

Urbane Oberflächenmodelle und -inventare zur Operationalisierung der Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen

Elias Naber, Rebekka Volk, Alice Krehl, Stefan Norra, Frank Schultmann

Zusammenfassung

Die nachhaltige und ressourceneffiziente Quartiersentwicklung erfordert eine Analyse des Ausgangszustands, die Formulierung von Zielen sowie die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen. Der Beitrag zeigt, wie urbane Oberflächenmodelle und -inventare dazu beitragen können, Kommunen bei diesem Prozess zu unterstützen. Eine Herausforderung stellt die Erhebung und Ableitung von Landbedeckungs-, Befestigungs- und Versiegelungsarten auf Teilflächenebene von Flurstücken dar. Amtliche und kommunale Daten erfassen die Nutzung von Flächen, welche auf die Befestigungs- oder Oberflächenart hinweist, aber keine eindeutige Klassifizierung zulässt. Eine datengetriebene Methode mit kommunal verfügbaren Katasterdaten und multispektralen Orthophotos zur Identifizierung von Befestigungs- bzw. Oberflächenarten wird vorgestellt und evaluiert. Die Evaluierung anhand eines granularen Validierungsdatensatzes zeigt, dass die auf Nutzungsart und Vegetationsindex basierte und vorgestellte Klassifizierung nur für eine grobe Einteilung in versiegelte oder unversiegelte Flächen anwendbar ist. Für eine genauere Klassifizierung auf Teilflächenebene von Flurstücken muss die Methodik weiterentwickelt und durch andere Ansätze erweitert werden.

Schlagworte: Entsiegelung; Landbedeckung; Datenanalyse; Befestigungsarten; Quartiersentwicklung

1 Einführung

Der Handlungsdruck zu mehr Klimaanpassung und Umsetzung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Stadtquartieren ist hoch. Die Beanspruchung der Ressource Fläche ist meistens mit negativen Umweltauswirkungen verknüpft. Beispielsweise wird der natürliche Wasserkreislauf gestört und durch die verwendeten Materialien die Wärmekapazität erhöht. Die genannten Beispiele führen zu oder verstärken Wärmeinseleffekte. Daher erfahren Flächen im Sinne einer lokal begrenzten Ressource einen

hohen Stellenwert in der Planung. Des Weiteren wird der nachhaltige Umgang mit Flächen von der Gesellschaft und Gesetzgebung gefordert. Einerseits wurde erkannt, dass Bodenflächen eine zentrale Rolle im Klima- und Umweltschutz einnehmen und unmittelbar durch künftige Klimaveränderungen betroffen sind. Andererseits werden nicht auf Böden projizierte Flächen verstärkt zur Steigerung der Produktivität und Nachhaltigkeit genutzt (z. B. vertikale Gärten oder Fassaden-Photovoltaik). Neben der Begrenzung und Umkehr des Flächenverbrauchs werden viele Handlungskonzepte zur Nutzung der Ressource Fläche zur direkten oder indirekten Anpassung an den Klimawandel, Verbesserung der Lebensqualität, zum Naturschutz und für die Unterstützung der gesellschaftlichen Transformation zur Klimaneutralität entwickelt. Das Nachhaltigkeitsziel SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ fasst diese Ziele zusammen. Diese Transformation stellt für die Stadtentwicklung eine komplexe Managementaufgabe dar, in welcher Komplexität, Vernetztheit, Eigendynamik, Intransparenz und Polytelie gleichzeitig und integriert behandelt werden müssen (Artmann 2015).

Geoinformationssysteme (GIS) und die sich stetig verbessernde Datenlage verändern die Art und Weise der Stadtplanung und -verwaltung (BBSR 2020). Eine wissenschaftlich fundierte und datengetriebene Herangehensweise ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die strategische und operative Planung von Nachhaltigkeits- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Hierfür existieren viele Ansätze, welche in der Literatur klassifiziert wurden (Volk et al. 2022; Voskamp et al. 2021). Insgesamt rücken Analysen und Bewertungen von Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Stadtentwicklung in den Fokus von Entscheidungsunterstützungswerkzeugen. Dies stellt höhere Ansprüche an die Digitalisierung und die Daten (ebenda). Im Folgenden wird der Ansatz der Oberflächenmodellierung und -inventarisierung aus den Ergebnissen der Forschungsprojekte NaMaRes und namares 2.0 zusammengefasst (www.iip.kit.edu/460_4242.php). Anhand eines Beispiels wird die Herausforderung der Generierung von granularen Landbedeckungsdaten vorgestellt und behandelt.

2 Oberflächenmodellierung, -inventarisierung und die Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen

Zur Ressource Fläche gehören natürliche, urbane Böden und anthropogene vertikale und horizontale Flächen, z. B. auf oder an Gebäuden, Bauwerken oder Infrastrukturen. Diese Flächen beeinflussen den Stadtraum maßgeblich und bieten bislang meist ungenutzten Platz für Nachhaltigkeits- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Eine

vollständige Erfassung dieser Flächen ist notwendig, um die Anforderungen verschiedener Untersuchungen zu erfüllen. Zum Beispiel müssen für Stadtklimasimulationen alle Oberflächen einer Oberflächenart zugeordnet und parametrisiert werden (Maronga et al. 2020). Für Analysen der Ökosystemleistungen und die Planung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen ist die Verortung und Quantifizierung von Potenzialen von großer Bedeutung und stellen hohe Anforderungen an Oberflächeninventare. Die Projekte NaMaRes und namares 2.0 zielen darauf ab, den integrierten Planungs- und Transformationsprozess auf Quartiersebene digital zu unterstützen. Dafür wurden Grundlagen und das namares-Modell für die Erfassung und Bewertung des Ist-Zustands von städtischen Quartieren, sowie für die Konzeptionierung und Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen und Quartieren erarbeitet (Naber et al. 2022; Naber et al. 2023; Volk et al. 2023). Das namares-Modell generiert ein vollständiges Oberflächeninventar (Abbildung 1).

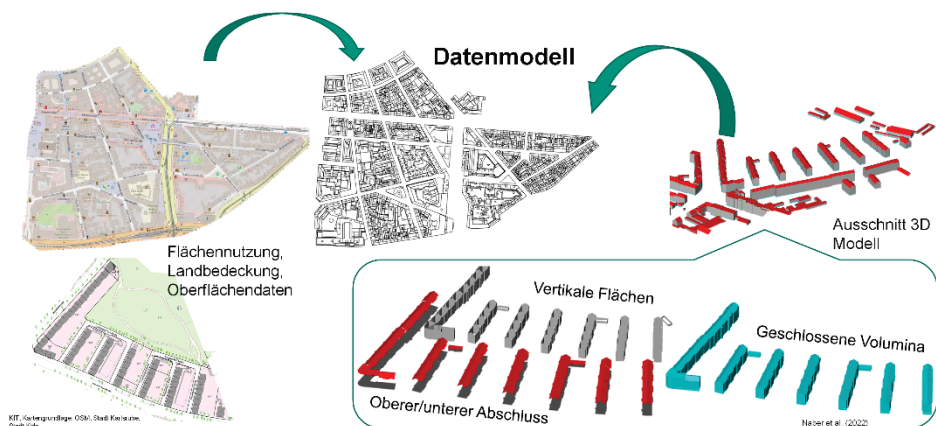


Abb. 1: Datengrundlagen des namares-Modells und Zusammensetzung des Oberflächeninventars (Eigene Darstellung, Kartengrundlage: OSM, Karlsruhe, Köln).

Zusätzlich errechnet das Modell die technischen (sozialen) Potenziale für jede betrachtete Maßnahme je Flurstück (Abbildung 2). Dabei berücksichtigt es die Anforderungen und Zwänge jeder einzelnen Teilfläche innerhalb eines Flurstücks. Durch die vollständige Erfassung sind umfangreiche Aussagen zum Ist-Zustand möglich. Gemeinsam mit einer detaillierten Maßnahmenmodellierung werden viele weitere Analysen durchführbar. Eine besondere Fähigkeit ist die techno-ökonomische Bewertung, die Potenziale identifiziert und eine detaillierte Analyse von Förderinstrumenten ermöglicht (Naber et al. 2023; Naber et al. 2022; Volk et al. 2023).

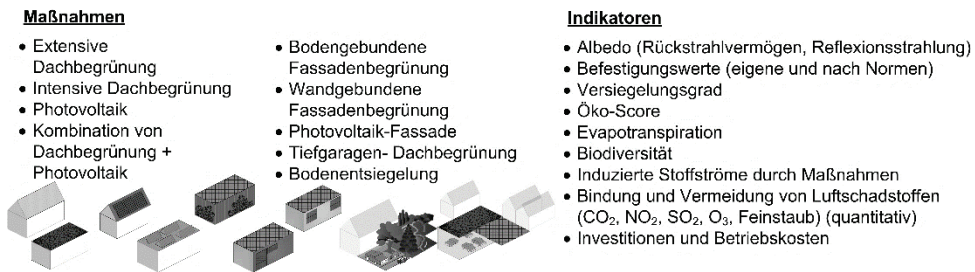


Abb. 2: Übersicht der modellierten Maßnahmen und Indikatoren (Eigene Darstellung)

Insbesondere die steigende Verfügbarkeit von hochauflösenden multispektralen Orthophotos (in Deutschland flächendeckend) fördert die Entwicklung von viel höher auflösenden Ansätzen, welche auf Teilflächen von Flurstücken Klassifizierungen mit hoher Genauigkeit erlauben sollten (Schmidt und Barron 2020).

Solche Analysen stellen hohe, aber realisierbare, Anforderungen an die Eingangsdaten. Eine Prämisse der Modellentwicklung war die Verarbeitung von vorhandenen kommunalen Daten. Die Datenanforderungen und Einschätzungen zur Verfügbarkeit sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Granularität der Daten sollte Aussagen im Bearbeitungsraster Flurstück zulassen und somit auch Teilflächen beinhalten. Ein essenzieller Datensatz stellt die Landbedeckung/Oberflächenbefestigung dar. Obwohl die gesplittete Abwassergebühr (>95 % der Kommunen in Baden-Württemberg erheben diese) im Wesentlichen auf Informationen über die Oberflächenbefestigung basiert, liegen die Daten häufig nicht als GIS-Datensätze vor. Damit stellt sich die Herausforderung, wie die fehlenden Daten erzeugt werden können. Hierzu existieren zahlreiche Ansätze. Bereits seit Jahrzehnten werden aus multispektralen und Radar-(Satelliten-)Aufnahmen die Landbedeckungen abgeschätzt, jedoch häufig mit Auflösungen, die auf Quartiersebene nicht ausreichend hoch sind (>1 m, oft >10 m) (Vali et al. 2020; Thomas et al. 2003; Hodgson et al. 2003).

Tab. 1: Notwendige Daten für das namares-Modell und Einschätzung der Verfügbarkeit. Priorität 1: Unbedingt notwendig, Priorität 1-2: Für den vollen Funktionsumfang unbedingt notwendig, Priorität 2: Für erweiterte Analysen notwendig (Eigene Darstellung)

Datenbeschreibung (inkl. Format)	Priorität	Geschätzte Verfügbarkeit
CityGML – 3D Gebäudemodell LOD2 oder besser (Vektordaten)	1	Gut – Sehr gut
ALKIS® Daten, Liegenschaftskataster (Vektordaten)	1	Sehr gut
Befestigungsdaten – Oberflächendaten z.B. aus der Erhebung zur gesplitteten Abwassergebühr (Vektordaten)	1	Schlecht – Gut
Luftbilder – Orthophotos mit RGBI (Rasterdaten, Kacheln)	1	Sehr gut
Laserscan-Daten (Punktwolken)	1	Gut – Sehr gut
Bäume/Grünflächen inkl. Dachbegrünung (Punkt-, Vektordaten)	1-2	Gut
Statistische Baublockkarte und dazugehörige Erhebungsdaten, z. B. Bevölkerung, Anzahl und Alter (Vektordaten, Tabellen)	1-2	Sehr gut
Wohneinheiten je Gebäude/Baublock (georeferenzierte Daten)	1-2	Mittel – Gut
Eigentumsart; öffentliche/priv. Flurstücke (georeferenzierte Daten)	1-2	Gut
Denkmalschutzdaten (georeferenzierte Daten)	1-2	Gut
Relevante Förderprogramme, -gebiete (Satzungen, Dokumente)	1-2	Gut
DGM – Digitales Geländemodell (Gitterdaten)	2	Gut – Sehr gut
Klimakarten (falls vorhanden)	2	Mittel
Weitere Flächennutzungsdaten: Gründächer, PV-Flächen etc.	2	Mittel

Diese reichen von handgefertigten (ebenda) bis zu selbstlernenden Algorithmen (Künstliche Intelligenz - KI) (Yang et al. 2018). Die KI-Ansätze basieren auf Trainingsdatensätzen mit den gesuchten Klassifizierungen, lernen die Zusammenhänge zwischen den Daten und den Klassifizierungen und können für neue unklassifizierte Daten die wahrscheinlichste Klassifizierung wiedergeben.

Die handgefertigten Methoden basieren auf physikalischen Gesetzen, hergeleiteten mathematischen und statistischen Zusammenhängen. Mehrere Studien zu letzteren haben vielversprechende Resultate mit der Nutzung von Vegetationsindizes erzielt

(Klassifikationsgenauigkeiten >80 %, kleine Stichprobe) (Schmidt und Barron 2020; Thomas et al. 2003). Daher wird in diesem Beitrag ein kombinierter Ansatz mit amtlichen Daten und Digitalen Orthophotos (DOP) hergeleitet und evaluiert.

3 Ausgangssituation Datenanforderungen, Datenlage

Im Folgenden wird anhand des Kölner Stadtbezirks Nippes die Ausgangslage geschildert (Fläche ca. 31 km²). Ein Datensatz zur Landbedeckung bzw. der Befestigung ist nicht verfügbar. Daher wurde, basierend auf amtlichen und Fernerkundungsdaten (multispektralen Orthophotos) eine Methodik entwickelt, erprobt und evaluiert. Die zu erfüllende Anforderung ist die Klassifizierung von Oberflächen in mindestens drei Kategorien: versiegelt, teilversiegelt und unversiegelt. Für die Validierung wurde mittels einer Biotoptypenkartierung in einem kleineren Ausschnitt des Bezirks eine vollständige Inventarisierung der Flächen durch Feldarbeit erstellt (Abbildung 3).



Abb. 3. Darstellung des Kölner Stadtbezirks Nippes und des Validierungsgebiets mit einem Ausschnitt aus der Biotoptypenkartierung (Eigene Darstellung, Universität Potsdam, Kartengrundlage: Universität Potsdam, Köln)

4 Daten und Methodik

Für die Erzeugung eines Datensatzes zur Versiegelung von Bodenflächen auf Flurstücksebene wurden das amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS®) und DOP mit vier Kanälen (RGBI) aus Befliegungen genutzt (Stand Open.NRW 2020/21). Das ALKIS® erfasst administrative und verwaltungsrelevante Informationen zu Flurstücken, Gebäuden und Bauwerken und deren Nutzungen. Die Nutzung kann implizit auf eine Landbedeckungs- bzw. Befestigungsart schließen lassen. Im IÖR-Monitor wird dieser Zusammenhang durch ein Flächenschema realisiert, dessen

Flächennutzungskategorien bestimmten Objekten des ATKIS-Basis-DLMs zugeordnet sind. Über Pufferung von Linienobjekten und eine priorisierte Überlagerung von Flächenarten wird gesamte Fläche Deutschlands modelliert (Krüger et al. 2013; Meinel et al. 2022). Diese Priorisierung wird auch in diesem Beitrag verwendet, um die Ergebnisse der Bildanalyse zu verbessern. Die verwendeten Daten für die Bildanalyse sind DOP-RGBI-Kacheln, welche hochauflösende (10 cm) verzerrungsfreie Abbildungen der Erdoberfläche wiedergeben. Die vier Kanäle umfassen die Farbkanäle Rot, Blau, Grün und Nahinfrarot. Damit können verschiedene Vegetationsindizes gebildet werden, welche auf die Dichte und teilweise Art der Vegetation zurückschließen lassen. Der verwendete Ansatz basiert auf dem Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI = \frac{\text{Nahinfrarot} - \text{Rot}}{\text{Nahinfrarot} + \text{Rot}}$). Die Werte des NDVI umfassen den Wertebereich -1 bis +1, wobei negative Werte auf Wasserflächen, hohe positive Werte auf Vegetation und niedrige positive Werte auf das Fehlen von Vegetation hindeuten. Die Klassifizierungsmethodik wird in Abbildung 4 schematisch zusammengefasst (eine vollständige Darstellung ist aus Platzgründen nicht möglich). Die aus der Flächenpriorisierung und Nutzung abgeleiteten Regeln, in Kombination mit der NDVI-basierten Vegetationsbewertung, klassifizieren die Teilflächen in drei Kategorien: vollversiegelt, teilversiegelt (wasserdurchlässige Deckschichten) und unversiegelt. Die Erhebung der Validierungsdaten in Form der Biotoptypenkartierung wurde mit einer Klassifizierungsmindestgröße von 1 m² durchgeführt. Der Biotoptypenkartierungsschlüssel erlaubt die Kategorisierung in die drei Zielkategorien versiegelt, teilversiegelt und unversiegelt (LUBW 2018). Zum Zeitpunkt der Analyse waren ca. 18 von 50 ha des Validierungsgebiets digitalisiert. Die vorgestellte Analyse beschränkt sich auf dieses Gebiet (Tabelle 2).

Tab. 2: Deskriptive Beschreibung des Untersuchungsgebiets und der Biotoptypenkartierung (Eigene Darstellung)

Gesamtfläche (188 Flurstücke)	17,8 ha	Rel. Teil + Vollversiegelung je Flurstück	Ø 46 %
Ø Fläche je Flurstück	463 m ²	Rel. Vollversiegelung je Flurstück	Ø 29 %
Median Fläche je Flurstück	942 m ²	Rel. Teilversiegelung je Flurstück	Ø 17 %

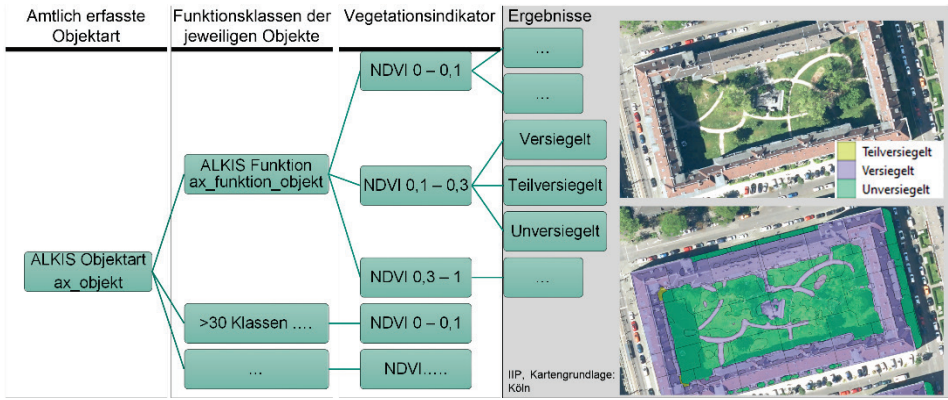


Abb. 4: Klassifizierungsbaum (li.) und Baublockbeispiel (re.) (Eigene Darstellung, Kartengrundlage: Köln)

5 Ergebnisse

In Abbildungen 4 und 5 sind korrekte sowie inkorrekte Klassifizierungen erkennbar. Zum Beispiel werden Zu-/Wege nicht vollständig erkannt. Für eine quantitative Evaluierung werden zwei Methoden angesetzt.

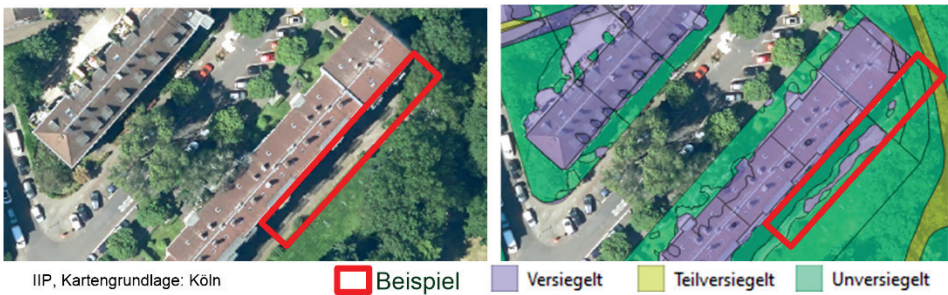


Abb. 5: Qualitative Analyse der Klassifizierung, z. B. werden überdeckte/verschattete Zuwege nicht korrekt identifiziert (Eigene Darstellung, Kartengrundlage Köln)

Einerseits wird die Klassifizierungsgüte mittels Konfusionsmatrix und andererseits die Auswirkung auf die Analyseeinheit Flurstück gemessen. Für die Konfusionsmatrix wurden die Ergebnisse und Validierung in Hexagone von 0,87 m² Größe gerastert. Gebäudegrundflächen wurden aus dieser Analyse ausgeschlossen, da diese Polygone aus den amtlichen Daten stammen. 84.379 Stichproben wurden verglichen und daraus die Klassifizierungsgütemaße bestimmt (Tabellen 3 und 4). Die Metriken bescheinigen dem Ansatz eine relativ hohe Güte (gesamte Treffergenauigkeit > 75 %), jedoch sind die

Metriken für Genauigkeit bei versiegelt inkl. teilversiegelt, versiegelt und teilversiegelt nicht hinreichend hoch. In Abbildung 6 wird die Auswirkung der Klassifizierung auf aggregierende Indikatoren statistisch untersucht. Mittels statistischer t-Tests werden die relativen Flächenanteile auf Flurstückebene beurteilt, d. h., ob die Ergebnisse der Klassifizierung zu denen aus den Validierungsdaten signifikant unterschiedlich sind. Die Verteilung der Werte bei einer Unterscheidung von versiegelt zu unversiegelt ist nicht statistisch signifikant unterschiedlich ($p > 0,05$, Abbildung 6 A/B), wohingegen sich die Unterscheidung von versiegelter Fläche in vollversiegelt und teilversiegelt signifikant unterscheidet ($p < 0,001$, Abbildung 6 C/D).

Tab. 3: Konfusionsmatrix bei 2 Klassen: Versiegelt (inkl. teilversiegelt) und unversiegelt (Eigene Darstellung)

Werte bei 2 Klassen		Vorhersage		Metriken
		Versiegelt	Unversiegelt	
Validierung	Versiegelt	19 052 (VV)	6 732 (UV)	Sensitivität: $\frac{VV}{VV + UV} = 0,739$
	Unversiegelt	9 646 (VU)	48 949 (UU)	Spezifität: $\frac{UU}{VU + UU} = 0,835$
Metriken		Genauigkeit: $\frac{VV}{VV + VU} = 0,664$	Trennfähigkeit: $\frac{UU}{UU + UV} = 0,879$	Treffergenauigkeit: $\frac{VV + UU}{VV + UU + VU + UV} = 0,806$

Tab. 4: Metriken der Multiklassen-Konfusionsmatrix über 3 Klassen: Versiegelt, teilversiegelt, unversiegelt. F1 Score: harmonisches Mittel (Genauigkeit, Sensitivität) (Eigene Darstellung)

Metriken bei 3 Klassen	Korrekt Positiv: 64.401; <i>gesamt</i> Treffergenauigkeit = 0,763			
Klasse	Treffergenauigkeit	Genauigkeit	Sensitivität	F1 Score
Versiegelt	0,899	0,62	0,77	0,69
Teilversiegelt	0,821	0,44	0,44	0,44
Unversiegelt	0,806	0,88	0,84	0,86

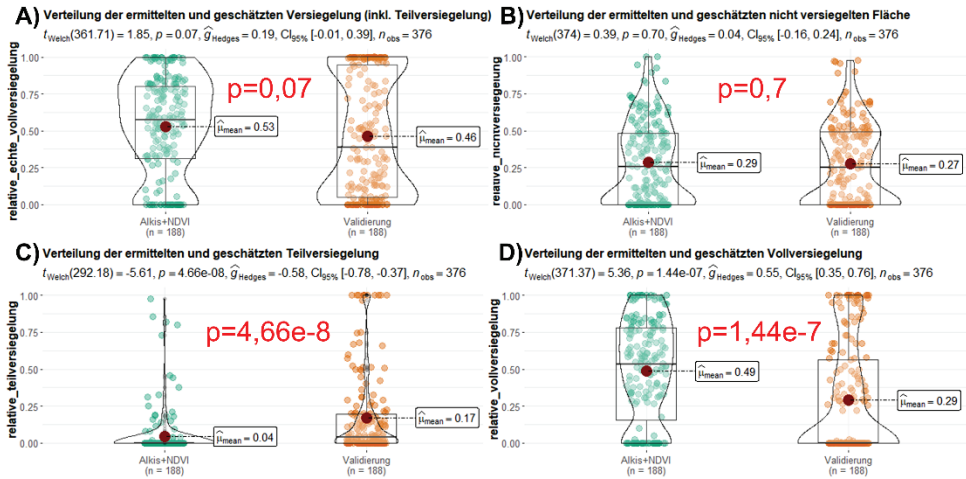


Abb. 6: Evaluierung der Auswirkung der Klassifizierung auf Flurstücksebene (Alkis+NDVI vs. Validierung). A und B stellen die Klassifizierung in zwei Klassen dar (Versiegelung inkl. Teilversiegelung und unversiegelt). C und D stellen die feinere Klassifizierung von versiegelten Flächen in Teil- und Vollversiegelung dar. Dargestellt werden die Boxplots, t-Test Parameter und Verteilungen der Werte. In Rot werden die p-Werte der t-Tests hervorgehoben. (Eigene Darstellung)

6 Diskussion und Ausblick

Für die automatisierte Erstellung von Befestigungs- bzw. Versiegelungs- oder Landbedeckungsdaten werden bereits Fernerkundungsdaten für Studien mit grobem Bearbeitungsraster angewendet und liefern zufriedenstellende Ergebnisse. Auf der Quartiersebene und im Bearbeitungsraster feiner als Flurstücksebene gibt es höhere Qualitätsanforderungen. Die Fallstudie demonstriert, dass die vorgestellte Methode für die generelle Unterscheidung von versiegelten und unversiegelten Flächen brauchbar ist. Allerdings konnte für eine weitere Differenzierung zwischen verschiedenen Versiegelungsarten (Vollversiegelung vs. Teilversiegelung) kein ausreichend gutes Ergebnis erzielt werden. Dies bedeutet, dass die Auswertungen verschiedene Schwächen berücksichtigen und für räumlich granulare Analysen Abstriche in der Detailschärfe hingenommen werden müssen. Die Weiterentwicklung des Ansatzes ist erstrebenswert, insbesondere hinsichtlich einer Klassifizierung, die der Qualität einer Biotoptypenkartierung nahekann. Verschiedene Fortschritte in der Verwendung KI-basierter Klassifizierungsverfahren und in der Verbesserung der Datenqualität durch Befliegungen versprechen die Nachteile und Qualitätsdefizite in naher Zukunft zu lösen.

7 Literaturverzeichnis

- Artmann, Martina (2015): Managing urban soil sealing in Munich and Leipzig (Germany) – From a wicked problem to clumsy solutions. In: *Land Use Policy* 46 (2), S. 21-37. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.02.004.
- BBSR (Hg.) (2020): Geoinformationen in der Raumplanung. Wie Geodaten und Digitale Tools die Raumplanung Verändern. Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/izr/2020/3/izr-3-2020.html>.
- Hodgson, Michael E.; Jensen, John R.; Tullis, Jason A.; Riordan, Kevin D.; Archer, Clark M. (2003): Synergistic Use of Lidar and Color Aerial Photography for Mapping Urban Parcel Imperviousness. In: *photogramm eng remote sensing* 69 (9), S. 973-980. DOI: 10.14358/PERS.69.9.973.
- Krüger, Tobias; Meinel, Gotthard; Schumacher, Ulrich (2013): Land-use monitoring by topographic data analysis. In: *Cartography and Geographic Information Science* 40 (3), S. 220-228. DOI: 10.1080/15230406.2013.809232.
- LUBW (2018): Arten, Biotope, Landschaft. Schlüssel zum Erfassen, Beschreiben, Bewerten. Unter Mitarbeit von Thomas Breunig, Siegfried Demuth, Annegret Wahl, Herbert Gerstner, Jochen Dümas und Julia Schwandner. Karlsruhe.
- Maronga, Björn; Banzhaf, Sabine; Burmeister, Cornelia; Esch, Thomas; Forkel, Renate; Fröhlich, Dominik et al. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. In: *Geosci. Model Dev.* 13 (3), S. 1335-1372. DOI: 10.5194/gmd-13-1335-2020.
- Meinel, Gotthard; Sikder, Sujit Kumar; Krueger, Tobias (2022): IOER Monitor. A Spatio-Temporal Research Data Infrastructure on Settlement and Open Space Development in Germany. In: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 242 (1), S. 159-170. DOI: 10.1515/jbnst-2021-0009.
- Naber, Elias; Krehl, A.; Schuhmann, Rainer; Volk, Rebekka; Boehnke, Denise; Ehbrecht, Anke et al. (2023): Ergebnisbericht zu den Arbeitspaketen 7, 8 und 10 des Forschungsprojekts NaMaRes. Ausgewählte Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt NaMaRes. Stand: 11.08.2022. Hg. v. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP). Karlsruhe.
- Naber, Elias; Volk, Rebekka; Mörmann, Kai; Boehnke, Denise; Lützkendorf, Thomas; Schultmann, Frank (2022): Namares – A Surface Inventory and Intervention Assessment Model for Urban Resource Management. In: *Sustainability* 14 (14), S. 8485. DOI: 10.3390/su14148485.
- Schmidt, Sebastian; Barron, Christopher (2020): Mapping Impervious Surfaces Precisely – a GIS-Based Methodology Combining Vector Data and High-Resolution Airborne Imagery. In: *J geovis spat anal* 4 (1), S. 1-10. DOI: 10.1007/s41651-020-00055-6.

- Thomas, Nancy; Hendrix, Chad; Congalton, Russell G. (2003): A Comparison of Urban Mapping Methods Using High-Resolution Digital Imagery. In: *photogramm eng remote sensing* 69 (9), S. 963-972. DOI: 10.14358/PERS.69.9.963.
- Vali, Ava; Comai, Sara; Matteucci, Matteo (2020): Deep Learning for Land Use and Land Cover Classification Based on Hyperspectral and Multispectral Earth Observation Data. A Review. In: *Remote Sensing* 12 (15), S. 2495. DOI: 10.3390/rs12152495.
- Volk, Rebekka; Naber, Elias; Schultmann, Frank; Lützkendorf, Thomas; Mörmann, Kai; Norra, Stefan et al. (2023): Bewertung der Ökologie, Wirtschaftlichkeit und sozialen Effekte von ressourceneffizienzsteigernden Maßnahmen auf Quartiersebene - von der volkswirtschaftlichen zur aktueursspezifischen Perspektive (NaMaRes). Schlussbericht des Forschungsvorhabens. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, Band 42).
- Volk, Rebekka; Rambhia, Mihir; Naber, Elias; Schultmann, Frank (2022): Urban Resource Assessment, Management, and Planning Tools for Land, Ecosystems, Urban Climate, Water, and Materials – A Review. In: *Sustainability* 14 (12), S. 7203. DOI: 10.3390/su14127203.
- Voskamp, Ilse M.; Luca, Claudia de; Polo-Ballinas, Monserrat Budding; Hulsman, Helena; Brolsma, Reinder (2021): Nature-Based Solutions Tools for Planning Urban Climate Adaptation. State of the Art. In: *Sustainability* 13 (11), S. 6381. DOI: 10.3390/su13116381.
- Yang, Chun; Rottensteiner, Franz; Heipke, Christian (2018): CLASSIFICATION OF LAND COVER AND LAND USE BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* IV-3, S. 251-258. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-3-251-2018.