

Unplausibilitäten filtern: Ein Ansatz zur Verbesserung fernerkundungsbasierter Landbedeckungsdaten

Eichfuss, Silas; Hollen, Martina

Veröffentlichungsversion / Published Version

Sammelwerksbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Eichfuss, S., & Hollen, M. (2022). Unplausibilitäten filtern: Ein Ansatz zur Verbesserung fernerkundungsbasierter Landbedeckungsdaten. In *Flächennutzungsmonitoring XIV: Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen* (S. 295-304). Berlin: Rhombos-Verlag. <https://doi.org/10.26084/14dfns-p030>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Flächennutzungsmonitoring XIV

Beiträge zu Flächenmanagement,
Daten, Methoden und Analysen

IÖR Schriften Band 80 · 2022

ISBN: 978-3-944101-80-4

Unplausibilitäten filtern: Ein Ansatz zur Verbesserung fernerkundungsbasierter Landbedeckungsdaten

Silas Eichfuss, Martina Hollen

Eichfuss, S.; Hollen, M. (2022): Unplausibilitäten filtern: Ein Ansatz zur Verbesserung fernerkundungsbasierter Landbedeckungsdaten. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIV. Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 80, S. 295-304.
DOI: <https://doi.org/10.26084/14dfns-p030>

Unplausibilitäten filtern: Ein Ansatz zur Verbesserung fernerkundungsbasierter Landbedeckungsdaten

Silas Eichfuss, Martina Hollen

Zusammenfassung

Im mFUND-finanzierten Projekt „Inwertsetzung von Copernicus-Daten für die Raumbeobachtung“ (incora) wurden, basierend auf dem optischen Erdbeobachtungssatellitensystem Sentinel-2, Landbedeckungsklassifizierungen sowie Veränderungsdatensätze erstellt. Der Veränderungsdatensatz (2019-2020) beinhaltet auffallend große Unplausibilitäten klassifizierter bebauter Fläche auf Agrar- und Waldflächen. Gründe hierfür sind vielfältig, aber keineswegs unbekannt. Mixed Pixels gelten als Herausforderung, sowie die spektralen Ähnlichkeiten unter den Klassen, sodass es hier zu Fehlklassifizierungen kommen kann. Anhand der visuellen Überprüfung dieser auffälligen Befunde wurde ein Workflow zur Reduzierung dieser Flächen entwickelt. Der Workflow beinhaltet verschiedene Schritte, bei denen sowohl die Form und Größe der Flächen als auch die Lage beachtet werden. Mit der Postprozessierung konnte ein Großteil der Unplausibilitäten reduziert werden. Der postprozessierte Datensatz der Veränderung der baulich geprägten Fläche gilt als hilfreiche Unterstützung zur Einschätzung der Siedlungsflächenentwicklung. Ergebnisse sind auf der Plattform www.incora-flaeche.de einsehbar.

Schlagwörter: incora, Landbedeckung, Postprozessierung, Siedlungsflächen, Copernicus, GIS

1 Einleitung

Die Qualität primärer Flächendaten ist stark abhängig vom erfassenden Medium. Bei Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikationen treten unterschiedliche Arten von Herausforderungen auf. In den Flächennutzungsdaten des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems (ALKIS), als Basis der deutschen Flächenstatistik, können technische Änderungen Unplausibilitäten hervorrufen (Schmitz et al. 2021; Destatis 2019). Sie treten dabei z. B. in der Erfassung von Objekten durch unterschiedliche Auslegung der Erfassungsregeln auf. In fernerkundlich erhobenen Landbedeckungsdaten auf Basis pixelbasierter Landbedeckungsklassifikationen gilt es vor allem, technische Herausforderungen wie Mischpixel (ein Pixel umfasst mehrere Landbedeckungsklassen) zu beachten. Zudem gilt die unterschiedliche Wolkenbedeckung, die eine Auswahl zeitgleicher Daten erschwert, als Herausforderung.

Basierend auf dem optischen Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2 wurden im Projekt incora pixelbasierte Landbedeckungsklassifizierungen erstellt und daraus

Veränderungsdatensätze abgeleitet. Diese wurden routinemäßig mit Filtern der Nachbearbeitung von Fernerkundungsdaten bereinigt (Lillesand 2004; Khorram 2012). In verschiedenen iterativen Prozessen wurden die Daten von regionalen Testgebieten auf die deutschlandweite Ebene skaliert, geprüft und angepasst. Bei Testberechnungen von Indikatoren der Siedlungsflächenentwicklung mit den incora-Landbedeckungsdaten (Eichfuss et al. 2021) wurden unplausible Ergebnisse aufgrund erhöhter Werte der baulich geprägten Fläche erkannt. Diese wurden größtenteils im Osten Deutschlands identifiziert und visuell bestätigt. Für eine plausible deutschlandweite Nutzbarkeit der incora-Landbedeckung gilt es, die Veränderungsdaten bezüglich der Auffälligkeiten zu filtern. Hierzu wurde in einem qualifizierten GIS-Workflow eine Routine entwickelt, die es ermöglicht, den Datensatz zur Berechnung von Indikatoren der Siedlungsflächenentwicklung vorzubereiten.

2 Landbedeckung mit Fernerkundung erfassen

Frei verfügbare, räumlich und zeitlich hochauflösende Fernerkundungsprodukte des Copernicus-Programms bieten neue Möglichkeiten, bestehende Datenquellen mit neuen Informationen der Siedlungsflächenentwicklung zu ergänzen (Beckmann, Dosch 2018). Die Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2 liefern seit 2015 Daten. Aufgrund ihres gesicherten Fortbestandes bis mindestens 2030 sind sie für längere Zeitreihen und für ein Monitoring der Landbedeckung geeignet (ESA 2017). Hauptziele des incora-Projekts waren die automatisierte Erstellung von Landbedeckungsdaten und die Berechnung von Indikatoren für die Siedlungsflächenentwicklung. Zu diesem Zweck wurden für die Jahre 2016, 2019 und 2020 deutschlandweite Landbedeckungsklassifikationen aus Sentinel-2-Daten abgeleitet. Diese weisen die Klassen „bebaute Fläche“, „hohe Vegetation“, „niedrige Vegetation“, „landwirtschaftliche Fläche“, „vegetationslose Fläche“, Wasser auf und haben eine räumliche Auflösung von 10x10 m (Eichfuss et al. 2021; Riembauer et al. 2021). Je nach Klasse, enthält die incora-Landbedeckung nicht nur Informationen über Siedlungsentwicklung und -struktur, sondern kann auch für die Berechnung von Indikatoren zur Grünüberdeckung verwendet werden. Aus der Kombination der Klassifikationen 2016 und 2019 sowie 2019 und 2020, wurden Veränderungen der Landbedeckung abgeleitet, die für die Berechnung dynamischer Indikatoren (z. B. Zunahme von baulich geprägter Fläche) herangezogen werden können. Die Basisdaten, Veränderungen und Indikatoren können unter www.incora-flaeche.de, der explorativen Ergebnisplattform des Projekts incora, betrachtet werden (siehe hierzu Beitrag Fina et al. in diesem Band).

3 Postprozessierung von Landbedeckungsdaten

Der Veränderungsdatensatz, der aus den deutschlandweiten incora-Landbedeckungsdatensätzen von 2016, 2019 und 2020 abgeleitet wurde, enthält alle möglichen

Kombinationen der Landbedeckungsveränderungen. Dieser wurde mittels Filterprozessen zur Indikatorenberechnung überarbeitet. Ein 3×3-Modalfilter im Moving-Window-Modus wurde angewendet, um isolierte Veränderungspixel und Kanteneffekte zu eliminieren. Zudem wurde der Information Gain berechnet (Quinlan 1986). Dieses Maß bewertet Änderungen der Werteverteilungen innerhalb des Fensters und keine pixelweisen. Dieses Maß kann verwendet werden, um vermeintliche Änderungen zu entfernen, die auf Klassifizierungsrauschen, der spektralen Mehrdeutigkeit eines beobachteten Bereichs zurückzuführen sind. Der Information Gain ergibt Werte von 0 (keine Veränderung) bis 1 (vollständige Veränderung). Bildpunkte mit Werten kleiner als 0,5 werden bei der Veränderungsklassifikation ausgeschlossen. Weiterhin wurden Änderungen mit Flächen kleiner als 0,5 ha entfernt. Insgesamt wurde der Fokus auf die Zu- bzw. Abnahme der Klasse „Baulich geprägte Fläche“ gelegt, da diese für die Berechnung von dynamischen Siedlungsindikatoren am relevantesten ist. Es verblieben je nach Untersuchungsgebiet teilweise deutliche Fehldetektionen von vermeintlich hinzugekommenen bzw. reduzierten baulich geprägten Flächen (Riembauer et al. 2021).

Die Verwechslungen von vegetationsloser Fläche bzw. unbewachsenen Landwirtschaftsflächen und baulich geprägter Fläche wurden durch die Automatisierung der Trainingsgebietserstellung zwar reduziert, aber nicht komplett entfernt (Abb. 1).

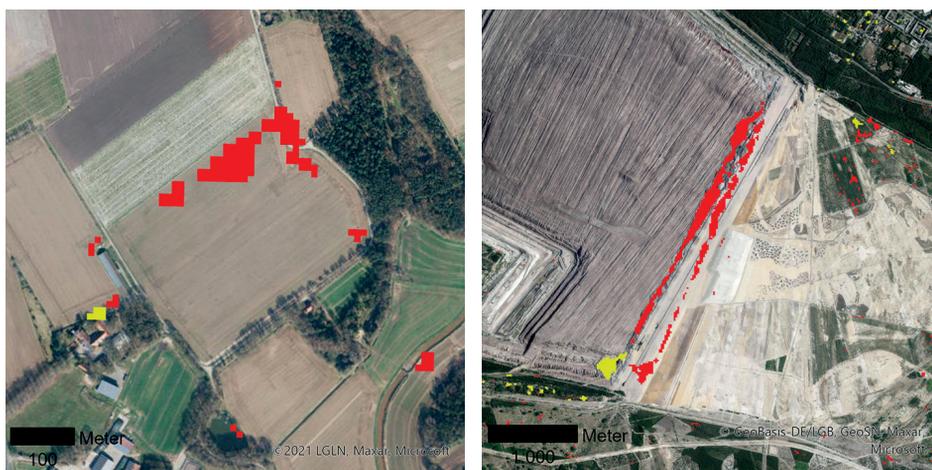


Abb. 1: Beispiele des *incora*-Veränderungsdatensatzes der baulich geprägten Fläche (2019-2020): l.) baulich geprägte Fläche auf Agrarflächen, (r.) baulich geprägte Fläche auf offenem Boden (Quelle: eigene Abbildung)

Die geringere Datenverfügbarkeit für die Klassifikation von 2016 und die damit verbundene geringere Klassifikationsgenauigkeit sowie trockenheitsbedingte Ausweitung vegetationsarmer Bereiche begünstigen Fehlklassifikationen und entsprechende Fehldetektionen in der Veränderungsanalyse.

Die Pixelgröße von 10×10 m führt bei kleinen abgebildeten Objekten dazu, dass mehrere Oberflächentypen in einem Pixel auftreten. Jedoch wird zu mehreren Zeitpunkten eine diskrete Klassifikation erstellt, sodass bei stark heterogenen Landbedeckungen die Klassifikation von Jahr zu Jahr unterschiedlich ausfällt.

Für die Klassifikation von Agrarflächen ist der „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) entscheidend. Der Index dient der Erfassung radiometrischer Eigenschaften von Vegetation im Infrarotbereich. Sorgt jedoch hohe Wolkenbedeckung dafür, dass während der Vegetationsperiode keine Daten vorliegen, gibt es nur unbewachsene Zeitpunkte in der Zeitreihe und die Verwechslungsgefahr aufgrund der spektralen Ähnlichkeit zu den bebauten Flächen ist gegeben.

Anhand der Erkenntnisse wurde der Veränderungsdatensatz 2019-2020 als Basis zur Berechnung der baulich geprägten Veränderungsindikatoren genutzt, da in beiden Jahren ausreichend wolkenfreie Bildmosaike erstellt werden konnten. Fehldetektionen der baulich geprägten Flächen befanden sich aufgrund der oben genannten Gründe vor allem in Sachsen (-32 km²), Sachsen-Anhalt (-14,7 km²) und Brandenburg (+153,7 km²). Mit einer GIS-gestützten Postprozessierung sollten diese Fehldetektionen minimiert werden mit dem Ziel, eine Nutzung der Daten für plausible Ergebnisse der Flächenbilanzierung für Indikatoren und das Monitoring zu erreichen.

4 Postprozessierung der incora-Veränderungsdaten

Die meisten Fehlklassifikationen der baulich geprägten Fläche traten auf Agrar- und Forstflächen sowie vegetationslosen Boden auf. Die Postprozessierung des Datensatzes wurde speziell auf diese Herausforderungen angepasst. Es wurden dabei unterschiedliche Vorgehensweisen für innerhalb und außerhalb der Siedlungsflächen, definiert durch die ATKIS-Ortslage, durchgeführt (Abb. 2).

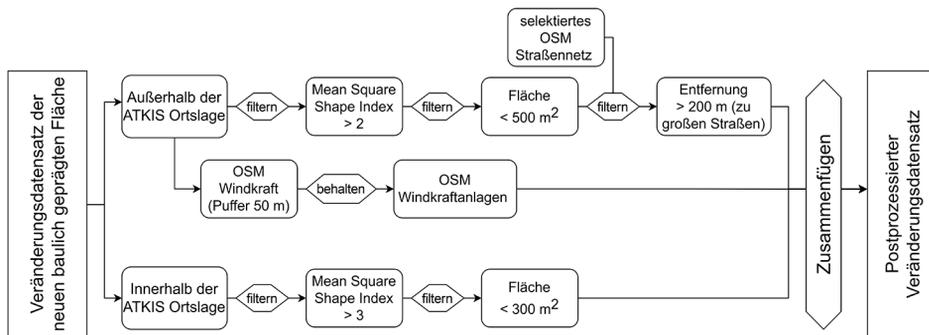


Abb. 2: Workflow der Postprozessierung des incora-Veränderungsdatensatzes der baulich geprägten Fläche (Quelle: eigene Abbildung)

Die als baulich geprägte Fläche klassifizierten Pixelverbände weisen in vielen Fällen, vor allem auf Agrarflächen, eine wenig kompakte Form auf. Kompakt wird in diesem Zusammenhang als Siedlungskörper (rechteckig) definiert, nicht Kompakt sind Flächen ohne definierte Form (Abb. 3).

Die Kompaktheit wurde im ersten Schritt der Postprozessierung genutzt und für jedes Objekt, innerhalb als auch außerhalb der Ortslage, berechnet. Dafür wurde der Mean Square Shape Index verwendet, bei dem der maximale Durchmesser des Objektes durch die Wurzel der Fläche geteilt wird (Lang, Blaschke 2007; SAGA-GIS o. J.). Die Werte geben das Maß der Kompaktheit des Objektes an. Bei sinkender Kompaktheit steigt der Wert des Index. Als Schwellenwert für die Objekte außerhalb der Ortslage wurde nach visueller Überprüfung der Wert 2 genutzt, denn baulich geprägte Flächen auf Forst- und Agrarflächen sind meist weniger kompakt. Für Objekte innerhalb der Ortslage wurde ein höherer Wert festgelegt. Innerhalb der Siedlungsflächen entstehen neue bebaute Fläche in einem anderen Ausmaß als fehlklassifizierte bebaute Flächen auf Agrarflächen im Außenbereich. Um eine zu starke Filterung wichtiger innerstädtischer Nachverdichtung vorzubeugen, wurde der Wert auf 3 hochgesetzt.

Anschließend wurden Kleinstflächen im Datensatz gefiltert. Als Schwellenwert außerhalb der Ortslage wurde eine Mindestgröße von 500 m² verwendet, innerhalb von 300 m² (Abb. 4 I.).

Neue baulich geprägte Flächen außerhalb der Ortslage müssen erschlossen sein und sich in der Nähe einer größeren befahrbaren Straße befinden. Dem Prinzip der vorwiegenden Nutzung frei verfügbarer Daten im incora Projekt folgend, wurde der aktuelle OpenStreetMap-Datensatz (OSM) verwendet und gefiltert. Eine neue Siedlungsfläche wird als erschlossen betrachtet, wenn sie sich höchstens in 200 m Entfernung zu einer größeren Straße befindet (Abb. 2). Es wurde um die Straße ein Puffer von 200 m gesetzt und die neuen baulich geprägten Flächen selektiert.

Neue Windkraftanlagen werden meist auf Agrar- oder Waldflächen gebaut, die Errichtung ist dynamisch, Entwicklungen werden in der incora-Landbedeckung erkannt. Mit den vorherigen Postprozessierungsschritten können diese Flächen allerdings wegfallen, da sie durch den Größenfilter der baulich geprägten Flächen eliminiert werden oder aufgrund der Distanz zur Straße als nicht erschlossen bewertet werden. Um dies zu verhindern, wurden aus dem OSM-Datensatz alle Windkraftanlagen selektiert, mit 50 m gepuffert und die darin befindlichen baulich geprägten Flächen selektiert.

Der Verbund der einzelnen Arbeitsschritte (Abb. 2) ergibt den postprozessierten Veränderungsdatensatz der incora-Landbedeckung für die baulich geprägte Fläche und kann für Veränderungsindikatoren mit Bezug zur baulich geprägten Fläche genutzt werden (vgl. Indikatoren baulich geprägte Fläche www.incora-flaeche.de, Eichfuss et al. 2021).

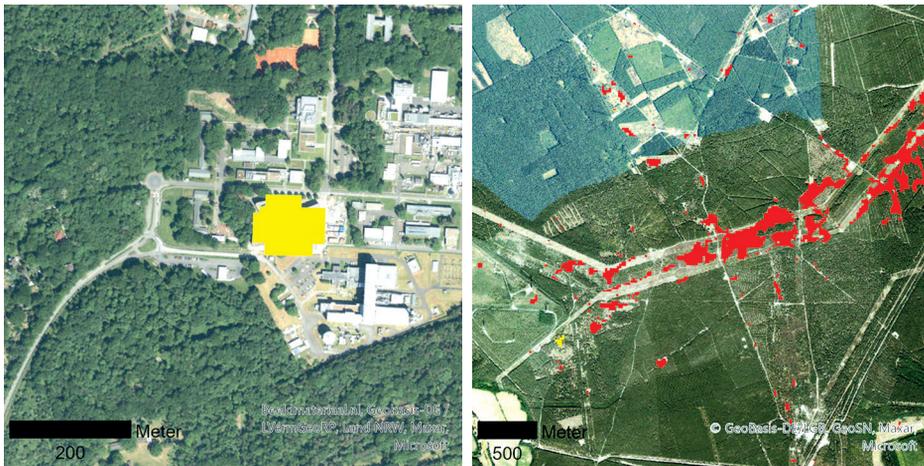


Abb. 3: Anwendung der Filter: gelb bleibt, rot wird gefiltert, (l.) kompakte Fläche innerhalb der Siedlungsfläche, (r.) nicht kompakte Flächen außerhalb der Siedlungsfläche (Quelle: eigene Abbildung)



Abb. 4: Anwendung der Filter: gelb bleibt, rot wird gefiltert, (l.) Teil einer Siedlungsfläche mit neuen Industriehallen > 300 m², (r.) Windkraftanlagen werden in die Postprozessierung mit einbezogen (Quelle: eigene Abbildung)

5 Effekt der Postprozessierung auf die Flächenbilanzen

Mit der Postprozessierung konnten viele Unplausibilitäten aus dem Datensatz gefiltert werden. Vor der Postprozessierung betrug die deutschlandweite Veränderung der baulich geprägten Fläche 296,1 km² was einem Anstieg dieser um 81 ha bebauter Fläche pro Tag entspräche; davon lagen 254,6 km² außerhalb und 41,5 km² innerhalb der Ortslage. Mittels Postprozessierung ergab sich eine minimierte Veränderungsrate. Insgesamt

samt wurde sie mit der Postprozessierung um 196,7 km² reduziert und beträgt 99,5 km² (27 ha/Tag Anstieg der bebauten Fläche), wovon 59,7 km² außerhalb und 39,8 km² innerhalb der Ortslage liegen (Abb. 5).

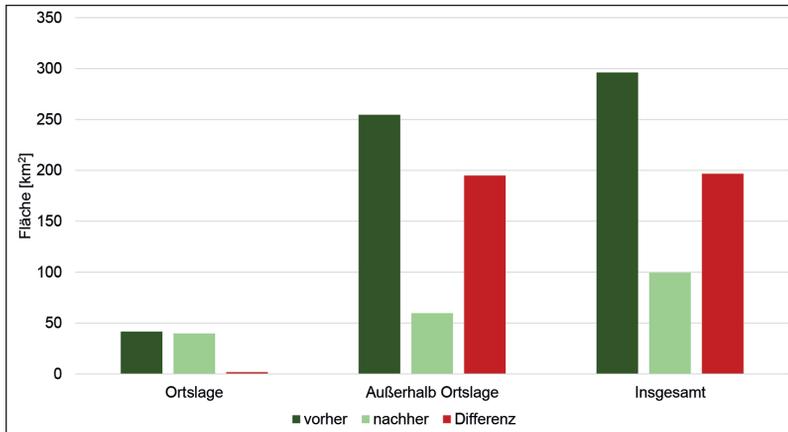


Abb. 5: Deutschlandweite Änderung neuer baulich geprägter Fläche vor (dunkles grün) und nach der Postprozessierung (helles grün) und die Differenz (rot) (eigene Abbildung)

Auf landwirtschaftlich geprägten Flächen (basierend auf dem ATKIS Basis-DLM), konnten die Fehlklassifikationen reduziert werden. Vor der Postprozessierung wurde 163,5 km² als neue baulich geprägte Fläche identifiziert. Durch die Postprozessierung wurde diese Fläche um 124,3 km² reduziert und beträgt 39,1 km². Die Reduzierung um 1,6 km² innerhalb der Ortslage ist aufgrund der geringen Anzahl landwirtschaftlicher Flächen erwartungsgemäß gering (Abb. 5).

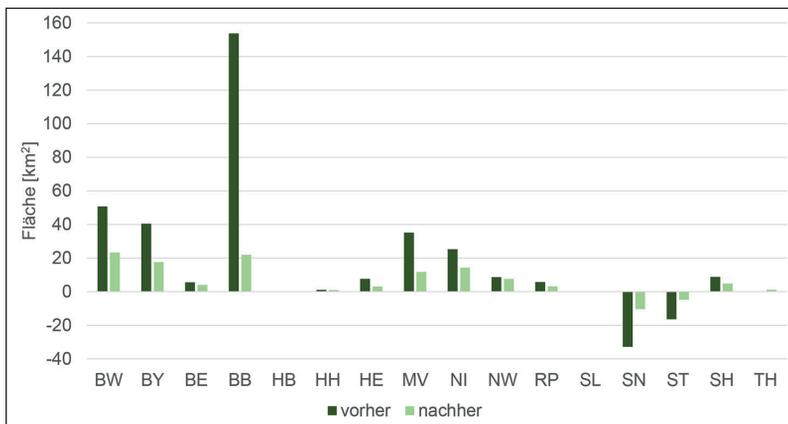


Abb. 6: Veränderungsrate neuer baulich geprägter Fläche vor (dunkles grün) und nach der Postprozessierung (helles grün) aufgeteilt nach Bundesland (eigene Abbildung)

Die flächenmäßig größten Unplausibilitäten konnten in Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt identifiziert werden (Abb. 6). Durch die Postprozessierung wurden viele der

Unplausibilitäten entfernt und der Zuwachs von baulich geprägter Fläche in Brandenburg konnte von 153,7 km² um 131,7 km² reduziert werden und beträgt noch 22,0 km². In Sachsen und Sachsen-Anhalt konnte die negative Entwicklung der baulich geprägten Fläche nicht umgekehrt werden, jedoch wurde der Anteil der negativen Entwicklung deutlich reduziert. In Sachsen wurde der Verlust von -32,8 km² an baulich geprägter Fläche um 22,4 km² reduziert, sodass dieser nun -10,4 km² beträgt. In Sachsen-Anhalt konnte die negative Entwicklung von -14,7 km² auf -4,3 km² reduziert werden.

Mit der Postprozessierung konnten Unplausibilitäten aus dem Veränderungsdatensatz der baulich geprägten Flächen entfernt werden. Durch die Postprozessierung konnte der Zuwachs von vormals 300 km² bundesweit stark reduziert werden und beträgt noch knapp 100 km². Beträgt der Zuwachs vor der Postprozessierung ca. 80 ha/Tag beträgt er danach 27,1 ha/Tag. Nach Vergleich mit der Flächenstatistik, die den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche für 2020 um 54 ha/Tag SuV zeigt (Destatis 2021) und der Annahme, dass ca. 40-50 % davon versiegelt/baulich geprägt sind, liegt der Wert mit 27,1 ha/Tag auf relativ vergleichbarem Niveau (Frie, Hensel 2009). Die Überprüfung der Veränderung der baulich geprägten Flächen auf den landwirtschaftlichen Flächen des ATKIS Basis-DLM zeigt, dass die Probleme zum großen Teil dort liegen und der Ansatz erfolgreich angewandt wurde. Doch nicht alle Unplausibilitäten können entfernt werden. So ist ein (scheinbarer) Rückgang der baulich geprägten Fläche in Sachsen und Sachsen-Anhalt zu verzeichnen, deren Ursachen zwar im Rückbau liegen können, aber landesweit nicht bekannt sind. Der (scheinbare) Rückgang konnte durch die Postprozessierung zwar stark reduziert, jedoch nicht komplett beseitigt werden. Dies gilt es in den Datensätzen der folgenden Jahre zu beobachten.

6 Fazit

Wie die Prozessierung der Fernerkundungsdaten ist auch eine themenspezifische Postprozessierung – also eine Nachbearbeitung der Klassifizierungsergebnisse – aufgrund der Automatisierung schnell und einfach durchführbar. Für den angedachten Zweck, die Qualität der Änderungsindikatoren basierend auf der baulich geprägten Fläche zu steigern, ist die Methode erfolgreich. Dabei ist das Vorgehen an den Zweck, die Änderungswerte der baulich geprägten Fläche zu verbessern, gebunden und nicht universell für andere Zwecke einsetzbar.

Ziel ist es, eine Zeitreihe anzustreben, die auf reproduzierbaren Basisdaten beruht.

Neben stetig verfügbaren Daten ist die Voraussetzung hierfür, die ermittelten Änderungsdaten der baulich geprägten Fläche auch in den künftigen IncoLandbedeckungsdaten mit einer Postprozessierung nach gleichem Verfahren zu ergänzen und zu qualifizieren.

Die Qualität der Klassifikation hängt von vielen Faktoren wie Wolkenbedeckung, Bodenfeuchte u. a. m. ab. Es können nicht alle Herausforderungen fragwürdiger Klassifikationsergebnisse mit einer Postprozessierung gelöst werden. Es bleibt zu beobachten, ob und wie die fehlerhaften Klassifikationen wie z. B. klassifizierte baulich geprägte Flächen auf Ackerflächen in den folgenden Jahren auftreten. Auch sind größerer Zeitabstände wichtig, um reale und rechnerische Änderungen zu unterscheiden, wobei sich die Postprozessierung beweisen muss.

Festzuhalten bleibt, dass ein fernerkundlich erhobenes Produkt mit Ungenauigkeiten behaftet ist. Eine Postprozessierung kann themenspezifische Herausforderungen adressieren und die Nutzbarkeit der Daten erhöhen, verbessert jedoch nicht die Güte der Erstklassifizierung. Der Datensatz wurde dem Workflow entsprechend gefiltert und wird für die Berechnung der Indikatoren (siehe Siedlungsindikatoren www.incora-flaeche.de) erfolgreich genutzt.

7 Literatur

- Beckmann, G.; Dosch, F. (2018): Monitoring der Siedlungsflächenentwicklung zwischen Wunsch und Wirklichkeit. In: Behnisch, M.; Kretschmer, O.; Meinel, G. (Hrsg.): Flächeninanspruchnahme in Deutschland. Auf dem Wege zu einem besseren Verständnis der Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung. Heidelberg: Springer: 3-24.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2019): Methodenbericht zur Flächenerhebung 2018.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2021): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatorenbericht 2021.
- Eichfuss, S.; Hollen, M.; Riembauer, G.; Xu, S. (2021): Monitoring von Siedlungsflächen auf Basis von Sentinel-2. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Erhardt, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIII. Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 79: 189-200. <https://doi.org/10.26084/13dfns-p017>
- ESA – European Space Agency (2017): Sentinel-2 factsheet, color vision for Copernicus. https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SENTINEL-2_sheet_170125.pdf (Zugriff: 20.06.2022).
- Frie, B.; Hensel, R. (2009): Schätzverfahren zur Bodenversiegelung – Ansatz der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen der Länder. In: Meinel, G.; Schumacher, U. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring – Konzepte – Indikatoren – Statistik. Aachen, Shaker: 17-45.
- Khorrarn, S.; Koch, F.; Wiele, C.; Nelson, S. (2012): Remote Sensing. Springer Briefs in Space Development. Springer, New York, Heidelberg.
- Lang, S.; Blaschke, T. (2007): Landschaftsanalyse mit GIS. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. (2004): Remote Sensing an Image Interpretation. Wiley, Hoboken.
- Quinlan, J. R. (1986): Induction of decision trees. In: Machine Learning, 1(1): 81-106.

- Riembauer, G.; Weinmann, A.; Xu, S.; Eichfuss, S.; Eberz, C.; Neteler, M. (2021): Germany-wide Sentinel-2 based Land Cover Classification and Change Detection for Settlement and Infrastructure Monitoring. 2021 conference on Big Data from Space (BiDS'2021).
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ac7c57e5-b787-11eb-8aca-01aa75ed71a1> (Zugriff: 20.06.2022).
- SAGA-GIS (o. J.): Tool Polygon Shape Indices.
http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/7.2.0/shapes_polygons_7.htm
(Zugriff: 20.06.2022).
- Schmitz, J.; Fina, S.; Riembauer, G.; Hollen, M. (2021): Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche nachgerechnet: Ein Plädoyer für frei zugängliche ALKIS-Daten. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Erhardt, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIII. Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 79: 161-169.
<https://doi.org/10.26084/13dfns-p015> (Zugriff: 20.06.2022).