



Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern 2015



boden



Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern 2015

Impressum

Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern 2015

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/

Bearbeitung/Text:

Soner Üreyen (M.Sc), Dr. Michael Thiel, DLR-Stiftungslehrstuhl für Fernerkundung am Geographischen Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

Redaktion/Koordination:

LfU, Referat 15

Bildnachweis:

Lehrstuhl für Fernerkundung, Universität Würzburg
Titelbild: LfU

Geobasisdaten:

© Bayerische Vermessungsverwaltung, www.geodaten.bayern.de

Stand:

Juni 2017

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Kurzfassung | 5 |
| 1 Hintergrund | 8 |
| 1.1 Bodenversiegelung in der politischen Wahrnehmung | 8 |
| 1.2 Versiegelungs-Studie aus dem Jahr 2007 | 13 |
| 1.3 Ziel der aktuellen Studie | 13 |
| 2 Methodik | 14 |
| 2.1 Erfassung versiegelter Flächen mittels Satellitendaten | 14 |
| 2.1.1 Datengrundlage | 14 |
| 2.1.2 Vorverarbeitung | 18 |
| 2.1.3 Modellierung der Versiegelung | 22 |
| 2.2 Ergänzung des Versiegelungsrasters durch Vektordaten | 28 |
| 2.3 GIS-basierte Auswertung der Versiegelungsinformation | 30 |
| 2.4 Validierung | 31 |
| 2.4.1 Referenzinformationen | 31 |
| 2.4.2 Methodische Umsetzung | 32 |
| 3 Ergebnisse der fernerkundlichen Modellierung | 35 |
| 3.1 Zwischenprodukte | 35 |
| 3.2 Versiegelungsinformation | 37 |
| 3.2.1 Güte des modellierten Versiegelungsrasters | 38 |
| 3.2.2 Kachelweise Berechnung des Versiegelungsrasters | 39 |
| 3.2.3 Ergänzung durch Vektordaten | 42 |
| 4 Versiegelungssituation in Bayern | 44 |
| 4.1 Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen in den Gemeinden | 44 |
| 4.2 Versiegelte Flächen der Gemeinden pro Einwohner | 46 |
| 4.3 Aggregierungsverfahren für die übergeordneten administrative Ebenen | 48 |
| 4.4 Versiegelungssituation der Landkreise und kreisfreien Städte | 49 |
| 4.5 Versiegelungssituation der Regierungsbezirke | 52 |
| 4.6 Bayernweite Betrachtung | 52 |
| 4.7 Versiegelungssituation in den Planungsregionen | 53 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.8 | Versiegelungssituation in den Gebieten gemäß den Kategorien des LEP | 53 |
| 4.9 | Entwicklung der Versiegelungssituation zwischen 2000 und 2015 | 54 |
| 5 | Fazit | 58 |
| 5.1 | Satellitenbasierte Versiegelungskartierung | 58 |
| 5.2 | Versiegelungssituation in Bayern | 60 |
| 5.3 | Zukünftiger Forschungsbedarf | 60 |
| 6 | Verzeichnisse | 62 |
| 6.1 | Abbildungsverzeichnis | 62 |
| 6.2 | Tabellenverzeichnis | 63 |
| 6.3 | Abkürzungsverzeichnis | 63 |
| 6.4 | Quellenverzeichnis | 65 |
| 7 | Anhang | 69 |

Kurzfassung

Sowohl im Freistaat Bayern als auch bundesweit ist seit vielen Jahrzehnten ein stetiger Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsflächen zu verzeichnen. Trotz vielfältiger Ansätze und Bemühungen, diesen Flächenverbrauch zu reduzieren, nehmen die Siedlungs- und Verkehrsflächen weiterhin stark zu. Während im Jahr 2000 rund 10,4 % der Landesfläche für Siedlungs- und Verkehrszwecke dienen, waren es im Jahr 2015 bereits 11,9 %. Im Jahr 2015 lag die tägliche Umwandlung von Freiflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen (Flächenverbrauch) bei 13,1 Hektar.

Mit dieser Entwicklung eng verknüpft – allerdings keineswegs gleichzusetzen – ist ein kontinuierlicher Anstieg der Bodenversiegelung. Die mit Siedlungs- oder Verkehrsflächen einhergehende teilweise Überbauung des Bodens führt dabei zu einem irreversiblen Verlust seiner natürlichen Funktionen und seiner Archivfunktion. Versiegelung verringert die natürliche Verdunstung und die Versickerung von Niederschlägen. Mögliche Folgen sind eine Verstärkung von Hochwasserereignissen und eine Verringerung der Grundwasserneubildung. In den Städten führt die Versiegelung zur Aufheizung, zu einer Verringerung der Luftfeuchte, zu einer verstärkten Staubbildung und somit zu einer Verschlechterung des lokalen Klimas.

Vor dem Hintergrund dieser Folgen sind eine aktualisierte Quantifizierung der Bodenversiegelung in Bayern sowie deren zeitliche Entwicklung ein wichtiger Fachbeitrag für eine differenzierte Diskussion über die Folgen eines weiterhin hohen Flächenverbrauchs.

Im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) hat der Lehrstuhl für Fernerkundung des Geographischen Instituts der Universität Würzburg daher bereits für das Jahr 2000 erstmals eine landesweit einheitliche und objektive Erhebung der Versiegelung mit hohem räumlichen Detaillierungsgrad durchgeführt. Grundlage war die Entwicklung einer Technik zur weitestgehend automatisierten, bayernweiten Kartierung der Flächenversiegelung auf der Basis von Satellitenaufnahmen und Daten aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS). Diese Studie aus dem Jahr 2007 wurde auf der Internetseite des LfU publiziert und ist weiterhin verfügbar.

In der vorliegenden Studie wird unter Nutzung der gleichen Methodik nunmehr für das Jahr 2015 der

- Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche sowie die
- versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner

für den Freistaat Bayern und seine administrativen und raumstrukturellen Teilräume (Gemeinden, Landkreise, Regierungsbezirke, Planungsregionen, Gebietskategorien des Landesentwicklungsprogramms (LEP) Bayern) ermittelt. Ergänzend wird erstmals auch die Entwicklung der Versiegelungssituation in Bayern zwischen dem Jahr 2000 und 2015 aufgezeigt.

Der im Kontext dieser Studie angewandte Ansatz beruht auf einem halbautomatisierten Verfahren, das zunächst über Techniken der digitalen Bildanalyse eine Modellierung von Versiegelungsgraden mittels multispektraler Satellitendaten vollzieht. Grundlage sind die Satellitenaufnahmen aus dem Jahr 2015. Dabei werden Luftbildaufnahmen für insgesamt sieben Untersuchungsgebiete in Bayern genutzt, um räumlich geringer aufgelöste Landsat-Szenen mit bedeutend höherer Flächenabdeckung für die Erfassung von Versiegelungsgraden zu trainieren. Die hohe räumliche Abdeckung der Landsat-Aufnahmen ist die entscheidende Voraussetzung für eine kostengünstige Kartierung großer Flächen. Der zuvor erwähnte Prozess des Trainings beginnt mit einer Auswertung der Luftbildaufnahmen. Dabei werden zunächst automatisiert versiegelte und unversiegelte Areale in einem 0,4-Meter-Raster kartiert. Diese Kartierung bildet die Basis für die anschließende Berechnung eines Regressionsmodells, welches die spektrale Information der Landsat-Daten mit den zuvor über die Luftbildaufnahmen ermittelten Versiegelungswerten in Beziehung setzt. Mit Hilfe dieses Modells kann abschließend jeder

einzelnen Rasterzelle der gesamten Landsat-Szene über deren Spektralinformation ein entsprechender Versiegelungsgrad zugewiesen werden.

Um das zuvor dargelegte Verfahren zu beschleunigen, aber auch, um die Genauigkeit der Analyse zu erhöhen, wird die Auswertung der Satellitendaten durch die Integration von Vektordaten des ATKIS gezielt auf die flächenhaften Siedlungs- und Verkehrsareale fokussiert. Diese Daten dienen zudem dazu, linienhafte Infrastrukturelemente zu ergänzen, die aufgrund der limitierten räumlichen Auflösung der Landsat-Daten nicht erfasst werden können. In Kombination mit dem zuvor generierten Versiegelungsraster liegt somit eine Datenbasis vor, die eine Erfassung und Quantifizierung der versiegelten Areale in Bayern zulässt.

Im Kontext einer abschließenden Auswertung über ein Geographisches Informationssystem (GIS) wird die generierte Datengrundlage auf administrative sowie raumstrukturelle Einheiten aggregiert und mit statistischen Informationen verschnitten. Auf diese Weise lassen sich der „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ sowie die „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ auf Gemeinde-, Kreis-, Bezirks- und Landesebene sowie den Gebietskategorien des LEP erheben.

Die Validierung des eingesetzten Verfahrens belegt, dass sich Informationen zur Versiegelung über eine Auswertung von Satellitendaten grundsätzlich mit hinreichender Genauigkeit erheben lassen. So ergibt die Validierung der berechneten Versiegelungsgrade anhand von Validierungsdaten auf den Siedlungs- und Verkehrsflächen eine mittlere Abweichung von 1 bis 2 %. Die umfangreichen Qualitätskontrollen aus der letzten Studie und die Ergebnisse der Validierung dieser Studie belegen, dass sich das im Rahmen dieser Studie eingesetzte Verfahren sehr gut zur Ermittlung der Versiegelung eignet.

Bedingt durch die fernerkundliche Methodik treten signifikante Abweichungen in der Bestimmung von Versiegelungsdaten im Kontext unbedeckter Böden auf. Diese werden aufgrund ihrer spektralen Ähnlichkeit zu Beton- und Asphaltflächen mitunter als versiegelte Areale ausgewiesen. Weitere verfahrensbedingte Einschränkungen ergeben sich aus Abschattungen, Überdeckungen durch Baumkronen oder begrünte Dachflächen.

Ein besonderer Vorzug des fernerkundlichen Ansatzes liegt in dem für eine flächendeckende Auswertung vergleichsweise hohen räumlichen Detaillierungsgrad. Dadurch ist es möglich, die Struktur und Verteilung der versiegelten Flächen selbst innerhalb von Ortslagen, aber auch in Bezug auf beliebige administrative oder raumstrukturelle Einheiten detailliert zu beschreiben. Das Verfahren ist zudem so ausgelegt, dass es die Nutzung sehr hoch aufgelöster Satellitendaten ermöglicht. Folglich kann der räumliche Detaillierungsgrad bei Bedarf weiter gesteigert werden, was gerade für kommunale Anwender von Interesse sein dürfte. Ferner wird die Versiegelung für jeden Bildpunkt auf der Grundlage eines identischen Regelwerks berechnet. Dadurch ist gewährleistet, dass sämtliche regionale Charakteristika erfasst und entsprechend in den Daten abgebildet werden.

Zur Gewährleistung vergleichbarer Eigenschaften der Datengrundlage bedarf die Auswertung von Satellitenaufnahmen einer automatisierten und operationalisierten Prozesskette. Dies stellt eine entscheidende Voraussetzung dar, um über standardisierte Informationsprodukte, adäquate Qualitätsstandards und flexible Fortschreibungsintervalle die Akzeptanz fernerkundlich erhobener Versiegelungsdaten im raum- und umweltplanerischen Umfeld zu stärken. Sind die genannten Voraussetzungen gewährleistet, bietet ein solches fernerkundliches Instrumentarium gegenüber den bisher etablierten Ansätzen bedeutend vielseitigere Möglichkeiten zur räumlich detaillierten Kartierung (über-)regionaler Raumeinheiten, zur bedarfsorientierten Erhebung von Versiegelungsinformationen und der Gewährleistung zeitlich und räumlich flexibler Anwendungen.

Mit dem Ergebnis der vorgelegten Studie wird der Datensatz zur Versiegelungssituation für ganz Bayern für das Jahr 2015 aktuell dargestellt. Mit nunmehr durchschnittlich 50,9 % hat sich der Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen in Bayern um 3,7 % gegenüber dem Jahr 2000 (47,2 %) erhöht (vgl. Hinweis). Etwas niedrigere Versiegelungsgrade als im Durchschnitt sind beispielsweise in Oberbayern (48,0 %) und Niederbayern (49,2 %), etwas höhere Versiegelungsgrade der Siedlungs- und Verkehrsflächen dagegen in der Oberpfalz (54,2 %) und in Unterfranken (55,4 %) zu finden.

Die Analyse der Pro-Kopf-Versiegelung für 2015 ergibt für Bayern eine versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche von durchschnittlich 330 Quadratmeter (m²) pro Einwohner und somit eine Zunahme von 53 m² seit dem Jahr 2000 (277 m²). Geringere Werte als im Durchschnitt sind beispielsweise in Oberbayern (221 m²) und Mittelfranken (297 m²), überdurchschnittliche Werte in der Oberpfalz (518 m²) und in Niederbayern (462 m²) festzustellen.

Darauf hinzuweisen ist, dass die in den beiden Versiegelungsstudien (2000 und 2015) als Versiegelungsmaße verwendeten Kennzahlen („Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ sowie „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“) aufgrund ihrer Bezugsgrößen nur eingeschränkt geeignet sind, das tatsächliche Ausmaß der Zunahme an versiegelten Flächen in den vergangenen 15 Jahren zu beschreiben.

Einerseits bezieht sich „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ auf die jeweils aktuell vorhandene Siedlungs- und Verkehrsfläche, ohne deren Zunahme im Betrachtungszeitraum abzubilden. Andererseits führt der Einwohnerbezug der Kennzahl „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ zu überlagernden Einflüssen der Bevölkerungsentwicklung in der jeweiligen Raumebene.

Mit der „Veränderung der versiegelten Fläche“ wird daher die absolute Zunahme versiegelter Flächen für die Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte in der aktuellen Studie zusätzlich ausgewiesen. Während im Jahr 2000 in Bayern eine Fläche von rund 3.570 km² versiegelt war, sind es im Jahr 2015 bereits 4.240 km². Dies entspricht in diesem Zeitraum einer jährlichen Zunahme von durchschnittlich 44,7 km², entsprechend 4.470 ha. Während in den Städten der Versiegelungsanstieg zumeist eher moderat ausfiel, weisen zwei Landkreise erhebliche Anstiege von jeweils insgesamt über 20 km² auf.

Hinweis:

Eine Ermittlung der Ursachen für die festgestellte Zunahme der Versiegelungsgrade war nicht Inhalt dieser Studie. Grundsätzlich tragen aber eine verstärkte Innenentwicklung und eine damit einhergehende Nachverdichtung in den Gemeinden dazu bei. Hierdurch werden Flächen im Außenbereich geschont. Eine andere Ursache kann der Ausbau des Verkehrsnetzes mit breiteren Straßen sein. Zudem werden neue Wohnsiedlungen bei hohen Grundstückspreisen zunehmend kompakter angelegt. In wenigen Fällen wurden aber auch niedrigere Versiegelungsgrade ermittelt. Eine Erklärung wäre, dass dort neu ausgewiesene Siedlungs- und Verkehrsflächen in größerem Umfang noch unbebaut sind. Die tatsächlichen Gründe müssten aber gezielt vor Ort ermittelt werden.

1 Hintergrund

Gestiegene Flächenansprüche haben in der Bundesrepublik Deutschland, wie auch im Freistaat Bayern, zu einem stetigen Verlust von Freiflächen geführt. Maßgeblichen Anteil an dieser Entwicklung hat der starke Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Trotz verschiedener Aktivitäten der Länder und gesetzlicher Initiativen des Bundes, wie beispielsweise der Verabschiedung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und der Novellierung des Baugesetzbuches in den Jahren 2004, 2007 und 2013, belief sich die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in den Jahren 2012 bis 2015 bundesweit auf ca. 66 Hektar (ha) pro Tag (DESTATIS, 2016). In Bayern lag der tägliche Flächenverbrauch im Jahr 2015 durchschnittlich bei 13,1 ha (LFSTAT, 2016). Ursache des deutlichen Rückgangs gegenüber dem Jahr 2013 (18,1 ha pro Tag) ist die Umstellung auf das Amtliche Liegenschafts-Katastersystem (ALKIS) durch die Vermessungsverwaltung. Bei der Umstellung wurde nicht nur der Datenbestand aktualisiert, sondern auch die Nutzungsartenzuordnung teilweise geändert. Eine Entlastung beim Flächenverbrauch lässt sich deshalb aus dem Rückgang nicht ableiten. Insgesamt wurden zum Jahresende 2015 in Bayern ca. 839.920 ha als Siedlungs- und Verkehrsfläche genutzt. Dies entspricht 11,9 % der gesamten Fläche Bayerns. Der Prozess der konstanten Flächeninanspruchnahme ist zum einen mit ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen für Gemeinden, Länder und den Bund verbunden – etwa durch Hochwassergefährdung, steigende Infrastrukturfolgekosten oder Verödung der Innenstädte. Darüber hinaus führt eine steigende Zersiedelung zur Generierung weiteren Verkehrs, der gerade für Kommunen zusätzliches Konfliktpotential birgt und sich negativ auf den Klimaschutz auswirkt.

Eine der bedenklichsten, in ihrer Gesamtheit und ihrem Wirkungsgefüge nur schwer überschaubaren Folgen der Flächeninanspruchnahme ist jedoch zweifelsohne die stetig fortschreitende Versiegelung fruchtbarer Böden und wertvoller Freiflächen (BLAG-NE, 2005). So führt die mit einer Umwidmung in Siedlungs- oder Verkehrsflächen einhergehende Versiegelung und Verdichtung der Böden unweigerlich zu einem irreversiblen Verlust der zahlreichen Bodenfunktionen. Hier sind insbesondere

- die Regelungsfunktion,
- die Lebensraumfunktion,
- die Produktionsfunktion sowie
- die Archivfunktion

hervorzuheben (SCHEFFER, 1998). Eine Renaturierung versiegelter Flächen – sofern überhaupt realisierbar – stellt zumeist einen langwierigen und überaus kostenintensiven Prozess dar. In der Folge muss aus ökonomischen Gesichtspunkten häufig auf einen aktiven Rückbau versiegelter Flächen verzichtet werden.

Obwohl die Problematik der Flächenversiegelung eng mit der Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche verknüpft ist, findet sie in der öffentlichen und politischen Diskussion häufig nur indirekt Beachtung. Im Folgenden sollen daher neben den bundes- sowie bayernweiten Initiativen zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme vor allem die Aktivitäten zum Schutz des Bodens dargelegt werden.

1.1 Bodenversiegelung in der politischen Wahrnehmung

Wie bereits zuvor erwähnt, findet auf politischer Ebene vornehmlich die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche Beachtung, während die Wahrnehmung der Bodenversiegelung demgegenüber etwas in den Hintergrund rückt. Dieser Umstand liegt einerseits darin begründet, dass die Siedlungs- und Verkehrsfläche bereits als feste Kenngröße in den statistischen Erhebungen der Landesämter

verankert ist und somit auf der Basis einer einheitlichen Methodik in regelmäßigen Abständen und hinreichend genau erfasst wird (BLAG NE, 2005). Demgegenüber gibt es bisher keinen umfassend validierten Ansatz zur bundes- oder landesweiten Quantifizierung der Bodenversiegelung. Darüber hinaus hat sich die statistische Kennzahl der Siedlungs- und Verkehrsfläche aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit bereits in zahlreichen Anwendungen als Indikator in verschiedenen Umweltmonitoring-Systemen etabliert (LFU, 2015, LIKI 2016).

Entsprechend bezieht sich das Gros politischer Initiativen im Hinblick auf die Problematik der zunehmenden Flächeninanspruchnahme auf die Zahlen zum Indikator „Siedlungs- und Verkehrsfläche“. So hat der Nachhaltigkeitsrat der Bundesregierung Maßnahmen gefordert, die bis zum Jahr 2020 zu einer Reduzierung des bundesweiten Flächenverbrauchs auf 30 ha pro Tag führen (RNE, 2004). Bereits im Jahr 1991 definierte die Bayerische Staatsregierung mit ihrem Bodenschutzprogramm Ziele und Maßnahmen zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme in Bayern und entwickelte diese in der Fortschreibung des Bodenschutzprogramms 2006 weiter. Zur deutlichen Reduzierung der Flächeninanspruchnahme sollen hierbei verstärkt vorhandene Potenziale im Bestand genutzt werden. Seit 2003 enthält das bayerische LEP das Ziel der „vorrangigen Innenentwicklung“. Außerdem sind die Innenentwicklung und Stärkung der Ortskerne zentrale Themen der Städtebauförderung und Dorferneuerung in Bayern (StMLF, 2006).

In der Bayerischen Nachhaltigkeitsstrategie ist festgeschrieben, dass der Flächenverbrauch deutlich reduziert werden soll. Langfristig ist eine Flächenkreislaufwirtschaft ohne weiteren Flächenneueverbrauch anzustreben. Dazu soll so weit wie möglich die erneute Nutzung vorhandener Flächen (Brachflächen, Baulücken, bereits genutzte Flächen) im Sinne eines Flächenrecyclings erfolgen. Die Inanspruchnahme von land- und forstwirtschaftlich nutzbaren Böden soll auf das unbedingt notwendige Maß begrenzt werden, insbesondere hochwertige Böden sollen für die Landwirtschaft erhalten werden.

Mit dem „Kommunalen Flächenressourcen-Management“ wurde seit 2001 ressortübergreifend eine Methodik für die Kommunen zur verbesserten Berücksichtigung des Flächensparens in allen relevanten Handlungsfeldern der städtebaulichen Planung erstellt und bayernweit im Rahmen von Regionalveranstaltungen beworben. Mit dem 2003 gegründeten und mittlerweile auf über 50 Mitglieder angewachsenen „Bündnis zum Flächensparen“ hat Bayern bundesweit erstmalig eine breite Allianz der auf verschiedene Art und Weise am Themenfeld beteiligten Akteure geschaffen. Neben den zuständigen Ministerien sind die kommunalen Spitzenverbände, Planer- und Umweltverbände sowie Kirchen, Universitäten und Unternehmen Partner des Bündnisses. Mit den Modellprojekten „Flächenmanagement in interkommunaler Zusammenarbeit“, „Neue Handlungshilfen für die aktive Innenentwicklung“ und „Revitalisierung von Einfamilienhausgebieten“ wurden die Handlungsansätze und die Flächenmanagement-Methodik verfeinert und mit der Arbeitshilfe „Kommunales Flächenmanagement“ sowie der „Flächenmanagement-Datenbank“ und dem „FolgekostenSchätzer“ für die kommunale Praxis aufbereitet. Wie die Diskussionen der letzten Jahrzehnte zum Thema Bodenschutz zeigen, lag der Fokus des öffentlichen und politischen Interesses vorwiegend auf der Belastung der Böden mit Schadstoffen verschiedenster Art. Hervorgerufen wurde dies vor allem durch das Aufkommen der Debatten um Altlasten in den 1980er Jahren (Brandt, 2001). Jedoch brauchte es weitere zehn Jahre, bis der Boden als eigenständiges und schützenswertes Gut mit dem Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17.03.1998 als letztes Umweltmedium einen gesetzlichen Rahmen fand. Zuvor waren Regelungen hinsichtlich des Schutzgutes Boden in der Bundesgesetzgebung unter anderem im Bau-Gesetzbuch (BauGB) oder dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) thematisiert. Darüber hinaus gibt es in einzelnen Bundesländern gesonderte Bodenschutzgesetze - etwa seit 24.06.1991 in Baden-Württemberg (BRANDT, 2001). In Bayern wurde das Landesbodenschutzgesetz am 23.02.1999 verabschiedet.

Die Problematik der Bodenversiegelung mit all ihren Ursachen findet allerdings auch im Bundes-Bodenschutzgesetz keine explizite Entsprechung. Sie lässt sich allenfalls aus der Schutzwürdigkeit des Bodens heraus ableiten. Noch in dem Bericht „Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000“ des Umweltbundesamtes (2000) wird dem Themenblock der Schadstoffbelastung der Böden, insbesondere im Zusammenhang mit Altlasten, ein ganzes Kapitel gewidmet. Dagegen wird die Bodenversiegelung eher am Rande im Kontext der Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche abgehandelt. Dabei hat schon im Jahre 1988 der Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau die Begrenzung und sogar Verringerung der Bodenversiegelung als ein wichtiges städtebauliches Ziel ausgegeben (BMBAU, 1988). Darüber hinaus wurden in diesem Beitrag bereits frühzeitig die aktuell angeführten, negativen Effekte der Flächenversiegelung, wie beispielsweise die Änderung des Stadtklimas, die Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt sowie den erhöhten Oberflächenabfluss, dargelegt.

Eine Schwierigkeit im Hinblick auf die Erfassung der Bodenversiegelung offenbart sich bei einer Betrachtung der Begriffsdefinition. Hier zeigt sich, dass sich je nach Fokus und Anwendungsfeld des Betrachters verschiedene Sichtweisen finden. Eine auf die Beeinträchtigung der Funktionen des Bodens gerichtete Definition gibt das Bundesamt für Naturschutz (BfN 2006) in ihrem Glossar:

Bodenversiegelung: ‚Abdichtung von Bodenoberflächen (z. B. durch Asphaltierung, Betonierung, Bebauung), die zum Verlust der natürlichen Bodenfunktionen (Lebensraum, Wasser- und Nährstoffkreisläufe, Filter- und Puffereigenschaften) führt.‘

Die STADT BRAUNSCHWEIG (1998) verfolgt in ihrem Umweltatlas einen Ansatz, der die baulichen Veränderungen im Zuge der Versiegelung beschreibt:

‚Bodenversiegelung wird definiert als eine vom Menschen geschaffene Trennung des Bodenraumes von der Atmosphäre durch Bedeckung der Bodenoberfläche mit praktisch undurchlässigen Materialien, insbesondere durch die Bebauung von Flächen mit Straßen Wegen und Gebäuden.‘

Eine Kombination beider Ansätze findet sich in einer früheren Definition bei BÖCKER (1985):

‚Bodenversiegelung bedeutet, dass offener Boden sehr stark verdichtet und mit impermeablen Substanzen wie Teer, Beton oder Gebäuden bedeckt wird. Die Austauschvorgänge zwischen Boden und Atmosphäre, die sowohl den abiotischen Bereich – wie Versickerung oder umgekehrt Verdunstung von Bodenwasser, Luftaustauschprozesse zwischen Boden und Luft – als auch den biotischen Bereich betreffen, werden unterbunden.‘

Allen drei Definitionen gemein ist die Notwendigkeit der Aufbringung von abdichtenden Materialien auf den Boden. Das Umweltbundesministerium (BMU 2007) geht hier noch einen Schritt weiter:

‚Unter einer Versiegelung wird die vollständige oder teilweise Abdichtung des Bodens zur Atmosphäre hin durch Deckbeläge, Baumaterial oder in den Boden eingebrachtes Fremdmaterial verstanden; als Versiegelung gilt auch die bauliche oder nutzungsbedingte Verdichtung des Bodens, wenn diese wie eine Abdichtung wirkt.‘

Hier werden neben der Aufbringung abdichtender Materialien auch das Einbringen von Substanzen in den Boden, sofern es zur Verdichtung führt, und die nutzungsbedingte Verdichtung in der Definition aufgegriffen.

In der Diskussion um die anhaltende Bodenversiegelung in Bayern ist zu beobachten, dass der Fokus insbesondere auf deren Auswirkungen auf den Oberflächenabfluss liegt. Gerade die in den letzten Jahren aufgetretenen Extremhochwässer in Bayern – aber auch in den neuen Bundesländern –

forcieren diese Sichtweise. Allerdings sollte Bodenversiegelung in ihren Auswirkungen nicht auf diesen einen Sachverhalt reduziert werden. Die Diskussion über die Folgen von Bodenversiegelung muss gegenüber allen als bedenklich zu bewertenden Aspekten offen geführt werden.

Im Hinblick auf die Debatte zum Umgang mit der Bodenversiegelung ist es bemerkenswert, dass in Ermangelung entsprechender Erhebungen in der öffentlichen Diskussion Zahlen und Maße verwendet werden, die nur indirekte Aussagen über die versiegelten Flächen enthalten. So wird häufig auf die Flächeninanspruchnahme beziehungsweise den Flächenverbrauch Bezug genommen. Die zugehörigen Zahlen beruhen auf dem statistisch erfassten Indikator „Siedlungs- und Verkehrsfläche“, der jedoch versiegelte und unversiegelte Areale umfasst. Der auf Länder- und Bundesebene verwendete Indikator Flächeninanspruchnahme (Flächenverbrauch) ist als die Entwicklung der statistisch erfassten Siedlungs- und Verkehrsfläche in einem bestimmten Zeitraum definiert. Die Grundlage für diesen Indikator bildet das amtliche Liegenschaftskataster. Darin wird eine bundesweit einheitliche Aufgliederung der Flächennutzungsarten gemäß dem Nutzungsarten-Schlüsselverzeichnis der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)¹ vorgenommen. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche setzt sich aus den Nutzungsarten „Gebäude- und Freifläche“, „Betriebsfläche (ohne Abbau- und Abbruchland)“, „Erholungsfläche“, „Verkehrsfläche“ und „Friedhofsfläche“ zusammen. Diese Kategorien zeichnen sich jeweils durch unterschiedliche Versiegelungsgrade aus (DESTATIS, 2006; KRAUSE, 2005). So nutzt KRAMER (2002) in seinen Berechnungen zur Flächenversiegelung in Rheinland-Pfalz für Gebäude- und Freiflächen einen mittleren Versiegelungsgrad von 44,9 %, für Betriebsflächen von 3,7 % sowie für Verkehrsflächen von 36,1 %.

Hier verspricht der Ansatz der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) eine Verbesserung des Informationsdefizits. Dabei wird eine genauere Aufschlüsselung der Flächeninanspruchnahme angestrebt, so dass bei deren jährlicher Berechnung auch die tatsächliche Bodenversiegelung ermittelt wird. Die Datengrundlage wird vom Arbeitskreis „Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder“ (AK UGRdL) zusammengestellt und zur Verfügung gestellt. Die Ermittlung der tatsächlichen Bodenversiegelung erfolgt anhand des so genannten UGRdL-Ansatzes (FRIE UND HENSEL, 2007). Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass jeder Nutzungsart der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Länderebene ein Versiegelungsgrad zugeteilt werden kann, der nur auf Grund der Besiedlungsdichte Schwankungen aufweist, jedoch keine regionalen Unterschiede zeigt. Die Besiedlungsdichte wird dabei auf Basis der Bundesländer anhand des Anteils der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) an der Gesamtfläche der Länder berechnet, wobei jährlich eine Anpassung an die neuen Verhältnisse vorgenommen wird. Diese Herangehensweise sichert auf Grund der bundesweiten Verfügbarkeit und der jährlichen Fortschreibung der Datenbasis eine schnelle, kostengünstige und transparente Ermittlung der Bodenversiegelung. Hinsichtlich der in Teilen weiterhin unsicheren Zuordnung der Flächen zu den Nutzungsarten sowie der Ausblendung regionaler Unterschiede in der Siedlungskultur müssen jedoch Lösungen gefunden werden, die eine bessere Detailtreue des Verfahrens gewährleisten.

Tab. 1 zeigt die absolute und prozentuale Zusammensetzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche für Bayern im Jahre 2015. Die prozentuale Verteilung der verschiedenen Nutzungsarten an der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Bayern ist auch für andere Regionen typisch. Während die Siedlungs- und Verkehrsfläche folglich verhältnismäßig exakt erfasst und konstant fortgeschrieben wird, basieren die Angaben zur versiegelten Fläche bisher weitestgehend auf daraus abgeleiteten Näherungswerten.

¹ Verzeichnis der flächenbezogenen Nutzungsarten im Liegenschaftskataster und ihrer Begriffsbestimmungen der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland

Tab. 1: Zusammensetzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Bayern für das Jahr 2015.
Den größten Anteil an der SuV haben die Gebäude- und Freiflächen, sowie die Verkehrsflächen.
Andere Nutzungsarten nehmen nur einen kleinen Anteil ein. Quelle: LFSTAT (2016).

| Nutzungsart | [km ²] | [%] |
|--------------------------------------|--------------------|--------------|
| Siedlungs- und Verkehrsfläche | 8.399,2 | 11,9 |
| Gebäude- und Freifläche | 4.340,0 | 6,2 |
| Betriebsfläche | 203,9 | 0,3 |
| Erholungsfläche | 510,6 | 0,7 |
| Verkehrsfläche | 3.303,2 | 4,7 |
| Friedhof | 41,6 | 0,0 |
| Gesamte Bodenfläche | 70.550,1 | 100,0 |

Neben diesem etablierten Ansatz wurden im Freistaat Bayern weitere Verfahren zur Ermittlung der Versiegelung geprüft. So gab das damalige Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen bereits 1990 eine Studie zur Erhebung der Versiegelung auf Gemeindeebene in Auftrag (KREUZ UND WENNG, 1990). Dabei fand ein Bottom-Up-Ansatz Anwendung, der auf einer luftbildbasierten, manuellen Bestimmung von Versiegelungsinformationen für repräsentative Beispielgemeinden basierte. Zu diesem Zweck wurden sämtliche Gemeinden Bayerns in acht Gemeindetypen eingeteilt und anschließend für jeweils zwei Beispielgemeinden jedes Gemeindetyps die Versiegelungswerte über eine visuelle Auswertung von Luftbildern ermittelt. Dabei wurde zwischen „Verdichtungskernen“, „Umlandgemeinden“, „Verdichteten Gemeinden“, „Industriegemeinden“, „Ländlichen Gemeinden“, „Agrarischen Fremdenverkehrsgemeinden“, „Agrargemeinden“ sowie „Wohnstandortgemeinden“ unterschieden. Die so gewonnenen Kennzahlen zur Versiegelung wurden dann für sämtliche Gemeinden eines Siedlungstyps übernommen, um auf diese Weise die bayernweite Versiegelung abzuschätzen.

Zudem hat sich in einigen wenigen Kommunen Bayerns eine gesplittete Abwassergebührenerhebung etabliert, deren Grundlage eine Luftbilddauswertung ist. Dabei wird eine manuelle Kartierung voll-, teil- und unversiegelter Flächen vorgenommen, um auf dieser Basis die grundstücksbezogenen Abwassergebühren zu erheben. Als Beispiel sei hier die Stadt Passau genannt. Obwohl die visuelle Auswertung von Luftbildern eine räumlich und thematisch hoch genaue Erfassung der Versiegelung erlaubt, ist dieses Verfahren jedoch kaum zur großflächigen, d.h. regionalen oder gar bayernweiten Erhebung von Versiegelungsinformationen geeignet. Denn die flächenhafte Prozessierung von sehr hoch aufgelösten Bilddaten ist mit immensm Verarbeitungsaufwand verbunden und wird nur durch den Einsatz von Hochleistungsrechnern ermöglicht. Dies ist wiederum mit sehr hohen Kosten verbunden. Folglich bleibt lediglich der Versuch einer Extrapolation von stichprobenhaft ermittelten Kennzahlen in die Fläche, wie sie im bereits beschriebenen Ansatz von KREUZ UND WENNG (1990) vorgenommen wurde. Diese Vorgehensweise vernachlässigt jedoch zu einem gewissen Grad die regional begrenzten Eigenarten der Siedlungs- und Baukultur. Über die Extrapolation auf größere Räume können sich Fehlinterpretationen im Kontext der Stichprobenerhebung zudem leicht potenzieren.

Die Städte München und Nürnberg schätzen die Versiegelung über eine Flächennutzungs- beziehungsweise Stadtstrukturtypenkartierung. Im Falle Nürnbergs werden insgesamt 62 Nutzungsformen unterschieden, denen jeweils ein spezifischer Versiegelungsgrad – unterteilt in zehn Klassen - zugeordnet wird.

Die Erhebung aussagekräftiger Daten zur aktuellen Situation und zeitlichen Entwicklung der Bodenversiegelung ist ein entscheidender Baustein für die Entwicklung effizienter Strategien und Konzepte zur Reduzierung der nachteiligen Auswirkungen auf Ökonomie und Ökologie. Diesbezüglich haben die vorangegangenen Erläuterungen jedoch klar gezeigt, dass in Bayern – aber auch der Bundesre-

publik Deutschland – weiterhin dringender Bedarf bezüglich einer kostengünstigen Methodik zur flächenhaften und fortschreibbaren Kartierung der Bodenversiegelung besteht.

In diesem Kontext könnte sich die satellitengestützte Erdbeobachtung zunehmend als vielversprechender Ansatz für ein zukunftsfähiges Instrumentarium zum regionalen Monitoring der Bodenversiegelung unterhalb der Länderebene bis hin zur Gemeindeebene erweisen. Moderne Sensorsysteme sind in der Lage, weltweit flächendeckend und vergleichsweise kostengünstig, raumbezogene Informationen in kurzen Zeitintervallen und mit hohem räumlichem Detaillierungsgrad zu erheben (DECH, 1997). Darüber hinaus können die Aufnahmen mittels digitaler Bildverarbeitung schnell und automatisiert verarbeitet werden.

1.2 Versiegelungs-Studie aus dem Jahr 2007

In den Jahren 2006 und 2007 hat der Lehrstuhl für Fernerkundung am Geographischen Institut der Julius-Maximilians-Universität Würzburg im Auftrag des LfU die Studie „Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern“ durchgeführt.

Ziel war es, die Versiegelung in Bayern bis auf Gemeindeebene landesweit mittels Satellitendaten (Landsat-Szenen aus dem Jahr 2000) zu untersuchen. Die Studie wurde im Jahr 2007 vom LfU herausgegeben und als Langfassung im Internet als PDF publiziert. Ergänzend hierzu wurde eine Kurzbroschüre mit den wesentlichen Ergebnissen als Druckfassung und ein Flyer veröffentlicht.

1.3 Ziel der aktuellen Studie

Mit der aktuellen Studie soll die Versiegelung in Bayern zum Stand 2015 ermittelt werden. Wichtig ist dabei die Konsistenz zum bereits abgeleiteten Versiegelungsgrad für das Jahr 2000 und eine Darlegung der Zunahme der versiegelten Flächen im Zeitraum von 2000 bis 2015. Der Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche wird für das Jahr 2015 mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern erhoben. Darüber hinaus wird die Versiegelungssituation in Bayern mittels landesweiter Statistiken auf verschiedenen Ebenen veranschaulicht.

2 Methodik

Im Rahmen dieses Kapitels sollen die Grundlagen jener Techniken erörtert werden, die für ein Verständnis der im Zuge dieser Studie eingesetzten Verfahren und Konzepte von Bedeutung sind. Dabei wird zunächst die fernerkundliche Methodik zur Erfassung versiegelter Flächen erläutert (Unterkapitel 2.1). Hier stehen zunächst die verwendete Datenbasis, deren Vorverarbeitung (Abschnitt 2.1.1) sowie das Verfahren zur Modellierung von Versiegelungsgraden im Vordergrund (Abschnitt 2.1.3). Im Anschluss wird die Aufbereitung und Integration von Vektordaten beschrieben, die eine Einbindung linienhafter Infrastrukturelemente – beispielsweise Straßen – ermöglichen sollen, da diese mit den verwendeten Fernerkundungsdaten nicht eindeutig zu erfassen sind (Unterkapitel 2.2). Im nachfolgenden Unterkapitel 2.3 wird dargelegt, wie die generierte Datengrundlage mittels eines GIS auf administrative sowie raumstrukturelle Einheiten aggregiert und mit statistischen Informationen verschnitten wird. Letztlich erfolgt eine Beschreibung des angewandten Verfahrens zur Validierung der erzielten Ergebnisse (Unterkapitel 2.4).

2.1 Erfassung versiegelter Flächen mittels Satellitendaten

Die im Rahmen dieser Studie verwendete Methodik zur Bestimmung des Versiegelungsgrades wurde am Lehrstuhl für Fernerkundung des Geographischen Instituts der Universität Würzburg entwickelt. Als Grundlage für die Auswertung dienen einerseits Daten des Satellitensystems Landsat (Auswertung) sowie Luftbilder von flugzeuggetragenen Fernerkundungsinstrumenten (Training und Validierung). Zudem werden Vektorgeometrien aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) zur räumlichen Fokussierung der Auswertung auf Siedlungs- und Verkehrsflächen eingesetzt. Die Eigenschaften dieser Datengrundlagen werden in Abschnitt 2.1.1 erörtert. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 2.1.2 die fernerkundliche Methodik zur Ableitung von Versiegelungsinformationen dargelegt.

2.1.1 Datengrundlage

Wie bereits eingangs erwähnt, wird im Folgenden zunächst die Datengrundlage, die sich aus satellitengestützten Landsat-Szenen sowie flugzeuggestützten Luftbildern zusammensetzt, beschrieben. Zugleich werden die Eigenschaften der entsprechenden Bilddaten vorgestellt und die wichtigsten Vorverarbeitungsschritte zur Analyse dieser Daten dargelegt. Da die fernerkundliche Versiegelungsanalyse zudem gezielt auf die Siedlungs- und Verkehrsflächen angewendet wird, werden die hierzu verwendeten Basis-DLM-Vektordaten ebenfalls im Kontext dieses Kapitels charakterisiert.

Landsat

Das Landsat-Programm liefert seit dem Start von Landsat-1 im Juli 1972 kontinuierlich multispektrale Aufnahmen der Erdoberfläche (USGS, 2016a). Im Laufe dieser Zeit wurden die eingesetzten Aufnahmesysteme fortwährend durch verbesserte Nachfolgermodelle ersetzt. Seit dem Start des Landsat-5 mit den Sensoren Multispectral Sensor (MSS) sowie Thematic Mapper (TM) am 01. März 1984 liefert dieser Satellit bis heute kontinuierlich Daten und ermöglicht somit die Auswertung langer Zeitreihen mit kontinuierlichen Daten. Der Start des Satelliten Landsat-7, der mit dem Sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) ausgestattet ist, erfolgte am 15. April 1999. Das Programm wurde zuletzt mit dem Start des Landsat-8 Satelliten am 11. Februar 2013 fortgesetzt. Dieser trägt die Sensoren Operational Land Imager (OLI) sowie Thermal Infrared Sensor (TIRS). Geleitet wird das Landsat-Programm von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und dem United States Geological Survey (USGS). Die Verarbeitung und den Vertrieb der Daten übernimmt dabei das USGS (USGS, 2016b). Im Rahmen des Earthnet-Programms der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) betreibt das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) eine Bodenstation für den Empfang und die Verarbeitung der Landsat-7 ETM+ sowie Landsat-8 Daten (USGS, 2016c).

Die Datengrundlage dieser Studie setzt sich aus Satellitenbildern der Landsat-8 Mission für das Jahr 2015 zusammen. Landsat-8 umkreist die Erde auf einer sonnensynchronen, polaren Umlaufbahn in einer Höhe von etwa 705 km und deckt mit insgesamt elf Aufnahmekanälen ein Spektrum vom blauen (Wellenlänge ca. 0,45 μm) bis zum thermalen Spektralbereich (Wellenlänge ca. 12 μm) ab. Hinzu kommt ein panchromatischer Kanal, mit einer großen Bandbreite vom Blau bis Rot. Die Pixelgröße der einzelnen Aufnahmekanäle variiert zwischen 15 * 15 Metern für den panchromatischen, 30 * 30 Metern für die monochromatischen und den thermalen Bereich. Die Daten aus dem thermalen Bereich werden jedoch auf eine räumliche Auflösung von 100 * 100 Metern heruntergerechnet. Dabei deckt eine Landsat-Szene eine Fläche von etwa 170 * 185 Kilometern ab. Die in dieser Studie verwendeten Landsat-8 Daten haben das Datenlevel 1T und sind somit von einer hohen geometrischen Genauigkeit gekennzeichnet. Tab. 2 fasst die wichtigsten Eigenschaften des Landsat-8 zusammen. Im Vergleich zu Landsat TM und ETM+ bietet Landsat-8 mit 16-bit eine höhere radiometrische Auflösung.

Tab. 2: Technische Daten des Landsat-8 OLI und TIRS Satelliten. Ein großer Vorteil des 1972 gestarteten Landsat-Programms liegt in seiner konstanten Fortführung. Dadurch können bei Bedarf Zeitreihen über einen Zeitraum von mehr als 30 Jahren aufgebaut und ausgewertet werden. Quelle: USGS (2016d), USGS (2016e)

| Technische Parameter | Panchromatisch | Monochromatisch | Thermal |
|-----------------------------------|----------------|--------------------|--|
| Spektrale Auflösung [nm] | 500 - 680 | Aerosol: 430 - 450 | TIRS: 10600 - 11190 TIRS: 11500 - 12510 |
| | | blau: 450 - 510 | |
| | | grün: 530 - 590 | |
| | | rot: 640 - 670 | |
| | | NIR: 850 - 880 | |
| | | SWIR: 1570 - 1650 | |
| | | SWIR: 2110 - 2290 | |
| | | Cirrus: 1360 -1380 | |
| Geometrische Auflösung [m] | 15 | 30 | 100 (30) |
| Breite des Aufnahmestreifens [km] | 170 * 185 | | |
| Repetitionsrate [Tage] | 16 | | |

Für die vorgesehene, bayernweite Kartierung der Versiegelung bietet das Landsat-System einen optimalen Kompromiss aus flächenhafter Abdeckung – ca. 170 * 185 Kilometer pro Szene – und räumlichem Detaillierungsgrad – 30 * 30 Meter. Die Abdeckung des Freistaates durch die Landsat-8 Szenen ist in Abb. 1 dargestellt. Zusätzlich zu den Path/Row Angaben der einzelnen Szenen ist das Aufnahmedatum der jeweiligen Szene aufgeführt, um die zeitliche Varianz zwischen den verschiedenen Szenen zu verdeutlichen. Die Path-Angabe (p) bezeichnet dabei die Nummer des Überflugpfads und die Row-Angabe (r) die Nummer der Aufnahme innerhalb des überflogenen Aufnahmestreifens an.

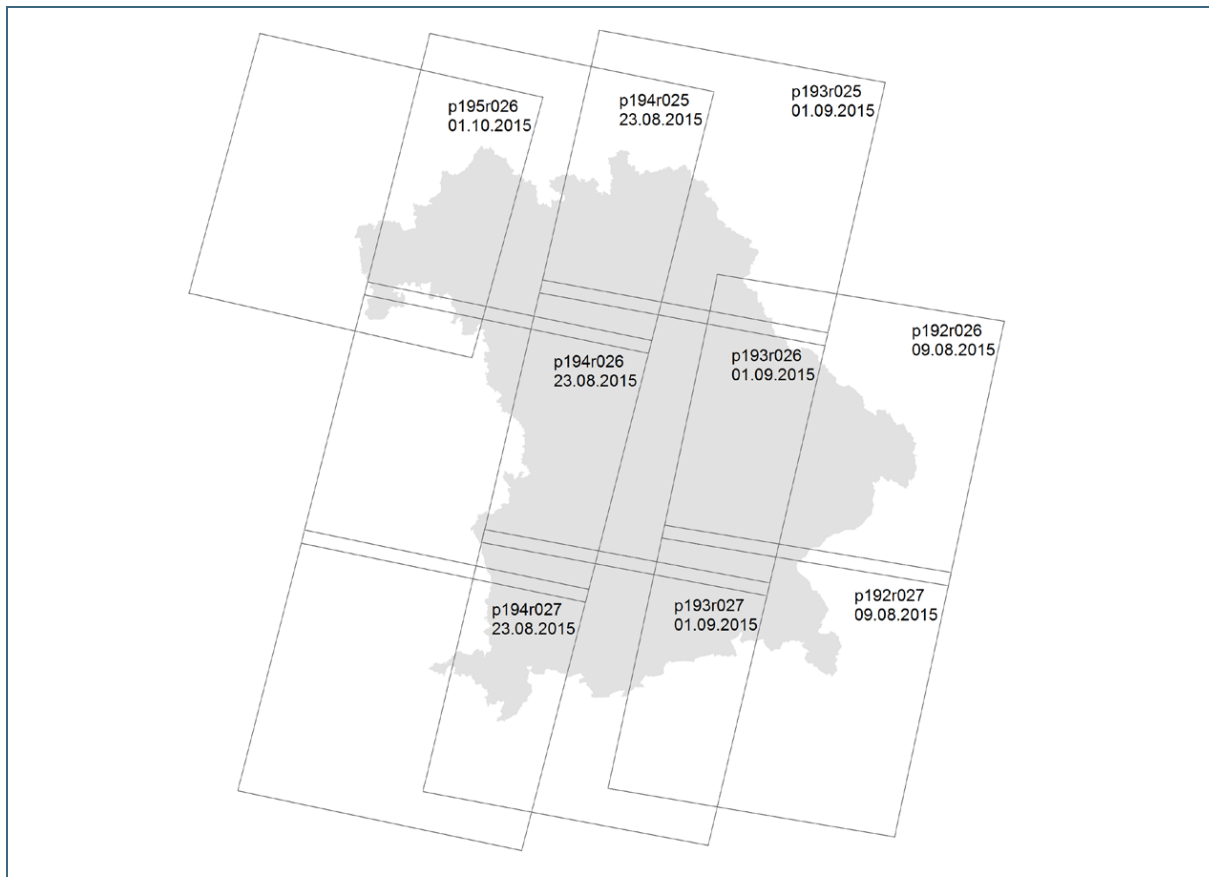


Abb. 1: Abdeckung Bayerns durch den Landsat-8 Satelliten. Unter der Kennziffer der einzelnen Szenen – definiert durch die Path- (p) und die Row-Angabe (r) – findet sich das Aufnahmedatum der Szene. Der Path kennzeichnet die Nummer des Überflugpfads, während die Row-Angabe die Lage der Aufnahme innerhalb des überflogenen Aufnahmestreifens definiert.

Abb. 1 zeigt, dass mittels neun Landsat-Szenen eine komplette Abdeckung für Bayern erreicht werden kann. Die Aufnahmezeitpunkte der verschiedenen Szenen für den Zeitschnitt 2015 liegen mit einer Spanne von maximal 2 Monaten zwischen Path 195 und Path 192 in einem für diese Anwendung vertretbarem Rahmen.

Digitale Luftbilder

Die flächendeckende Befliegung Bayerns, die vom Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) durchgeführt wird, bildet eine wichtige Grundlage für sämtliche Luftbildprodukte in Bayern. Bis zum Jahr 2002 wurden überwiegend Schwarz-Weiß-Luftbilder aufgenommen, seit 2002 erfolgen die Luftbildaufnahmen jedoch ausschließlich in Farbe. Die Luftbilder werden mittels einer Senkrechtaufnahme aus einer Höhe von etwa 2 bis 3 Kilometern aufgezeichnet, wobei die Bayernbefliegung jedes Jahr für etwa ein Drittel der Fläche Bayerns realisiert wird. Die Aufnahmen erfolgen mit einer räumlichen Auflösung von 20 Zentimetern für die Wellenlängenbereiche des nahen Infrarots sowie für die Kanäle Blau, Grün und Rot. Tab. 3 zeigt die entsprechenden technischen Details der digitalen Luftbilder, die im Rahmen der Bayernbefliegung aufgenommen werden (LDBV, 2015).

Tab. 3: Technische Daten zur Bayernbefliegung – Digitale Luftbilder. Die für diese Studie entscheidenden Unterschiede zum Landsat-System liegen insbesondere in der geometrischen Auflösung der Aufnahmekanäle, die einen erheblich höheren, räumlichen Detaillierungsgrad der Analysen gewährleisten. Aufgrund der sehr hohen Bodenauflösung bleibt die räumliche Abdeckung jedoch deutlich hinter jener der Landsat-Satelliten zurück. Quelle: LDBV (2014)

| Technische Parameter | Monochromatisch |
|------------------------------------|-----------------|
| Spektrale Kanäle | Blau |
| | Grün |
| | Rot |
| | Nahes Infrarot |
| Geometrische Auflösung [cm] | 20 |
| Länge und Breite einer Kachel [km] | 2 x 2 |
| Repetitionrate | 3-Jahres-Zyklus |

In dieser Studie wurden digitale Luftbilder für die sieben Städte Aschaffenburg, Bayreuth, Kempten, München, Passau, Regensburg und Würzburg mit einer räumlichen Auflösung von 40 Zentimetern verwendet. Insgesamt liegen für diese Studie 209 einzelne Luftbildkacheln vor, davon entfallen 71 Kacheln auf die Stadt München. Die Auswahl dieser Daten erfolgte im Hinblick auf die räumliche Lage in Bezug zu den Landsat-Kacheln. Die räumliche Lage der digitalen Luftbilder sowie deren Aufnahmezeitpunkte sind in Abb. 2 dargestellt. Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, konnten nahezu für jeden Landsat-Überflug digitale Luftbildaufnahmen bezogen werden. Die Zeitspanne zwischen dem Aufnahmezeitpunkt der Landsat-Daten und der zugehörigen Luftbilder variiert, bedingt wegen des dreijährigen Aufnahmezyklus, zum Teil bis zu zwei Jahren. Die größten zeitlichen Unterschiede liegen für die Städte Passau und Regensburg und den entsprechenden Landsat-Kacheln vor.

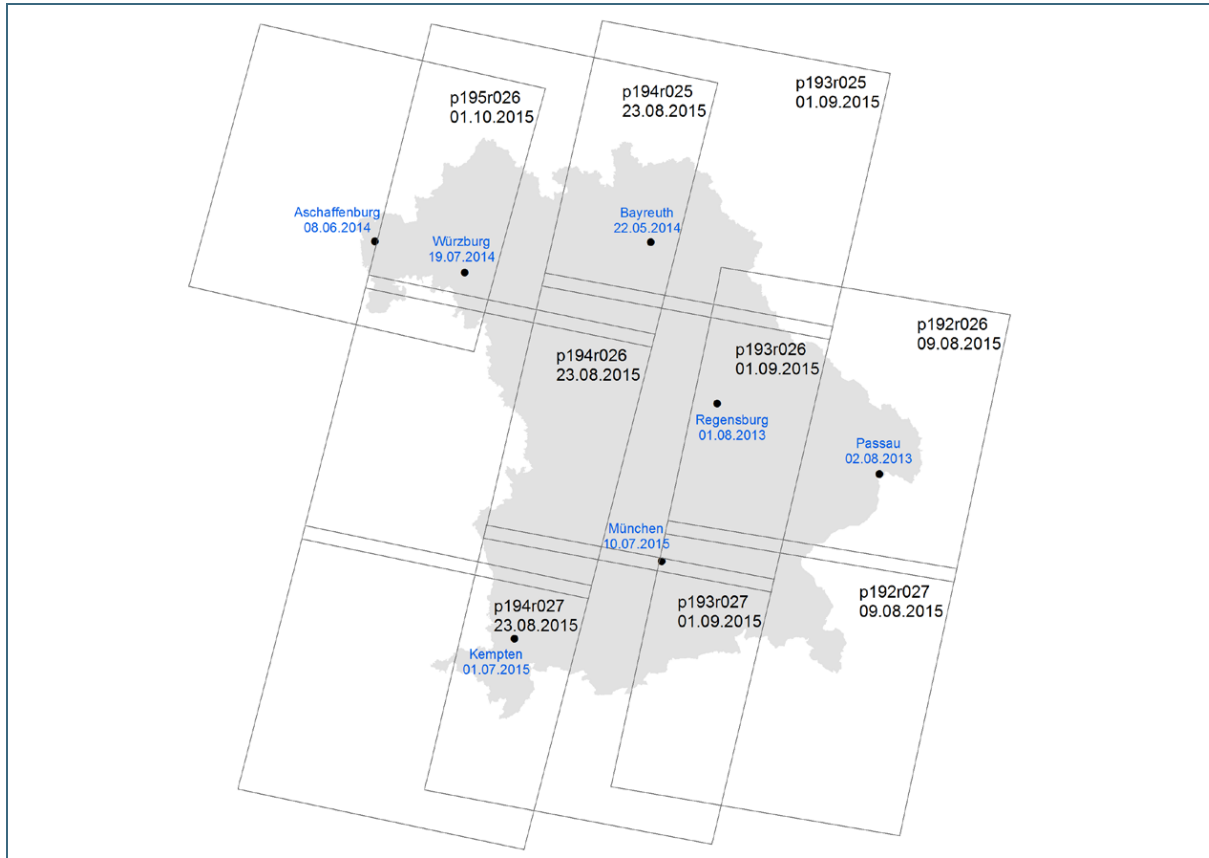


Abb. 2: Lage der Luftbildaufnahmen in Relation zum Landsat-Mosaik. Das Datum unterhalb der Ortsbezeichnung der Luftbildaufnahme (schwarze Punkte) gibt den Aufnahmetermin an. Zu sehen ist, dass die Zeitspanne zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Landsat-Daten und der zugehörigen Luftbilder zwischen zwei und 25 Monaten variiert.

ATKIS-Basis-DLM-Daten

Zur räumlichen Fokussierung der Satellitenbilddauswertung auf Siedlungs- und Verkehrsflächen werden Vektordaten aus dem Basis-DLM, welches Bestandteil des ATKIS ist, in die Auswertung integriert (siehe Kapitel 2.2). ATKIS stellt eine digitale topographische Datenbasis zur Ergänzung der analogen Landeskartenwerke dar und wird regelmäßig zur Anbindung und Verknüpfung geothematischer Zusatzinformationen genutzt. ATKIS-Daten werden von den Landesvermessungs-ämtern auf der Grundlage der DGK5, TK10, TK25, Orthophotos und Daten des Topographischen Informationsdienstes erhoben. Dabei liegt die Aktualisierungshäufigkeit zwischen fünf Jahren bei Objekttypen mit so genannter Grundaktualität und drei bis zwölf Monaten bei der Spitzenaktualität (z. B. Verkehrswege). Die Lagegenauigkeit beläuft sich auf rund drei Meter im freien Gelände (BKG, 2013).

Grundsätzlich werden baulich geprägte Flächen in ATKIS unabhängig von ihrer Größe erfasst. Als baulich geprägte Flächen gelten auch einzeln stehende Wohngrundstücke, Anwesen, Betriebe und ähnliche bewohnte oder von Menschen regelmäßig genutzte Einrichtungen außerhalb von Ortslagen. Nicht erfasst werden untergeordnete Gebäude, wie zum Beispiel Schuppen und Scheunen in freier Feldlage. Maßgebend für die Zuordnung von baulich geprägten Flächen ist die tatsächliche Funktion, nicht die eventuell davon abweichende vorgesehene Funktion der Bauleitung (ADV, 2007).

2.1.2 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung der zuvor aufgeführten Daten umfasst zunächst die Überführung in ein einheitliches kartographisches Bezugssystem. Als solches wurde Universal Transversal Mercator (UTM) mit dem Datum WGS 84 gewählt.

Zudem wurden die Landsat-Szenen entsprechend der administrativen Landesgrenze Bayerns zurechtgeschnitten, indem sämtliche, außerhalb des Freistaats liegenden Bildareale entfernt wurden. Die spektralen beziehungsweise radiometrischen Eigenschaften der einzelnen Kacheln werden darüber hinaus von den atmosphärischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Aufnahme beeinflusst (vgl. Abb. 3). Dabei spielen insbesondere der Aerosol- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre eine Rolle (ALBERTZ, 2001; RICHTER, 2006). So bewirken beide Faktoren ungleichmäßige Streuprozesse, wobei die kurzwellige Strahlung gegenüber der langwelligen Strahlung stärker von diesem Effekt beeinflusst wird (ALBERTZ, 2001). Eine Korrektur dieser atmosphärischen Einflüsse ist daher bei der flächenhaften Auswertung der Landsat-Szenen unumgänglich. Die Umsetzung einer solchen Atmosphärenkorrektur erfolgte mit Hilfe des Softwarepakets ATCOR-2/3. Nähere Informationen hierzu finden sich bei RICHTER (2006).

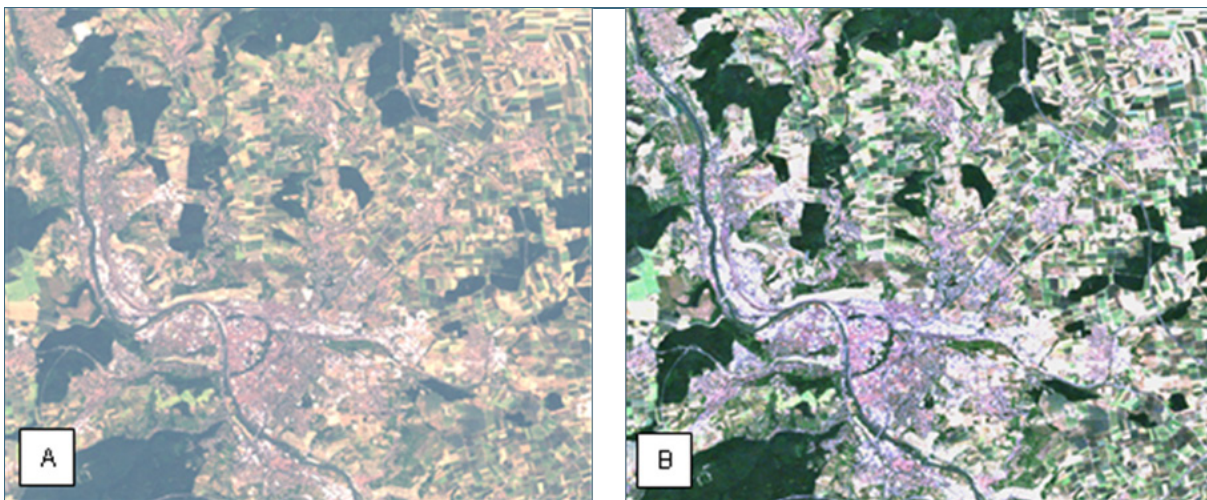


Abb. 3: Atmosphärenkorrektur der Landsat-Daten. Zu sehen ist der Ausschnitt einer Landsat-Szene, welche die Stadt Würzburg und deren Umland zeigt. Die Gegenüberstellung von ursprünglicher Aufnahme (A) und atmosphärenkorrigierter Szene (B) belegt die Wirkung der Atmosphärenkorrektur. Speziell der scheinbare Dunstschleier in der Originalaufnahme kann vollständig beseitigt werden. Zudem ist erkennbar, dass auch die Spektralinformation deutlich aufgewertet wird.

Im Zuge der in Abschnitt 3.2 dargelegten Modifizierung des ursprünglichen Ansatzes wurde zudem ein Histogramm-Ausgleich zwischen den einzelnen Landsat-Aufnahmen durchgeführt (vgl. Abb. 4). Unter einem Histogramm versteht man die Häufigkeitsverteilung der Pixelwerte (Grauwert, DN) für jeden einzelnen Aufnahmekanal eines fernerkundlichen Aufnahmesystems (ALBERTZ, 1998). Der Ausgleich der Histogramme ist notwendig, da auch nach der Korrektur atmosphärischer Einflüsse die radiometrischen Eigenschaften zwischen den Szenen noch leicht variieren. Die Folge ist, dass unter anderem die Möglichkeit zur Anwendung eines einheitlichen Regressionsmodells auf verschiedene Landsat-Szenen eingeschränkt wird.

Durch den Abgleich der Histogramme für den gemeinsamen Überlappungsbereich zweier benachbarter Szenen lässt sich die Abweichung in den Spektralinformationen dieser Szenen recht exakt abschätzen und anpassen. Die konstante Anpassung der Reflektionswerte erfolgt individuell für jeden Kanal, wobei die Histogramme benachbarter Szenen angeglichen werden, ohne die räumliche Information zu verändern. Zur Optimierung des Ergebnisses werden für die Histogrammanpassung dabei nur die Flächen innerhalb der ATKIS Siedlungs- und Verkehrsareale berücksichtigt. Zum einen sind nur diese Bereiche bei der Berechnung des Versiegelungsgrades von Interesse und zum anderen ist hier die natürliche, zeitliche Variation der spektralen Information aufgrund phänologischer Effekte gering. Somit kann vermieden werden, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Szenen zu sehr durch phänologisch bedingte Differenzen vegetationsbedeckter Flächen überprägt werden.

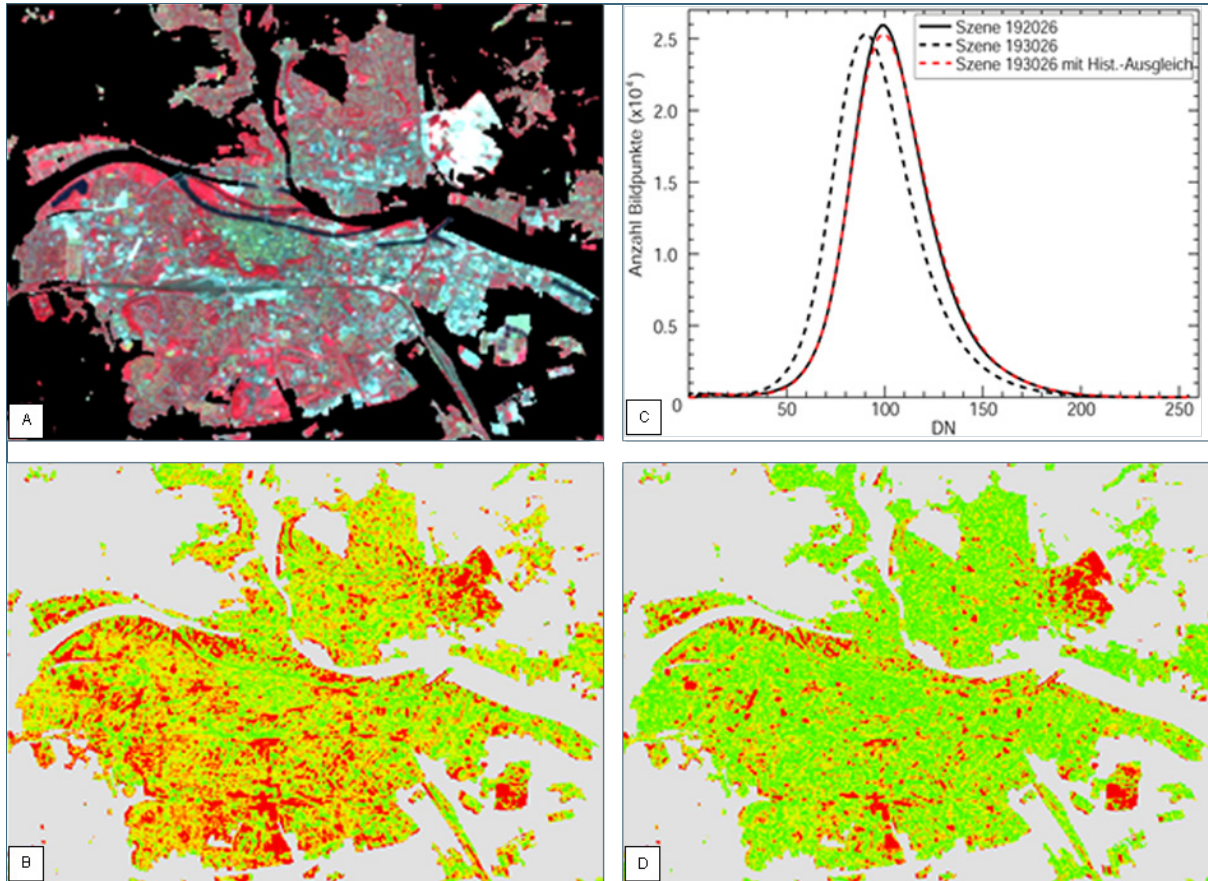


Abb. 4: Anpassung atmosphärenbedingter Unterschiede in den Spektralwerten zwischen zwei Landsat-Aufnahmen. Die Abbildung zeigt die Stadt Regensburg, die sowohl von der Landsat-Szene p192r26 (A) als auch p193r26 erfasst wird. Bedingt durch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte sind bei der Betrachtung identischer Flächen aufgrund differierender atmosphärischer Bedingungen radiometrische Differenzen zu verzeichnen. Diese sind in Abbildung B in Form eines Differenzbildes für den Kanal 4 (NIR) der Szenen p193r26 und p192r26 dargestellt. Die Differenz der Aufnahmen zeigt sich auch in der relativen Verschiebung des Histogramms beider Szenen für diesen Kanal (C). Wird das Histogramm der Aufnahme p193r26 über ein entsprechendes Verfahren an die Szene p192r26 angepasst (C), so zeigt das Differenzbild eine signifikante Minimierung des Unterschieds in der Helligkeit. (D).

Die Vorverarbeitung der digitalen Luftbilder, die mit einer Farbtiefe von 8 bit je Kanal bereitgestellt worden sind, umfasst die Zusammenführung der einzelnen Luftbild-Kacheln zu einem Mosaik pro Untersuchungsgebiet. Des Weiteren sind die Luftbilder bereits entzerrt, d.h. die Verzerrungen sind bereits maßstabsgetreu korrigiert. Daher wird das abgebildete Gelände lagerichtig dargestellt. Abb. 5 zeigt beispielhaft Ausschnitte der mosaikierten Luftbilder.

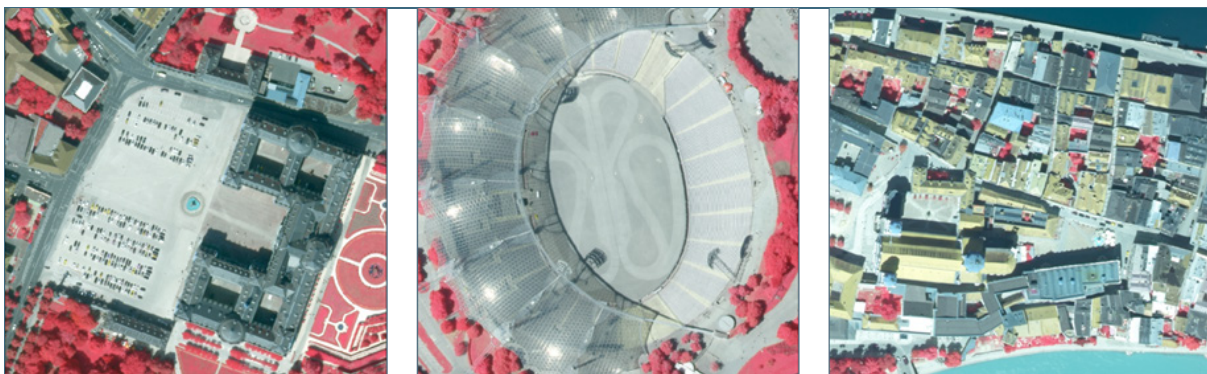


Abb. 5: Ausschnitte der Luftbilder für Würzburg, München und Passau. Dargestellt sind die Luftbilder auf Basis einer RGB-Darstellung der Kanäle NIR, Rot und Grün mit einer räumlichen Auflösung von 40 * 40 Zentimetern.

Der im Rahmen dieser Studie eingesetzte ATKIS-Datensatz wurde vom LfU zur Verfügung gestellt und umfasst die flächenhaften Objektbereiche Siedlung sowie Verkehr für das Jahr 2015. Nach der Überführung dieser Daten in das einheitliche kartographische Bezugssystem wurden die flächenhaften Objektarten der Bereiche Siedlung (Objektgruppen 41000, 51000, 52000) und Verkehr (Objektgruppen 42000, 53000) auf der Basis der Gemeinden miteinander verschnitten. Dabei wurden zunächst aus der Objektgruppe 41000 die Objektarten 41004 Bergbaubetriebe sowie 41005 Tagebau, Grube, Steinbruch entfernt, um zu vermeiden, dass diese Flächen als Siedlungsareale in die Berechnungen eingehen. Das Ergebnis dieser Verschneidung ist eine Maske der flächenhaften Siedlungs- und Verkehrsareale. Tab. 4 zeigt die verschiedenen ATKIS-Objektarten des Objektbereichs Siedlung, die in die Maske der flächenhaften Siedlungs- und Verkehrsareale einfließen. Aus dem Objektbereich Verkehr sind darüber hinaus die Objektgruppen Flugverkehr, Schiffsverkehr sowie die Objektgruppe Verkehrsbauwerke und -anlagen hinzugefügt worden.

Tab. 4: Flächenhafte Objektarten und -gruppen des ATKIS-Bereichs „Siedlung und Verkehr“. Im Kontext der Studie dienen diese Elemente als Grundlage zur Erzeugung einer Maske der flächenhaften Siedlungs- und Verkehrselemente, die zur Fokussierung der satellitenbasierten Auswertung dient.

Siedlung 41000, 51000, 52000

| | Kennung | Name |
|--------------|----------------|--|
| Ebene | SIE01 | Ortslage |
| | 52001 | Ortslage |
| Ebene | SIE02 | Baulich geprägte Flächen |
| | 41001 | Wohnbaufläche |
| | 41002 | Industrie- und Gewerbefläche |
| | 41006 | Fläche gemischter Nutzung |
| | 41007 | Fläche besonderer funktionaler Prägung |
| | 41008 | Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche |
| | 41009 | Friedhof |
| Ebene | SIE03 | Bauwerke und sonstige Einrichtungen |
| | 51002 | Bauwerk oder Anlage für Industrie und Gewerbe |
| | 51003 | Vorratsbehälter, Speicherbauwerk |
| | 51006 | Bauwerk oder Anlage für Sport, Freizeit und Erholung |
| | 51007 | Historisches Bauwerk oder Einrichtung |
| | 51009 | Sonstiges Bauwerk oder Einrichtung |
| Ebene | SIE04 | Besondere Anlagen auf Siedlungsflächen |
| | 52002 | Hafen |
| Ebene | SIE05 | Gebäude |
| | 51001 | Turm |

Verkehr 42000, 53000

| | Kennung | Name |
|--------------|----------------|--------------------------------------|
| Ebene | VER04 | Flugverkehr |
| Ebene | VER06 | Verkehrsbauwerke und -anlagen |
| | 53001 | Bauwerk im Verkehrsbereich |
| | 53002 | Straßenverkehrsanlage |
| | 53004 | Bahnverkehrsanlage |
| | 53007 | Flugverkehrsanlage |
| | 53008 | Einrichtungen für den Schiffsverkehr |

2.1.3 Modellierung der Versiegelung

Bevor der Ansatz zur Modellierung der Versiegelung eingehender erläutert wird, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Erhebung der Flächenversiegelung mittels fernerkundlicher Techniken verfahrensbedingte Spezifika aufweist, die nachfolgend kurz dargelegt werden sollen.

Grundsätzlich liefern fernerkundliche Sensoren Informationen über die Beschaffenheit von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern, ohne unmittelbar mit diesen in Kontakt zu treten. Ziel ist es, über eine flächendeckende, mitunter mehrdimensionale Messung der von den betrachteten Objekten reflektierten (Sonnenlicht) oder emittierten (Thermalstrahlung) elektromagnetischen Strahlung, quantitative und qualitative Informationen über deren Vorkommen, Zustand sowie Beziehungen zu gewinnen. Im Hinblick auf die Auswertung von Erdbeobachtungsdaten machen sich alle fernerkundlichen Ansätze dabei den Umstand zu Nutze, dass zwischen den betrachteten Objekten und der auf sie einwirkenden elektromagnetischen Strahlung material- bzw. objektspezifische Wechselwirkungen auftreten. Trifft Strahlung auf einen Körper, wird sie als Funktion der Wellenlänge und in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials in variierenden Anteilen reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Somit weist jedes Material beziehungsweise jeder Oberflächentyp über das gesamte elektromagnetische Spektrum einen charakteristischen Verlauf der Reflektion auf – die so genannte spektrale Signatur.

Die fernerkundliche Informationserhebung basiert im Grunde genommen auf der Messung dieser spezifischen Reflektionscharakteristik. Dazu wird mit Hilfe entsprechender Sensorsysteme jeweils in verschiedenen Aufnahmekanälen beziehungsweise Wellenlängenbereichen die von einem Körper pro Flächeneinheit und Raumwinkel reflektierte und emittierte Strahlungsleistung aufgezeichnet. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Fernerkundungssysteme primär Informationen über die physikalischen beziehungsweise biophysikalischen Eigenschaften der Erdoberfläche – sprich die Bodenbedeckung – liefern. Mit Blick auf die Erhebung von Versiegelungsgraden bedeutet dies, dass jedem detektierten Oberflächentyp eine Eigenschaft bezüglich der Versiegelung zugewiesen werden muss. So werden beispielsweise vegetationsbedeckte Areale als unversiegelt angesehen, während Asphaltflächen als versiegelt gelten.

Unter dieser Voraussetzung ist die fernerkundungsbasierte Erhebung von Versiegelungsgraden mit gewissen Ungenauigkeiten verbunden. So kann selbst bei den höchst aufgelösten Daten nicht davon ausgegangen werden, dass die spektralen Informationen der bildgebenden Pixel eine Fläche homogener Bedeckungstypen repräsentieren. Gerade im kleinstrukturierten Siedlungsraum werden mit einer Auflösungszelle häufig mehrere Oberflächenarten erfasst – d.h. es handelt sich um so genannte Mischpixel, deren spektrale Signatur sich aus den Anteilen beziehungsweise einer Mischung der einzelnen Bedeckungstypen ergibt. Dennoch kann die Charakteristik des Mischsignals mitunter Aussagen über die Zusammensetzung und die Anteile der einzelnen Oberflächentypen – und somit letztlich auch den Anteil der versiegelten Fläche – ermöglichen. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus dem Umstand, dass sich bestimmte Oberflächentypen aufgrund ihrer nahezu identischen chemischen Zusammensetzung nicht differenzieren lassen. Hier seien beispielhaft unbedeckte Böden, die als unversiegelt anzusehen sind und wasserundurchlässige Baustoffe wie Beton, Dachziegel etc. erwähnt, die sich spektral mitunter kaum unterscheiden.

Ungenauigkeiten können sich auch daraus ergeben, dass ein Bedeckungstyp – je nach Nutzungsart beziehungsweise Funktion – mitunter versiegelte und/oder unversiegelte Flächen repräsentiert. Mit den in dieser Studie verwendeten multispektralen Satellitenbildern und der angewandten Methode besteht nur die Möglichkeit die Bedeckung an der Oberfläche zu beschreiben. So werden vegetationsbedeckte Tiefgaragen oder Gebäude mit begrünten Dächern als Grünfläche bzw. unversiegelte Fläche ausgewiesen. Somit wird die versiegelte Fläche im Untergrund nicht erfasst.

Aus den zuvor dargelegten Limitierungen der fernerkundungsbasierten Erhebung von Versiegelungs-Informationen geht hervor, dass der nachfolgend beschriebene Ansatz sämtliche vegetationsbedeckten Areale als unversiegelt erfasst – ebenso wie Wasserflächen –, während Asphalt-, Dach- und Betonflächen sowie einige spektral ähnliche Bodentypen als versiegelt detektiert werden. Da die Auswertung durch die Integration der ATKIS-Daten (vgl. Abschnitt 2.1.3) jedoch auf Siedlungs- und Verkehrsflächen fokussiert wird, dürfte die Ausweisung unbedeckter Böden als versiegelte Fläche nur in sehr geringem Umfang erfolgen. Hinzu kommt, dass es sich bei solchen Flächen häufig um stark verdichtete Areale handelt – zum Beispiel um Abstellflächen gewerblicher oder industrieller Betriebe.

Zur Veranschaulichung der vorangegangenen Ausführungen sind im Folgenden einige Abbildungen aufgeführt, die unterschiedlich stark versiegelte Areale in der Stadt Würzburg zeigen. Orange hinterlegt wird dabei jeweils ein Ausschnitt definiert, der die von einem Bildpixel einer Landsat-Aufnahme abgedeckte Fläche symbolisiert. Im Falle von Abb. 6A ist dabei ein Areal innerhalb des Ringparks von Würzburg aufgeführt, das aufgrund des dichten Baumbestands und der geräumigen Grasflächen im Landsat-Bildpunkt als unversiegelt erscheint.



Abb. 6: Räumliche Abdeckung eines Landsat-Pixels am Beispiel von Luftaufnahmen der Stadt Würzburg. Die obere Bildzeile zeigt jeweils eine Bodenansicht des betreffenden Landsat-Bildpunktes (oranges Quadrat), während das in der unteren Zeile dargestellte Luftbild die Ansicht aus der Vogelperspektive verdeutlicht. Im oberen Teil der Abbildung (A) ist ein Ausschnitt zu sehen, der in der nachfolgend beschriebenen, satellitenbasierten Analyse als unversiegelt ausgewiesen wird. Der mittlere Ausschnitt (B) zeigt hingegen ein teilversiegeltes Areal, während das Bildelement im untersten Teil (C) in der Landsat-Aufnahme als vollversiegelt klassifiziert wird.

Der in Abb. 6B gezeigte Ausschnitt des so genannten „Oberen Frauenlandes“ ist ein in südwestlicher Richtung direkt an den Ringpark angrenzender Stadtteil, in dem Einzelhausbebauung dominiert. Größere Abstände zwischen den einzelnen Häusern, die von Grünanlagen und Bäumen gesäumt sind, bestimmen das Bild. In dieser Lage wird für das aufgezeigte Landsat-Pixel ein Versiegelungsgrad von

knapp 50 % ausgewiesen. Dabei ist im Luftbild gut zu erkennen, dass insbesondere Baumkronen und Schattenwurf die vollständige Erfassung versiegelter Flächen erschweren.

Als hoch versiegelt wird hingegen der Bildpunkt in Würzburg Sanderau erfasst (vgl. Abb. 6C). Innerhalb der vorwiegend drei- bis fünfgeschossigen Blockbebauung aus dem späten 19. und frühen 20. Jahrhundert finden sich kaum Grünflächen und die Hinterhöfe sind meist gepflastert oder asphaltiert.

Entwickelte Methodik

Kernelement des fernerkundlichen Ansatzes zur Erfassung von Versiegelungsgraden ist eine vom Lehrstuhl für Fernerkundung am Geographischen Institut der Julius-Maximilians-Universität Würzburg im Kontext des REFINA-Projektes „Entwicklung und Evaluierung eines fernerkundungsbasierten Flächenbarometers als Grundlage für ein nachhaltiges Flächenmanagement“ konzipierte Methodik, deren Ablaufschema in Abb. 7 vereinfacht illustriert wird (vgl. REFINA, 2007).

Die zu Grunde liegende Technik beruht im Wesentlichen auf einem lern- und generalisierungsfähigen Algorithmus zur Bestimmung des Versiegelungsgrades auf der Basis spektraler Informationen aus Satellitendaten. Das Lernen der Zusammenhänge zwischen Versiegelungsgrad und spektralen Reflektanzen beruht auf automatisch generierten Trainingsgebieten und mündet in einer Zusammenfassung der gewonnenen Informationen in einem mathematischen Modell (vgl. Abb. 7). Das generierte Regressionsmodell dient nachfolgend zur Vorhersage der Versiegelungswerte für die gesamte Satellitenaufnahme.

Der in der linken Hälfte der Abb. 7 dargestellte Prozessablauf kommt nur dann in vollem Umfang zum Tragen, wenn Trainingsdaten für diese Landsat-Szene zur Verfügung stehen. Sollten keine höchstauflösenden Datensätze und somit keine Trainingsdaten verfügbar sein, kann alternativ auf ein Modell aus einer entsprechenden Bibliothek zurückgegriffen werden, die auf Grundlage von Bilddaten anderer Regionen oder Aufnahmezeitpunkte angelegt wurde (vgl. Abb. 7). Grundsätzlich ist es jedoch auch denkbar, als Trainingsdaten hoch aufgelöste Referenzkartierungen – etwa auf der Basis von Luftbildern erstellte Versiegelungskarten – zu nutzen. Eine abschließende Validierung der generierten Versiegelungsdaten bewertet die Güte und Belastbarkeit des generierten Modells. Die dabei gewonnenen Informationen können optional nochmals zu dessen Feinjustierung genutzt werden.

Algorithmische Grundlage für das Lernen und Vorhersagen bilden so genannte Support Vector Machines (SVM) die im Deutschen als „Stützvektormaschinen“ bezeichnet werden und eine Form der überwachten Klassifikation darstellen (CHANG UND LIN, 2001, HSU ET AL., FAN ET AL. 2005). Diese Klasse von Algorithmen bildet eine Teilklasse der statistischen Lerntheorie (VAPNIK, 1995, VAPNIK, 1998). Sie zeichnen sich durch die Fähigkeit aus, neben der Minimierung des zu erwartenden empirischen Risikos bei der Schätzung unbekannter Daten (strukturelle Risikominimierung) ebenso die Komplexität der zugrunde liegenden Generalisierungsfunktion zu berücksichtigen (SMOLA UND SCHÖLKOPF, 1998). Dabei können sowohl lineare als auch nicht-lineare Zusammenhänge in einem separaten Lernprozess trainiert werden. Durch diese Vorgehensweise – Training und Anwenden des erlernten Wissens – stellen die SVM eine Form der überwachten Klassifikation dar. Bei der Modellbildung mittels einer geringen Anzahl bekannter Versiegelungswerte werden dabei die Zusammenhänge zwischen dem Merkmal „Versiegelungsgrad“ und den spektralen Reflektionswerten der verwendeten Satellitendaten erlernt und in einem Regressionsmodell abgebildet. Um dieses Modell im Kontext weiterer Klassifizierungen nutzen zu können, wird es in Form einer Datei gesichert. Die Trainingsmethode als solche kann durch die Variation verschiedener Trainingsparameter an beliebige Eingangsdaten, beziehungsweise deren spezifische Eigenschaften, angepasst werden. Um die zuvor eingehend dargelegte Methodik möglichst anwenderfreundlich umzusetzen, wurde ein bereits als Prototyp am Lehrstuhl für Fernerkundung entwickelter Ansatz für eine leicht zu bedienende Programmoberfläche verwendet.

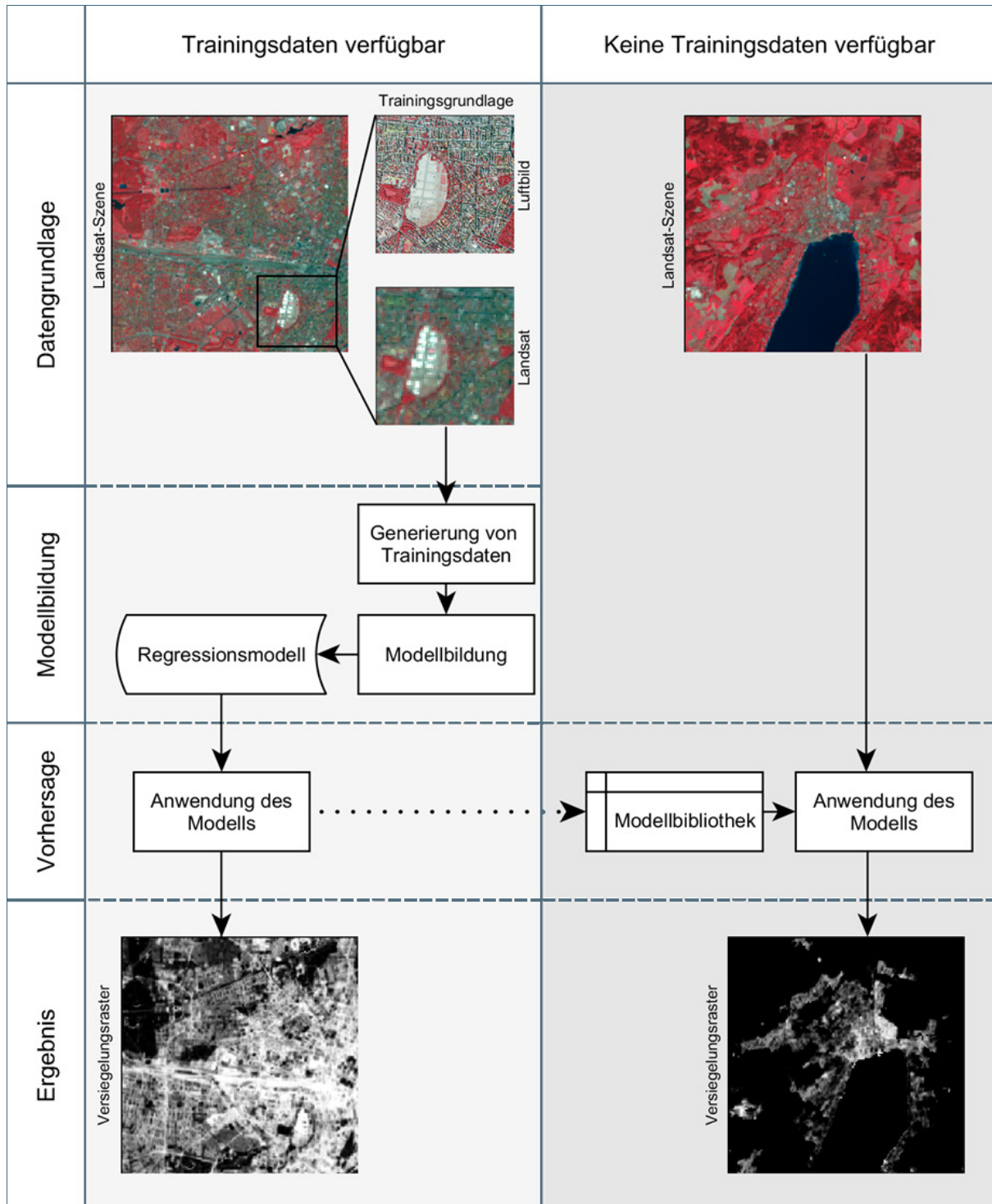


Abb. 7: Ablaufschema zur Modellierung der Flächenversiegelung. Sofern Trainingsdaten – im Falle dieser Studie höchstauflösende Luftbilder aus der Bayernbefliegung – verfügbar sind, verläuft der Vorhersageprozess zur Erhebung der Versiegelung nach dem in der linken Bildhälfte abgebildeten Schema. Zunächst erfolgen auf der Grundlage eines räumlich begrenzten Areals das Training der Zusammenhänge zwischen Versiegelungsgrad und spektralen Reflektanzen und die daraus resultierende Generierung eines Regressionsmodells (Modellbildung). Anschließend wird dieses mathematische Modell zur Vorhersage der Versiegelungsgrade im gesamten Landsat-Bilddatensatz eingesetzt. Im rechten Teil ist der Prozessablauf dargestellt, wenn keine Trainingsdaten verfügbar sind. Hier entfällt die Modellbildung und zur Vorhersage wird auf bereits erstellte Modelle aus einer Modellbibliothek zugegriffen.

Um die Bestimmung idealer Modellparameter zu ermöglichen, wurde zudem eine spezielle Automatisierungsprozedur entwickelt, die über eine iterative Variation der Modellparameter nach der besten

Übereinstimmung zwischen modellierten Versiegelungswerten und den entsprechenden Referenzwerten des Trainingsdatensatzes sucht.

Eine besondere Bedeutung fällt ferner der Genauigkeit der Trainingsdaten zu. Durch überwachtetes Lernen muss aus ihnen ein generalisierungsfähiges Modell extrahiert werden, wobei der Versiegelungsgrad das zu erlernende Merkmal darstellt. Da eine manuelle Auswahl von Trainingsflächen mit hohem Personal- und Zeitaufwand verbunden ist, wurde wiederum ein Ansatz konzipiert, der die erforderlichen Trainingsinformationen – d.h. räumlich möglichst hoch aufgelöste Daten über versiegelte und unversiegelte Flächen – halbautomatisiert generiert.

Dieses Verfahren zur Auswahl von Trainingsgebieten basiert auf einer Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) auf der Grundlage der Luftbilder (ALBERTZ, 2001, RICHARDS UND JIA, 1999). Dieser Index berechnet sich aus den jeweiligen Reflexionsgraden der Aufnahmekanäle „Rot“ und „Nahes Infrarot“ (NIR). Dabei gilt:

$$NDVI = \frac{(NIR - Rot)}{(NIR + Rot)} \quad (2.1)$$

Im Allgemeinen stellt der NDVI ein Maß für die photosynthetische Aktivität dar, mit dem Aussagen über die Dichte und den Alterungszustand der Vegetation getroffen werden können. Daher lässt sich dieser Index über die Definition geeigneter Schwellenwerte zur Identifizierung vegetationsbestandener sowie vegetationsloser Areale einsetzen. Dabei sind vegetationsbedeckte Flächen – bis auf wenige Ausnahmen, wie etwa begrünte Dächer, als unversiegelt anzusehen. Zur genaueren Differenzierung der vegetationslosen Areale in die Kategorien „Wasser“, „Boden“ und „Versiegelt“ werden zusätzlich Schwellenwerte für den spektralen Reflexionsgrad des Nahen Infrarot (NIR) verwendet (vgl. Abb. 8). Dieser Schritt ermöglicht insbesondere die Trennung von Wasser und Versiegelung, da Wasser in diesem Spektralkanal eine weitaus geringere Reflexion aufweist.

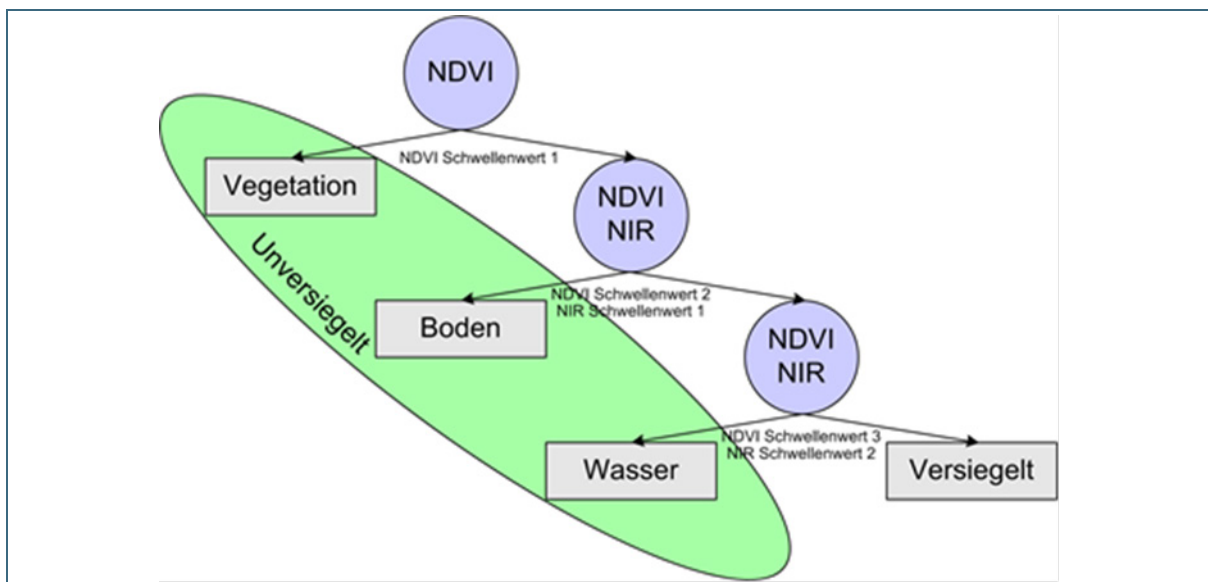


Abb. 8: Hierarchischer Entscheidungsbaum zur automatisierten Generierung einer Versiegelungsmaske auf der Basis von Luftbildern aus der Bayernbefliegung. Die obere Stufe wird anhand von NDVI-Schwellenwerten, die untersten beiden auf Basis des NDVI und des Nahen Infrarot (NIR) extrahiert. Nachfolgend werden die drei Klassen Vegetation, Boden und Wasser als unversiegelt zusammengefasst. Die verwendeten Schwellenwerte werden für die einzelnen Luftbilder individuell angepasst.

Mit Hilfe dieser hierarchischen Klassifikation lassen sich letztlich die Klassen Vegetation, Boden, Wasser und Versiegelung extrahieren, wobei die drei ersteren zur Kategorie „Unversiegelte Fläche“ zusammengefasst werden.

In einem nachfolgenden Schritt erfolgt die räumliche Aggregation der generierten Trainingsdaten – d.h. der im Luftbild klassifizierten Pixel – auf die Pixelaufösung der auszuwertenden Landsat-Bilder des Jahres 2015. Dabei setzt sich ein Landsat-8-Pixel aus jeweils $75 * 75$ Luftbild-Pixeln zusammen. Dieser Schritt ist aus technischen Gründen erforderlich, um den Trainingsprozess respektive die Generierung der Regressionsmodelle zu ermöglichen. Der Versiegelungsgrad jedes Landsat-Pixels errechnet sich aus dem Quotienten zwischen der Summe aller als versiegelt klassifizierten Luftbild-Pixel durch die Gesamtanzahl aller Luftbild-Bildpunkte pro Landsat-Pixel – also 5.625 Bildpunkte. Eine schematische Darstellung der Arbeitsabläufe bis hin zur Erstellung der Trainingsdaten illustriert Abb. 9 am Beispiel eines Ausschnittes der Theresienwiese in München.

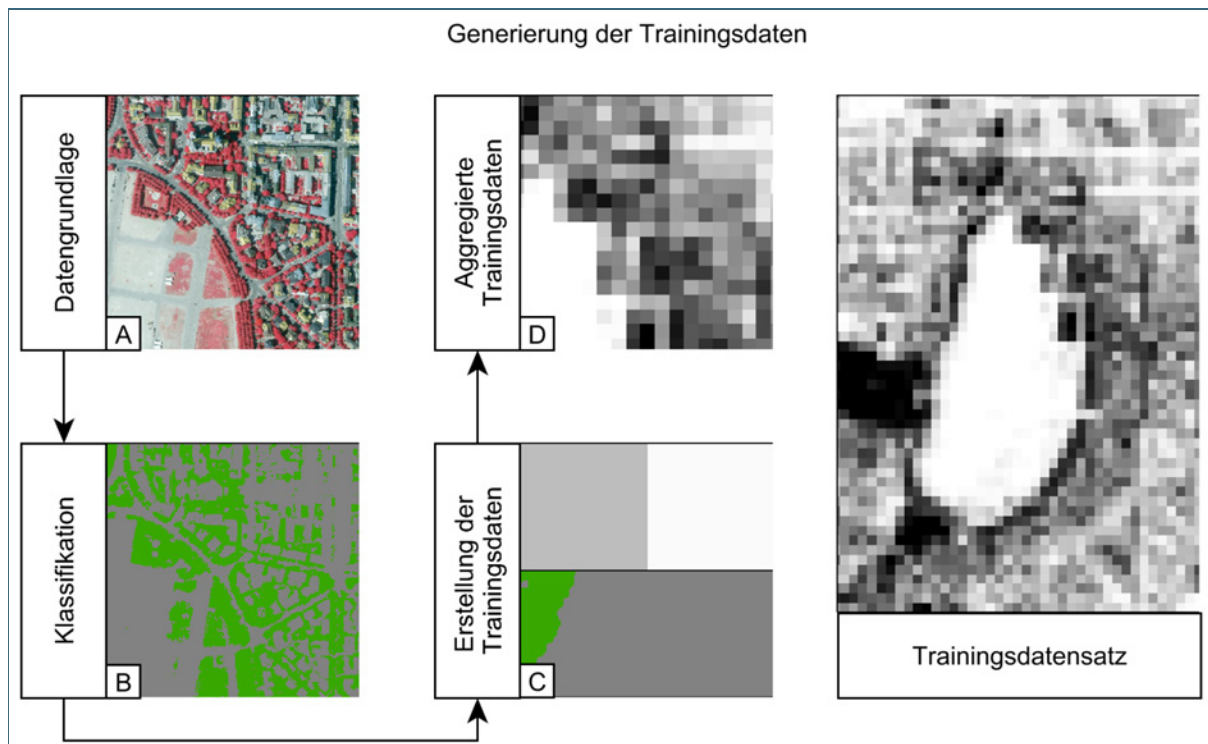


Abb. 9: Schematische Darstellung zur Generierung der Trainingsdaten. Zu Beginn wird auf der Basis eines Luftbildmosaiks (A) eine hierarchische Klassifikation durchgeführt, die in der Generierung einer Binärmaske der versiegelten (grau) und unversiegelten (grün) Areale resultiert (B). Über die Aggregation der 0,4-Meter Pixel dieser Binärmaske auf die 30-Meter-Auflösung der Landsat-Szene (C) werden abschließend die eigentlichen Trainingsdaten erstellt (D).

2.2 Ergänzung des Versiegelungsrasters durch Vektordaten

Zur Vervollständigung der Versiegelungsinformation werden mit Hilfe entsprechender ATKIS-Vektordaten jene linienhaften Infrastrukturelemente ergänzt, die als versiegelte Areale anzusehen sind und die in den Satellitenaufnahmen aufgrund ihrer geringen Breite nicht identifiziert werden können. Dazu zählt insbesondere die Objektgruppen 42000 (Verkehr) (siehe Tab. 5).

Um eine räumliche Überschneidung mit den bereits im Rahmen der Satellitenbildauswertung verwendeten flächenhaften Siedlungs- und Verkehrselementen – und damit die doppelte Berücksichtigung im Kontext der eigentlichen Versiegelungsanalyse – zu vermeiden, müssen jedoch in einem Vorverarbeitungsschritt zunächst sämtliche Linienelemente entfernt werden, die innerhalb der flächenhaften Siedlungs- und Verkehrsareale liegen (vgl. Abb. 10).

Tab. 5: ATKIS-Objektarten der linienhaften Infrastrukturelemente. Diese Objektarten können in Satellitenaufnahmen auf Grund ihrer geringen Breite nicht identifiziert werden.

Verkehr 42000

| | Kennung | Name |
|--------------|--------------|------------------------|
| Ebene | VER01 | Straßenverkehr |
| | 42001 | Straßenverkehr |
| | 42008 | Fahrwegachse |
| Ebene | VER03 | Schienerverkehr |
| | 42010 | Bahnverkehr |

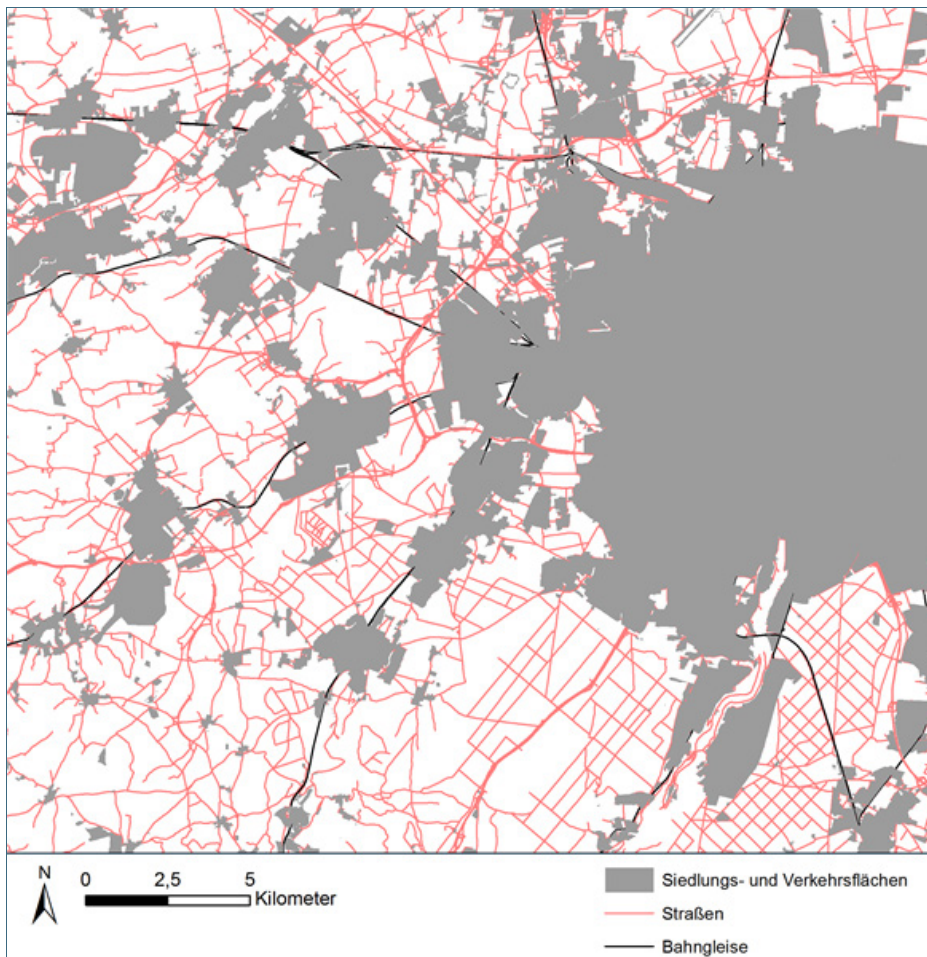


Abb. 10: Darstellung der Siedlungs- und Verkehrsfläche aus ATKIS. Um eine doppelte Berücksichtigung der linienhaften Verkehrselemente zu vermeiden, werden diese lediglich außerhalb der flächenhaften ATKIS-Areale verwendet.

Darüber hinaus wird der neue Datensatz um eine Attributspalte ergänzt, die der jeweiligen Objektart eine durchschnittliche Breite und Versiegelung zuweist. Als Grundlage für die Straßen dienen Daten der Autobahndirektion Südbayern (ABDSB), welche die durchschnittliche Fahrbahnbreite der verschiedenen Straßenarten definieren. Dieser Datensatz wurde für die vorliegende neue Versiegelungsstudie aktualisiert. Dabei kann für diese Objektarten ein Versiegelungsfaktor von Eins angesetzt werden. Die entsprechenden Werte für Gleiskörper liegen bei 3,2 Metern für die durchschnittliche Breite von einspurigen Gleiskörpern beziehungsweise 7,0 Metern für zweispurige Anlagen. In Abstimmung mit dem LfU wurde der durchschnittliche Versiegelungsgrad von Gleiskörpern mit 50 % angesetzt, ein Wert der bei modernen Gleiskörpern aufgrund des Unterbaus auch überschritten wird (vgl. Tab. 6). Da diesbezüglich jedoch keine detaillierten Informationen vorliegen, wurde für die Berechnungen eine eher konservative Schätzung angesetzt.

Tab. 6: Aktualisierte durchschnittliche Breite und Versiegelung der linienhaften ATKIS-Infrastrukturelemente. Diese Informationen werden ergänzend zur Berechnung der versiegelten Fläche herangezogen.

| Objektart | durchschnittliche Breite [m] | Versiegelungsfaktor |
|--------------------------|------------------------------|---------------------|
| Autobahnen | 26,3 | 1 |
| Bundesstraßen | 10,1 | 1 |
| Staats- und Kreisstraßen | 6,8 | 1 |
| Gemeindestraßen | 6,5 | 1 |
| Hauptwirtschaftswege | 4,5 | 1 |
| Gleiskörper (Einspurig) | 3,2 | 0,5 |
| Gleiskörper (Zweispurig) | 7,0 | 0,5 |

2.3 GIS-basierte Auswertung der Versiegelungsinformation

Das Endprodukt der zuvor erläuterten Methodik ist ein Datensatz, der den Versiegelungsgrad auf der Grundlage der flächenhaften Siedlungs- und Verkehrselemente sowie der vektoriiellen Informationen zu sämtlichen linienhaften Infrastrukturelementen erfasst. Diese Informationen sollen nun auf administrative sowie raumstrukturelle Einheiten aggregiert und mit statistischen Informationen verschnitten werden. Auf diese Weise können dann auf Gemeindebasis der

- Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche, sowie
- die versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner

ermittelt und visualisiert werden. Diese Kenngrößen werden anschließend auf Kreis-, Bezirks- und Landesgrenzen, die Planungsregionen sowie die Gebietskategorien des LEP aggregiert.

Der „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen“ auf Gemeindeebene wird anhand des Versiegelungsrasters der fernerkundlichen Methodik berechnet. Hierzu wird über einen GIS-Verschnitt mit den administrativen Gemeindegrenzen jedes Bildelement eindeutig einer Gemeinde zugeordnet. Da jedes Bildelement die gleiche Flächengröße repräsentiert, kann nun anhand einer Mittelwertbildung über alle Bildelemente einer Gemeinde der Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen auf Gemeindeebene berechnet werden.

Zur Berechnung der „Versiegelten Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ auf Gemeindeebene müssen die entsprechenden Daten aus der Flächenstatistik über eine tabellarische Verschneidung in die Analyse eingebunden werden. Die verwendeten Daten enthalten Informationen über die Siedlungs- und Verkehrsfläche sowie die Bevölkerungszahl pro Gemeinde. Über die Verschneidung der Satellitendaten mit den Vektorgeometrien und den statistischen Erhebungen stehen alle zur Beschreibung der Versiegelungssituation benötigten Informationen auf Gemeindeebene zur Verfügung. Die Berechnung der „Versiegelten Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ erfolgt, indem der auf den ATKIS-Flächen ermittelte Versiegelungsgrad der Gemeinden mit der für die Gemeinden aus der oben genannten Statistik entnommenen Siedlungs- und Verkehrsfläche multipliziert und dann durch die Einwohnerzahl dividiert wird (vgl. Formel 2.2). Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass der gemittelte Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen aus ATKIS auch für die Grundfläche der statistischen Erhebung zur Siedlungs- und Verkehrsfläche repräsentativ ist – auch wenn die zu Grunde liegende Gesamtfläche der beiden Datengrundlagen leicht variieren dürfte.

$$\text{Versiegelte Fläche pro Einwohner [m}^2\text{]} = \frac{(\text{Versiegelungsgrad [\%]} * \text{SuV [m}^2\text{]})}{(\text{Einwohner})} \quad (2.2)$$

Die Generalisierung dieser Informationen auf der Basis höherer räumlicher Einheiten wie etwa Landkreise, Regierungsbezirke, Planungsregionen oder Gebietskategorien des LEP wird über eine GIS-

basierte Aggregation der Gemeindedaten auf die gewählte Ebene realisiert. Die Zuordnung der gemeindebezogenen Werte auf die höheren, administrativen oder raumstrukturellen Einheiten erfolgt über eine Datenbankverschneidung.

2.4 Validierung

Die Untersuchungen zur Robustheit der Methodik sowie Güte der modellierten Versiegelungsdaten sind essentieller Bestandteil einer objektiven Bewertung des angewendeten Ansatzes. Eine Validierung liefert dabei zum einen wertvolle Informationen zur optimalen Kalibrierung der fernerkundlichen Modellierung und zum anderen ist sie eine zwingende Voraussetzung für die quantitative und qualitative Bewertung der berechneten Versiegelungsdaten.

In Bezug auf die Kalibrierung der fernerkundlichen Modellierung gilt es, die Zwischenschritte im Rahmen der Prozessierungskette zu bewerten, um auf diese Weise potentielle Fehlerquellen zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Güte der Versiegelungsmodellierung beschreiben zu können. Diese Informationen sollen primär zur Optimierung des Modellierungsverfahrens genutzt werden. Die Güte der generierten Versiegelungsdaten soll über einen direkten Abgleich mit objektiven Referenzdaten – d.h. Informationen beziehungsweise Datensätzen, welche die tatsächlichen Gegebenheiten bezüglich der Versiegelung exakt wiedergeben – quantifiziert werden.

Im nachfolgenden Unterkapitel werden zunächst die vorliegenden Referenzdaten sowie deren Aufbereitung thematisiert. Im Anschluss wird die Methodik zur Validierung der Zwischen- und Endprodukte eingehend erörtert.

2.4.1 Referenzinformationen

Ein Vergleich der generierten Zwischen- und Endprodukte mit geeigneten Referenzdaten, die die tatsächliche Situation widerspiegeln, ist zur quantitativen Bewertung der Ergebnisse unerlässlich. Dabei muss zwischen Referenzdaten, die sich zur absoluten Validierung der Resultate eignen und jenen, die lediglich eine relative Bewertung zulassen, unterschieden werden. Absolute Referenzdaten umfassen Informationen beziehungsweise Datensätze, welche die tatsächlichen Gegebenheiten bezüglich der Versiegelung räumlich und inhaltlich präzise wiedergeben. Sie stellen somit einen unabhängigen Vergleichsdatensatz dar, der eine exakte und objektive Überprüfung der Ergebnisse gewährleistet.

Im Gegensatz dazu können auf der Grundlage von relativen Referenzinformationen keine belastbaren, quantitativen Bewertungen vorgenommen werden. Dies liegt vornehmlich darin begründet, dass die entsprechenden Referenzdaten ebenfalls nur auf einer Schätzung der realen Situation beruhen. In diesem Fall muss sich die Validierung auf Plausibilitätsprüfungen durch vergleichende Gegenüberstellungen der Ergebnisse beschränken.

Referenzdaten zur absoluten Validierung

Im Rahmen dieser Studie ist die Einbindung von Referenzdaten, die in der letzten Studie aus Daten zur Abwassergebührenerhebung abgeleitet worden sind und sich zur absoluten Validierung des entwickelten Verfahrens eigneten, aus zeitlichen Gründen nicht realisierbar gewesen.

Im Rahmen der Bewertung der automatisch erstellten Luftbild-Binärmasken (vgl. Abschnitt 2.1.2) wurden die sehr hochaufgelösten Luftbilder als absolute Referenzdaten herangezogen. Dieser Ansatz ist in Abschnitt 2.4.2 eingehend dargelegt. Die Generierung weiterer Referenzdaten – etwa über eine manuelle Auswertung von Luftbildern beziehungsweise höchstaflösenden Satellitendaten – ließ sich innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens der Studie auf Grund des damit verbundenen Zeit- und Kostenaufwandes ebenfalls nicht realisieren. Aus diesem Grund wurde während der Modellierung des Versiegelungsgrades der aus den Luftbildern abgeleitete aggregierte Versiegelungsgrad in einen

Trainings- und einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. Der Validierungsdatensatz wurde bei der Validierung der modellierten Versiegelungsinformation als Referenz verwendet.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der aufgeführte Referenzdatensatz aufgrund der ihr zu Grunde liegenden Annahmen und Schätzungen ebenfalls mit Fehlertoleranzen behaftet ist. Demzufolge kann lediglich die Plausibilität der modellierten Versiegelungsinformationen bewertet werden.

2.4.2 Methodische Umsetzung

Die Validierung verfolgt zwei methodisch unterschiedliche Zielsetzungen, die im Folgenden näher erläutert werden. Zum einen liefert sie die nötigen Informationen zur optimalen Kalibrierung der fernerkundlichen Modellierung. Zum anderen ist sie eine zwingende Voraussetzung für die quantitative und qualitative Bewertung der berechneten Versiegelungsdaten.

Validierung der Luftbild-Klassifizierung

Die Erstellung der Binärmasken auf der Grundlage einer automatisierten Klassifizierung der Luftbild-Aufnahmen – sprich der Kartierung versiegelter und unversiegelter Areale – stellt den ersten Schritt in der Prozessierungskette zur Erhebung der Flächenversiegelung dar (vgl. Abschnitt 2.1.2). Fehlklassifikationen der Daten an diesem Punkt wirken sich nachteilig auf die Güte der auf dieser Grundlage trainierten Modelle aus. Somit beeinflussen Fehler in den Luftbild-Binärmasken die weiteren Prozessierungsschritte nachhaltig. Aus diesem Grunde ist es von besonderer Wichtigkeit, Informationen über die Qualität dieser Kartierung zu erhalten.

Dazu wird zur Kalkulation der thematischen Genauigkeit der Luftbild-Klassifizierung eine in der Fernerkundung gängige Methode der Genauigkeitsanalyse eingesetzt. Dazu werden in einem ersten Schritt 300 zufallsverteilte Referenzpunkte pro Untersuchungsgebiet definiert, auf deren Grundlage die Ergebnisse der Klassifizierung manuell mit der realen Situation abgeglichen werden. Als Referenzdatensatz dienen die sehr hochaufgelösten Luftbilder (vgl. Abschnitt 2.4.1). In Form einer so genannten Fehlermatrix werden daraufhin jeweils die richtig oder falsch erkannten Referenzpunkte eingetragen (RICHARDS UND JIA, 1999, JENSEN, 2005). Diese Fehlermatrizen geben Auskunft über den absoluten und prozentualen Anteil der falsch beziehungsweise korrekt klassifizierten Pixel. Dabei werden grundsätzlich die drei Maße „User Accuracy“, „Producer Accuracy“ sowie „Total Accuracy“ unterschieden. Die „User Accuracy“ bezeichnet die Anzahl der korrekt klassifizierten Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse über den Algorithmus insgesamt zugewiesen wurden. Sie gibt also an, wie viel Prozent der Pixel, die einer Klasse zugeordnet wurden auch wirklich zu dieser Klasse gehören. Die „Producer Accuracy“ hingegen berechnet sich aus der Anzahl der korrekt klassifizierten Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse in der Referenz angehören. Sie zeigt dementsprechend, wie viele Pixel, die einer bestimmten Klasse tatsächlich angehören, auch über den Algorithmus zu dieser Klasse zugeteilt werden. Die „Total Accuracy“ beschreibt letztlich den Anteil der korrekt klassifizierten Bildpunkte aller Klassen im Verhältnis zur Gesamtheit der betrachteten Pixel (RICHARDS UND JIA, 1999, JENSEN, 2005).

Zur Validierung der modellierten Versiegelungswerte, werden wie bereits erwähnt, die aus den Luftbildern gewonnenen Versiegelungsinformationen verwendet (vgl. Abschnitt 2.4.1). Mittels eines statistischen Vergleichs zwischen dieser Referenz und der modellierten Versiegelungswerte werden anschließend ausgewählte Fehlerindizes ermittelt. Dabei werden auf der Grundlage von allen vorhandenen Bildpunkten (abzüglich der Trainingspunkte) die mittlere und die mittlere absolute Abweichung zwischen der Referenz und des Ergebnisses berechnet.

Validierung des Versiegelungsrasters

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, kann die Güte des über die fernerkundliche Auswertung gewonnenen Versiegelungsrasters anhand des Validierungsdatensatzes quantifiziert werden. Zu diesem Zweck werden anhand der Referenz verschiedene statistische Gütemaße berechnet, die eine Quantifizierung der Qualität des Versiegelungsrasters erlauben.

So wird ein Differenzbild erzeugt, das sich über die pixelweise Subtraktion des Versiegelungsrasters vom zugehörigen Referenzdatensatz der sieben Untersuchungsgebiete, für die die Luftbilder vorliegen, berechnet. Auf dieser Basis lassen sich die mittlere Abweichung (Mittelwert des Subtraktionsbildes) sowie die absolute mittlere Abweichung (Betrag der mittleren Abweichung zwischen Modellierung und Referenz) berechnen.

Dabei gilt für die mittlere Abweichung

$$\text{mittlere Abweichung} = \sum V_1(i, j) - V_2(i, j) \quad i = 0, \dots, m - 1; j = 0, \dots, n - 1 \quad (2.3)$$

wobei m und n gleich der Bildgröße der Versiegelungskartierungen V_1 (modellierter Versiegelungsgrad) und V_2 (Validierungsdatensatz) sind. Die mittlere absolute Abweichung berechnet sich aus

$$\text{mittlere absolute Abweichung} = \frac{1}{m * n} \sum |V_1(i, j) - V_2(i, j)| \quad (2.4)$$

$$i = 0, \dots, m - 1; j = 0, \dots, n - 1$$

wobei m und n wiederum gleich der Bildgröße der Versiegelungskartierungen V_1 und V_2 sind.

Die mittlere und mittlere absolute Abweichung stellen den mittleren bzw. mittleren absoluten Abstand der einzelnen Datenwerte vom arithmetischen Mittelwert dar. Anhand dieser Streuungsmaße kann die durchschnittliche Streuung relativ einfach in der ursprünglichen Einheit ermittelt und interpretiert werden (BAHRENBERG, 2010). Bei der mittleren Abweichung gleichen sich negative und positive Differenzen aus. Durch die Verwendung absoluter Datenwerte wird dies vermieden.

Zu letzterer wird darüber hinaus die Standardabweichung ausgegeben. Ferner werden der Maximal- und Minimalwert der Abweichung berechnet. Mit Blick auf die spätere Auswertung und Visualisierung der Daten liefern der mittlere absolute Fehler und dessen Standardabweichung wichtige Informationen hinsichtlich der optimalen Klasseneinteilung (vgl. Kapitel 4 bzw. Unterkapitel 3.2). So erscheint es beispielsweise bei einem mittleren absoluten Fehler von 10 % und einer Standardabweichung von 15 % wenig sinnvoll, die Versiegelungsinformationen in 10 Klassen – d.h. 10-%-Schritte pro Kategorie – einzuteilen, denn somit würde der Eindruck einer Genauigkeit erweckt, die in diesem Fall nicht zu gewährleisten wäre.

Im Rahmen der Validierung werden die Werte des Versiegelungsrasters daher auf der Grundlage des mittleren absoluten Fehlers und dessen Standardabweichung in eine definierte Anzahl an Klassen unterteilt. Auf Basis dieses quantifizierten beziehungsweise kategorisierten Versiegelungsrasters wird – vergleichbar der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Validierung der Luftbild-Binärmasken – eine Fehlermatrix erstellt. Dabei wird jede Kategorie der quantifizierten Daten als eigene Klasse angesehen. Das heißt bei einer Unterteilung des berechneten Siedlungsrasters in 10-%-Schritten liegen zehn Klassen vor, wobei ein Versiegelungswert von fünf Prozent der Klasse „Eins“ zugeordnet würde. Zur Berechnung der Fehlermatrix wird die Klassenzuteilung jedes Pixels des Versiegelungsrasters mit dem Wert des entsprechend kategorisierten Referenzdatensatz der jeweiligen Stadt abgeglichen. Bei einer solchen statischen Betrachtung eines kategorisierten, ursprünglich jedoch kontinuierlichen Datensatzes tritt allerdings das grundlegende Problem auf, dass die Bewertung auf künstlich gesetzten, diskreten Grenzen basiert. Weist etwa ein Pixel in der Modellierung einen Wert von neun Prozent auf

– und gehört damit der Klasse „Eins“ an (0 -10 %) –, während diesem Pixel im Referenzdatensatz ein Wert von elf Prozent und somit die Klasse „Zwei“ zugewiesen ist, wird dieses Bildelement bei der Erstellung der Fehlermatrix trotz der geringen Abweichung von lediglich zwei Prozent als falsch klassifiziert angesehen. Um die mit der Unterteilung in diskrete Klassen einhergehenden Effekte bei der statistischen Bewertung zu berücksichtigen, werden im Kontext der Berechnung der Total Accuracy für die einzelnen Klassen alle Werte als korrekt klassifiziert angesehen, die maximal eine Klasse ober- oder unterhalb der betrachteten Zielkategorie eingeordnet sind. Bei der Validierung der Klasse „Fünf“ des modellierten Versiegelungsrasters werden folglich alle Werte als korrekt klassifiziert eingestuft, die im Referenzdatensatz der Klasse „Vier“, „Fünf“ oder „Sechs“ angehören.

Tab. 7: Übersicht der statistischen Parameter zur Validierung des Versiegelungsrasters. Die Berechnungen basieren auf der Berechnung eines Differenzbilds zwischen modelliertem Versiegelungsgrad und Referenzdatensatz.

| Statistischer Parameter | Validierung | |
|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | Kontinuierlicher Datensatz | Kategorisierter Datensatz |
| Mittelwert | Ja | Ja |
| Mittelwert (absolut) | Ja | Ja |
| Minimum | Ja | Ja |
| Maximum | Ja | Ja |
| Standardabweichung | Ja | Ja |
| User Accuracy | Nein | Ja |
| Producer Accuracy | Nein | Ja |
| Total Accuracy | Nein | Ja |

3 Ergebnisse der fernerkundlichen Modellierung

Im vorangegangenen Kapitel wurde die methodische Umsetzung der Versiegelungskartierung ausführlich erläutert. Im folgenden Abschnitt sollen nun die erzielten Ergebnisse und deren Charakteristik umfassend dargelegt und diskutiert werden. Ein erster Schwerpunkt widmet sich zunächst den Ergebnissen der fernerkundlichen Modellierung, da diese die entscheidende Grundlage zur Kartierung der Versiegelungsinformation darstellen (vgl. Unterkapitel 2.1). Im Vordergrund steht hier die Quantifizierung der thematischen Genauigkeit der generierten Informationsprodukte.

Das Ergebnis der fernerkundlichen Modellierung (vgl. Abschnitt 2.1.3) ist ein bayernweites Versiegelungsraster, räumlich fokussiert über die flächenhaften Siedlungs- und Verkehrselemente aus ATKIS, mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern. Wie in Unterkapitel 2.1 dargelegt, wird zur Erstellung dieses Produktes eine umfassende Prozesskette durchlaufen. Die wichtigsten Zwischen- beziehungsweise Endprodukte dieses fernerkundlichen Teils der Prozessierungskette werden nachfolgend vorgestellt und erläutert.

3.1 Zwischenprodukte

Im Rahmen der fernerkundlichen Modellierung des Versiegelungsgrades werden drei wesentliche Zwischenprodukte generiert, auf denen letztlich die Berechnung des resultierenden Versiegelungsrasters basiert. Diese umfassen (1) die Luftbild-Binärmasken der versiegelten und unversiegelten Areale, (2) auf diesen Masken beziehungsweise Klassifizierungen aufbauende Trainingsdaten sowie (3) daraus abgeleitete Regressionsmodelle zur Transformation der Landsat-Spektralwerte in zugehörige Versiegelungsgrade.

Luftbild-Binärmasken und Trainingsdaten

Die aus einer automatisierten Klassifikation der Luftbild-Aufnahmen hervorgehenden Binärmasken der versiegelten beziehungsweise unversiegelten Areale bilden das erste Zwischenprodukt in der Prozessierungskette. Ein Beispiel für eine solche Binärmaske ist in Abb. 11 aufgeführt. In der oberen Reihe sind die Luftbild-Szene (A) sowie das entsprechende Areal der Landsat-Kachel (B) für einen Ausschnitt von Passau dargestellt. Die untere Reihe zeigt die Luftbild-Binärmaske (C) sowie die aus der räumlichen Aggregation dieser Maske resultierenden Trainingsdaten (D). Sowohl der Vergleich zwischen der Luftbildaufnahme und des Landsat-Ausschnitts als auch zwischen der Binärmaske und den Trainingsdaten zeigt die enormen Unterschiede in der Detailschärfe der Luftbild- und Landsat-basierten Datensätze.

Klar zu erkennen ist in Abb. 11 die exakte Wiedergabe der Siedlungsstrukturen in der Binärmaske (C). Sowohl Straßen als auch Gebäudekomplexe sind in ihrer Struktur und ihrem Verlauf klar zu identifizieren. Einzig schattige Bildbereiche werden mitunter nicht eindeutig klassifiziert. Innerhalb der abgeschatteten Flächen ist keine exakte Differenzierung der Bodenbedeckung möglich, da der spektrale Informationsgehalt dieser Areale deutlich eingeschränkt ist.

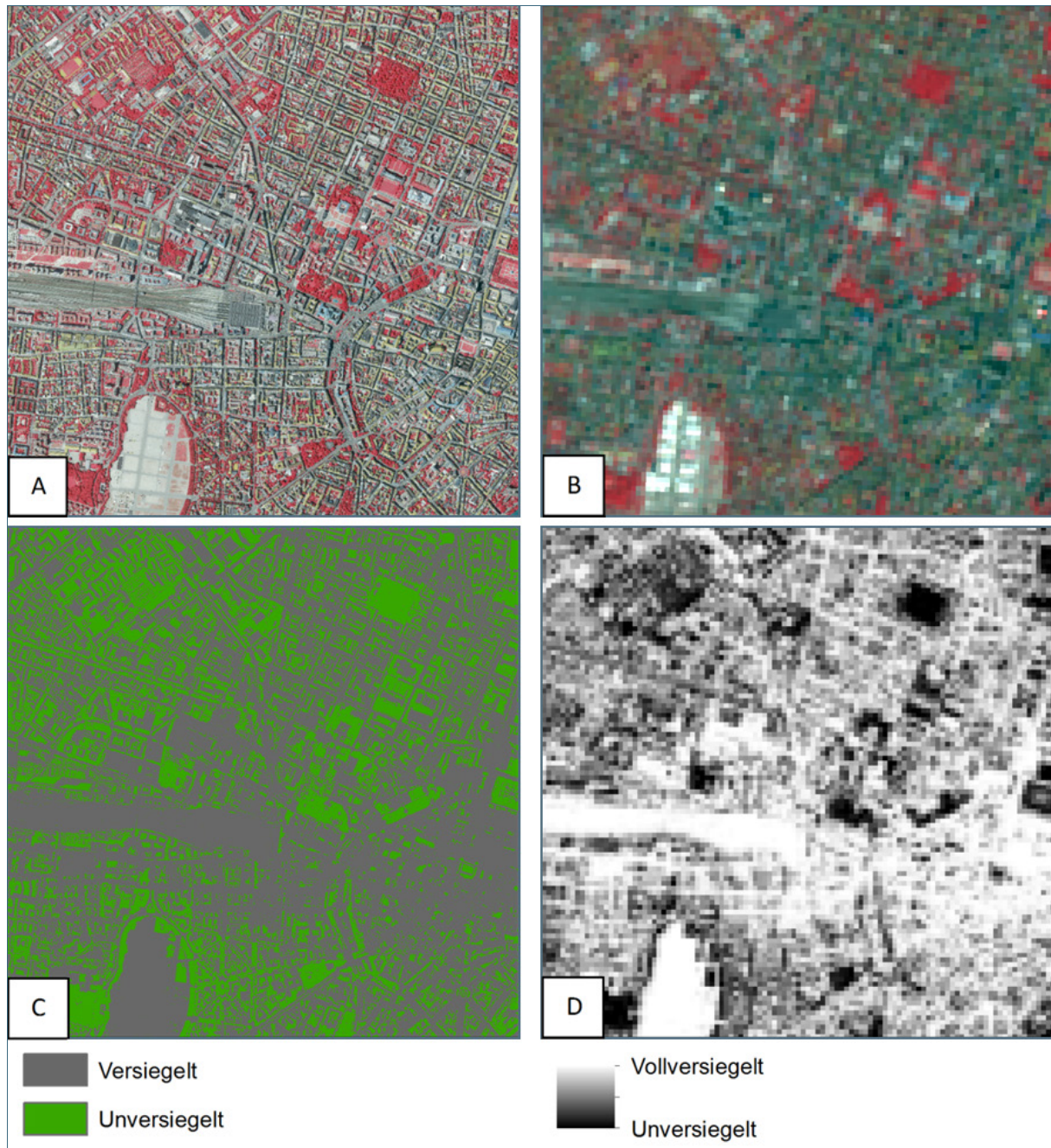


Abb. 11: Luftbild-Binärmaske und daraus erzeugter Trainingsdatensatz. Dargestellt ist ein identischer Ausschnitt der Luftbildaufnahme (A) und der Landsat-Szene (B) mittels einer Falschfarbkomposite (Infrarot, Rot, Grün) von München. Bild C zeigt die zugehörige Luftbild-Binärmaske, die automatisiert auf Basis der Luftbild-Szene erstellt wird. Das Ergebnis der räumlichen Aggregation der Binärmaske auf die Pixelgröße von 30 * 30 Meter der Landsat-Aufnahme ist in Bild D wiedergegeben. Dieser Datensatz (Trainingsdaten) bildet die Grundlage zur Berechnung des Regressionsmodells, welches die Beziehung zwischen den Spektralwerten der Landsat-Aufnahme und dem zugehörigen Versiegelungsgrad beschreibt.

Die Binärmasken liegen für die sieben Luftbildaufnahmen der Untersuchungsgebiete Aschaffenburg, Bayreuth, Kempten, München, Passau, Regensburg und Würzburg vor. Alle Masken konnten für das Training der Regressionsmodelle verwendet werden, da die Aufnahme aller Luftbilder in Sommermonaten erfolgte, bis auf das Untersuchungsgebiet Bayreuth, wo die Luftbilder im späten Frühling aufgenommen worden sind. Der Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder ist ausschlaggebend für die Klassifizierung der Vegetation.

Zur Bestimmung der Klassifikationsgüte der Binärmasken wurde über die Erstellung einer Fehlermatrix eine Validierung durchgeführt, deren grundlegende Methodik in Abschnitt 2.4.2 eingehend beschrieben wurde. Die Resultate dieser Genauigkeitsanalyse zeigen, dass die Klassifikationsgüte über alle Szenen hinweg lediglich geringen Schwankungen unterliegt. Für die Stadt Bayreuth kann mit einer thematischen Genauigkeit von 95 % die beste Übereinstimmung der Binärmaskierung mit den Gegebenheiten vor Ort erzielt werden. Mit 94 % erreichen die Klassifikationen der Luftbildaufnahmen der Städte Aschaffenburg und Passau ebenfalls eine hohe Genauigkeit. Selbst für die Stadt Regensburg, wo die geringste Güte zu verzeichnen ist, wird immer noch eine Genauigkeit von 89 % erreicht. Die mittels der Validierung quantifizierten Abweichungen zwischen den Luftbild-Trainingsdaten und der Referenz werden in den meisten Fällen wegen Abdeckungs- und Abschattungseffekten durch Bäume oder Gebäude in den Luftbildaufnahmen hervorgerufen. Insbesondere aufgrund der Überdeckung versiegelter Flächen durch Baumkronen ist in den Trainingsdaten generell eine Unterschätzung des Versiegelungsgrades zu verzeichnen (vgl. Abb. 12).



Abb. 12: Eingeschränkte Sichtbarkeit versiegelter Areale aufgrund von Überdeckungen durch Baumkronen und Schattenflächen. Dargestellt ist in die Luftbildaufnahme als Falschfarbkomposite. Deutlich zu erkennen sind die von Bäumen überdeckten oder von Baum- beziehungsweise Gebäudeschatten beeinträchtigten Straßen. Zu sehen ist die Umgebung südlich des Nordbads im Münchener Stadtteil Schwabing-West.

3.2 Versiegelungsinformation

Die Berechnung des Versiegelungsrasters erfolgt auf Basis der zuvor generierten Trainingsdaten und stellt den Kern der fernerkundlichen Prozessierungskette dar (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die letztlich verfolgte Strategie zur bayernweiten Berechnung des Versiegelungsrasters und die dabei erzielten Ergebnisse werden im Folgenden ausführlich dargelegt.

In Abschnitt 2.4.1 wurde bereits erläutert, dass die aggregierten Luftbild-Binärmasken als Referenz für eine Validierung und quantitative Bewertung des fernerkundlich erzeugten Versiegelungsrasters verwendet werden. Die folgenden Ausführungen zur Güte der abgeleiteten Versiegelungswerte basieren auf allen vorliegenden Referenzdatensätzen der sieben Untersuchungsgebiete.

3.2.1 Güte des modellierten Versiegelungsrasters

In Unterkapitel 3.1 wurde dargelegt, dass die Luftbild-Binärmasken der sieben Untersuchungsgebiete eine Klassifikationsgüte zwischen 89 und 95 % aufweisen. Entsprechend des in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Konzeptes basiert die Erstellung des Regressionsmodells – welches letztlich die Beziehung zwischen der Landsat-Spektralinformation und dem daraus resultierenden Versiegelungsgrad definiert – auf den Trainingsdaten, die durch eine Aggregation der Luftbild-Binärmasken ermittelt werden.

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die quantifizierten Abweichungen der Trainingsdaten die Qualität der auf dieser Basis trainierten Regressionsmodelle negativ beeinflusst. So führt das Erlernen fehlerhafter Zusammenhänge zwischen Spektralinformation der Landsat-Daten und zugehörigem Versiegelungsgrad zwangsläufig zu einer Fortpflanzung dieses Fehlers im Kontext der Modellanwendung. Hinzu kommt, dass ein solches Regressionsmodell stets eine Schätzung des Zusammenhangs zwischen Versiegelung und Spektralwerten darstellt – d.h. selbst bei fehlerfreier Trainingsgrundlage ist mit einem leichten Informations- beziehungsweise Qualitätsverlust zu rechnen. Diese Einschätzung wird durch einen Blick auf das validierte Ergebnis des modellierten Versiegelungsrasters bestätigt. Zur Reduzierung der Fehlertoleranz wurde eine intensive Optimierung der Modellparameter des Regressionsmodells durchgeführt. Hierfür wurden, unter Verwendung des gesamten Merkmalraums (Landsat-8), verschiedene Intervalle für die Modellparameter sowie eine unterschiedliche Anzahl an Trainingspunkten definiert. Die Auswahl der geeigneten Modellparameter erfolgte mittels berechneter Gütekriterien. Ferner wird, wie in der letzten Studie, die Ableitung des Versiegelungsgrades auf die ATKIS Siedlungs- und Verkehrsflächen reduziert.

In Abb. 13 ist die absolute Abweichung des modellierten Versiegelungsdatensatzes für einen Ausschnitt der Stadt München dargestellt. Die Berechnung der Versiegelungskartierung erfolgte hierbei ausschließlich auf den flächenhaften ATKIS Siedlungs- und Verkehrselementen.

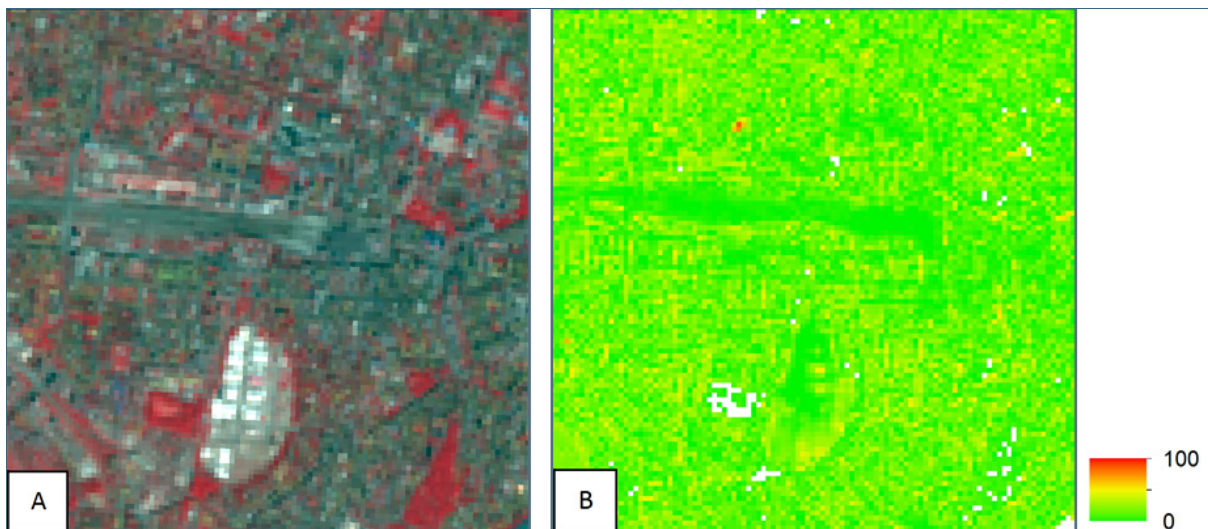


Abb. 13: Landsat-Aufnahme und Differenz der modellierten Versiegelungswerte zum Validierungsdatensatz. Dargestellt ist neben der Berechnungsgrundlage in Form der Landsat-8 Aufnahme (A) die absolute Abweichung der jeweiligen Bildelemente zum Validierungsdatensatz (B).

Die Ergebnisse der durchgeführten Genauigkeitsanalyse für die Untersuchungsgebiete Bayreuth und Aschaffenburg sind in Tab. 8 dargestellt. Das modellierte Versiegelungsraster zeigt für das Untersu-

chungsgebiet Bayreuth eine mittlere absolute Abweichung von 9,59 % zu den Validierungsdaten. Für Aschaffenburg ist die mittlere absolute Abweichung mit 14,30 % vergleichsweise höher.

Sofern eine Kategorisierung der Werte des kontinuierlichen Versiegelungsrasters in eine definierte Anzahl diskreter Klassen erforderlich ist, erscheint eine Untergliederung in sieben Kategorien als bester Kompromiss zwischen Kompensation der vorliegenden Fehlertoleranz und thematisch detaillierter Aufschlüsselung der Versiegelungsgrade. Die Gesamtgenauigkeit, die anhand der klassenbasierten Genauigkeiten berechnet wird, liegt für das Untersuchungsgebiet Bayreuth bei 84,04 % und für Aschaffenburg bei 77,21 %.

Tab. 8: Qualitätsstatistiken zur Versiegelungsberechnung gegenüber den Referenzdaten. Die klassenbasierten Ergebnisse wurden über eine Genauigkeitsanalyse mittels Fehlermatrix, wie sie in Abschnitt 2.4.2 dargestellt wurde, erhoben.

Kontinuierlich

| | Bayreuth | Aschaffenburg |
|--------------------------------|----------|---------------|
| Mittlere absolute Abweichung | 9,59 % | 14,30 % |
| Standardabweichung des Fehlers | 13,00 % | 19,12 % |
| Mittlere Abweichung | 1,56 % | 1,10 % |

Klassenbasiert

| | Bayreuth | Aschaffenburg |
|--------------------------------|----------|---------------|
| Mittlere absolute Abweichung | 9,59 % | 14,30 % |
| Standardabweichung des Fehlers | 13,00 % | 19,12 % |
| Mittlere Abweichung | 1,56 % | 1,10 % |
| Klasse 1 (0-15%) | 87,18 % | 86,78 % |
| Klasse 2 (15-30%) | 84,48 % | 82,02 % |
| Klasse 3 (30-45%) | 79,23 % | 71,17 % |
| Klasse 4 (45-60%) | 79,27 % | 69,58 % |
| Klasse 5 (60-75%) | 79,72 % | 70,71 % |
| Klasse 6 (75-90%) | 86,70 % | 78,87 % |
| Klasse 7 (>90%) | 91,72 % | 81,31 % |
| Gesamtgenauigkeit | 84,04 % | 77,21 % |

3.2.2 Kachelweise Berechnung des Versiegelungsrasters

Bei einem Blick auf die Statistiken der übrigen Kacheln zeigt sich, dass die mittlere absolute Abweichung zwischen den Validierungsdaten und den letztlich modellierten Versiegelungswerten mit 10,9 % bis 13,9 % in einem Wertebereich liegen, der mit den in Tabelle 3-1 aufgeführten Fehlerwerten vergleichbar ist. Nach Bayreuth wurde mit 10,9 % die geringste mittlere absolute Abweichung für das Untersuchungsgebiet Regensburg erreicht. Dahingegen ist die mittlere absolute Abweichung mit 13,9 % für das Untersuchungsgebiet Kempten höher.

Des Weiteren hat die Berechnung des Versiegelungsrasters auf Basis der vorliegenden Luftbilddaufnahmen neben vergleichbaren Fehlerwerten (Tab. 8) auch durchweg hohe Gesamtgenauigkeiten ergeben. Die Gesamtgenauigkeiten für alle Untersuchungsgebiete liegen in einem Wertebereich zwischen 70,3 % und 84,4 %. Der Mittelwert der Gesamtgenauigkeiten aus allen Gebieten liegt bei 78,9 %. Für drei der sieben Untersuchungsgebiete ist die Gesamtgenauigkeit höher als 80 %. Neben Bayreuth mit 84,0 % beträgt die Gesamtgenauigkeit für Regensburg 81,9 % und für Würzburg 81,2 %. Ferner beträgt die Gesamtgenauigkeit 79,6 % für München und 78 % für Passau. Für das Untersuchungsgebiet Kempten wurde eine Gesamtgenauigkeit von 70,3 % erreicht.

Eine Schwierigkeit, die sich aus der einheitlichen Anwendung eines einzigen Modells auf sämtliche Landsat-Kacheln ergibt, ist die Tatsache, dass die Spektralwerte der einzelnen Aufnahmen selbst in

ihren Überlappungsbereichen – d. h. bei einem Blick auf räumlich identische Flächen – mitunter signifikant voneinander abweichen. Der geschilderte Effekt liegt maßgeblich in Unterschieden der atmosphärischen Bedingungen begründet. In der vorangegangenen Studie wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Unterschiede in den Spektralwerten zu quantifizieren. Mit diesem Wissen aus der letzten Studie wurden die einzelnen Landsat-Aufnahmen im Rahmen der Vorprozessierung mit Hilfe einer Atmosphärenkorrektur und einer Histogramm-Angleichung bearbeitet (vgl. Abschnitt 2.1.1). Abb. 14 und Abb. 15 zeigen abschließend Ausschnitte des bayernweiten Versiegelungsrasters am Beispiel einiger bayerischer Großstädte beziehungsweise ausgewählter Objekte. Bemerkenswert ist der hohe räumliche Detaillierungsgrad, welcher trotz der vergleichbar geringen räumlichen Auflösung des Landsat-Systems erzielt werden kann.

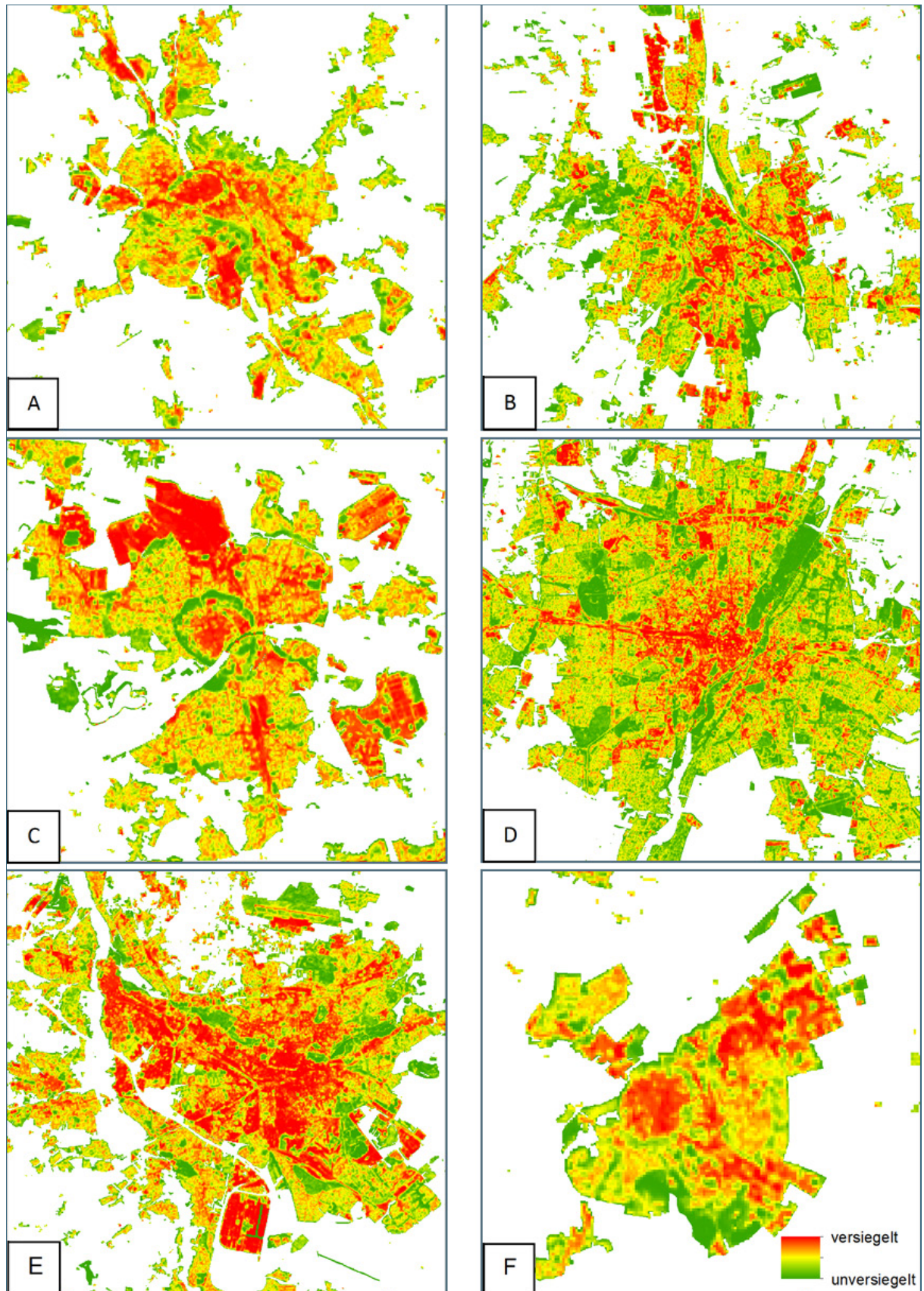


Abb. 14: Versiegelungskartierung für verschiedene Städte in Bayern. Dargestellt sind die Städte Amberg (A), Augsburg (B), Ingolstadt (C), München (D), Nürnberg (E) und Nördlingen (F). Wie diese Beispiele verdeutlichen, ermöglicht die Versiegelungskartierung eine effiziente Lokalisierung und Charakterisierung der unterschiedlichen Verdichtungszone innerhalb des Siedlungskörpers.

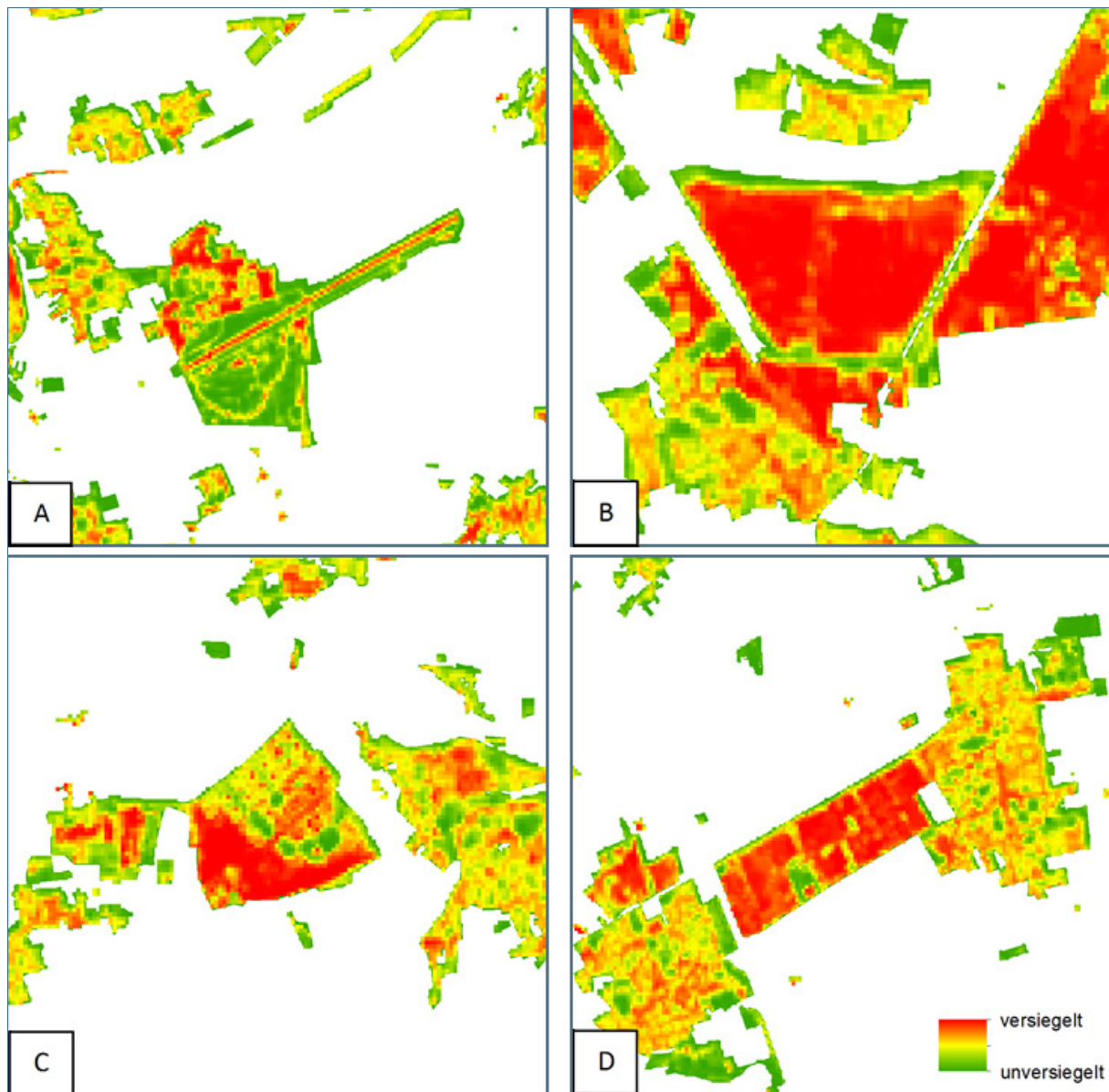


Abb. 15: Versiegelungskartierungen für verschiedene Objekte in Bayern. Dargestellt sind der Flughafen Memmingen (A), ein Gewerbegebiet südöstlich von Regensburg (B), eine Raffinerie bei Vohburg (C) sowie Eching-Ost bei München (D).

3.2.3 Ergänzung durch Vektordaten

Das zuvor erläuterte Versiegelungsraster wird abschließend durch die linienhaften ATKIS-Strukturelemente ergänzt (vgl. Tab. 6). Der entstehende Datensatz bildet die Grundlage für die Resultate der nachfolgend dargelegten Berechnungen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass auf die Berücksichtigung der in der Siedlungs- und Verkehrsfläche enthaltenen Wirtschaftswege (Funktion 5212) verzichtet wird. Dies liegt darin begründet, dass nicht bestimmt werden kann, welche dieser Wege versiegelt beziehungsweise unversiegelt sind. Es sei jedoch erwähnt, dass die aus dem ATKIS-Datensatz separierten Wirtschaftswege bei einer angenommenen durchschnittlichen Breite von drei Metern für ganz Bayern eine Fläche von 65.498 ha einnehmen.

Abb. 16 zeigt beispielhaft die Versiegelungskartierung von München mit den zugehörigen linienhaften ATKIS-Strukturelementen. Zur besseren Darstellung wurde eine einheitliche Breite für alle linienhaften Elemente verwendet. In den Berechnungen der Versiegelungsmaße gehen jedoch die Straßen mit ihrer aktualisierten jeweiligen mittleren Breite ein (vgl. Tab. 6).

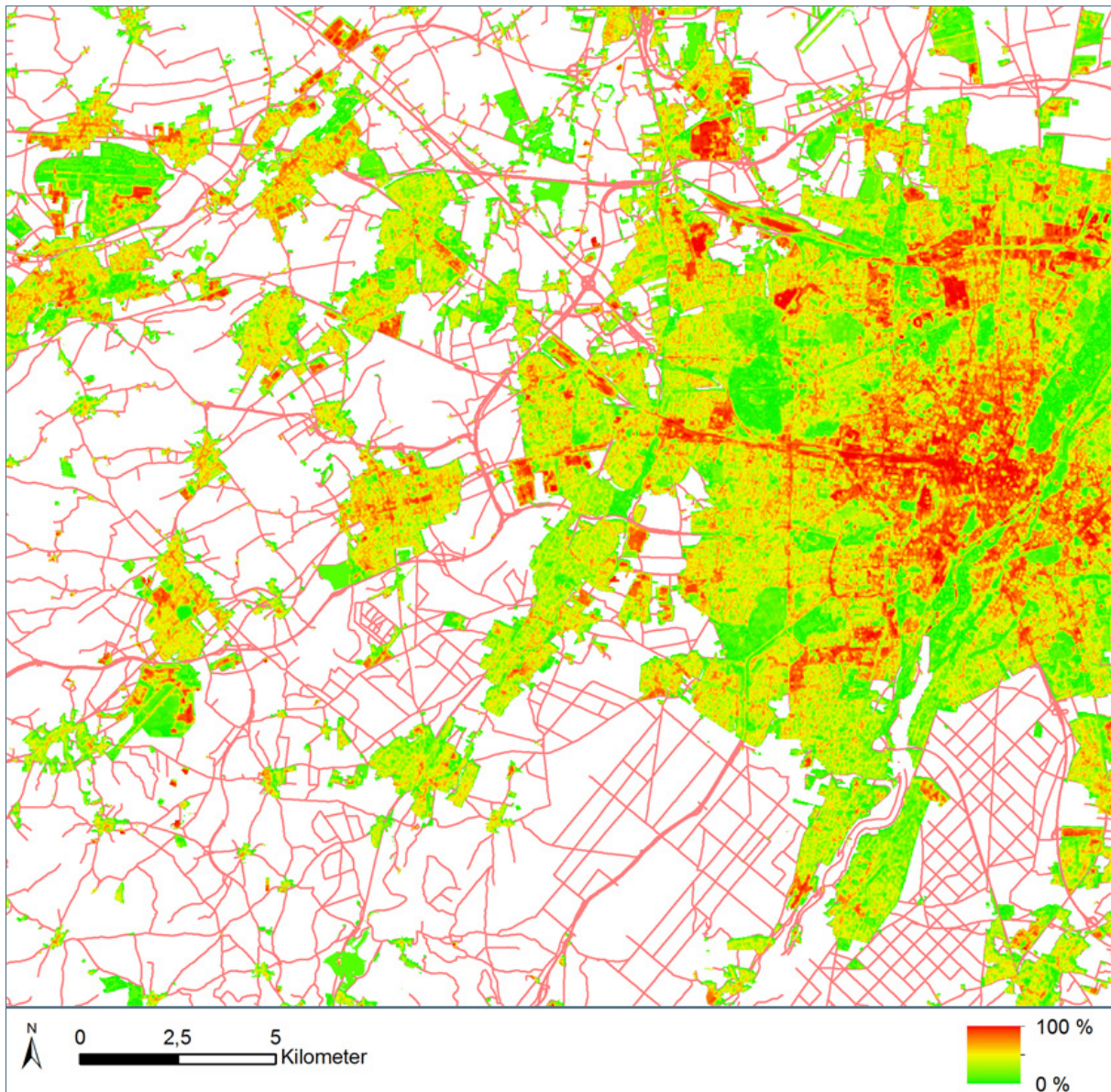


Abb. 16: Kombination aus fernerkundlich erhobenem Versiegelungsraster und linienhaften Infrastrukturelementen aus ATKIS. Zu sehen ist das aus den Landsat-8 generierte Versiegelungsraster für die Region um München, welches durch Straßen und Bahnlinien aus dem ATKIS Vektordatensatz ergänzt wurde.

4 Versiegelungssituation in Bayern

Im Anschluss an die zuvor aufgeführten Ergebnisse der fernerkundlichen Methodik wird nun das Resultat aus der Kombination des fernerkundlich erhobenen Versiegelungsrasters und den Vektordaten der linienhaften Infrastrukturelemente erörtert. Wie bereits in der Versiegelungsstudie 2007 werden hierfür als Versiegelungsmaße die Kenngrößen „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ sowie die „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ herangezogen und für verschiedene Raumebenen ausgewertet. Abschließend wird für die Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte die Entwicklung der Versiegelungssituation zwischen 2000 und 2015 anhand der absoluten Zunahme der versiegelten Fläche sowie ergänzend anhand der Veränderung des Versiegelungsgrades gezeigt.

Im vorherigen Kapitel wurden die Ergebnisse zur fernerkundlichen Modellierung der Versiegelung sowie deren Ergänzung durch Vektordaten zu den linienhaften Infrastrukturelementen dargelegt. Die nachfolgenden Abschnitte widmen sich nun der Visualisierung und Beschreibung der Versiegelungssituation in Bayern im Jahr 2015.

4.1 Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen in den Gemeinden

Durch einen GIS-basierten Verschnitt des bayernweit generierten Versiegelungsdatensatzes mit den administrativen Grenzen der Gemeinden lässt sich die entsprechende Kenngröße für ganz Bayern darstellen (vgl. Abb. 17). Der Versiegelungsgrad ist dabei nur auf die aktuelle Siedlungs- und Verkehrsfläche der Gemeinde bezogen, nicht auf die gesamte Gemeindefläche. Darin repräsentieren weiße Flächen gemeindefreie Forste und Seen, für die keine Berechnung des Versiegelungsgrades vorgenommen wurde.

Für Bayern ergibt sich für 2015 ein Durchschnittswert für den Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen von 50,9 %. Die weitaus größte Anzahl der Gemeinden Bayerns findet sich in der Kategorie mit einem Versiegelungsgrad von 45 bis 60 %. Die Versiegelungsgrade liegen – abgesehen von einzelnen Ausnahmen - insgesamt innerhalb einer Spanne von knapp 27 % als unterster Grenze bis etwa 75 % als maximalem Versiegelungswert.

Auffällig ist beispielsweise die höhere Anzahl an Gemeinden mit einem hohen Versiegelungsgrad von über 60 % in Teilen Frankens. Etwa ein Drittel dieser 50 Gemeinden finden sich in Unterfranken, die Gemeinde mit dem höchsten Versiegelungsgrad liegt aber in Oberbayern.

Kommunen mit niedrigeren Werten unter 45 % finden sich überall im Freistaat, insbesondere aber in Oberfranken nördlich des Fichtelgebirges sowie in größeren Bereichen in Oberbayern und Schwaben. In Oberbayern sind sogar mehr als die Hälfte dieser 50 Gemeinden. Gemeinden mit niedrigen Versiegelungsgraden von unter 30 % gibt es noch vereinzelt, unter 15 % (sehr niedrig) keine mehr.

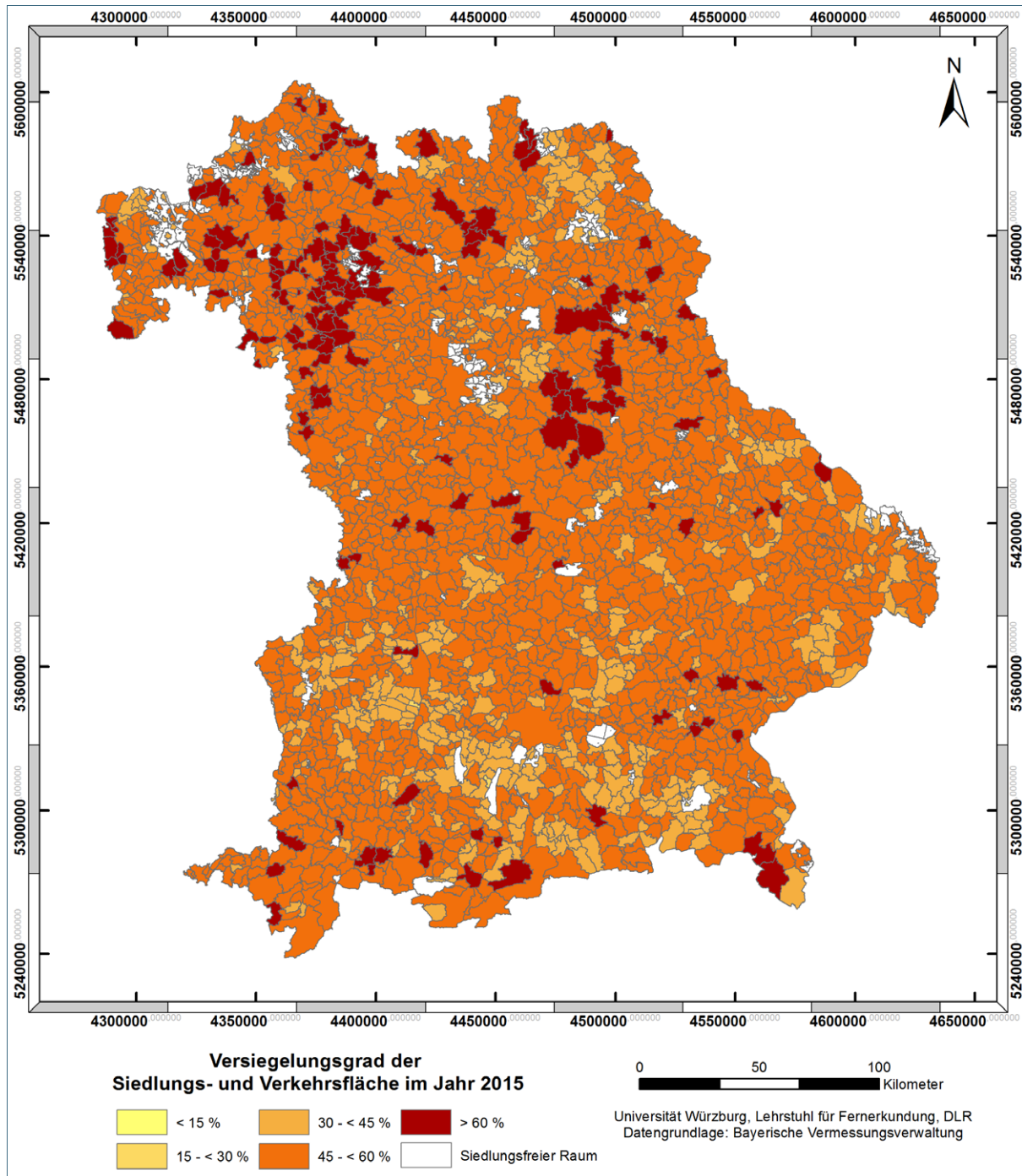


Abb. 17: Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Jahr 2015 auf Ebene der Gemeinden. Die Klasseneinteilung entspricht der Studie 2007. Weiße Flächen zeigen gemeindefreie Forstflächen und Seen, die nicht in die Berechnungen einfließen (Siedlungsfreier Raum).

Beispielhaft für die Versiegelungssituation im Jahr 2015 werden die Regionen München und Bamberg an dieser Stelle etwas näher betrachtet (vgl. Abb. 18).

Teilkarte A: Die Stadt München hat mit rund 46 % einen für Städte vergleichsweise etwas niedrigeren Versiegelungsgrad. Dies dürfte an den großflächigen Parkanlagen - etwa dem Englischen Garten und den Grünanlagen des Nymphenburger Schlossparks - sowie dem Grüngürtel entlang der Isar liegen. Vor allem Umlandgemeinden im Südwesten im Bereich der Seen zeigen niedrigere Werte von unter 45 %. Feldafing bleibt mit rund 27 % eine der wenigen Gemeinden Bayerns der Kategorie mit einem niedrigen Versiegelungsgrad von unter 30 %.

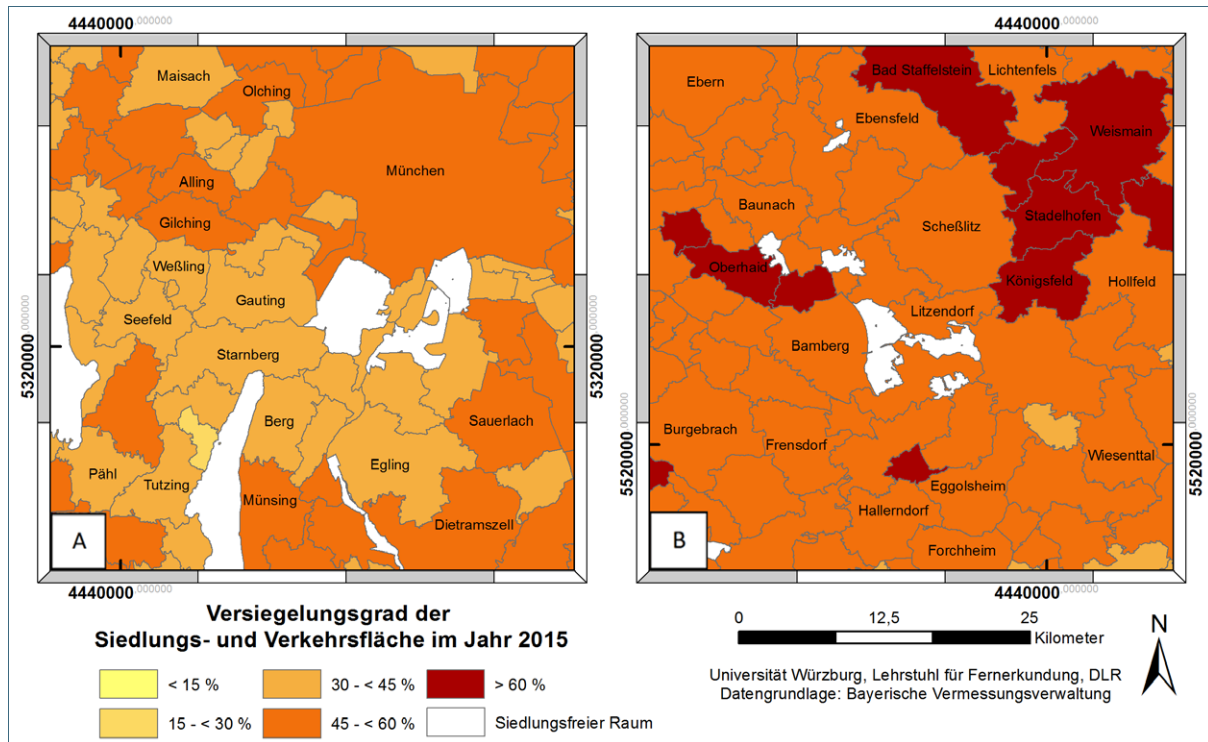


Abb. 18: Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Jahr 2015 in den Regionen München und Bamberg. Die Klasseneinteilung entspricht der Studie 2007. Weiße Flächen zeigen gemeindefreie Forstflächen und Seen, die nicht in die Berechnungen einfließen (Siedlungsfreier Raum).

Teilkarte B: Die Stadt Bamberg hat mit rund 53 % einen etwas höheren Versiegelungsgrad als der aktuelle bayerische Durchschnitt, was auch für andere Städte kennzeichnend ist. Die Region um Bamberg in Oberfranken zeigt fast ausschließlich Gemeinden mit einem höheren oder sogar hohen Versiegelungsgrad von über 60 %, was häufig auf kompaktere Ortsstrukturen mit dichterem Bebauung zurückzuführen ist.

4.2 Versiegelte Flächen der Gemeinden pro Einwohner

Wird die ermittelte versiegelte Fläche auf die aktuelle Einwohnerzahl der jeweiligen Gemeinde bezogen, ergibt sich die Kenngröße „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ (Abb. 19). Weiße Flächen sind gemeindefreie Forste und Seen, für die keine Berechnung vorgenommen wurde.

Für Bayern ergibt sich für 2015 ein Durchschnittswert für die versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner von 330 m². Auffallend niedrigere Werte unter 300 m² pro Einwohner zeigen erwartungsgemäß viele Städte und vor allem die Großstädte Bayerns (München, Nürnberg, Augsburg) sowie deren Umland. Dies ist ein Hinweis auf die aus städtebaulicher Sicht wünschenswerte, effizientere Nutzung der Siedlungsfläche in urban geprägten Räumen.

Dagegen liegen sehr viele ländliche Gemeinden Bayerns in den zwei Kategorien über 500 und über 650 m² Pro-Kopf-Versiegelung. Fast zehn Prozent der Gemeinden belegen Werte der höchsten Kategorie mit über 900 m² Pro-Kopf-Versiegelung. Mit jeweils über 1.500 m² versiegelter Fläche pro Einwohner weisen zehn Gemeinden in der Oberpfalz und 5 in Mittelfranken die höchsten Werte auf. Ganz allgemein lassen sich hohe und sehr hohe Werte eher im ländlichen Raum und in den nördlichen Regionen Bayerns beobachten.

Bayernweit betrachtet zeigen sich für die versiegelte Fläche pro Einwohner Werte zwischen 73 m² als unterer Grenze und etwa 3.200 m² als Maximum.

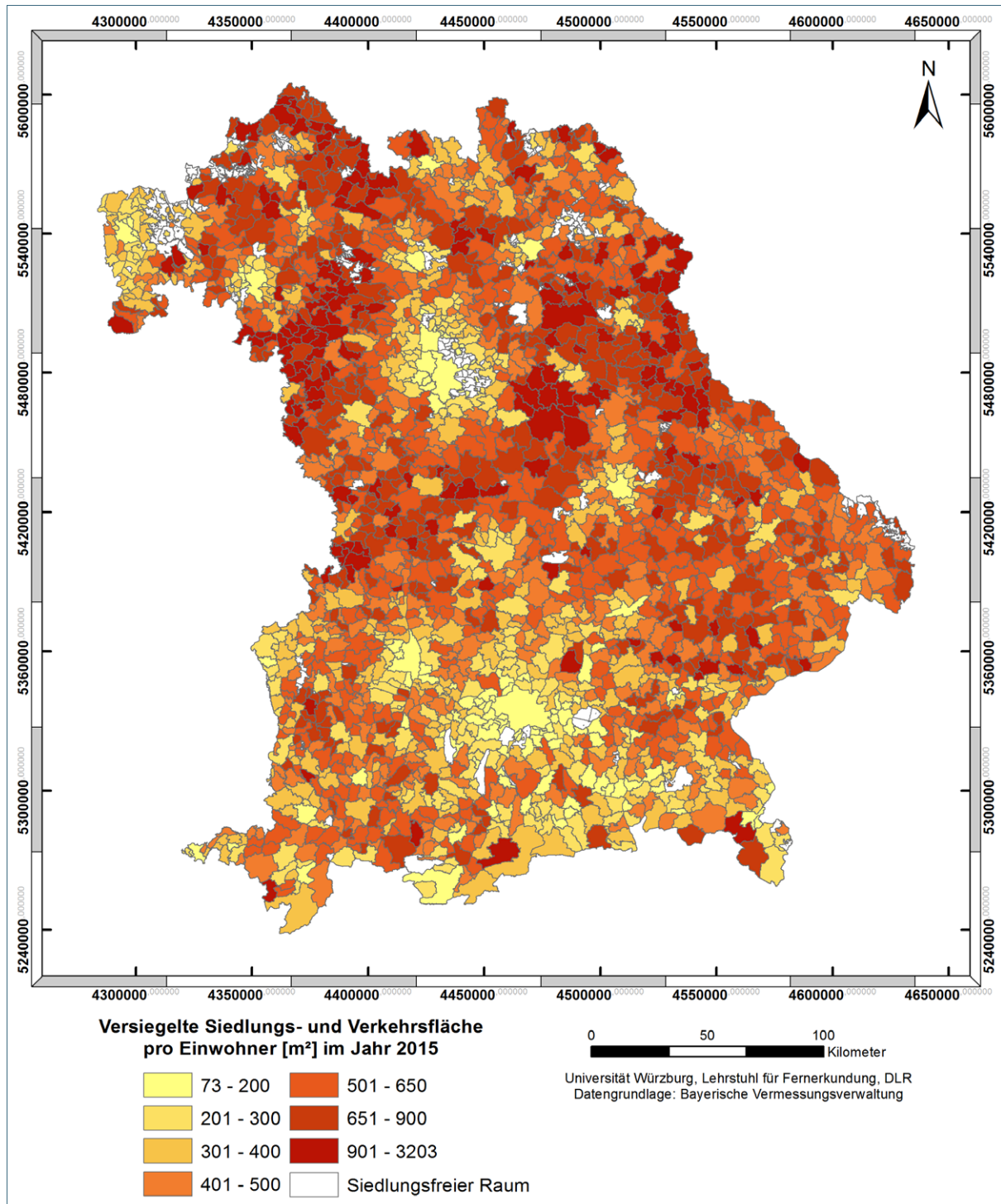


Abb. 19: Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 auf Ebene der Gemeinden. Die Klasseneinteilung wurde so gewählt, dass eine optimale Trennung der Datenbasis erreicht und der absolute Abstand zwischen den einzelnen Gruppen maximiert wird. Sie entspricht der Studie 2007. Weiße Flächen zeigen gemeindefreie Forstflächen und Seen, die nicht in die Berechnungen einfließen (Siedlungsfreier Raum).

Beispielhaft für die Versiegelungssituation im Jahr 2015 werden auch hier wieder die Regionen München und Bamberg an dieser Stelle näher betrachtet (Abb. 20).

Teilkarte A: Die Stadt München sowie deren Umland zeichnen sich durch eine niedrigere Pro-Kopf-Versiegelung aus, in der Landeshauptstadt ist als Folge des starken Bevölkerungswachstums sogar ein Rückgang dieser Kennzahl auf jetzt 73 m² festzustellen. Auch eine Reihe weiterer Gemeinden im

Umland (vgl. Olching, Gilching, Gauting) weisen eine niedrige Pro-Kopf-Versiegelung mit teilweise auch deutlich unter 200 m² aus. Anzunehmen ist, dass auch die vergleichsweise höheren Preise für Bauland und Wohnraum für flächeneffizientere Wohnformen förderlich sind. Im weiteren Umkreis finden sich auch Gemeinden, die eine deutlich höhere Pro-Kopf-Versiegelung von über 500 m² haben (vgl. Pähl, Münsing, Dietramszell).

Teilkarte B: Wie in anderen Städten Bayerns, sind auch die Stadt Bamberg und einige direkt angrenzende Gemeinden (vgl. durch eine niedrige Pro-Kopf-Versiegelung von unter 200 m² gekennzeichnet. Anders als in München finden sich aber bereits im näheren Umland Gemeinden mit hohen oder sehr hohen Werten (vgl. Königsfeld, Stadelhofen).

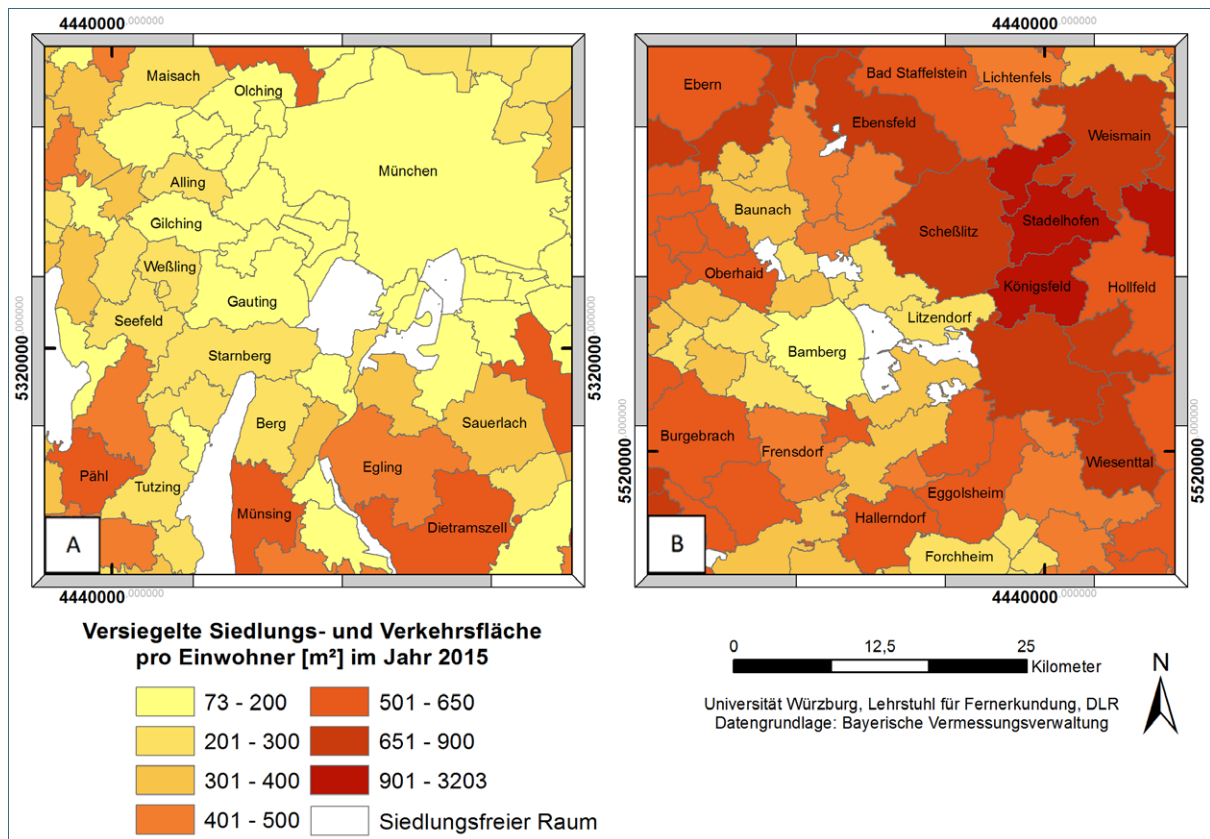


Abb. 20: Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 in den Regionen München und Bamberg. Die Klasseneinteilung entspricht der Studie 2007. Weiße Flächen zeigen gemeindefreie Forstflächen und Seen, die nicht in die Berechnungen einfließen (Siedlungsfreier Raum).

Interessant stellt sich ein Vergleich der Ergebnisse aus Abb. 20 mit denen aus Abb. 18 dar. Am Beispiel Bambergs und Münchens zeigt sich, dass Gemeinden trotz eines relativ hohen Versiegelungsgrads von 45 bis 55 % dennoch eine vergleichsweise geringe Pro-Kopf-Versiegelung von unter 200 m² aufweisen können.

4.3 Aggregierungsverfahren für die übergeordneten administrative Ebenen

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurden die auf Ebene der Gemeinden ermittelten Versiegelungsmaße auf höhere administrative oder raumstrukturelle Einheiten aggregiert. Dieser Schritt erfolgt dabei über die Aufsummierung der versiegelten Flächen aller Gemeinden innerhalb des Betrachtungsraumes (Landkreis, Planungsregion, Regierungsbezirk, LEP Gebietskategorie). Deren prozentualen Anteil an der aufsummierten Siedlungs- und Verkehrsfläche aller Gemeinden kann sodann ermittelt werden. Die Berechnung erfolgt hier in zwei Schritten (vgl. Formel 4.1 und 4.2).

$$\text{Versiegelte Fläche}_{agg} [ha] = \sum (\text{Versiegelungsgrad} * \text{SuV} [ha]) \quad (4.1)$$

$$\text{Versiegelungsgrad}_{agg} [\%] = \frac{\text{Versiegelte Fläche}_{agg} [ha]}{\sum \text{SuV}_{agg} [ha]} \quad (4.2)$$

Der Index „agg“ kennzeichnet hierbei die Aggregierungsebene. Die versiegelte Fläche pro Einwohner auf der Betrachtungsebene wird mittels einer Division der „Versiegelten Fläche_{agg}“ über die aufsummierte Einwohnerzahl des entsprechenden Landkreises oder Regierungsbezirkes ermittelt.

4.4 Versiegelungssituation der Landkreise und kreisfreien Städte

Bayern ist in 71 Landkreise und 25 kreisfreie Städte gegliedert. Hierfür wurden die beiden Versiegelungsmaße „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen“ sowie „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner“ ermittelt und in den nachfolgenden Abb. 21 und Abb. 22 visualisiert. Für die kreisfreien Städte gelten die Daten der gemeindlichen Ebene weiter, für die Landkreise wurden die jeweiligen Werte aus den Daten der zugehörigen Gemeinden durch Aggregation berechnet. Eine tabellarische Übersicht der Versiegelungsmaße dieser Raumebene befindet sich im Anhang.

Die räumlichen Verteilungsmuster entsprechen erwartungsgemäß qualitativ dem Muster der Verteilung der gemeindebasierten Versiegelungsgrade aus Abb. 17 und der Pro-Kopf-Versiegelung aus Abb. 18.

Die weitaus größte Anzahl der Landkreise und kreisfreien Städte findet sich in den drei Kategorien mit den höheren Versiegelungsgraden, also über 47 %. Auffällig in Abb. 21 sind die vielen Landkreise und Städte mit einem hohen Versiegelungsgrad von über 54 % in Franken und der Oberpfalz, darüber hinaus die Städte Straubing und Memmingen.

Bayernweit zeigt der Landkreis Kitzingen mit 58,9 % den höchsten und der Landkreis Starnberg in Oberbayern mit 39,5 % den niedrigsten Wert. Auch die Stadt Nürnberg mit 57,1 % und die Stadt Schweinwurt mit 56,7 % haben einen hohen Versiegelungsgrad und liegen damit in etwa auf einer Ebene mit den höchsten Werten der Landkreise. Bayernweit zeigen die 25 kreisfreien Städte mit einer mittleren Versiegelung von 51,9 % einen etwas höheren Wert gegenüber einem Mittelwert von 50,7 % bei den Landkreisen auf.

Landkreise mit niedrigeren Werten unter 47 % finden sich vor allem in Oberbayern und Schwaben. Ganz im Norden zählen die Stadt Coburg mit einem Versiegelungsgrad von 40,5 %, die Stadt Hof mit 44,4 % und der Landkreis Hof zu dieser Kategorie. In Niederbayern ist die Stadt Landshut mit 45,8 % umgeben von Landkreisen mit höheren Versiegelungsgraden.

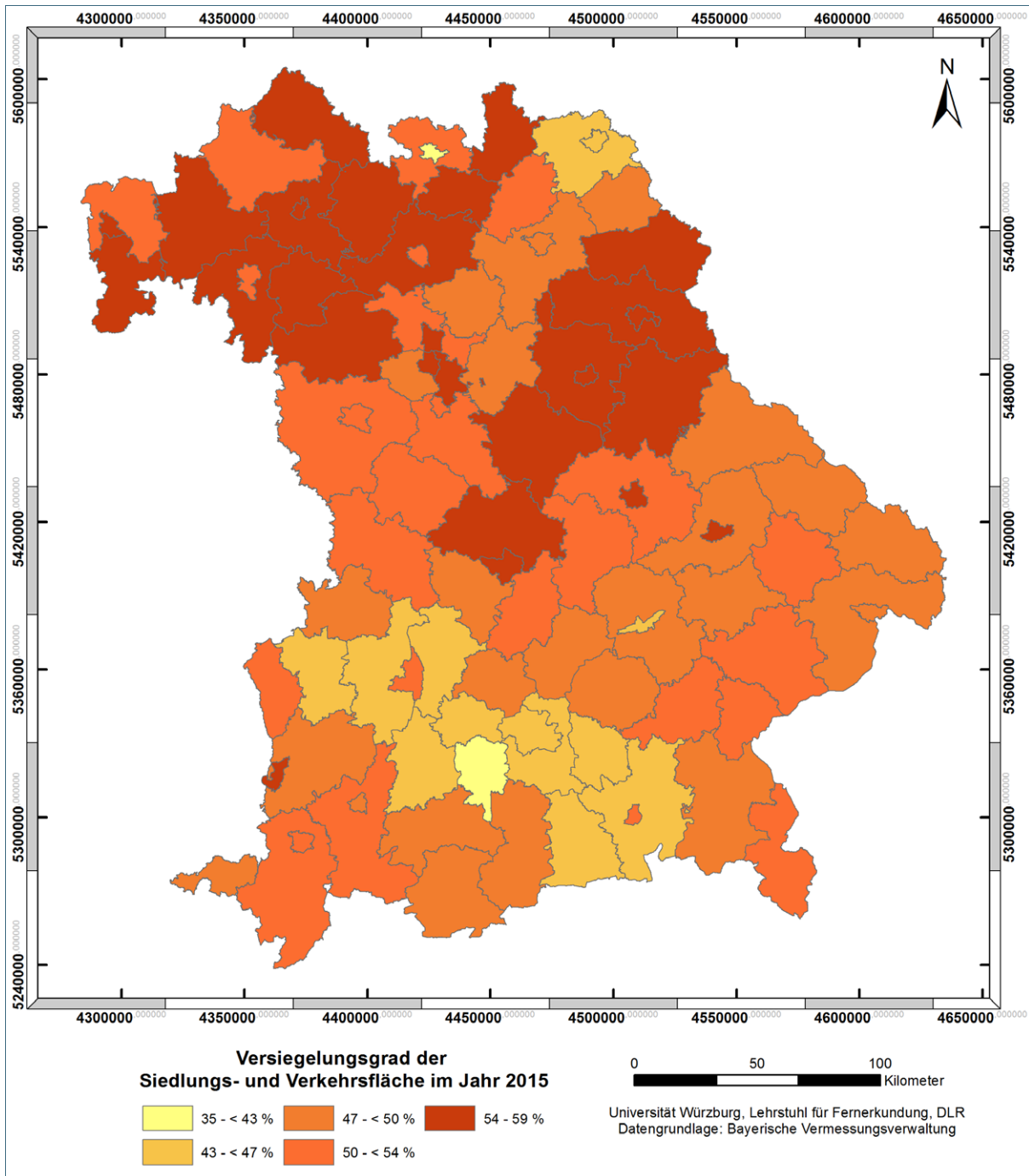


Abb. 21: Versiegelungsgrad im Jahr 2015 der Landkreise und kreisfreien Städte. Die Klasseneinteilung entspricht der Studie 2007, nicht jedoch der der entsprechenden gemeindebezogenen Abbildung 4-1. Die Neueinteilung dient einer verbesserten Visualisierung der Daten und nutzt den Datenraum optimal aus.

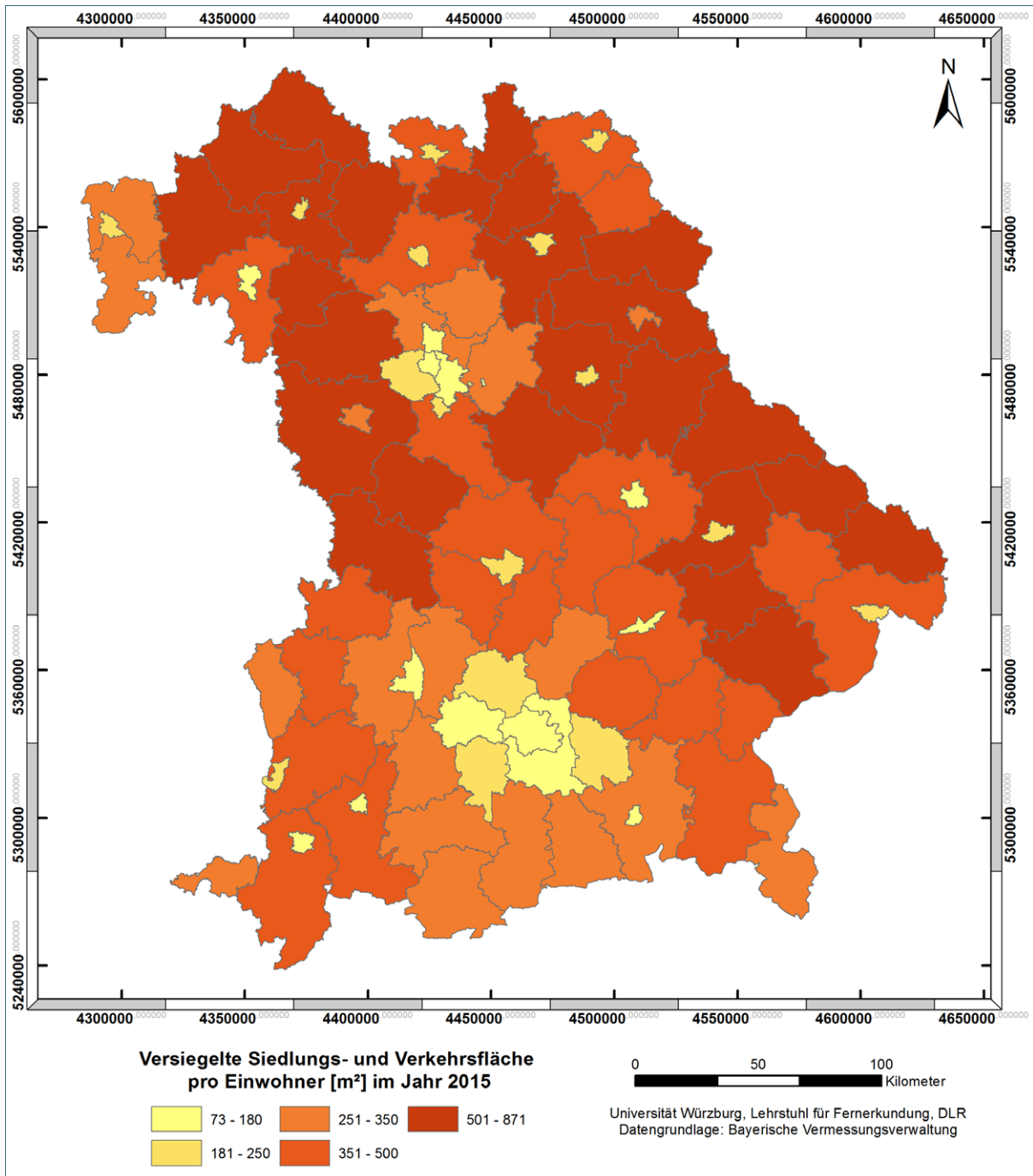


Abb. 22: Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 der Landkreise und kreisfreien Städte. Die Klasseneinteilung entspricht der Studie 2007, nicht jedoch der der entsprechenden gemeindebezogenen Abbildung 4-3. Die Neueinteilung dient einer verbesserten Visualisierung der Daten und nutzt den Datenraum optimal aus.

Für Bayern liegt für 2015 der Durchschnittswert für die versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner bei 330 m². Deutlich niedrigere Werte von unter 250 m² pro Einwohner zeigen (Abb. 22) erwartungsgemäß nur die meisten Städte und einige Landkreise im Umland von München und Nürnberg. Diese „hellen Inseln“ sind umgeben von Landkreisen mit hohen und sehr hohen Pro-Kopf-Versiegelungsgraden von über 250 m², von über 350 m² oder gar von über 500 m². Insgesamt lässt sich für Oberbayern bereits durch diese Darstellung eine etwas geringere Pro-Kopf-Versiegelung erwarten (vgl. Tab. 9).

Das Maximum der Pro-Kopf-Versiegelung findet sich mit 871 m² im Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab in der Oberpfalz. Lässt man die kreisfreien Städte unberücksichtigt - beispielsweise München mit 73 m² – dann findet sich der geringste Wert für die versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner mit 169 m² im Landkreis Fürstenfeldbruck.

4.5 Versiegelungssituation der Regierungsbezirke

Die Ergebnisse der auf Basis der sieben Regierungsbezirke aggregierten Versiegelungsmaße sind in Tab. 9 aufgeführt. Auf eine Kartendarstellung wird verzichtet. Auch auf dieser Ebene setzen sich die in den vorhergehenden Auswertungen beschriebenen Tendenzen fort. Die Reihenfolge der Nennung wird hier durch die Pro-Kopf-Versiegelung bestimmt, so dass der Regierungsbezirk mit der insgesamt effizientesten Flächennutzung in der ersten Zeile steht.

Mit 48,0 % zeigt Oberbayern auch den geringsten Anteil versiegelter Flächen an der Siedlungs- und Verkehrsfläche, während Unterfranken mit 55,4 % den höchsten Anteil aufweist. Die Werte für Oberfranken, Schwaben, Mittelfranken sowie Niederbayern liegen in einer engen Spanne von 49,2 bis 52,9 %, während Oberpfalz und Unterfranken jeweils einen Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche von 54,2 beziehungsweise 55,4 % aufweisen.

Bei der Pro-Kopf-Versiegelung treten insbesondere Oberbayern mit 221 m² als niedrigstem Wert und die Oberpfalz mit 518 m² als höchstem Wert hervor. Die verbleibenden fünf Regierungsbezirke liegen allesamt zwischen 297 und 462 m².

Tab. 9: Versiegelungsmaße der Regierungsbezirke in Bayern im Jahr 2015.

| Regierungsbezirk | Versiegelungsgrad [%] | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m ²] |
|------------------|----------------------------|--|
| Oberbayern | 48,0 | 221 |
| Mittelfranken | 52,9 | 297 |
| Schwaben | 49,7 | 324 |
| Oberfranken | 50,6 | 405 |
| Unterfranken | 55,4 | 427 |
| Niederbayern | 49,2 | 462 |
| Oberpfalz | 54,2 | 518 |

4.6 Bayernweite Betrachtung

Für die gesamte Fläche des Freistaates Bayern (rund 70.550 km²) konnte für das Jahr 2015 ein aktueller durchschnittlicher Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche von 50,9 % ermittelt werden. Insgesamt war eine Fläche von rund 4.240 km² oder rund 424.200 ha versiegelt. Zum Vergleich: Der Chiemsee hat als größter bayerischer See eine Fläche von knapp 80 km². Berücksichtigt wurden bei den Berechnungen auch die inzwischen größeren mittleren Straßenbreiten (u. a. für Autobahnen, Bundesstraßen und Staats- und Kreisstraßen).

Im Jahr 2015 hatte Bayern einen Bevölkerungsstand von rund 12.843.500 Einwohnern. Die versiegelte Fläche pro Einwohner liegt im bayerischen Durchschnitt bei 330 m². Zum Vergleich: Als Wohnfläche hat jeder Einwohner durchschnittlich knapp 48 m² zur Verfügung.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die im ATKIS-Datensatz enthaltenen Wirtschaftswege nicht berücksichtigt wurden, da für diese Wege keine eindeutige Zuordnung bezüglich ihrer Versiegelung vorge-

nommen werden konnte. Vor dem Hintergrund, dass diese Wege bei einer angenommenen durchschnittlichen Breite von drei Metern für ganz Bayern eine Fläche von etwa 65.500 ha einnehmen und teilweise asphaltiert sind, dürfte die tatsächlich versiegelte Fläche noch deutlich über den o. g. Werten liegen. Zudem sei darauf hingewiesen, dass auch landwirtschaftliche Nutzgebäude außerhalb geschlossener Ortschaften nicht in der ATKIS-Maske enthalten sind.

4.7 Versiegelungssituation in den Planungsregionen

Der Freistaat Bayern ist insgesamt 18 Planungsregionen gegliedert (vgl. Tab. 10). Auf dieser Raumebene zeigt sich für die Region 2 (Würzburg) mit 56,1 % der höchste und für die Region 14 (München) mit 46,0 % der geringste Versiegelungsgrad. Bei der Pro-Kopf-Versiegelung findet sich der höchste Wert für die Region 6 (Oberpfalz-Nord) mit 606 m² während die geringste versiegelte Fläche pro Einwohner mit 154 m² ebenfalls die Region 14 (München) ausweist.

Tab. 10: Versiegelungssituation in den 18 Planungsregionen Bayerns.

| Planungsregion | Versiegelungsgrad [%] | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m ²] |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| Nr. 1 Bayerischer Untermain | 54,4 | 291 |
| Nr. 2 Würzburg | 56,1 | 416 |
| Nr. 3 Main-Rhön | 55,2 | 556 |
| Nr. 4 Oberfranken-West | 53,4 | 398 |
| Nr. 5 Oberfranken-Ost | 47,5 | 415 |
| Nr. 6 Oberpfalz-Nord | 55,7 | 606 |
| Nr. 7 Nürnberg | 52,6 | 207 |
| Nr. 8 West-Mittelfranken | 53,1 | 583 |
| Nr. 9 Augsburg | 48,8 | 306 |
| Nr. 10 Ingolstadt | 52,3 | 388 |
| Nr. 11 Regensburg | 52,4 | 448 |
| Nr. 12 Donau-Wald | 48,8 | 469 |
| Nr. 13 Landshut | 49,0 | 448 |
| Nr. 14 München | 46,0 | 154 |
| Nr. 15 Donau-Ilser | 49,2 | 364 |
| Nr. 16 Allgäu | 51,9 | 318 |
| Nr. 17 Oberland | 48,2 | 304 |
| Nr. 18 Südostoberbayern | 48,8 | 312 |

4.8 Versiegelungssituation in den Gebieten gemäß den Kategorien des LEP

Werden die Ergebnisse auf die Gebietskategorien des LEP Bayern 2013 bezogen und diese Kategorien bayernweit zusammengefasst, ergeben sich Werte für den durchschnittlichen Versiegelungsgrad sowie die versiegelte Fläche pro Einwohner gemäß Tab. 11.

Die Kategorie „Allgemeiner ländlicher Raum“ weist einen Versiegelungsgrad von 51,2 % auf, wohingegen der „Verdichtungsraum“ einen etwas geringeren Wert von 50,0 % hat. Auch bei den LEP-Kategorien fällt die versiegelte Fläche pro Einwohner im ländlichen Raum mit 496 m² höher aus als im Verdichtungsraum, wo sie 163 m² beträgt. Dieser Unterschied zeigt die effizientere Nutzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in den Verdichtungsräumen. Für die Kategorie „Raum mit besonderem Handlungsbedarf“ hat sich ein Versiegelungsgrad von 51,9 % ergeben. Die Pro-Kopf-Versiegelung fällt für diese Kategorie mit 506 m² noch etwas höher aus als beim „Allgemeinen ländlichen Raum“.

Tab. 11: Versiegelungssituation in den LEP-Gebietskategorien im Jahr 2015.

| LEP-Gebietskategorie | Versiegelungsgrad [%] | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m ²] |
|---|-----------------------|--|
| 1. Allgemeiner ländlicher Raum | 51,2 | 496 |
| 1.1 Raum mit besonderem Handlungsbedarf | 51,9 | 506 |
| 2. Verdichtungsraum | 50,0 | 163 |
| 3. Ländlicher Raum mit Verdichtungsansätzen | 50,6 | 259 |

4.9 Entwicklung der Versiegelungssituation zwischen 2000 und 2015

In diesem Abschnitt soll kurz die Entwicklung der Versiegelungssituation zwischen den Jahren 2000 und 2015 auf der Raumebene der Landkreise und kreisfreien Städte beschrieben werden.

Darauf hinzuweisen ist, dass insbesondere die in den beiden Versiegelungsstudien (Datenstand: 2000 bzw. 2015) verwendete Kennzahl „Versiegelte Fläche pro Einwohner“ aufgrund der gleichzeitig dynamischen Bevölkerungsentwicklung nicht geeignet ist, das Ausmaß der Zunahme an versiegelten Flächen in den vergangenen 15 Jahren zu beschreiben. Aussagekräftig ist vor allem die Zunahme der mit Fernerkundungsmethoden abgeleiteten Kennzahl „Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsflächen (ha)“ in diesem Zeitraum, die neben der Veränderung der Kennzahl „Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche (%)“ beschrieben wird.

Diese tatsächliche absolute Zunahme versiegelter Flächen wird daher für die Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte in der aktuellen Studie zusätzlich ausgewiesen. Während im Jahr 2000 in Bayern eine Fläche von rund 3.570 km² versiegelt war, sind es im Jahr 2015 bereits 4.240 km². Dies entspricht in diesem Zeitraum einer jährlichen Zunahme von durchschnittlich 44,7 km², entsprechend 4.470 ha.

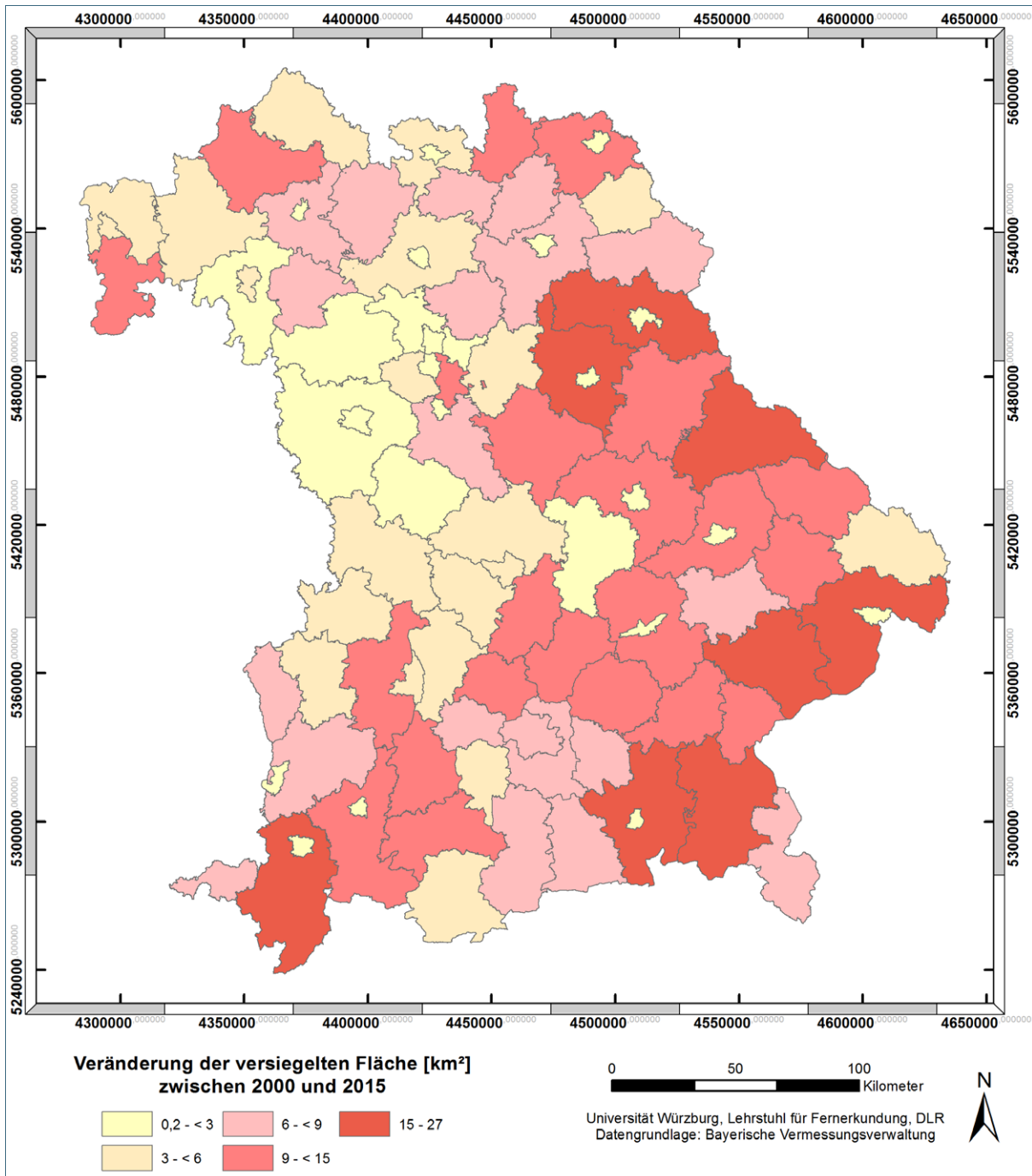


Abb. 23: Veränderung der fernerkundlich erhobenen versiegelten Flächen auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zwischen 2000 und 2015.

Die Abb. 23 zeigt, dass die versiegelten Flächen zwischen dem Jahr 2000 und 2015 in allen Landkreisen und kreisfreien Städten Bayern in einem deutlich unterschiedlichen Maße zugenommen haben. Eine Abnahme war erwartungsgemäß nicht festzustellen.

Eine sehr starke Zunahme von insgesamt über 15 km² (1.500 ha) im Betrachtungszeitraum ist in den südlichen und östlichen Landkreisen Oberallgäu, Rosenheim, Traunstein, Rottal-Inn, Passau, Cham, Amberg-Sulzbach und Neustadt a. d. Waldnaab festzustellen. Der Landkreis Neustadt a. d. Waldnaab weist einen Spitzenwert von 26,4 km² auf.

Eine ebenfalls starke Zunahme in den letzten 15 Jahren von über 9 km² (900 ha) findet sich in den 21 (ebenfalls zumeist im Süden und im Osten) gelegenen Landkreisen sowie der Stadt Nürnberg. Um mindestens jeweils 6 km² (600 ha) hat die versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche in weiteren 19 Landkreisen und der Stadt München seit dem Jahr 2000 zugenommen.

Dagegen fällt im landesweiten Vergleich der Versiegelungsanstieg in den verbleibenden Landkreisen und kreisfreien Städten im Betrachtungszeitraum moderater aus. Um mindestens 3 km² (300 ha) stieg sie in 18 Landkreisen und den drei Städten Augsburg, Würzburg und Aschaffenburg an. Noch niedrigere Werte (unter 300 ha) finden sich für die verbleibenden 11 Landkreise, die sich fast alle in Franken befinden und bayernweit in den übrigen 14 kreisfreien Städten. Bei den Städten hat die Stadt Straubing mit 25 ha, bei den Landkreisen der Landkreis Neustadt a. d. Aisch - Bad Windsheim mit 85 ha in den letzten 15 Jahren landesweit den geringsten Versiegelungszuwachs.

Ergänzend beschreibt die Abb. 24 die Veränderung des Versiegelungsgrades der Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen dem Jahr 2000 und 2015 in allen Landkreisen und kreisfreien Städten Bayerns. Erkennbar ist, dass fast überall auch eine Zunahme des Versiegelungsgrades zu verzeichnen ist.

Eine starke Zunahme des Versiegelungsgrades von mehr als 4 % im Betrachtungszeitraum ist in allen Teilen Bayerns zu erkennen. Von den 27 Landkreisen und den sieben Städten dieser Kategorie weisen die Landkreise Miltenberg, Berchtesgadener Land, Lindau (Bodensee), Oberallgäu, Rottal-Inn und die Stadt Aschaffenburg sogar Zunahmen von über 7 % auf.

Verteilt über Bayern finden sich auch die Landkreise und Städte in den Kategorien mit Steigerungen von mindestens 2 % und darüber sowie mit Zunahmen des Versiegelungsgrades von unter 2 %. In einem Landkreis und in vier Städten kann sogar ein zumeist geringer Rückgang des Versiegelungsgrades festgestellt werden. Mit einem Rückgang von 2,4 % hat die Stadt Straubing auch hier den höchsten Wert, ebenso wie bei der in Abb. 23 gezeigten geringen Zunahme der versiegelten Fläche. Auch die Städte Rosenheim, Kaufbeuren und Weiden i. d. Opf. und der Landkreis Kehlheim zeigen einen leichten Rückgang beim Versiegelungsgrad, der ebenso wie in Straubing konsistent ist mit einem jeweils nur geringen Versiegelungsanstieg.

Hinweis:

Eine Ermittlung der Ursachen für die festgestellte Zunahme der Versiegelungsgrade war nicht Inhalt dieser Studie. Grundsätzlich tragen aber eine verstärkte Innenentwicklung und eine damit einhergehende Nachverdichtung in den Gemeinden dazu bei. Hierdurch werden Flächen im Außenbereich geschont. Eine andere Ursache kann der Ausbau des Verkehrsnetzes mit breiteren Straßen sein. Zudem werden neue Wohnsiedlungen bei hohen Grundstückspreisen zunehmend kompakter angelegt. In wenigen Fällen wurden aber auch niedrigere Versiegelungsgrade ermittelt. Eine Erklärung wäre, dass dort neu ausgewiesene Siedlungs- und Verkehrsflächen in größerem Umfang noch unbebaut sind. Die tatsächlichen Gründe müssten aber gezielt vor Ort ermittelt werden.

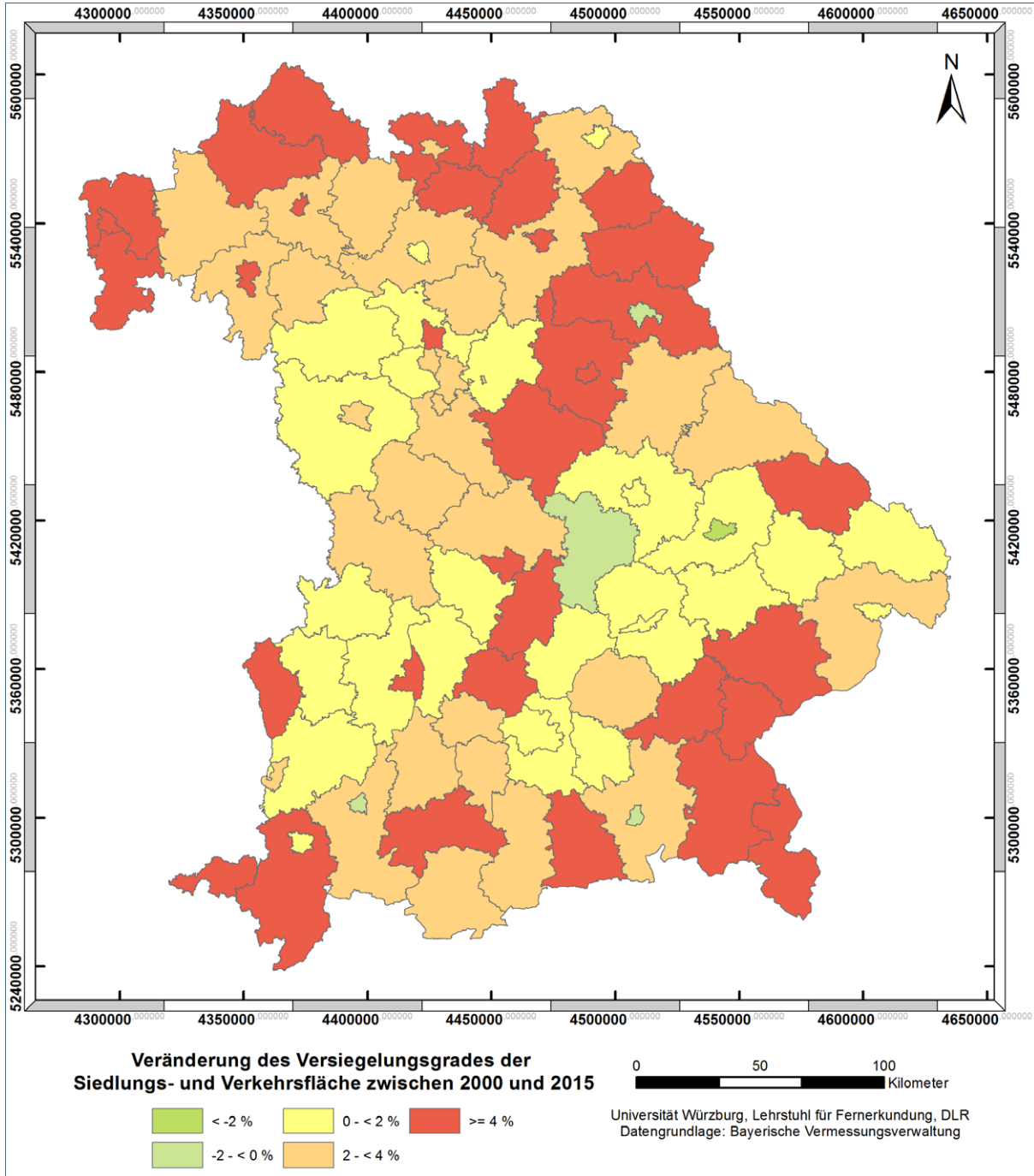


Abb. 24: Veränderung des Versiegelungsgrades der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zwischen 2000 und 2015.

5 Fazit

Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse die Potentiale und Limitierungen hinsichtlich einer satellitengestützten Erhebung flächendeckender Versiegelungsinformationen zusammenfassend dargelegt. Nachfolgend werden die zentralen Charakteristika der Versiegelungssituation in Bayern zum Zeitschnitt 2015 skizziert. Das Kapitel schließt letztlich mit der Erörterung des weiterführenden Forschungsbedarfs hinsichtlich der fernerkundlichen Erhebung von Daten zur Versiegelung.

5.1 Satellitenbasierte Versiegelungskartierung

Mit dem Ziel der Erstellung eines konsistenten Versiegelungsrasters für das Jahr 2015, wurde in dieser Studie die bereits in der vorigen Studie aus dem Jahr 2007 angewandte Methodik eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Studie haben erneut bestätigt, dass sich Versiegelungsdaten über eine Auswertung von Satellitenaufnahmen grundsätzlich mit hinreichender Genauigkeit erheben lassen. So ergibt die Validierung der berechneten Versiegelungsgrade für die Siedlungs- und Verkehrsflächen anhand von Validierungsdaten eine mittlere absolute Abweichung zwischen 9,6 und 14,3 % (vgl. Abschnitt 3.2). Weiterhin wurde durch die Durchführung einer Genauigkeitsanalyse eine Gesamtgenauigkeit von bis zu 84,4 % erzielt.

Allerdings treten bedingt durch die fernerkundliche Methodik signifikante Abweichungen in der Bestimmung von Versiegelungsdaten vor allem im Kontext unbedeckter Böden auf. Diese werden aufgrund ihrer spektralen Ähnlichkeit zu Beton- und Asphaltflächen mitunter als versiegelte Areale ausgewiesen. Dieser Effekt wurde im Zuge dieser Studie jedoch durch die ATKIS-basierte Fokussierung auf Siedlungs- und Verkehrsflächen deutlich minimiert. Eine weitere verfahrensbedingte Einschränkung ergibt sich aus der Tatsache, dass über Satellitendaten ausschließlich die vom Weltraum aus sichtbare Bodenbedeckung analysiert wird. Daher kann es etwa durch Abschattungen, Überdeckung durch Baumkronen oder begrünte Dachflächen zu fehlerhaften Resultaten kommen.

Das Resultat der satellitenbasierten Kartierung führt vor Augen, dass ein besonderer Vorzug des fernerkundlichen Ansatzes in dem für eine flächendeckende Auswertung vergleichsweise hohen räumlichen Detaillierungsgrad liegt. So wird der Versiegelungsgrad im Rahmen dieser Studie bayernweit für sämtliche flächenhaften Siedlungs- und Verkehrsareale in einem 30 * 30 Meter umfassenden Raster erfasst. Dadurch ist es möglich, die Struktur und Verteilung der versiegelten Flächen selbst innerhalb von Ortslagen, aber auch in Bezug auf beliebige administrative oder geographisch-raumstrukturelle Einheiten detailliert zu beschreiben. Dies stellt einen klaren Vorteil gegenüber Ansätzen dar, die auf Informationen der amtlichen Statistik beruhen. Das beschriebene fernerkundliche Verfahren ist dabei so ausgelegt, dass es zudem die Nutzung höher aufgelöster Satellitendaten ermöglicht. Folglich kann der räumliche Detaillierungsgrad bei Bedarf weiter gesteigert werden. Zudem gilt es zu betonen, dass eine solche, bayernweite Kartierung innerhalb weniger Wochen erstellt werden kann.

Darüber hinaus wird die Versiegelung für jeden Bildpunkt auf der Grundlage eines identischen Regelwerks berechnet. Somit ist gewährleistet, dass sämtliche regionalen Charakteristika erfasst und entsprechend in den Daten abgebildet werden. Sofern die Satellitendaten in ihren radiometrischen beziehungsweise spektralen Eigenschaften standardisiert sind – etwa durch eine Atmosphärenkorrektur und Histogramm-Angleichung – können einmal erstellte Regressionsmodelle zur Versiegelungsmodellierung zudem auf jede beliebige Aufnahme des zu Grunde liegenden Sensors angewendet werden. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die natur- und kulturräumlichen Gegebenheiten der betrachteten Regionen nicht grundlegend von jenem Raum, auf dem das Modell trainiert wurde, unterscheiden. Sollte dies der Fall sein, muss über die Einbindung entsprechender Trainingsdaten der betreffenden Region (z. B. sehr hoch aufgelöstes Luftbild oder Referenzdatensatz) ein individuelles Modell gene-

riert werden. Diese Eigenschaft ist insbesondere vor dem Hintergrund des umfassenden Datenbestandes des Landsat-Programms von besonderem Interesse. So zeichnet Landsat-5 seit 1984 weltweit systematisch Satellitendaten auf. Die Landsat Mission wird nun seit Mitte 2015 mit Landsat-8 fortgesetzt. Folglich bietet sich die Gelegenheit, bei Bedarf auch rückwirkend auf der Basis einer konstanten Datengrundlage Zeitreihen über mehr als 30 Jahre aufzubauen und entsprechend auszuwerten.

Im Hinblick auf die Etablierung eines satellitenbasierten Ansatzes zum regionalen Monitoring oder der Analyse von Zeitreihen zur Versiegelungsentwicklung hat die vorliegende Studie gezeigt, dass einer in kontinuierlicher Qualität bereitstehenden Datenbasis entscheidende Bedeutung beizumessen ist. Zur Gewährleistung vergleichbarer Eigenschaften der Datengrundlage bedarf die Auswertung von Satellitenaufnahmen im Vergleich zur Verwendung von Daten der amtlichen Statistik beziehungsweise der amtlichen Vermessung jedoch eines Prozedere, das bislang noch nicht vollständig operationalisiert ist. Diese Automatisierung ist eine entscheidende Voraussetzung, um über

- standardisierte Informationsprodukte,
- adäquate Qualitätsstandards und
- flexible Fortschreibungsintervalle

die Akzeptanz fernerkundlich erhobener Produkte zur Versiegelung im raum- und umweltplanerischen Umfeld zu stärken. Sind die zuvor genannten Voraussetzungen gewährleistet, bietet ein solches, fernerkundliches Instrumentarium gegenüber den bisher etablierten Ansätzen bedeutend vielseitigere Möglichkeiten zur

- räumlich detaillierten Kartierung (über-)regionaler Raumeinheiten,
- bedarfsorientierten Erhebung von Versiegelungsinformationen und
- Gewährleistung zeitlich und räumlich flexibler Anwendungen.

Eine abschließende Bewertung der satellitenbasierten Technik zur Erhebung von Informationen zur Versiegelung findet sich in Tab. 12.

Tab. 12: Bewertung der fernerkundlichen Methodik zur Erfassung der Bodenversiegelung im Vergleich zu alternativen Ansätzen. (++ sehr hoch; + hoch; o mittel; - niedrig; -- sehr niedrig)

| | Luftbildauswertung | UGRdL-Ansatz der LABO | Satellitenbasierte Erhebung |
|--|--------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Datenverfügbarkeit | + | ++ | + |
| Flexibilität bezüglich Datenbereitstellung | ++ | - | ++ |
| Vergleichbare Eigenschaften der Daten | + | ++ | o |
| Potential zur Automatisierung | o | + | ++ |
| Räumlicher Detaillierungsgrad | ++ | o | + |
| Genauigkeit, lokal | ++ | - | o |
| Genauigkeit, regional | ++ | + | + |
| Zeit- und Kostenaufwand | -- | ++ | + |
| Adaption an diverse Maßstabsebenen | - | + | ++ |
| Eignung zum Monitoring | - | + | + |

5.2 Versiegelungssituation in Bayern

Die Versiegelungsgrade der Gemeinden liegen im Jahresschnitt 2015 zwischen 27 und 75 %. Auf die gesamte Siedlungs- und Verkehrsfläche Bayerns bezogen ergibt sich ein Anteil der versiegelten Fläche von 50,9 %. Im Vergleich zum Jahresschnitt 2000 gibt es somit ein Plus von 3,7 Prozentpunkten des Versiegelungsgrades der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass der Versiegelungsgrad im Süden Bayerns etwas geringer ist als in den nördlichen Regionen. Hier zeichnen sich insbesondere Unter- sowie Mittelfranken und Oberpfalz durch hohe Werte aus. Darüber hinaus zeigt eine Analyse der Versiegelungsdaten, dass hohe Versiegelungsgrade innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsfläche auch in kleinen, ländlichen Gemeinden zu finden sind.

Bei einer gemeindebezogenen Betrachtung der versiegelten Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner tritt eine Wertespanne zwischen 73 und 3.203 m² auf. Dabei ist zu erwähnen, dass der maximale Wert einen Ausreißer darstellt, der nur von einer weiteren Gemeinde annähernd erreicht wird. Auf Gesamtbayern gerechnet, ergibt sich für jeden der rund 12,84 Millionen Einwohner eine versiegelte Fläche von 330 m². Dieser Indikator ist seit 2000 somit um 53 m² gestiegen. Die Pro-Kopf-Versiegelung macht deutlich, dass in Städten und Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte die Siedlungsfläche viel effizienter genutzt wird.

Tab. 13 zeigt eine Zusammenfassung der ermittelten Versiegelungsmaße für die betrachteten administrativen Einheiten Bayerns. Dabei sei nochmals darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Studie die versiegelte Fläche der Wald- und Feldwege aus methodischen Gründen keine Berücksichtigung gefunden hat. Zudem führt auch die Abdeckung versiegelter Flächen durch Baumbestände zu einer tendenziellen Unterschätzung der wirklichen Versiegelung (vgl. Abschnitt 3.1).

Tab. 13: Zusammenfassung der ermittelten Versiegelungsmaße für die betrachteten administrativen Ebenen.

| Administrative Ebene | Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche [%] | | Versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Einwohner [m ²] | |
|-------------------------------------|---|------|---|------|
| | Max. | Min. | Max. | Min. |
| Bayern | 50,9 | | 330 | |
| Regierungsbezirke | 55,4 | 48,0 | 518 | 221 |
| Planungsregionen | 56,1 | 46,0 | 606 | 154 |
| Landkreise (ohne kreisfreie Städte) | 58,9 | 39,5 | 871 | 169 |
| Gemeinden | 75,4 | 26,9 | 3.203 | 73 |

5.3 Zukünftiger Forschungsbedarf

Weiterentwicklung und Optimierung des satellitengestützten Ansatzes

Beginnend bei der Prozessierungskette zur Analyse der Satellitendaten besteht zum einen weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Verbesserung der sehr hoch aufgelösten Luftbild-Binärmaskierung. In diesem Kontext wird mit Werten von bis zu 94 % zwar grundsätzlich bereits eine hohe Genauigkeit erzielt. Jedoch wirken sich diese Fehlertoleranzen direkt nachteilig auf die Güte des nachfolgend generierten Regressionsmodells und somit auf die Zuweisung der Versiegelungswerte aus. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Qualität der Binärmaskierung besteht darin, den bisherigen, vergleichbar einfach aufgebauten hierarchischen Ansatz durch den Einsatz von Support Vector Machines (SVM) zu ersetzen. In diesem Zusammenhang dürfte insbesondere die hierarchische Staffellung mehrerer Regressionsmodelle – die jeweils auf sehr spezifische Aufgaben trainiert werden – vielversprechende Ergebnisse liefern. Allerdings würde dies bei sehr hoch aufgelösten Bilddaten einen immensen Prozessierungsaufwand darstellen.

Unter Einbindung weiterer Referenzdaten für verschiedene Regionen bietet sich zur Verbesserung der Versiegelungsmodellierung die Erstellung eines Regressionsmodells auf der Grundlage eines künstlich erstellten Mosaiks dieser Referenzdaten an. Mittels eines solchen Mosaiks könnte ein Regressionsmodell generiert werden, das auf einer umfassenden und dabei gleichsam realitätsgetreuen Trainingsgrundlage berechnet wird.

Im Kontext der Modellbildung ist es zudem denkbar, für zuvor definierte Versiegelungsklassen der Referenzdaten ein separates Modell zu erstellen. Eine derartige Anpassung würde eine bessere Annäherung der aus den Landsat-Szenen geschätzten Versiegelungsgrade an die Werte der Referenzdaten ermöglichen. Darüber hinaus kann auf dieser Basis eine erweiterte Statistik abgeleitet werden, die auf Grundlage klassenbasierter Erhebungen genauere Aussagen über Qualität respektive Abweichung einzelner Klassen erlaubt. Auf diesem Wege können gezielt Optimierungen umgesetzt werden, die jeweils nur eine Versiegelungsstufe respektive ein Regressionsmodell betreffen.

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass insbesondere spektrale Unterschiede in den zu Grunde liegenden Landsat-Kacheln die szenenübergreifende Anwendung eines Modells erschweren. Ein erweiterter Trainingsprozess, der spektrale Informationen aus verschiedenen Landsat-Szenen als Lernbasis verwendet, könnte folglich dazu beitragen, dass das generierte Regressionsmodell durch die größere Lernbasis eine höhere Toleranz gegenüber Schwankungen in den Reflektionswerten aufweist. Des Weiteren würde sich auch eine Verwendung von Zeitreihen anbieten. Dies würde eine szenenübergreifende Modellierung deutlich vereinfachen, denn durch die Nutzung mehrerer Szenen pro Kachel werden temporale Effekte minimiert.

Wie im vorangegangenen Unterkapitel aufgeführt, treten im Zusammenhang mit einigen unbedeckten Böden auf Acker- oder Schotterflächen signifikante Abweichungen auf. Um diese Flächen möglichst genau zu extrahieren wäre die Einbindung von Radar-Fernerkundungsdaten möglich, denn das Reflexionsverhalten von bebauten Gebieten unterscheidet sich in diesem Datentyp merklich von anderen Landoberflächen. Somit würden entsprechende Flächen bei der eigentlichen Versiegelungsanalyse nicht mehr berücksichtigt beziehungsweise als unversiegelt deklariert.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Erweiterung des bisherigen Ansatzes besteht darin, die Funktionalität so auszubauen, dass Siedlungsflächen direkt automatisiert über die Satellitendaten identifiziert werden. Somit könnte die Einbindung diesbezüglicher Vektordaten entfallen, was die Flexibilität des Ansatzes nochmals deutlich erhöhen würde. Diesbezüglich wäre auch die Einbindung von verfügbaren Klassifikationen (u.a. CORINE Land Cover (EEA, 2016), Global Urban Footprint) möglich.

Validierung und Kalibrierung statistikbasierter Ansätze

Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass über die Auswertung von Satellitendaten Informationen zur Versiegelung mit einer thematischen Güte erhoben werden können, die mit denen aktuell eingesetzter Verfahren wie etwa einer Ableitung über Stadtstrukturtypen oder dem UGRdL-Ansatz der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2007) vergleichbar ist. Dabei bietet das letztgenannte Verfahren den Vorteil einer kontinuierlichen, bundesweit verfügbaren und jährlich aktualisierten Datenbasis. Allerdings ermöglicht die satellitenbasierte Auswertung eine weitaus höher aufgelöste, räumliche Zuordnung der Versiegelungsinformation. Vor diesem Hintergrund bieten satellitengestützte Versiegelungskartierungen eine vielversprechende Möglichkeit zur Validierung und Kalibrierung statistikbasierter Methoden. Hier seien beispielhaft das Potential zur flächendeckenden Erhebung nutzungsspezifischer Versiegelungswerte oder die Definition genauerer Korrekturfaktoren zur lokalen beziehungsweise regionalen Anpassung der statistikbasierten Modelle genannt. So ist denkbar, dass mittels einer fernerkundungsbasierten Auswertung – die durchaus auf einige repräsentative Beispielräume begrenzt sein könnte – in einem regelmäßigen Turnus die Validität bestehender Modelle überprüft und gegebenenfalls gleichsam Kenngrößen bezüglich einer notwendigen Anpassung erhoben werden.

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 1: | Abdeckung Bayerns durch den Landsat-8 Satelliten. | 16 |
| Abb. 2: | Lage der Luftbildaufnahmen in Relation zum Landsat-Mosaik. | 18 |
| Abb. 3: | Atmosphärenkorrektur der Landsat-Daten. | 19 |
| Abb. 4: | Anpassung atmosphärenbedingter Unterschiede in den Spektralwerten zwischen zwei Landsat-Aufnahmen. | 20 |
| Abb. 5: | Ausschnitte der Luftbilder für Würzburg, München und Passau. | 20 |
| Abb. 6: | Räumliche Abdeckung eines Landsat-Pixels am Beispiel von Luftaufnahmen der Stadt Würzburg. | 24 |
| Abb. 7: | Ablaufschema zur Modellierung der Flächenversiegelung. | 26 |
| Abb. 8: | Hierarchischer Entscheidungsbaum zur automatisierten Generierung einer Versiegelungsmaske auf der Basis von Luftbildern aus der Bayernbefliegung. | 27 |
| Abb. 9: | Schematische Darstellung zur Generierung der Trainingsdaten. | 28 |
| Abb. 10: | Darstellung der Siedlungs- und Verkehrsfläche aus ATKIS. | 29 |
| Abb. 11: | Luftbild-Binärmaske und daraus erzeugter Trainingsdatensatz. | 36 |
| Abb. 12: | Eingeschränkte Sichtbarkeit versiegelter Areale aufgrund von Überdeckungen durch Baumkronen und Schattenflächen. | 37 |
| Abb. 13: | Landsat-Aufnahme und Differenz der modellierten Versiegelungswerte zum Validierungsdatensatz. | 38 |
| Abb. 14: | Versiegelungskartierung für verschiedene Städte in Bayern. | 41 |
| Abb. 15: | Versiegelungskartierungen für verschiedene Objekte in Bayern. | 42 |
| Abb. 16: | Kombination aus fernerkundlich erhobenem Versiegelungsraster und linienhaften Infrastrukturelementen aus ATKIS. | 43 |
| Abb. 17: | Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Jahr 2015 auf Ebene der Gemeinden. | 45 |
| Abb. 18: | Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Jahr 2015 in den Regionen München und Bamberg. | 46 |
| Abb. 19: | Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 auf Ebene der Gemeinden. | 47 |
| Abb. 20: | Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 in den Regionen München und Bamberg. | 48 |
| Abb. 21: | Versiegelungsgrad im Jahr 2015 der Landkreise und kreisfreien Städte. | 50 |
| Abb. 22: | Versiegelte Fläche pro Einwohner im Jahr 2015 der Landkreise und kreisfreien Städte. | 51 |
| Abb. 23: | Veränderung der fernerkundlich erhobenen versiegelten Flächen auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zwischen 2000 und 2015. | 55 |
| Abb. 24: | Veränderung des Versiegelungsgrades der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zwischen 2000 und 2015. | 57 |

6.2 Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Tab. 1: | Zusammensetzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Bayern für das Jahr 2015. | 12 |
| Tab. 2: | Technische Daten des Landsat-8 OLI und TIRS Satelliten. | 15 |
| Tab. 3: | Technische Daten zur Bayernbefliegung – Digitale Luftbilder. | 17 |
| Tab. 4: | Flächenhafte Objektarten und -gruppen des ATKIS-Bereichs „Siedlung und Verkehr“. | 21 |
| Tab. 5: | ATKIS-Objektarten der linienhaften Infrastrukturelemente. | 29 |
| Tab. 6: | Aktualisierte durchschnittliche Breite und Versiegelung der linienhaften ATKIS-Infrastrukturelemente. | 30 |
| Tab. 7: | Übersicht der statistischen Parameter zur Validierung des Versiegelungsrasters. | 34 |
| Tab. 8: | Qualitätsstatistiken zur Versiegelungsberechnung gegenüber den Referenzdaten. | 39 |
| Tab. 9: | Versiegelungsmaße der Regierungsbezirke in Bayern im Jahr 2015. | 52 |
| Tab. 10: | Versiegelungssituation in den 18 Planungsregionen Bayerns. | 53 |
| Tab. 11: | Versiegelungssituation in den LEP-Gebietskategorien im Jahr 2015. | 54 |
| Tab. 12: | Bewertung der fernerkundlichen Methodik zur Erfassung der Bodenversiegelung im Vergleich zu alternativen Ansätzen. | 59 |
| Tab. 13: | Zusammenfassung der ermittelten Versiegelungsmaße für die betrachteten administrativen Ebenen. | 60 |
| Tab. 14: | Übersicht der Versiegelungsmaße der einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte in Bayern für das Jahr 2015. | 69 |

6.3 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|---|
| ABDSB | Autobahndirektion Südbayern |
| AdV | Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland |
| AK UGRdL | Arbeitskreis "Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder" |
| ATKIS | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem |
| BauGB | Bundes-Baugesetzbuch |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz |
| BfN | Bundesamt für Naturschutz |
| BKG | Bundesamt für Kartographie und Geodäsie |
| BLAG NE | Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Entwicklung |
| BMBau | Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit |
| DESTATIS | Statistisches Bundesamt |
| DFD | Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum des DLR |

| | |
|-----------|--|
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. |
| DN | Digital Number, Grauwert eines Bildpixels |
| EEA | European Environment Agency |
| ESA | European Space Agency |
| ETM | Enhanced Thematic Mapper, Sensor des Landsat-Satelliten |
| EUSI | European Space Imaging |
| FH | Fachhochschule |
| GIS | Geographisches Informationssystem |
| I&CLC2000 | Image2000-Datensatz (Landsat-Daten) und Corine Landcover 2000 Projekt |
| LABO | Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz |
| LDBV | Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern |
| LDS NRW | Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen |
| LEP | Landesentwicklungsprogramm Bayern |
| LfStat | Bayerisches Landesamt für Statistik |
| LfU | Bayerisches Landesamt für Umwelt |
| LfUG | Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie |
| LVG | Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern |
| MSS | Multispectral Sensor, Sensor des Landsat-Satelliten |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index, Vegetationsindex |
| NIR | Near Infrared, Aufnahmekanal im Nahen Infrarot |
| OLI | Operational Land Imager |
| OKSTRA | Objektkatalog Straßen |
| Pan | Panchromatischer Aufnahmekanal |
| UBA | Umweltbundesamt |
| USGS | United States Geological Survey |
| UTM | Universal Transversal Mercator |
| RNE | Rat für Nachhaltige Entwicklung |
| StMLF | Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten |
| StMUGV | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz |
| SuV | Siedlungs- und Verkehrsfläche, Statistische Kenngröße und Indikator |

| | |
|-----|--|
| SVM | Support Vector Machines, Regressions- und Klassifikationsverfahren |
| TM | Thematic Mapper, Sensor des Landsat-Satelliten |

6.4 Quellenverzeichnis

Literatur

ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung, 2. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

BAHRENBURG, G., GIESE, E. UND NIPPER, J. (1984): Statistische Methoden in der Geographie, Band 1. 3. Auflage. Teubner Studienbücher, Stuttgart.

BAHRENBURG, G., GIESE, E., MEVENKAMP, N. UND NIPPER, J. (2010): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik. 5. Auflage. Gebr. Borntraeger, Stuttgart.

BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (2013): Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie – Langfassung. München.

BLAG NE (2005): Erfahrungsbericht Indikatoren der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Entwicklung – BLAG NE. Verabschiedet von der 65. Umweltministerkonferenz am 3. und 4. November 2005, Rostock.

BMBAU (1988): Städtebauliche Lösungsansätze zur Verminderung der Bodenversiegelung als Beitrag zum Bodenschutz'. Schriftenreihe „Forschung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau Heft Nr. 456, 1988.

BÖCKER, R. (1985): Bodenversiegelung – Verlust vegetationsbedeckter Flächen in Ballungsräumen – am Beispiel von Berlin (West), Landschaft und Stadt 17, 1985, S. 57 – 61.

BRANDT, E. (2001): Studium der Umweltwissenschaften: Rechtswissenschaften, Springer Verlag, Heidelberg.

CABLK, M. E. UND MINOR, T. B. (2003): Detecting and discriminating impervious cover with high-resolution IKONOS data using principal component analysis and morphological operators. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (2003), S. 4627 – 4645.

DECH, S.W. (1997): Anwendung der Satellitenfernerkundung. Von der geowissenschaftlichen Forschung zum operationellen Einsatz. DLR-Forschungsbericht 97(52), Köln, Habilitationsschrift zur Erlangung der Venia Legendi für Geographie an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Würzburg.

ESCH, T., MARCONCINI, M., FELBIER, A., ROTH, A., HELDENS, W., HUBER, M., SCHWINGER, M., TAUBENBÖCK, H., MÜLLER, A. UND DECH, S. (2013): Urban Footprint Processor—Fully Automated Processing Chain Generating Settlement Masks From Global Data of the TanDEM-X Mission. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10, 6.

FAN, R.-E., CHEN, P.-H. UND LIN, C.-J. (2005): Working set selection using the second order information for training SVM. *Journal of Machine Learning Research*, 6 (2005), S. 1889-1918.

FRIE, B. UND HENSEL, R. (2007): Schätzverfahren zur Bodenversiegelung. In: Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Statistische Analysen und Studien Nordrhein-Westfalen, Band 44. ISSN 1619-506X. S. 19-34.

JENSEN, J.R. (2005): *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (Prentice Hall Series in Geographic Information Science), 3. Auflage, Pearson Prentice Hall, New Jersey.

KRAMER, G (2002): Flächenverbrauch und Versiegelung – auch ein rheinland-pfälzisches Problem? -. Statistische Monatshefte Rheinland-Pfalz, 11 (2002), S. 189-203.

KREUZ, D. UND WENNG, S. (1990): Flächennutzung, Flächennutzungswandel und Flächenversiegelung in Bayern, Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Ottobrunn.

LABO (2007): Indikator Versiegelung, Abschlussbericht der Fachgespräche „Indikator Versiegelung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, unveröffentlicht.

LFSTAT (2006): Pressemitteilung 118/2006/34/C, 24.10.2006.

LFU (2007): Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern. Augsburg.

LFU (2015): Umweltbericht Bayern 2015. Augsburg.

LFUG (2003): Umweltindikatoren für Sachsen. Broschüre des Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie, Artikel-Nr. L 0-10/1, Dresden.

RICHARDS, J.A. , JIA, X. (1999): Remote Sensing Digital Image Analysis, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

RNE (2004): Mehr Wert für die Fläche: Das „Ziel-30-ha“ für die Nachhaltigkeit in Stadt und Land. Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung an die Bundesregierung. RNE-Texte Nr. 11, Berlin.

SCHEFFER, F. ET AL. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SCHÖNWIESE, C.D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 3. Auflage. Gebrüder Bornträger, Berlin.

SINGER, C. (1995): Stadtökologisch wertvolle Freiflächen in Nordrhein-Westfalen. ILS-Schriften, 96 (1995), Dortmund

SMOLA, A. J. UND SCHÖLKOPF, B. (1998): A Tutorial on Support Vector Regression. NeuroCOLT Technical Report Series NC2-TR-1998-030.

STMLF (2006): Ländliche Entwicklung in Bayern. Aktionsprogramm Dorf vital. Materialienheft 40/2006 des Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, ISSN 0943-7622, München.

STMUGV (2005): Bündnis zum Flächensparen, Aktionsprogramm 2005. Broschüre des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München.

UBA (2001): Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Umweltbundesamt, 7. Ausgabe, 2001, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

VAPNIK, V. N. (1995): The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, Berlin.

VAPNIK, V. N. (1998): Statistical Learning Theory. Wiley & Sons, New York.

Internet

ADV (2007): Erläuterungen zum ATKIS-Objektartenkatalog der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. Abrufbar unter: www.atkis.de/dstinfo/dstinfo.dst_start1?dst_oar=2000&inf_sprache=deu&c1=1&dst_typ=25&dst_ver=dst&dst_land=BA. Stand 11.04.2007

BFN (2006): Homepage des Bundesamtes für Naturschutz. Abrufbar unter: www.bfn.de/glossar_tz.html. Stand 12.01.2006

- BKG (2013): Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung). Aufrufbar unter: www.ldbv.bayern.de/file/pdf/8479/basis-dlm-aaa.pdf. Stand 13.08.2013
- BMU (2007): Homepage des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abrufbar unter: www.bmu.de/bodenschutz/doc/text/6246.php. Stand 29.01.2007
- CHANG C.-C. UND LIN C.-J. (2001): LIBSVM: a library for support vector machines. Abrufbar unter: www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm. Stand 20.12.2006
- DESTATIS (2006): Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2005. Abrufbar unter: www.destatis.de/download/d/ugr/suv2005.pdf. Stand 23.11.2006
- DESTATIS (2016): Homepage des Statistischen Bundesamts. Abrufbar unter: www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/FlaechennutzungAktuell.html. Stand 19.07.2016
- EEA (2016): Copernicus Land Monitoring Services. CLC 2012. Aufrufbar unter: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>. Stand: 24.01.2016
- EUSI (2007): Homepage der European Space Imaging. Abrufbar unter: www.euspaceimaging.com/default.asp. Stand 21.01.2007
- GEOEYE (2007): Homepage von GeoEye. Abrufbar unter: www.geoeye.com/products/imagery/ikonos/default.htm. Stand 03.02.2007
- HSU C.-W., CHANG C.-C. UND LIN C.-J. : A Practical Guide to Support Vector Classification. Abrufbar unter: www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf. Stand 20.01.2007
- KRAUSE, T. (2005): Die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Sachsen, Schrift des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen. Abrufbar unter: https://www.statistik.sachsen.de/download/300_Voe-Zeitschrift/2005_01_30-37_Krause.pdf. Stand 30.01.2005
- LDBV (2014): Luftbildprodukte. Aufrufbar unter: www.ldbv.bayern.de/file/pdf/1039/download_faltblatt-luftbilder08.pdf. Stand 2014
- LDBV (2015): Bayernbefliegung, Seit 1987 aktuelle Luftbilder von ganz Bayern. Aufrufbar unter: www.ldbv.bayern.de/vermessung/luftbilder/bayernbefliegung.html. Stand 2015
- LFSTAT (2016): 11,9 % der Fläche Bayerns dient Siedlungs- und Verkehrszwecken. www.statistik.bayern.de/presse/archiv/2016/294_2016.php. Stand 2016
- LIKI (2017): Homepage der Länderinitiative Kernindikatoren. Abrufbar unter: <https://indikatorenlanuv.nrw.de/liki/> Stand 20.06.2017
- STADT BRAUNSCHWEIG (1998): Homepage der Stadt Braunschweig. Abrufbar unter: www.braunschweig.de/umwelt_naturschutz/infos/umweltatlas/5/5_4.html. Stand Februar 1998
- REFINA (2007): Homepage des Lehrstuhls für Fernerkundung am Geographischen Institut der Universität Würzburg. Abrufbar unter: www.geographie.uni-wuerzburg.de/arbeitsbereiche/fernerkundung/forschungsprojekte/refina/. Stand 15.02.2007
- RICHTER, R. (2006): Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 User Guide, Version 6.2). Abrufbar unter: www.rese.ch/pdf/atcor23_manual.pdf. Stand 15.02.2007
- UBA (2005): www.umweltbundesamt.de/dux/bo-inf.htm. Stand 21.12.2006

USGS (2016a): Landsat Missions. Abrufbar unter: http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php. Stand 15.08.2016

USGS (2016b): Landsat Processing Details. Abrufbar unter: http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php. Stand 25.08.2016

USGS (2016c): International Ground Station (IGS) Network. Aufrufbar unter: http://landsat.usgs.gov/about_ground_stations.php. Stand: 23.02.2016

USGS (2016d): Landsat 8. Aufrufbar unter: <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>. Stand 1.12.2015

USGS (2016e): Landsat 8 History. Aufrufbar unter: http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php. Stand 20.11.2015

7 Anhang

Tab. 14: Übersicht der Versiegelungsmaße der einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte in Bayern für das Jahr 2015. Die kreisfreien Städte sind durch den Zusatz „(Stadt)“ gekennzeichnet.

| Landkreis | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m ²] | Versiegelungsgrad [%] | Zunahme der versiegelten Fläche seit 2000 [ha] |
|-------------------------|--|-----------------------|--|
| Aichach-Friedberg | 332 | 46,4 | 480 |
| Altötting | 371 | 54,0 | 934 |
| Amberg-Sulzbach | 648 | 56,0 | 1.568 |
| Amberg (Stadt) | 234 | 56,5 | 168 |
| Ansbach | 596 | 52,5 | 113 |
| Ansbach (Stadt) | 280 | 50,2 | 142 |
| Aschaffenburg | 284 | 53,4 | 406 |
| Aschaffenburg (Stadt) | 200 | 55,5 | 348 |
| Augsburg | 299 | 44,5 | 1.275 |
| Augsburg (Stadt) | 114 | 51,6 | 542 |
| Bad Kissingen | 584 | 51,5 | 1.170 |
| Bad Tölz-Wolfratshausen | 277 | 47,3 | 746 |
| Bamberg | 456 | 57,1 | 505 |
| Bamberg (Stadt) | 199 | 53,0 | 259 |
| Bayreuth | 513 | 47,8 | 747 |
| Bayreuth (Stadt) | 185 | 47,6 | 266 |
| Berchtesgadener Land | 280 | 50,0 | 815 |
| Cham | 604 | 48,6 | 1.735 |
| Coburg | 454 | 51,7 | 529 |
| Coburg (Stadt) | 193 | 40,5 | 111 |
| Dachau | 248 | 47,6 | 1.128 |
| Deggendorf | 446 | 50,1 | 948 |
| Dillingen a.d. Donau | 483 | 49,0 | 445 |
| Dingolfing-Landau | 520 | 48,8 | 778 |
| Donau-Ries | 582 | 54,0 | 492 |
| Ebersberg | 220 | 46,0 | 692 |
| Eichstätt | 496 | 54,8 | 389 |
| Erding | 374 | 47,3 | 1.197 |
| Erlangen-Höchstadt | 281 | 51,4 | 113 |
| Erlangen (Stadt) | 164 | 55,9 | 226 |
| Forchheim | 349 | 49,4 | 663 |
| Freising | 305 | 48,6 | 1.211 |
| Freyung-Grafenau | 537 | 47,6 | 402 |
| Fürstenfeldbruck | 169 | 44,9 | 694 |
| Fürth | 227 | 48,4 | 415 |
| Fürth (Stadt) | 133 | 56,0 | 211 |
| Garmisch-Partenkirchen | 300 | 49,6 | 516 |
| Günzburg | 405 | 46,3 | 349 |

| Landkreis | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m ²] | Versiegelungsgrad [%] | Zunahme der versiegelten Fläche seit 2000 [ha] |
|------------------------------|--|-----------------------|--|
| Hassberge | 667 | 57,6 | 661 |
| Hof | 485 | 45,5 | 999 |
| Hof (Stadt) | 210 | 44,4 | 65 |
| Ingolstadt | 208 | 56,4 | 473 |
| Kaufbeuren | 166 | 47,3 | 58 |
| Kelheim | 473 | 51,6 | 277 |
| Kempten (Allgäu) | 157 | 50,9 | 131 |
| Kitzingen | 621 | 58,9 | 601 |
| Kronach | 511 | 54,6 | 928 |
| Kulmbach | 511 | 50,3 | 896 |
| Landsberg a. Lech | 348 | 46,2 | 925 |
| Landshut | 463 | 48,6 | 1.239 |
| Landshut (Stadt) | 145 | 45,8 | 126 |
| Lichtenfels | 512 | 56,9 | 633 |
| Lindau (Bodensee) | 270 | 49,5 | 670 |
| Main-Spessart | 533 | 56,4 | 332 |
| Memmingen (Stadt) | 239 | 56,6 | 138 |
| Miesbach | 300 | 46,3 | 861 |
| Miltenberg | 349 | 55,4 | 1.176 |
| Mühdorf a. Inn | 391 | 51,2 | 1.382 |
| München | 176 | 45,6 | 617 |
| München (Stadt) | 73 | 45,9 | 777 |
| Neu-Ulm | 280 | 51,6 | 615 |
| Neuburg-Schrobenhausen | 431 | 47,1 | 383 |
| Neumarkt i.d. Opf. | 610 | 56,2 | 1.426 |
| Neustadt a.d. Waldnaab | 871 | 57,8 | 2.635 |
| Neustadt/Aisch-Bad Windsheim | 692 | 54,8 | 85 |
| Nürnberg (Stadt) | 128 | 57,1 | 939 |
| Nürnberger Land | 282 | 47,5 | 472 |
| Oberallgäu | 357 | 53,5 | 1.769 |
| Ostallgäu | 427 | 52,1 | 1.094 |
| Passau | 485 | 47,2 | 1.704 |
| Passau (Stadt) | 218 | 49,9 | 64 |
| Pfaffenhofen a.d. Ilm | 435 | 51,9 | 1.021 |
| Regen | 512 | 49,4 | 1.163 |
| Regensburg | 426 | 52,1 | 1.138 |
| Regensburg (Stadt) | 174 | 56,0 | 231 |
| Rhön-Grabfeld | 682 | 55,4 | 550 |
| Rosenheim | 274 | 44,2 | 1.814 |
| Rosenheim (Stadt) | 123 | 50,3 | 65 |
| Roth | 449 | 53,7 | 783 |
| Rottal-Inn | 548 | 50,3 | 2.199 |
| Schwabach (Stadt) | 186 | 52,2 | 133 |

| Landkreis | Versiegelte Fläche pro Einwohner [m²] | Versiegelungs- grad [%] | Zunahme der versiegelten Fläche seit 2000 [ha] |
|--------------------------|---|--|---|
| Schwandorf | 578 | 54,2 | 928 |
| Schweinfurt | 517 | 56,6 | 781 |
| Schweinfurt (Stadt) | 216 | 56,7 | 157 |
| Starnberg | 207 | 39,5 | 511 |
| Straubing-Bogen | 614 | 49,6 | 1.188 |
| Straubing (Stadt) | 235 | 55,4 | 25 |
| Tirschenreuth | 662 | 54,4 | 775 |
| Traunstein | 367 | 49,2 | 1.773 |
| Unterallgäu | 468 | 48,9 | 830 |
| Weiden i.d. Opf. | 276 | 56,1 | 81 |
| Weilheim-Schongau | 336 | 49,3 | 1.052 |
| Weißenburg-Gunzenhausen | 575 | 53,0 | 170 |
| Wunsiedel/Fichtelgebirge | 436 | 48,0 | 556 |
| Würzburg | 400 | 55,3 | 244 |
| Würzburg (Stadt) | 171 | 50,7 | 340 |

