

# OpenStreetMap zur Ermittlung von Landnutzungsänderungen und Schätzung dadurch erzeugter CO<sub>2</sub>-Emissionen

Veit Ulrich, Sven Lautenbach, Alexander Zipf

## Zusammenfassung

Räumlich explizite Informationen zu CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit Landnutzungsänderungen sind für die Umsetzung lokaler Strategien zur Eindämmung des Klimawandels von entscheidender Bedeutung. Schätzungen dieser Emissionen werden jedoch meist mit einer groben räumlichen Auflösung durchgeführt, während lokale Emissionen oft nicht erfasst werden. In dieser Arbeit wurden, basierend auf OpenStreetMap unter Anwendung zweier Korrekturverfahren, Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg ermittelt und die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen quantifiziert. Die verschiedenen Korrekturverfahren führten zu großen Unterschieden in der Fläche der ermittelten Landnutzungsänderungen, was eine große Spannbreite an Schätzungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge hatte. Für ganz Baden-Württemberg betragen die Emissionsschätzungen mit den zwei verschiedenen Korrekturverfahren 291.710 Mg C Jahr<sup>-1</sup> bzw. 93.591 Mg C Jahr<sup>-1</sup>. Dies entspricht in etwa anderen Bruttoemissionsschätzungen für Baden-Württemberg. Gegenüber vergleichbaren Schätzungen bietet die Methode jedoch den Vorteil einer hohen räumlichen Auflösung. Unsicherheiten entstanden u. a. durch die unvollständige Kartierung der Landnutzung in OpenStreetMap sowie Änderungen und Korrekturen in OpenStreetMap während des Analysezeitraums. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass OpenStreetMap erfolgreich zur Schätzung von Landnutzungsänderungen verwendet werden kann, wenn die extrahierten Geodaten mit den vorgeschlagenen Methoden prozessiert werden.

## 1 Einführung

Landnutzungsänderungen tragen  $1,1 \pm 0,7$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr zum gesamten anthropogenen Kohlenstoffausstoß von 11,1 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr bei (Friedlingstein et al. 2022, 4814). Somit stellen sie eine nicht unerhebliche Emissionsquelle dar. Mit Änderungen der Landnutzung geht auch oft Flächenverbrauch einher, beispielsweise durch die Umwandlung von Grünland oder Ackerfläche in

Siedlungs- oder Verkehrsfläche. Dieser Flächenverbrauch ist nach wie vor ein Problem. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland 55 Hektar pro Tag neu als Siedlungs- oder Verkehrsfläche ausgewiesen (BMUV 2023). Während der Flächenverbrauch in den 2000er- und 2010er-Jahren insgesamt zurückging, ist in den letzten Jahren keine Abnahme mehr erkennbar, was in einem Widerspruch zum bundesweiten Ziel, den täglichen Flächenverbrauch auf unter 30 Hektar pro Tag zu reduzieren, steht (BMUV 2023). Da Flächenverbrauch meist mit Treibhausgasemissionen einhergeht, lässt sich mit einer Reduktion des Flächenverbrauchs auch ein Schritt in Richtung Einhaltung der Klimaziele gehen (beispielsweise hat die Bundesregierung beschlossen, dass Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral sein soll (Bundesregierung 2023)).

Angesichts des relevanten Beitrags von Landnutzungsänderungen zu den anthropogenen Kohlenstoffemissionen ist die Einbeziehung der Emissionen aus Landnutzungsänderungen in CO<sub>2</sub>-Bilanzen erforderlich. Während räumlich aggregierte Schätzungen der Emissionen aus Landnutzung, beispielsweise für die Bundesrepublik Deutschland (Gensior et al. 2020, 528), vorliegen, fehlen lokale Schätzungen mit einer hohen räumlichen Auflösung. Diese sind jedoch nötig, um die Emissionen aus Landnutzungsänderungen auch in lokale Emissionsbilanzen einzubeziehen. Außerdem können räumlich hoch aufgelöste Emissionsschätzungen hilfreich sein, um das Bewusstsein und den Bezug lokaler Akteure zu Emissionsquellen auf lokaler Ebene zu steigern sowie um informierte lokale Maßnahmen zur Emissionsreduzierung treffen zu können (Jungmann et al. 2022). Karten, die Emissionen aus Landnutzungsänderungen in hoher räumlicher Auflösung zeigen, repräsentieren die lokale Dynamik von Landnutzungsänderungen besser als räumlich aggregierte Schätzungen und können die Verlässlichkeit von CO<sub>2</sub>-Fußabdruckstudien erhöhen. Um die Emissionen aus Landnutzungsänderungen quantifizieren zu können, werden zunächst Landnutzungskarten benötigt. Obgleich viele Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikationen wie z. B. CORINE Land Cover (Europäische Umweltagentur 2018) verfügbar sind, hat die Ableitung der Landnutzung aus freien Geodatenquellen – wie zum Beispiel OpenStreetMap (OSM) – den Vorteil, dass diese großräumig skalierbar und meist auf dem neuesten Stand sind.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, das Potenzial von OSM zur Quantifizierung von Kohlenstoffemissionen durch Landnutzungsänderungen anhand einer regionalen Fallstudie, für das deutsche Bundesland Baden-Württemberg, abzuschätzen. Basierend

auf OSM werden unter Anwendung zweier Korrekturverfahren Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg ermittelt und die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen quantifiziert.

## **2 Datengrundlage**

Die Datengrundlage sollte folgende Anforderungen erfüllen: Zunächst sollte sie die Ableitung von Landnutzungsänderungen in hoher räumlicher Auflösung zulassen. Außerdem sollte die Datengrundlage aktuell sein und skalierbar, d. h., für ein möglichst großes Anwendungsgebiet verfügbar sein. OSM ist eine globale, offene Geodatenbank, die von jedermann benutzt und bearbeitet werden kann und dynamisch von aktuell mehr als acht Millionen Mitwirkenden weltweit aktualisiert und erweitert wird (OpenStreetMap Mitwirkende 2022). Somit erfüllt OSM die oben genannten Anforderungen. OSM wurde bereits in mehreren Arbeiten zum Kartieren von Landnutzung verwendet (Schultz et al. 2017, Fonte et al. 2017, Jokar Arsanjani et al. 2013, Jokar Arsanjani et al. 2015), aber noch nicht zur Erfassung von Landnutzungsänderungen.

## **3 Methodik**

Die Landnutzung des Untersuchungsgebietes, das Bundesland Baden-Württemberg, wird durch ein Mosaik von Wald, Grünland, Feldern und Siedlungen charakterisiert. Die Landnutzungsänderungen wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren (März 2018 bis März 2020) analysiert. OSM-Daten von beiden Zeitpunkten wurden verwendet, um die Landnutzungsänderungen zu erfassen. Ergänzend dazu wurde eine Zeitserie von Landsat-Satellitenbildern genutzt, um die aus OSM detektierten Änderungen zu überprüfen und zu korrigieren.

Zunächst wurden die Landnutzungsdaten aus OSM jeweils vom Stand März 2018 und März 2020 mit der Osmose API (Raifer et al. 2019) heruntergeladen. Anschließend wurden die in dieser Arbeit verwendeten Landnutzungsklassen (Urban, Ackerland, Grünland, Wald) aus den OSM-Landnutzungsdaten extrahiert. Hierbei wurden jeder Landnutzungsklasse die OSM-Objekte mit den relevanten Tags zugeordnet. Tab. 1 zeigt die Zuordnung der OSM-Key-Value-Paare zu den jeweiligen Landnutzungsklassen. Schließlich wurden die Landnutzungsänderungen durch Verschneidung der OSM-Landnutzungspolygone von beiden Zeitpunkten ermittelt.

Tab. 1: Zuordnung der OSM-Key-Value-Paare zu den Landnutzungsklassen (Quelle: Eigene Bearbeitung)

OSM Key-Value-Paare	Landnutzungsklasse
building=garage, landuse=garages, landuse=residential	Urban
landuse=farm, landuse=farmland, landuse=farmyard, building=greenhouse, landuse=greenhouse_horticulture	Ackerland
landuse=meadow	Grünland
landuse=forest, landuse=wood	Wald

In den erfassten OSM-Landnutzungsänderungen trat das Problem falsch-positiver Änderungen auf. Diese falsch-positiven Änderungen hatten zwei Ursachen: Erstens kam es durch die Anpassung der Umgrenzung von Landnutzungspolygonen während des Analysezeitraums häufig zu langen und schmalen Splitter-Polygonen. Solche Splitter-Polygone treten auch auf, wenn Grenzen in OSM nicht exakt verbunden sind (Dorn et al. 2015). Diese Flächen entsprechen in der Regel keinen tatsächlichen Landnutzungsänderungen und müssen für die Quantifizierung der Änderungen entfernt werden. In einem einfachen Korrekturschritt wurden alle Änderungspolygone mit einer Fläche unter 0,4 ha entfernt.

Die zweite Ursache für falsch-positive Landnutzungsänderungen waren Landnutzungsobjekte, die während des Analysezeitraums erstmalig kartiert wurden. Da die Abdeckung der Landnutzung in OSM noch nicht vollständig ist, werden immer noch neue Objekte zur Karte hinzugefügt. Wenn in OSM beispielsweise eine Grünlandfläche während des Analysezeitraums neu kartiert wird, stellt dies eine vermeintliche Landnutzungsänderung in OSM dar, die keiner tatsächlichen Änderung in der Realwelt entspricht. Um diese falsch-positiven Änderungen zu entfernen, wurde eine Satellitenbild-Zeitserienanalyse angewandt.

Der Ablauf der Satellitenbild-Zeitserienanalyse umfasste mehrere Schritte. Zunächst wurden die Landsat-Bilder mithilfe von Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017) heruntergeladen. Wolken und Schatten wurden aus den Bildern entfernt, und die Bilder wurden auf den Untersuchungsbereich Baden-Württemberg zugeschnitten. Anschließend wurden spektrale Indizes wie der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) und der Normalized Difference Moisture Index (NDMI) berechnet.

Zur Identifizierung von Landnutzungsänderungen wurde der BFAST Monitor-Algorithmus verwendet (Verbesselt et al. 2012). Dieser basiert auf einem Regressionsmodell, das den langfristigen Trend und die saisonale Variation der Landnutzung beschreibt. Zunächst generiert BFAST Monitor dieses Modell über einen historischen Zeitraum. Anschließend passt BFAST Monitor für jeden Pixel in der Satellitenbild-Zeitreihe ein Regressionsmodell an und vergleicht die beobachteten Daten im Analysezeitraum mit diesem Modell, um Brüche in der Zeitserie, also Landnutzungsänderungen, zu erkennen.

Für die BFAST Monitor-Analyse wurden die folgenden spektralen Indizes angewendet: NDVI für die Klasse Grünland, NDMI für den Wald und SAVI für Ackerland. Basierend auf der Hypothese, dass jeder Index mit einer Landnutzungsklasse zusammenhängt, wurde jeder Index ausschließlich für eine bestimmte Landnutzungsklasse verwendet. Im Anschluss wurden die BFAST Monitor-Änderungsflächen mit den OSM-Landnutzungsänderungsflächen überlagert. Nur die sowohl in den BFAST Monitor-Änderungen also auch den OSM-Änderungen enthaltenen Flächen wurden als Landnutzungsänderungen behalten.

Die Kohlenstoffemissionen aus den Landnutzungsänderungen wurden mit drei verschiedenen Zusammenstellungen von Emissionsfaktoren berechnet. Dabei wurde angenommen, dass die Kohlenstoffvorräte vor und nach einer Landnutzungsänderung im Gleichgewicht sind. Die zeitliche Dimension verzögerter Emissionen wurde nicht berücksichtigt. Jeder Landnutzungsklasse wurde ein bestimmter Kohlenstoffvorrat zugewiesen und die Differenz zwischen den Kohlenstoffvorräten zweier Landnutzungs-klassen bildete den Emissionsfaktor der jeweiligen Landnutzungsänderung. Die zugewiesenen Kohlenstoffvorräte wurden überwiegend dem BLUE-Modell (Hansis et al. 2015) und einer Datenbank des Carbon Dioxide Information Analysis Center (Houghton & Hackler 2001) entnommen.

## **4 Ergebnisse**

Mit dem ersten Korrekturverfahren (Entfernung der Splitterpolygone) wurde für Baden-Württemberg zwischen März 2018 und März 2020 eine Landnutzungsänderungsfläche von 4 867 ha ermittelt. Nach Anwendung des zweiten Korrekturverfahrens (Satellitenbild-Zeitreihenanalyse) betrug die Fläche der Landnutzungsänderungen nur noch 1 577 ha. Der Unterschied in der Ausdehnung der Landnutzungsänderungsflächen ist deutlich erkennbar (Abb. 1). Die ermittelten Landnutzungsänderungen mit beiden

Korrekturverfahren hatten gemeinsam, dass die meisten Landnutzungsänderungen von den Landnutzungsklassen Grünland und Wald ausgingen, während Änderungen mit der Ausgangsklasse Ackerland seltener vorkamen. Außerdem waren die Landnutzungsänderungen nicht homogen im Bundesland verteilt, sondern wiesen regionale Häufungen auf. So kann man im äußersten Südosten Baden-Württembergs, welcher bereits zum Allgäu gehört, eine Häufung von Landnutzungsänderungen mit der Ausgangsklasse Grünland erkennen (Abb. 1).

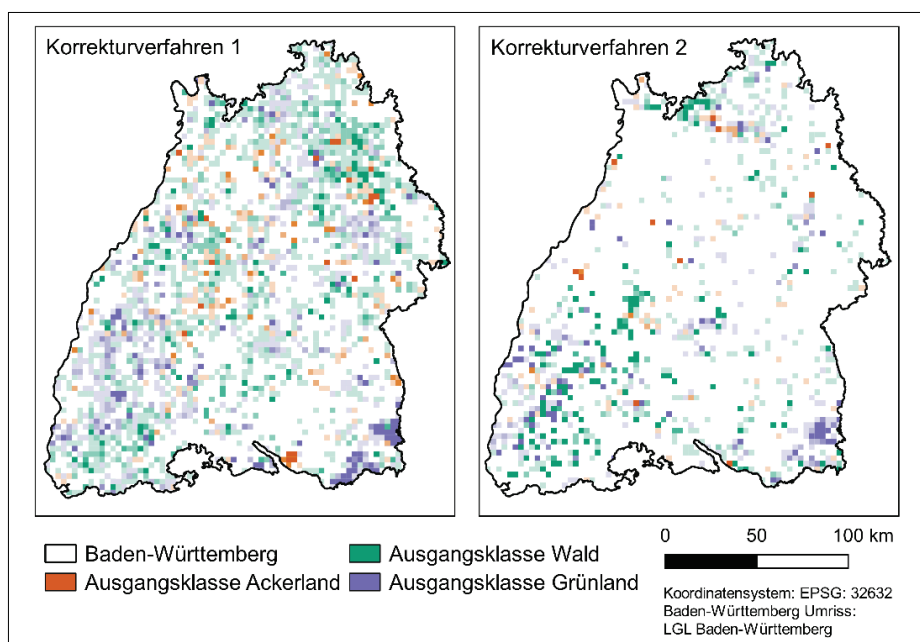


Abb. 1: Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg nach Korrekturverfahren 1 (Entfernung der Splitter-Polygone) und Korrekturverfahren 2 (Satellitenbild-Zeitreihenanalyse) pro  $3 \times 3$  km Gitterzelle. Die Gitterzellen sind nach der Ausgangsklasse eingefärbt. Je größer die Änderungsfläche in einer Gitterzelle, desto dunkler (weniger transparent) der Farbwert. (Quelle: eigene Bearbeitung)

Entsprechend der Abweichungen in der Landnutzungsänderungsfläche unterschieden sich auch die Emissionsschätzungen. Mit dem ersten Korrekturverfahren beliefen sich die Kohlenstoffemissionen durch Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg auf 291.710 t Kohlenstoff pro Jahr. Dies ist der Durchschnitt aus den drei unterschiedlichen Werten, die sich für die drei verschiedenen Zusammenstellungen von Emissionsfaktoren ergeben. Mit dem zweiten Korrekturverfahren betrug die Emissionen 93 591 t Kohlenstoff pro Jahr. Die verwendeten Emissionsfaktoren wirkten sich ebenfalls auf die

geschätzten Emissionen aus, aber der Einfluss der Emissionsfaktoren auf die Emissions-schätzungen war weniger stark als der Einfluss der Unterschiede in den Änderungs-flächen durch die verschiedenen Korrekturverfahren.

## 5 Diskussion

Die Unterschiede in der Ausdehnung der Änderungsflächen zwischen den beiden Korrekturverfahren lagen vor allem daran, dass Korrekturverfahren 1 zwar Splitter-Polygone entfernt, aber nicht Änderungen, die durch neu kartierte Landnutzungsflächen während des Beobachtungszeitraums entstehen. Der beträchtliche Unterschied in der Ausdehnung der Änderungsflächen vor und nach Anwendung des zweiten Korrektur-verfahrens zeigt, dass es wichtig ist, letztere Änderungen zu entfernen. Dies wird durch das Korrekturverfahren 2 gewährleistet. Allerdings kann es passieren, dass beim Abgleich mit den Landnutzungsänderungen, die mit der Satellitenbildzeitserie ermittelt wurden, zu viele Änderungsflächen entfernt werden.

Beispielsweise ist die Erkennung von Änderungen von Grünland zu Ackerland in einer Zeitserie von Satellitenbildern problematisch. BFAST Monitor stellt dann eine Landnutzungsänderung fest, wenn der verwendete spektrale Index ungewöhnliche Werte annimmt, die in der stabilen historischen Periode nicht aufgetreten sind. Grünland und Ackerland weisen jedoch ähnliche Reflexionsmuster auf. Somit sind Änderungen von Grünland zu Ackerland schwer von Änderungen der Anbaukultur, beispielsweise von Mais zu Rüben, abzugrenzen. Die Parameter für BFAST Monitor wurden in dieser Arbeit optimiert, um Änderungen der Anbaukultur nicht als Landnutzungsänderungen zu identifizieren. Dadurch werden aber Änderungen von Grünland zu Ackerland teilweise auch nicht erkannt, und diese Änderungsflächen fehlen dann in der Änderungskarte und der Emissionsschätzung.

Das Korrekturverfahren 1 entfernt zwar den Großteil der Splitter-Polygone, jedoch verbleiben sehr lange Splitter-Polygone, die den Schwellenwert von 0,4 ha überschreiten, in den Daten. Gleichzeitig kann es passieren, dass auch tatsächliche Änderungsflächen, die keine Splitter-Polygone sind, eliminiert werden. Daher könnte es sinnvoll sein, zur Beseitigung der Splitter-Polygone anstatt der pauschalen Löschung kleiner Polygone Methoden anzuwenden, die zum Beispiel die durchschnittliche Breite der Polygone als Metrik benutzen, um Splitter-Polygone zu identifizieren (Mas 2005). Eine weitere Möglichkeit wäre, Splitter-Polygone mit überwachter Klassifikation zu bestimmen (Delafontaine et al. 2009).

Nicht nur die mit den zwei verschiedenen Korrekturverfahren ermittelten Emissionsschätzungen sind sehr unterschiedlich, sondern auch Emissionsschätzungen für Baden-Württemberg aus anderen Studien weichen sehr stark voneinander ab (Abb. 2). Hierbei ist es wichtig zu bemerken, dass die angeführten Vergleichsstudien auf einer größeren Maßstabsebene durchgeführt wurden, d.h. auf deutschlandweiter (Gensior et al. 2020) bzw. europaweiter Ebene (Fuchs et al. 2016). Aufgrund dessen ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt.

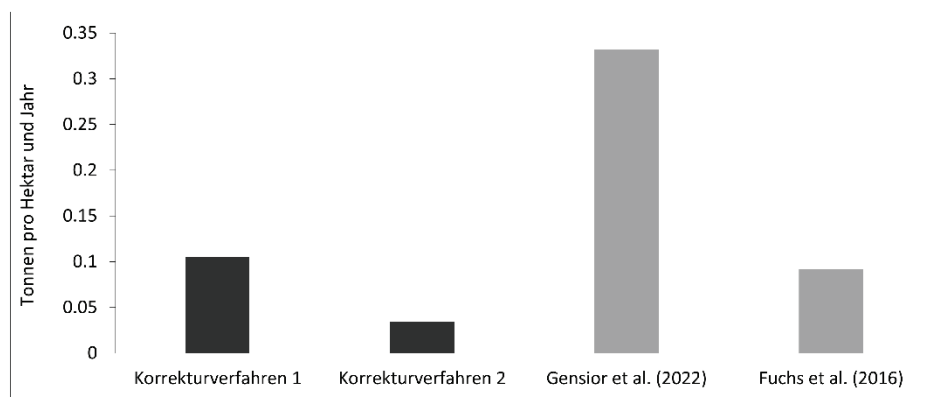


Abb. 2: Durchschnittliche Kohlenstoffemissionen pro Hektar und Jahr in Baden-Württemberg (Quelle: s. Abb.)

Die Unterschiede zwischen den Emissionsschätzungen dieser und anderer Arbeiten werden vermutlich durch unterschiedliche Methodiken verursacht. So unterscheiden sich die Studien beispielsweise im Umfang der erfassten Emissionen. Während in der Schätzung von Gensior et al. (2020) sowohl Emissionen aus stabilen, unveränderten Landnutzungsklassen als auch aus Landnutzungsänderungen enthalten sind, werden in dieser Arbeit nur Emissionen aus Landnutzungsänderungen berechnet. Einen weiteren Unterschied stellen die berücksichtigten Landnutzungsklassen dar. In der Schätzung von Gensior et al. (2020) ist zusätzlich zu den in dieser Arbeit verwendeten Klassen noch die Klasse Feuchtgebiet enthalten, während in der Schätzung von Fuchs et al. (2016) urbane Flächen fehlen. Außerdem unterscheiden sich die Studien in der Frage, ob angenommen wird, dass der komplette Kohlenstoffausstoß bei einer Landnutzungsänderung auf einmal stattfindet, oder ob die zeitliche Dimension des Kohlenstoffausstoßes berücksichtigt wird.



## 6 Fazit

In dieser Arbeit wurden Kohlenstoffemissionen durch Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg basierend auf Landnutzungsinformationen aus OSM in hoher räumlicher Auflösung geschätzt. Es konnte gezeigt werden, dass OSM erhebliches Potenzial für die Quantifizierung von Kohlenstoffemissionen, die durch Landnutzungsänderungen verursacht werden, bietet. Aus den aus OSM abgeleiteten Landnutzungsänderungen lassen sich mithilfe von Emissionsfaktoren räumlich explizite Informationen zu diesen Emissionen generieren. Dies ermöglicht die Einbeziehung dieser Emissionen in lokale Emissionsbilanzen sowie die Erzeugung von Wissen zu lokalen Emissionsquellen, was eine Voraussetzung für lokale Maßnahmen zur Emissionsreduzierung darstellt. Außerdem bieten die OSM-Landnutzungsänderungen die Möglichkeit, den Flächenverbrauch abzuleiten.

Es gibt jedoch auch zahlreiche Anknüpfungspunkte für methodische Verbesserungen. Zum einen wäre eine genauere Methode zur Entfernung der Splitter-Polygone sinnvoll, die nicht nur die Größe, sondern auch die Geometrie der Polygone berücksichtigt. Außerdem könnte die automatisierte Erkennung der Landnutzungsänderungen aus der Satellitenbild-Zeitreihe (Korrekturverfahren 2) weiter optimiert werden. Zu guter Letzt wäre es von Nutzen, nicht nur Bruttoemissionen, sondern auch Nettoemissionen zu berechnen, d. h., auch Landnutzungsänderungen zu berücksichtigen, die Kohlenstoffsenken darstellen. Somit könnte ein umfassenderes Bild der Rolle von Landnutzungsänderungen im Klimawandel gezeichnet werden.

## 7 Literatur

BMUV (2023): Flächenverbrauch – Worum geht es? Stand 22.02.2023.

<https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es> (Zugriff 22.06.2023).

Delafontaine, M., Nolf, G., Van de Weghe, N., Antrop, M., & de Maeyer, P. (2009): Assessment of sliver polygons in geographical vector data. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 23, S. 719–735.

Dorn, H., Törnros, T., Zipf, A. (2015): Quality evaluation of VGI using authoritative data-a comparison with land use data in southern Germany. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4, S. 1657–1671.

Europäische Umweltagentur (2018): CORINE Land Cover. Stand 21.06.2023. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018> (Zugriff 22.06.2023).

- Fonte, C. C., Minghini, M., Patriarca, J., Antoniou, V., See, L., Skopeliti, A. (2017): Generating up-to-date and detailed land use and land cover maps using OpenStreetMap and GlobeLand30. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6, 125.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Zheng, B. (2022): Global carbon budget 2022. In: *Earth System Science Data*, 14 (11), S. 4811-4900.
- Fuchs, R., Schulp, C. J., Hengeveld, G. M., Verburg, P. H., Clevers, J. G., Schelhaas, M.-J., Herold, M. (2016): Assessing the influence of historic net and gross land changes on the carbon fluxes of Europe. In: *Global Change Biology*, 22, S. 2526–2539.
- Gensior, A., Fuß, R., Dunger, K., Stümer, W., Döring, U. (2020): Land use, land use change and forestry (CRF sector 4). In: *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2018, Kapitel 6. Umweltbundesamt (2020)*, S. 526-692.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017): Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. In: *Remote Sensing of Environment*, 202, S. 18–27.
- Hansis, E., Davis, S. J., Pongratz, J. (2015): Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes. In: *Global Biogeochemical Cycles*, 29, S. 1230–1246.
- Houghton, R. A., Hackler, J. L. (1995): Carbon flux to the atmosphere from land-use changes: 1850 to 1990 (ndp-050/r1). <https://data.ess-dive.lbl.gov/view/doi:10.3334/CDIAC/LUE.NDP050> (Zugriff: 27.06.2023).
- Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Bakillah, M., Hagenauer, J., Zipf, A. (2013): Toward mapping land-use patterns from volunteered geographic information. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 27(12), S. 2264-2278.
- Jokar Arsanjani, J., Mooney, P., Zipf, A., Schauss, A. (2015): Quality assessment of the contributed land use information from OpenStreetMap versus authoritative datasets. In: *OpenStreetMap in GIScience: experiences, research, and applications*, S. 37-58.
- Jungmann, M., Vardag, S. N., Kutzner, F., Keppler, F., Schmidt, M., Aeschbach, N., Butz, A. (2022): Zooming-in for climate action—hyperlocal greenhouse gas data for mitigation action? In: *Climate Action*, 1(1), 8.
- Mas, J.-F. (2005): Change estimates by map comparison: A method to reduce erroneous changes due to positional error. In: *Transactions in GIS*, 9, S. 619–629.
- OpenStreetMap Mitwirkende (2022): Contribute map data. Stand 13.04.2022. [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Contribute\\_map\\_data](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Contribute_map_data) (Zugriff 23.06.2023).
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2023): Klimaschutzgesetz und Klimaschutzprogramm. Ein Plan fürs Klima. Stand 21.06.2023. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaschutzgesetz-2197410> (Zugriff 30.06.2023).
- Raifer, M., Troilo, R., Kowatsch, F., Auer, M., Loos, L., Marx, S., Zipf, A. (2019): OSHDB: a framework for spatio-temporal analysis of OpenStreetMap history data. In: *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), S. 1-12.
- Schultz, M., Voss, J., Auer, M., Carter, S., Zipf, A. (2017): Open land cover from OpenStreetMap and remote sensing. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, S. 206–213.
- Verbesselt, J., Zeileis, A., Herold, M. (2012): Near real-time disturbance detection using satellite image time series. In: *Remote Sensing of Environment*, 123, S. 98–108.