Landwirtschaft ergibt sich durch Aggregation der fünf Einzelindikatoren in der Weise, dass

der jeweils höchste Einzelwert die Stufe des Gesamtindikators bestimmt (vgl. Abb. 1).

3.3 Indikatoren für das Handlungsfeld »Natur und Landschaft«

Aus dem Bereich Natur und Landschaft wurden Indikatoren ausgewählt, die eine kleinräumige Differenzierung der Agrarlandschaft aufzeigen. Da die Naturnähe (Hemero-bie-Index) von Ackerflächen überwiegend in der gesamten Region identisch bewertet wird und daher keine Differenzierung erlaubt, wird dieser Indikator nicht genutzt. Dies gilt analog auch für den Indikator »Bioklimatische Situation Siedlung«. Ähnlich verhält es sich beim Indikator »Erholungsqualität des Freiraumes«, welcher insbesondere in siedlungsnahen Bereichen weniger aussagekräftige Ergebnisse liefert. Daher erfolgt eine Konzentration auf folgende Indikatoren:

■ Flächen mit besonderer ökologischer Funktion

Um die ökologische Qualität des Freiraums zu erfassen, sind Biotope (inkl. Biotopverbund), Wasser, Boden und Klima als die vier wesentlichen Schutzgüter in Abhängigkeit zu deren jeweiligem Schutzlevel zusammengeführt worden (Multicodierung von Schutzgütern). Da die rechtlich »weichen« Schutzgüter Boden und Klima, für die bislang kein Schutzregime besteht, analog wie die rechtlich »harten« Schutzgüter (u. a. FFH-Gebiete, Wasserschutzgebiete) bewertet werden, ergibt sich ein hoher Indikatorwert für weite Bereiche der Agrarlandschaft. Dies ist vor allem durch die besonders geschützten Bodentypen nach der Bodenkarte NRW sowie durch die sehr hohen Volumina der Kaltluftströme begründet, die in der Agrarlandschaft der Region weit verbreitet sind.

■ Regionale Verantwortungsarten

Bei den sog. Verantwortungsarten handelt es sich um Arten, für die eine Region aus globaler Perspektive eine besondere Verantwortung trägt. Da die vorliegende Region wesentlich von der Agrarlandschaft geprägt wird, findet sich unter den regionalen Verantwortungsarten eine Vielzahl an bedrohten Feldarten (u. a. Feldhamster, Grauammer, Feldlerche, Wiesenweihe). Deshalb hat die Agrarlandschaft eine besondere Verantwortung für den Schutz dieser Arten zu übernehmen. Auf Grundlage der bekannten Fundorte dieser Arten wurden die Populationszentren und Verbreitungsgebiete bestimmt und zusammengeführt. Der Indikator zeigt somit den konkreten Raumanpruch dieser Arten in der Region an.

3.4 Indikatoren für das Handlungsfeld »Wohnen und Lebensqualität«

Im Handlungsfeld Wohnen und Lebensqualität liegen zwei Indikatoren vor, die für jede Rasterzelle »Wohnen« die Anbindung an den personenbezogenen Schienen-Nah-

verkehr (SPNV) und den Zugang zu ausgewählten Angeboten der sozialen Infrastruktur und Versorgung abbilden.

In Anlehnung an die Erreichbarkeitsanalysen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) wird fußläufige Erreichbarkeit über eine Luftliniendistanz von 1000 m berechnet (Burgdorf et al. 2015, S. 16). In den Szenarien werden keine neuen Verkehrswege berücksichtigt, sondern die neuen Wohngebiete iterativ ergänzt und die Luftliniendistanzen nach Bedarf neu berechnet.

■ Zugang zum schienengebundenen Personennahverkehr (SPNV)

Der Indikator zeigt, ob eine Wohnlage (Gitterzelle) im 1000-m-Umkreis einer Haltestelle im Regionalverkehr der Deutschen Bahn oder den Stadtbahnen der Kölner Verkehrsbetriebe liegt. Bis 2030 geplante Haltestellen werden für die Szenarien ab dem Jahr der Inbetriebnahme berücksichtigt.

■ Erreichbarkeitsindex

Der Index bildet anhand von vier ausgewählten Infrastrukturangeboten die mittlere Erreichbarkeit von Versorgungsangeboten ausgehend von den Wohnstandorten ab. Der Index basiert auf Routingdaten entlang des Straßennetzes bzw. für alle Siedlungsflächen außerorts entlang von klassifizierten Straßen. Je Infrastrukturart wird ausgehend von den Gitterzellen eine bestimmte Anzahl an Zielen berücksichtigt. Bei Kindertageseinrichtungen, Grundschulen sowie Supermärkten und Discounter werden jeweils die nächsten drei Einrichtungen, bei Einzelhandelszentren und Innenstädten wird die Entfernung zum nächsten derartigen Bereich zugrunde gelegt. Bei mehreren Zielen wird ein Mittelwert berechnet. Für Flächen außerhalb der Siedlungsflächen und Hauptverkehrsstraßen liegen Schätzwerte auf Basis der Luftliniendistanz zu den nächsten Straßen vor. Anhand der resultierenden mittleren Entfernungen erfolgt die Berechnung eines Erreichbarkeitsindex für alle Gitterzellen »Wohnen«. Dieser Mittelwert bildet die durchschnittliche Erreichbarkeit für jede Gitterzelle »Wohnen« innerhalb der Region ab. Anhand der Indexwerte können somit über- und unterdurchschnittlich versorgte Gebiete identifiziert werden. Die Vergleichswerte für die Szenarien beziehen sich für den Indikator immer auf die bereits bestehende Ausstattung und neue Infrastrukturen, d. h. Versorgungseinrichtungen werden nicht berücksichtigt.

3.5 Methodische Grundlagen des Landnutzungsmodells NACHWUCHS

Mit dem Landnutzungsmodell NACHWUCHS soll die Frage beantwortet werden, welche alternativen Entwicklungspfade für die Siedlungsentwicklung in der Region denkbar sind und welche Auswirkungen die damit einhergehenden Flächeninanspruchnahmen auf die räumliche Struktur, die Landwirtschaft, auf Natur und Landschaft sowie auf die

Erreichbarkeit und Versorgungssituation der potenziellen neuen Siedlungsstandorte haben werden. Hierfür werden mit Hilfe eines Programms zur Landnutzungsmodellierung plausible alternative Entwicklungsszenarien mit spezifischen Modellannahmen durchgeführt und mit einem partizipativ entwickelten Indikatorenset bewertet.

Die Grundidee des Landnutzungsmodells NACHWUCHS folgt dem Ansatz der Mikro-Makro-Modellierung. Hierbei wird die angenommene Entwicklung hinsichtlich des Bedarfs an zusätzlichen Wohnflächen auf der Makroebene auf Grundlage von Standortfaktoren räumlich verortet. Die Umsetzung von Bevölkerungswachstum in Wohneinheiten und Siedlungsfläche wird dabei von Annahmen für die Szenarien z. B. hinsichtlich des Anteils der Innenentwicklung und der Bebauungsdichte beeinflusst. Die Verteilung auf der Mikroebene berücksichtigt ferner Standortfaktoren, deren Einfluss empirisch bestimmt wird. Das Landnutzungsmodell NACHWUCHS benutzt hierfür einen Random-Forest-Klassifikator (Breimann 2001). Die Verteilung der Wohneinheiten erfolgt einzeln für jedes Jahr des Untersuchungszeitraums. Das Modell wurde auf alle vier Szenarien (s. Tab. 1) getrennt angewendet.

Die komplette Implementierung des Modells erfolgt in der Programmiersprache Python. Die notwendige Aufbereitung der Eingangsdaten sowie die Kommunikation mit der zugrunde liegenden Datenbank (PostgreSQL mit PostGIS) erfolgt über die SQL-Schnittstelle. Die Visualisierung der Ergebnisse wurde mit QGIS und R durchgeführt.

Alle Eingangsdaten des Modells, aber auch die Indikatorensets, die für die Bewertung der resultierenden Landnutzung herangezogen werden, wurden auf das 100 m × 100 m-Raster des Zensus 2011 übertragen.

Als erklärende Variablen wurden im Modell die gerouteten Distanzen in Meter zum nächstgelegenen Supermarkt, zu Einzelhandelsstandorten, zur nächsten Autobahnauffahrt sowie die Distanzen zum öffentlichen Personennah- und -fernverkehr verwendet.

Für die Ausweisung neuer Siedlungsflächen werden für die zu untersuchenden Szenarien verschiedene plausible Restriktionen als Ausschlusskriterien formuliert, z. B. Schutzgebiete nach Fachplanungsrecht als Tabuzonen für künftige Siedlungsflächen. Für das »Weiter so«-Szenario wurden alle landwirtschaftlichen Flächen, die nicht in Schutzgebieten liegen, als potenzielle Flächen betrachtet (vgl. Abb. 3). Für die beiden Szenarien »Agri-urban« mit geringer und hoher Dichte werden zusätzlich alle landwirtschaftlichen Flächen hoher Güte (»Gesamtindikator Landwirtschaft« Stufe 5) für eine Umwidmung zu Siedlungsflächen ausgeschlossen. Für alle Szenarien wird zudem angenommen, dass 30 % des zusätzlichen Bedarfs an neuem Wohnraum durch Innenentwicklung gedeckt werden können. Die Verfügbarkeit solcher Flächen wird vor Simulationsbeginn ermittelt und die verfügbaren Flächen werden im Simulationsverlauf angepasst.

Der Zusammenhang zwischen erklärenden Variablen und der Eignung einer Fläche wurde mittels eines Random-Forest-Modells hergestellt. Der Ansatz verwendet die

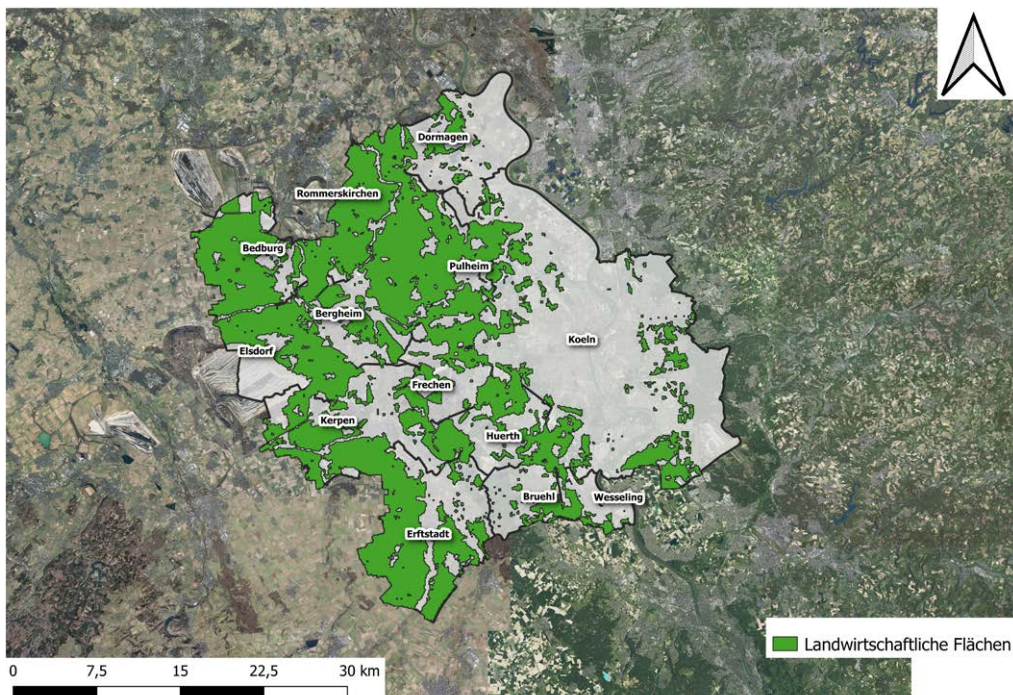


Abb. 3:
Landwirtschaftsflächen
außerhalb von Schutz-
gebieten

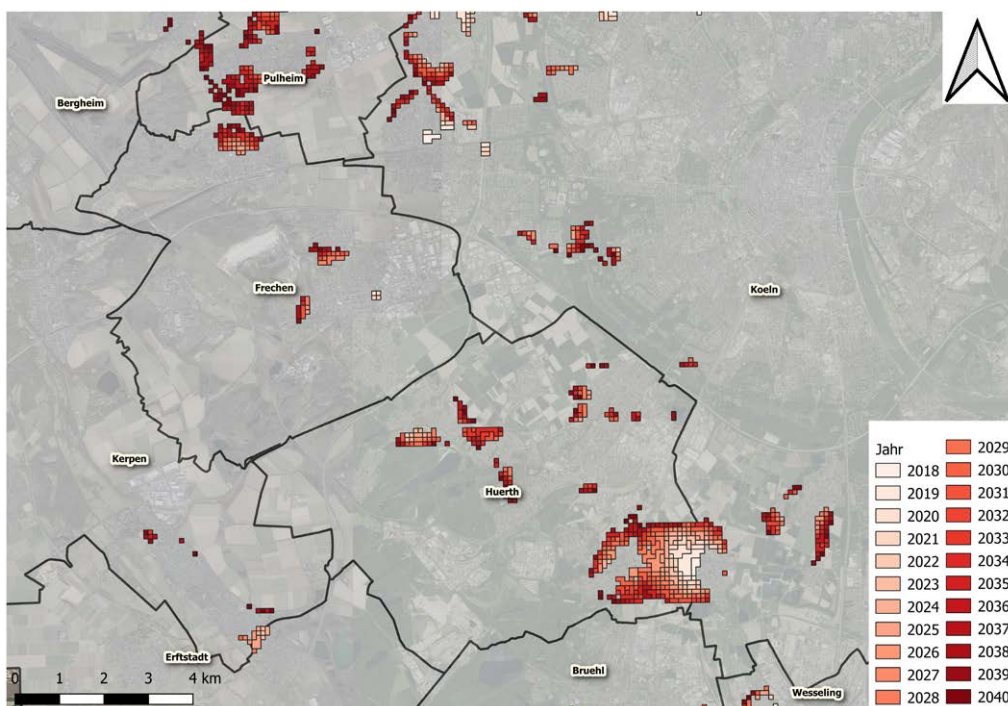


Abb. 4:
Prognose der künftigen
Siedlungsflächenent-
wicklung im »Weiter so«-
Szenario niedriger Dichte
(Ausschnitt) mit sequen-
zieller Darstellung in Jah-
resscheiben für zeitliche
Inanspruchnahme der
Fläche für Siedlungs- und
Verkehrszwecke

Mehrheitsentscheidung einer Vielzahl von Entscheidungsbäumen zur Vorhersage. Die einzelnen Entscheidungsbäume werden jeweils mit einer Teilmenge der erklärenden Variablen und einer Stichprobe der Eingangsdaten geschätzt, was zu einer robusteren Vorhersage führt (Van Asselen und Verburg 2013). Das Modell wurde anhand von Trainingsdaten aus vorausgegangenen Landnutzungsbeobachtungen parametrisiert. Für die Vorhersage wird je

verfügbarer Gitterzelle die Eignung für die Umwandlung in Siedlungsfläche angegeben. Die Ergebnisse werden anhand ihrer Eignung absteigend sortiert. Aufgrund dieser Reihung wird dann der vorgegebene Bedarf an Siedlungseinheiten je Jahr bedient (s. Abb. 4). Nach jedem Zeitschritt wird die Siedlungsfläche aktualisiert und das Jahr der Umwandlung vermerkt.

4 Ergebnisse der Landnutzungsmodellierung

4.1 Modellparameter und Ergebnisse im Überblick

Die Modellparameter und die Ergebnisse der vier Szenarien sind in Tab. 1 zusammenfassend vergleichend dargestellt.

Die quantitative und qualitative Bewertung der Flächeninanspruchnahmen für Siedlungs- und Verkehrszwecke erfolgt nachfolgend hinsichtlich der räumlichen Verteilung sowie anhand der ausgewählten Indikatoren für die Handlungsfelder »Landwirtschaft«, »Natur und Landschaft« und »Wohnen und Lebensqualität«.

4.2 Räumliche Muster der Siedlungsflächenszenarien

Die räumlichen Muster und Verteilungen der neuen Siedlungsflächen in den insgesamt vier Szenarien zeigen, dass

das Modell entsprechend den normativ gesetzten Parametern die bisherigen räumlichen Planungsansätze für den Szenariozeitraum 2018–2040 adaptiert (vgl. Abb. 5 und 6).

Erwartungsgemäß sinkt die Flächeninanspruchnahme in beiden Szenarien mit der Erhöhung der Wohndichte (WE/ha). Allerdings wirkt sich die Veränderung der Wohndichte zusätzlich auf die räumliche Allokation der neuen Siedlungsflächen aus.

Betrachtet man die Szenarien »Agri-urban« mit dem Ausschluss landwirtschaftlicher Flächen mit dem Gesamtindikator Stufe 5 im Vergleich zu den »Weiter so«-Szenarien, so fallen zwei Unterschiede auf. Zum einen eine stärkere Fragmentierung der Siedlungsfläche über die gesamte Region, zum anderen der überproportionale Zuwachs an Siedlungsflächen im Stadtgebiet von Köln. Die Neuausweisung von Siedlungsflächen erfolgt in diesen Szenarien vor allem auf Agrarflächen im rechtsrheinischen Bereich im südlichen und östlichen Stadtgebiet von Köln. Diese

Tab. 1: Vergleichende Gegenüberstellung der Szenarien »Weiter so« und »Agri-urban« mit den jeweiligen Modellparametern und Modellierungsergebnissen im Zeitraum 2018–2040.

Szenarien	»Weiter so« niedrige Dichte	»Weiter so« hohe Dichte	»Agri-urban« niedrige Dichte	»Agri-urban« hohe Dichte
Modellparameter				
■ Anteil Innenentwicklung	30 %	30 %	30 %	30 %
■ Dichte: WE/ha	30	50	30	50
■ Flächenkulisse	Landwirtschaftsflächen außerhalb von NSG, FFH und HQ100			
■ Restriktion			Ausschluss von Landwirtschaftsflächen mit Gesamtindikator Stufe 5	
Ergebnisse				
■ Gesamtflächeninanspruchnahme 2018–2040	3.266 ha	1.978 ha	3.266 ha	1.978 ha
■ darunter Inanspruchnahme von Flächen ...				
... mit besonderer ökologischer Funktion (Stufe 4 und 5)	989 ha	480 ha	481 ha	264 ha
... mit Bedeutung für regionale Verantwortungsarten (Stufe 4 und 5)	1.245 ha	765 ha	1.207 ha	680 ha
... mit hoher Bedeutung für die Landwirtschaft (Gesamtindikator Stufe 5)	1.952 ha	1.056 ha	0 ha	0 ha
■ neue Wohneinheiten	97.980	98.900	97.980	98.900
■ Anteil Wohneinheiten mit fußläufiger Erreichbarkeit des SPNV 2040 (2018: 69,6 %)	Gesamtregion: 67,2 % Neubau: 46,6 %	Gesamtregion: 67,7 % Neubau: 53,1 %	Gesamtregion: 66,5 % Neubau: 40,0 %	Gesamtregion: 67,1 % Neubau: 47,0 %
■ Anteil Wohneinheiten mit Versorgungsindex 2040 Stufe 4 und 5 (2018: 64,0 %)	Gesamtregion: 61,1 % Neue Siedlungsflächen: 36,5 %	Gesamtregion: 61,0 % Neue Siedlungsflächen: 35,8 %	Gesamtregion: 59,9 % Neue Siedlungsflächen: 25,0 %	Gesamtregion: 60,5 % Neue Siedlungsflächen: 32,5 %

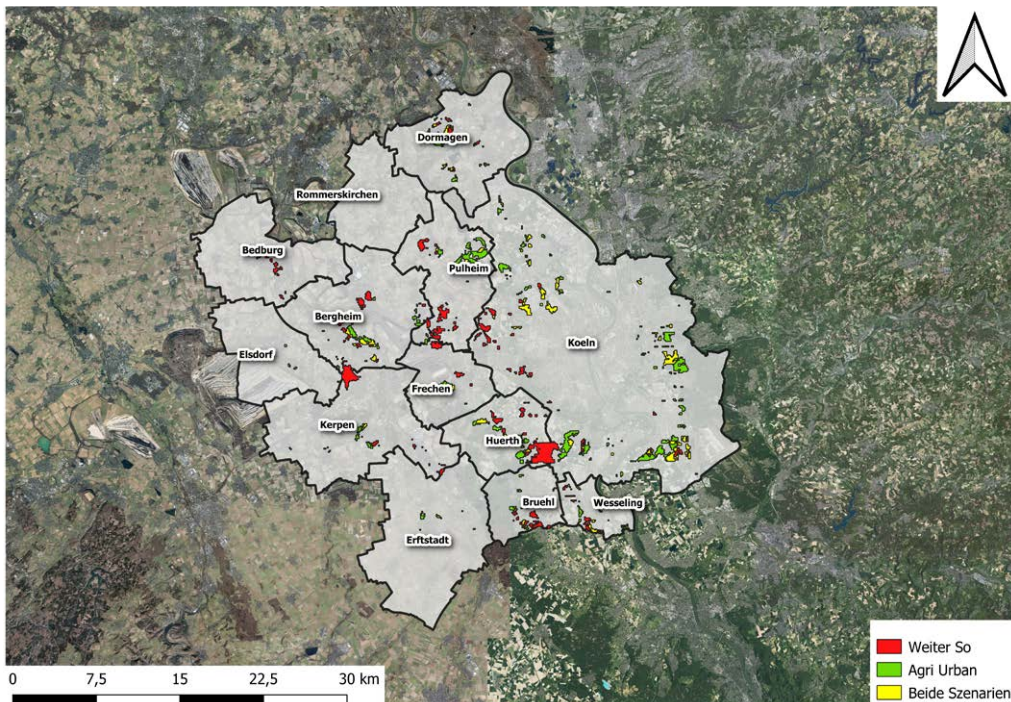


Abb. 5:
Flächeninanspruchnahmen für SuV 2018–2040 in den Szenarien »Weiter so« und »Agri-urban« mit der Dichte 30 WE/ha

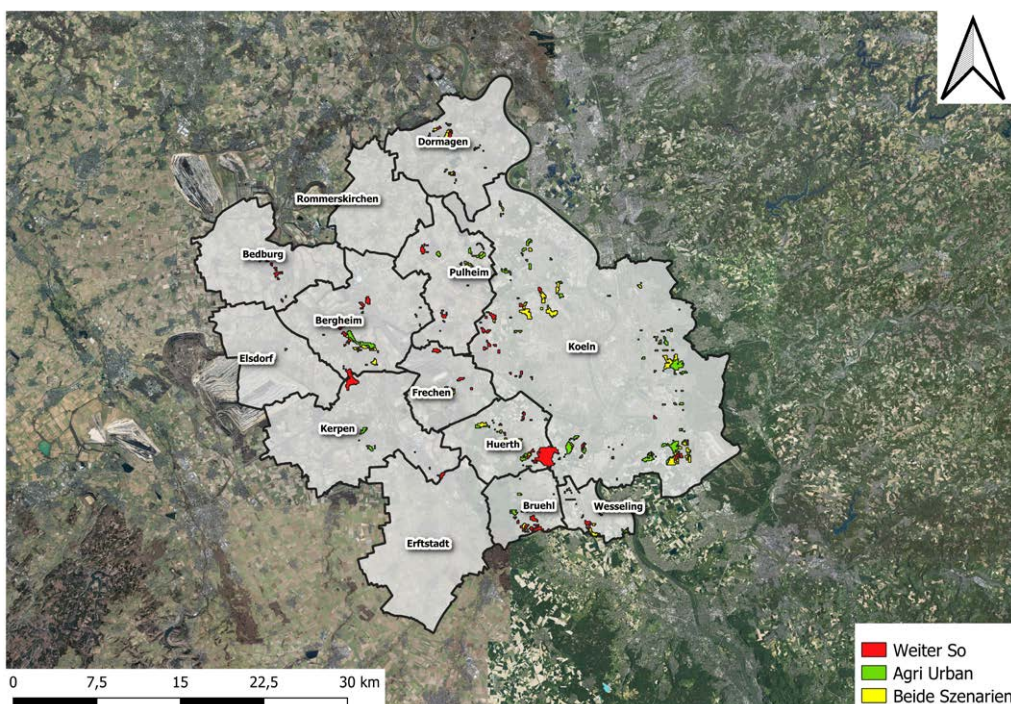


Abb. 6:
Flächeninanspruchnahmen 2018–2040 in den Szenarien »Weiter so« und »Agri-urban« mit der Dichte 50 WE/ha

Effekte der Verlagerung und der weiteren Fragmentierung für die Region in den »Agri-urbanen« Szenarien resultieren aus dem restriktiven Schutz der besonders hochwertigen Ackerflächen, die in diesen Szenarien nicht umgewidmet werden dürfen. Dadurch entfallen zahlreiche siedlungsnah Standorte als mögliche Siedlungsflächen. Die neuen ausgewiesenen Siedlungsflächen sind signifikant kleiner und damit zahlreicher sowie dezentraler in der Region verteilt als beim »Weiter so«-Szenario. Es ist daher festzustellen, dass ein restriktiver Schutz hochwertiger landwirtschaftlicher Flächen zu nachteiligen Auswirkungen auf die Landschaft führt und die Zersiedelung in der Region erheblich verstärkt.

4.3 Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Beim »Agri-urbanen« Szenario werden die besonders bedeutsamen Flächen für die Landwirtschaft (Indikatorstufe 5) ausgeschlossen, sodass die negativen Effekte auf die Landwirtschaft geringer ausfallen. Trotz identischer Gesamtflächeninanspruchnahme (3266 bzw. 1978 ha) werden lediglich die Flächen mit – aus Sicht der Landwirtschaft – geringerer Wertigkeit umgewidmet. Beim »Weiter so«-Szenario ist äußerst kritisch zu sehen, dass hier mit 1952 ha rund 60 % der künftigen Siedlungsflächen bei geringer Wohnungsdichte von lediglich 30 WE/ha auf Flächen mit einer hohen Bedeutung für die Landwirtschaft entstehen.

Im »Weiter so«-Szenario mit einer Dichte von 50 WE/ha sind es mit 1056 ha immerhin noch knapp über die Hälfte der Flächen.

In den Szenarien mit »hoher Dichte« kommt es gegenüber den weniger dichten Szenarien zu einer signifikanten Reduktion der Siedlungsfläche auf umgewandelter Dauergrünlandfläche. Aufgrund der Bedeutung des Dauergrünlandes für den biotischen und abiotischen Ressourcenschutz und angesichts des bisherigen Verlustes dieses Flächentyps in den letzten 20 Jahren in NRW ist das Resultat als äußerst positiver Effekt zu beurteilen.

4.4 Auswirkungen auf Natur und Landschaft

Um die Auswirkungen auf Natur und Landschaft darzustellen, wurden die Teilindikatoren »Flächen mit besonderer ökologischer Funktion« sowie »Flächen mit Bedeutung für regionale Verantwortungsarten« mit den jeweiligen prognostizierten Siedlungsflächen verschnitten (s. Abb. 7). Generell gehen in allen Szenarien für Natur und Landschaft bedeutsame Flächen verloren. Bei den für regionale Verantwortungsarten bedeutsamen Freiflächen sind zwischen den Szenarien gesamtregional kaum signifikante Unterschiede festzustellen. Immerhin 34 % und 39 % der neuen Siedlungsflächen entstehen auf derartigen Flächen, sodass in allen Szenarien eine Beeinträchtigung schutzbedürftiger Tierarten zu erwarten ist. Bei der Inanspruchnahme von Flächen mit besonderer ökologischer Funktion für SuV lassen sich allerdings deutliche Unterschiede erkennen. So werden bei den »dichten« Szenarien erheblich weniger ökologisch bedeutsame Flächen umgewidmet. Darüber hinaus sind die »Agri-urbanen« Szenarien aus gesamtregio-

ner Sicht deutlich ökologisch verträglicher und nehmen im Vergleich zu den »Weiter so«-Szenarien lediglich halb so viele Flächen mit besonderer ökologischer Funktion in Anspruch.

Quantitativ fällt der Verlust von Flächen mit mittleren bis hohen ökologischen Werten (Stufen 3, 4 und 5 des Indikators »Besondere ökologische Funktion«) in Bezug auf die gesamte Region vergleichsweise gering aus. Allerdings ist die räumliche Verlagerung und damit der Zuwachs an potenziellen Siedlungsflächen in den beiden »Agri-urbanen« Szenarien im rechtsrheinischen Bereich auf dem Stadtgebiet Kölns aus ökologischer Sicht kritisch zu beurteilen. Für die Metropole ist die Flächeninanspruchnahme sowohl aus quantitativer als auch aus qualitativer Sicht besonders schwerwiegend. Bei den möglichen neuen Siedlungsflächen der »Agri-urbanen« Szenarien handelt es sich um wichtige Trittsteine innerhalb des lokalen und überregionalen Biotopverbundes und um Lebensraumbestandteile für Verantwortungsarten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie sowie teilweise um die letzten verbliebenen hochwertigen Freiflächen in der Stadtregion (vgl. Abb. 7). Anders stellt sich diese Situation in den »Weiter so«-Szenarien dar. Hier werden zwar mehr landwirtschaftlich hochwertige Flächen in Anspruch genommen, jedoch sind die Nutzungskonflikte regional gleichmäßiger verteilt und treten im Stadtgebiet von Köln lediglich in geringerem Umfang und weniger intensiv auf. Die grundsätzlichen ökologischen und landschaftlichen Wirkungen einer derartigen zunehmenden Fragmentierung der Landschaft sind seit langem bekannt (z. B. Jaeger et al. 2005). Welche lokalen negativen Effekte die fortschreitende Zersiedlung und Zerschneidungen der Landschaft in quantitativer und qualitativer Sicht haben, sollte indessen in weiteren Studien untersucht werden.

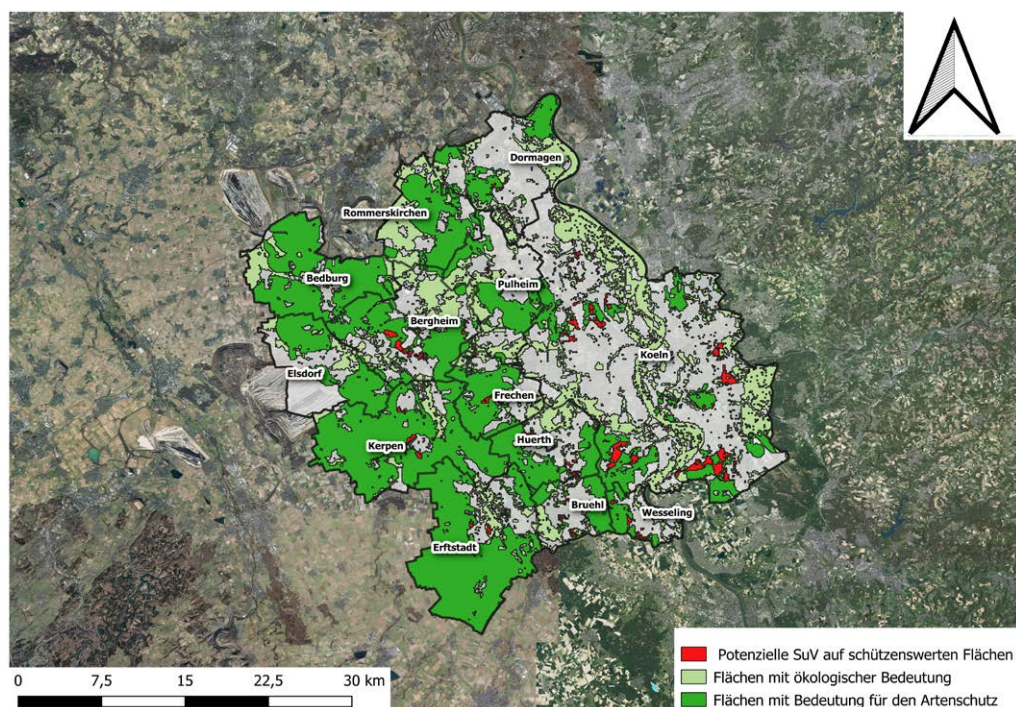


Abb. 7:
Inanspruchnahme von Flächen mit besonderer ökologischer Bedeutung und mit Bedeutung für den Artenschutz im Szenario »Agri-urban« bei einer Dichte von 30 WE/ha

4.5 Qualität der potenziellen Wohnbauflächen – Erreichbarkeiten und Versorgungssituation

Die Qualität der möglichen zukünftigen Wohnbauflächen wird bei allen vier Szenarien anhand der Indikatoren »Anteil Wohneinheiten mit fußläufiger Erreichbarkeit des SPNV« und »Anteil Wohneinheiten mit Versorgungsindex Stufe 4 und 5« analysiert und beurteilt. Bei beiden Indikatoren basieren indessen hinsichtlich der SPNV-Infrastruktur und der Versorgungseinrichtungen auf dem Status quo, bilden also diesbezüglich den Ist-Zustand ab. Weder die Errichtung von zusätzlichen Einzelhandelsgeschäften oder Supermärkten noch der Ausbau des SPNV mit zusätzlichen Haltepunkten an den möglichen neuen Siedlungsstandorten über die derzeitigen Planungen bis etwa 2030 hinaus werden berücksichtigt.

Sowohl hinsichtlich der Versorgungsqualität als auch des Zugangs zum SPNV weisen beide »Agri-urbanen« Szenarien niedrigere Indikatorwerte als die »Weiter so«-Szenarien auf. Ursache hierfür ist, dass die Siedlungsflächen in den »Agri-urbanen« Szenarien aufgrund des Ausschlusses besonders bedeutsamer landwirtschaftlicher Flächen stärker fragmentiert und in größerer mittlerer Entfernung zu den bestehenden Siedlungen und damit auch zu den vorhandenen Einrichtungen liegen. Aufgrund der geringen Größe der einzelnen Flächenfragmente in den »Agri-urbanen« Szenarien, insbesondere in den westlichen Bereichen der Projektregion, scheint eine nachträgliche Erschließung mit neuen SPNV-Haltestellen aus wirtschaftlichen Gründen nicht zweckmäßig zu sein. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe der GTFS-Daten des VRS (Verkehrsverbund Rhein-Sieg) grob geprüft, ob eine regelmäßige Erschließung mit sonstigen ÖPNV-Bedarfsträgern vorliegt. Dabei wurde festgestellt, dass einige potenzielle Siedlungsstandorte außerhalb der Hauptverkehrszeit im Umkreis von 2,5 km keine Haltestellen mit einer stündlichen Bedienung in der Woche oder einer mindestens zweistündlichen Bedienung am Wochenende aufweisen.

5 Schlussfolgerungen

Das entwickelte Landnutzungsmodell NACHWUCHS liefert valide Grundlagen für Planungsentscheidungen zur Ausweisung künftiger Wohnsiedlungsflächen auf regionaler und kommunaler Ebene. Das Modell kann anhand geeigneter Trainingsdaten die Trends der Siedlungsflächenentwicklung der vergangenen Jahrzehnte daher offensichtlich plausibel abbilden und auch in die Zukunft extrapolieren. Die empirischen Ergebnisse des Landnutzungsmodells für das »Weiter so«-Szenario zeigen, dass sich die prognostizierten Siedlungsflächen tatsächlich an bisherigen planerischen Grundsätzen orientieren und daher im Sinne der gewählten Modellparameter des jeweiligen Szenarios realistisch verortet sind. Die räumliche Nähe zu bestehenden Verkehrsinfrastrukturen und Nahversorgungseinrichtungen spielt dabei eine zentrale Rolle.

Es wird deutlich, dass sich der Schutz einzelner natürlicher Ressourcen als ein wesentliches Ziel nachhaltiger Entwicklung durch entsprechende Restriktionen zwar erreichen ließe. Allerdings entstehen dadurch erhebliche neue Konflikte mit der nachhaltigen Landnutzung. Analog zum Pareto-Optimum ist es daher nicht möglich, den Schutz von Landwirtschaftsflächen zu verbessern, ohne zugleich andere natürliche Ressourcen oder nachhaltigkeitsrelevante Strukturen (z. B. Fragmentierungsgrad der Landschaft, Kompaktheit von Siedlungen) zu verschlechtern. Werden die Modellannahmen zugunsten eines Indikators verändert, so hat dies negative Auswirkungen auf die anderen Indikatoren. Der Schutz von hochwertigen landwirtschaftlichen Flächen führt zu erhöhter Fragmentierung und Zersiedelung und geht zulasten bedeutsamer Naturräume. Siedlungserweiterungen im »Weiter so«-Szenario erweisen sich trotz der wenig ausgeprägten dezentralen Konzentration im Vergleich zum »Agri-urbanen« Szenario zwar infrastrukturell effizienter, führen indessen aus umweltökonomischer Gesamtsicht ebenfalls zu erheblichen externen Kosten.

Es bedarf daher einer integrierten Gesamtbetrachtung bei der Auswahl und Setzung der Modellparameter. Zudem sind weitere konzeptionelle Ansätze und Szenarien zu entwickeln und hinsichtlich der Auswirkungen zu analysieren, um die negativen Auswirkungen notwendiger neuer SuV auf Landwirtschaftsflächen und auf Natur und Landschaft zu minimieren. Dazu gehören die Erhöhung der Wohndichte sowie die Forcierung der Innenentwicklung im Bestand. Beide Ansätze verringern den Neubedarf an SuV und damit die Landnutzungskonflikte und -konkurrenzen.

Aus methodischer Sicht ist festzustellen, dass das Modell zur Unterstützung von Flächenentscheidungen auf der Ebene der Region und einzelner Kommunen verwendet werden kann. Es können die Auswirkungen alternativer planerischer Flächenentscheidungen und stadtentwicklungspolitischer Ziele für die Flächennutzung simuliert und visualisiert werden. Eine Beschränkung auf die mit den Kommunen abgestimmten relevanten Indikatoren und auf die frei verfügbaren raumbezogenen Daten für die Modellierung der Landnutzung, von denen je nach Szenario auch eine Auswahl verwendet werden kann, führt zu einer Robustheit des Modells und Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse. Hinzu kommen der Bezug der Daten auf ein flächendeckendes einheitliches räumliches Raster sowie die evidenten Modellannahmen zur Flächenumwidmung, die eine Modellierung unabhängig von kommunalpolitischen Grenzen erlauben. Diese Eigenschaften erhöhen die Praxistauglichkeit für die kommunale Anwendung wesentlich.

Für die Governance in der Region liefert das Tool erhebliche Vorteile durch die Unterstützung bei der Implementierung einer nachhaltigen Landnutzung auf regionaler Ebene. So führen die Verwendung der gemeinsamen Datengrundlagen sowie eine zwischengemeindliche Vereinbarung gemeinsamer Standards (z. B. Schutzregime für ökologische Ressourcen) in diesem Modell zu einer

interkommunal abgestimmten und damit impliziert zu einer integrierten Entwicklung der SuV sowie zugleich zum Schutz natürlicher Ressourcen und von Landwirtschaftsflächen im Sinne einer nachhaltigen Landnutzung. Ob diese Wirkungen eintreten, hängt freilich neben der Festlegung von Schutzregimen auch von konsistenten Planungsentscheidungen und vom stringenten Einsatz effizienter bodenpolitischer Instrumente ab.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die analytischen Erkenntnisse aus den Szenarien einen erheblichen Bedarf zur Weiterentwicklung vorhandener und zur Konzeption neuer innovativer Siedlungsformen in Agrarlandschaften haben erkennen lassen. Diesem Ziel widmet sich das NACHWUCHS-Projekt mit dem Entwurf der Bewertung und der Implementierung agri-urbaner Siedlungsmodelle. Diese Modelle haben zum Ziel, die Ansprüche der Landwirtschaft mit den Erfordernissen moderner Stadtquartiere zu verbinden. Dabei sollen einerseits wertvolle landwirtschaftliche Flächen erhalten sowie landwirtschaftliche Produktions-, Vermarktungs- und Partizipationsprozesse gestaltet werden, um der Landwirtschaft wieder einen höheren strategischen Stellenwert in der Raumentwicklung zu geben. Zum anderen sollen durch neue Demografie-feste Wohnmodelle mit flächensparenden Dichtekonzepten, modernen Mobilitätsangeboten und ökologisch hochwertigen multicodierten Grünflächen funktions- und sozialgemischte Quartiere der Zukunft entstehen. Insgesamt sind für künftige Landnutzungsmodellierungen neben den rein quantitativen Effekten vor allem derartige qualitative Aspekte der Flächeninanspruchnahme und der Flächennutzung stärker zu berücksichtigen.

Literatur

- Abraham, T., Heising, P., Weiden, L. (2020): Gutachten zur Ermittlung des künftigen Wohnungsbedarfes und der Wohnungsnachfrage in Köln bis 2040. <https://ratsinformation.stadt-koeln.de/getfile.asp?id=795682&type=do>, letzter Zugriff 01.07.2022.
- BMEI – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2021): Landwirtschaftliche Flächenverluste. <https://bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/flaechennutzung-und-bodenmarkt/flaechenverluste-landwirtschaft.html>, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Breiman, L. (2001): Random Forests. In: *Machine Learning*, 45 (1), 5–32.
- Bundesagentur für Arbeit (2022): Statistik der Bundesagentur für Arbeit. <https://statistik.arbeitsagentur.de>, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021. www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/nachhaltigkeitsstrategie-2021-1873560, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Burgdorf, M., Krischausky, G., Müller-Kleißler, R. (2015): Indikatoren zur Nahversorgung. Erreichbarkeit von Gütern und Dienstleistungen des erweiterten täglichen Bedarfs. Hrsg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). BBSR-Analysen KOMPAKT 10/2015.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., Gaydos, L. J. (1997): A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area. In: *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24 (2), 247–261.
- empirica regio (2022): empirica Regionaldatenbank. www.empirica-regio.de, letzter Zugriff 01.07.2022.

- Goetzke, R., Schlump, C., Hoymann, J., Beckmann, G., Dosch, F. (2014) Flächenverbrauch, Flächenpotenziale und Trends 2030. Hrsg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). BBSR-Analysen KOMPAKT 7/2014.
- IT.NRW – Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2022): Landesdatenbank NRW. <https://landesdatenbank.nrw.de/>, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Jaeger, J., Grau, S., Haber, W. (2005): Landscape dissection: From the identification of the problem to the handling of it. In: *GAIA: Ökologische Perspektiven in Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaften*, 14 (2), 81–81.
- Lohrberg, F. (2001): Stadtnahe Landwirtschaft in der Stadt- und Freiraumplanung. Ideengeschichte, Kategorisierung von Konzepten und Hinweise für die zukünftige Planung. Diss., Universität Stuttgart. https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/31/1/part_1.pdf, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Müller, M., Verhaag, E. (2022): Die Landwirtschaft in der NACHWUCHS-Region. Betriebsbefragungen im Rahmen des Projekts »Nachhaltiges Agri-Urbane zusammenWACHSEN (NACHWUCHS)«. Landwirtschaftskammer NRW, Köln.
- Pedregosa, F. et al. (2011): Scikit-learn: Machine Learning in Python. In: *JMLR – Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Pszola, N., Morawski, F., Weiß, D., Kötter, T., Lohrberg, F. (2022): Raumbilder als Planungsinstrument für wachsende Stadtregionen. In: Henn, S., Zimmermann, T., Braunschweig, B. (Hrsg.): *Stadtregionales Flächenmanagement*. Springer, Heidelberg (erscheint 2022).
- Schmidt, C. (2017): Den Landschaftswandel gestalten ... Nur wie? In: Wende, W., Walz, U. (Hrsg.): *Die räumliche Wirkung der Landschaftsplanung*. Springer Spektrum, Berlin, 111–132.
- Siedentop, S. (2005): Urban Sprawl – verstehen, messen, steuern. Ansatzpunkte für ein empirisches Mess- und Evaluationskonzept der urbanen Siedlungsentwicklung. In: *disP – The Planning Review*, 41 (160), 23–35.
- Sieverts, T. (1997): Zwischenstadt. Zwischen Ort und Welt, Raum und Zeit, Stadt und Land. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- UBA – Umweltbundesamt (2022): Flächensparen – Böden und Landschaften erhalten. <https://umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten>, letzter Zugriff 01.07.2022.
- Van Asselen, S., Verburg, P. H. (2013): Land cover change or land-use intensification: simulating land system change with a global-scale land change model. In: *Global Change Biology* 19, 3648–3667.
- Weiß, D., Grade, J., Lennartz, G., Toschki, A., Blinn, M. (2020): Strategische Anwendung von Nachhaltigkeitsindikatoren für die Siedlungsentwicklung im Stadt Umland Netzwerk. In: Meinel, G., Schumacher, U., Behnisch, M., Krüger, T. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs*. IÖR Schriften, Band 78, 205–213.
- Weiß, D., Rehorst, F., Kötter, T. (2019): Nachhaltigkeitsindikatoren für die stadregionale Entwicklung. In: *REAL CORP 2019 Proceedings*. https://programm.corp.at/cdrom2019/papers2019/CORP2019_74.pdf, letzter Zugriff 01.07.2022.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Theo Kötter
Professur für Städtebau und Bodenordnung, Institut für Geodäsie und Geoinformation Universität Bonn
Nußallee 1, 53115 Bonn
koetter@uni-bonn.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.