



Flächennutzungsmonitoring IX Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung?

IÖR Schriften Band 73 · 2017

ISBN: 978-3-944101-73-6

Abschätzung des Versiegelungsgrades mit Sentinel-2-Daten durch Anwendung von Bebauungsindizes

Christian Jungnickl, Ralf Bill

Jungnickl, Ch.; Bill, R. (2017): Abschätzung des Versiegelungsgrades mit Sentinel-2-Daten durch Anwendung von Bebauungsindizes. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Schwarz, S.; Richter, B. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring IX. Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung? Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 73, S. 21-29.

Abschätzung des Versiegelungsgrades mit Sentinel-2-Daten durch Anwendung von Bebauungsindizes

Christian Junnickl, Ralf Bill

Zusammenfassung

Die Ableitung von Informationen über die Flächennutzung aus Fernerkundungsdaten ist eine wichtige Komponente des Umwelt- und Städtemonitorings. Die Sentinel-Missionen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus stellen in dieser Hinsicht aktuell eine vielversprechende Datenquelle mit enormen Potenzial dar. Ein wichtiger Indikator, der mittels Satellitendaten erhoben werden kann, ist die Flächenversiegelung. Diese lässt Rückschlüsse auf den anthropogenen Einfluss, den Landschaftszustand oder die Siedlungsentwicklung zu. In dieser Arbeit werden verschiedene Bebauungsindizes für den Stadt-Umland-Raum Rostock berechnet. Als Datengrundlage dienen Multispektraldaten des Sentinel-2A-Sensors. Eine Vielzahl von Indizes wird berechnet und deren Fähigkeit bezüglich der Abschätzung des Versiegelungsgrades anhand von manuell kartierten Referenzdaten bewertet. Die Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Built-up Index (BUI) und der Combinational Built-up Index (CBI) Vorteile bei der Abschätzung des Versiegelungsgrades besitzen. Während der BUI die konstantesten Ergebnisse im Jahresverlauf liefert, erreicht der CBI mit einer Overall Accuracy (Gesamtgenauigkeit) von 87 % die höchste Übereinstimmung mit den Referenzdaten.

1 Einführung

Die Ableitung von Informationen über die Flächennutzung aus Fernerkundungsdaten ist mittlerweile eine gängige Vorgehensweise. Deren Etablierung steht eng in Verbindung mit der technischen Weiterentwicklung der Aufnahmesensoren. Daraus resultieren neue Einsatzmöglichkeiten und methodische Optimierungen von klassischen Anwendungen. Die Sentinel-Missionen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus stellen aktuell eine vielversprechende Datenquelle mit enormen Potenzial dar. Die Komponente im optischen Spektrum wird derzeit durch die Satelliten Sentinel-2A und Sentinel-2B bedient (Strunz, von Sassen 2015, 163 ff.). Sie ermöglichen u. a. die Erfassung von urbanen Gebieten und die Quantifizierung der Flächenversiegelung.

Arnold & Gibbons (1996, 244) beschreiben die Versiegelung als Abdeckung des natürlichen Bodens durch undurchlässige Materialien. Der Versiegelungsgrad gilt als ein wichtiger Indikator für anthropogenen Einfluss und die Siedlungsentwicklung (Meinel et al. 2013, 123 f.). Außerdem spielt er für diverse weitere Fragestellungen, wie Abfluss, Mikroklima, Luft- und Wasserqualität oder für Habitate, eine Schlüsselrolle (Scalenghe,

Marsan 2009, 6 ff.). In den vergangenen Jahren wurden vielfältige Ansätze zur Abschätzung des Versiegelungsgrades auf Basis von Fernerkundungsdaten erprobt (Weng 2012, 39 ff.). Ein bundesweit standardisiertes Erhebungsverfahren, welches den Ansprüchen des Siedlungsmonitorings gerecht wird, existiert trotz seiner hohen Relevanz bisher nicht (Artmann 2014, 85).

Im Gegensatz zu vielen komplexeren Methoden lassen Indexberechnungen in der Regel nur wenig Spielraum für subjektive Einstellungen, sondern geben klar Kanäle und Berechnungsformel vor. Dies macht sie zu einfachen, objektiven und leicht reproduzierbaren Anwendungen. Die fehlende Flexibilität ist auch gleichzeitig ihr Nachteil, da eine Feinabstimmung aufgrund fehlender Parametereinstellungen nicht möglich ist. Mithilfe von Indizes wird versucht, Oberflächen mit bestimmten spektralen Eigenschaften gegenüber anderen Landnutzungen hervorzuheben. Vor allem die Separation von bebauten Flächen und vegetationslosen Böden zählt zu den großen Herausforderungen bei der Abschätzung des Versiegelungsgrades mit Fernerkundungsdaten. Durch die Maskierung des Freiraums (Ackerfläche, Wald, Grünland etc.) können fehlerhafte Zuordnungen außerhalb von Siedlungsflächen ausgeschlossen werden (Dams et al. 2013, 85).

Viele Indizes, wie z. B. der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), dienen der Identifikation von gesunder Vegetation. Daneben gibt es andere, die je nach Anwendung vorgezogen werden sollten, wie z. B. der Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) für urbane Gebiete (Huete 1988). Für Gewässer ist z. B. der Normalized Difference Water Index (NDWI) oder der Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Tab. 1: Übersicht gängiger Bebauungsindizes. (Quelle: verändert, nach Kaimaris, Patias 2016, 1845 f.)

Bebauungsindex	Berechnung (Spektralkanäle Sentinel-2)
Urban Index (UI)	$\frac{2190 \text{ nm} - 842 \text{ nm}}{2190 \text{ nm} + 842 \text{ nm}}$
Normalized Difference Built-Up Index (NDBI)	$\frac{1610 \text{ nm} - 842 \text{ nm}}{1610 \text{ nm} + 842 \text{ nm}}$
Index-based Built-Up Index (IBI)	$\frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2}$
New Built-Up Index (NBI)	$\frac{665 \text{ nm} * 1610 \text{ nm}}{842 \text{ nm}}$
Built-Up Index (BUI)	$\frac{2 * [(665 \text{ nm} * 2190 \text{ nm}) - (1610 \text{ nm})^2]}{(842 \text{ nm} + 1610 \text{ nm}) * (1610 \text{ nm} + 2190 \text{ nm})}$
Combinational Built-Up Index (CBI)	$\frac{\frac{PCA1 + NDWI}{2} - SAVI}{\frac{PCA1 + NDWI}{2} + SAVI}$

von Interesse (Xu 2006). Zu den üblichen Bebauungsindizes zählen der Urban Index (Kawamura et al. 1996), der Normalized Difference Built-Up Index (Zha et al. 2003), der Index-based Built-Up Index (Xu 2008), der New Built-Up Index (Jieli et al. 2010), der Combinational Built-Up Index (Sun et al. 2016) und der Built-Up Index (Kaimaris, Patias 2016). Tabelle 1 gibt einen Überblick der in dieser Arbeit relevanten Indizes. Dieser Beitrag erörtert die Leistungsfähigkeit der genannten Bebauungsindizes auf Basis von Sentinel-2-Daten. Dafür wird die Versiegelung mit den verschiedenen Indizes abgeschätzt und anhand manuell kartierten Referenzwerten überprüft.

2 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wird der Stadt-Umland-Raum von Rostock betrachtet (Abb. 1). Das Gebiet grenzt mit ca. 20 km Küstenlinie an die Ostsee. Die Fläche des hier betrachteten Raumausschnitts beträgt insgesamt 664 km². Davon werden ca. 90 km² als Siedlungs- und Verkehrsfläche genutzt. Ein relativ großer Teil (11 km²) entfällt davon auf Kleingartenanlagen und auch Wasserflächen prägen die Stadtfläche (12 km²). Die dominierende Nutzungsklasse ist die landwirtschaftliche Ackerfläche mit 275 km² (HRO 2016, 21). Das Untersuchungsgebiet wird von ca. 250 000 Menschen bewohnt, wobei etwa 80 % davon in der Hansestadt Rostock leben. Nachdem im Zuge der Wiedervereinigung nach 1990 große Teile der Bevölkerung die Hansestadt in Richtung Umland oder entfernter Regionen verließen, verzeichnet die Stadt in der jüngsten Vergangenheit wieder Zuwächse. Im nahen Umland von Rostock kam es im Zuge der Suburbanisierung während der letzten beiden Jahrzehnte verstärkt zum Siedlungsausbau, der bis heute anhält. Rückbaumaßnahmen in den Plattenbausiedlungen, geplante Innenentwicklungsmaßnahmen und der vorgesehene Ausbau des Überseehafens lassen auch während der nächsten Jahre eine anhaltende Dynamik erwarten.

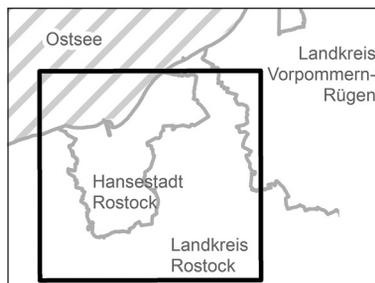


Abb. 1: Untersuchungsgebiet
(Quelle der Hintergrunddaten: WFS
Verwaltungseinheiten GeoPortal.MV)

3 Daten und Methoden

Im folgenden Abschnitt werden zugrunde liegende Daten und Verarbeitungsschritte skizziert. Die Arbeitsschritte wurden mithilfe der Software-Produkte ArcGIS 10.4 (kommerzielle GIS-Software der Firma Esri Inc.), SAGA GIS (Open Source Software), SNAP 5.0 (Sentinel Application Platform) und R (Open Source Statistikprogramm) umgesetzt. Ein Schema des Arbeitsablaufes wird in Abbildung 2 gezeigt.

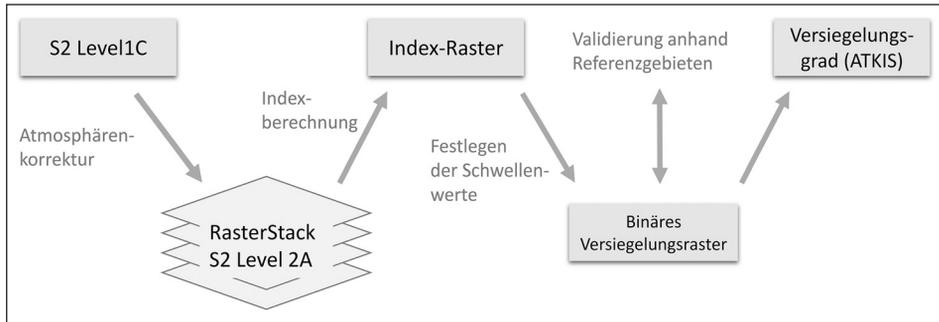


Abb. 2: Workflow zur Ableitung des Versiegelungsgrades aus Bebauungsindizes
(Quelle: eigene Abbildung)

3.1 Sentinel-2

Als Grundlage für die Untersuchung dienen Multispektraldaten des Sentinel-2A-Sensors. Gewählt wurden wolkenfreie Aufnahmen aus den Monaten Januar, Mai, August, September und November, um auch saisonal-bedingte Unterschiede berücksichtigen zu können. Sentinel-2-Daten umfassen 13 Kanäle, wovon 3 atmosphärische Parameter erfassen. Mit einer räumlichen Auflösung von 10 m liegen die RGB-Kanäle sowie ein infraroter Kanal vor. Sechs weitere Kanäle mit einer Auflösung von 20 m erfassen die Erdoberfläche im nahen und kurzwelligen Infrarot. Nach dem Start von Sentinel-2B (07. März 2017) wird die Erde im optischen Bereich in einem Wiederholungszyklus von 2-3 Tagen (in Regionen mittlerer Breite) aufgenommen (Drusch et al. 2012, 26 ff.; ESA 2017). Die Aufnahmen aller Kanäle wurden mit der Software-Erweiterung Sen2Cor in SNAP atmosphärisch korrigiert und auf eine gemeinsame räumliche Auflösung von 10 m resampled.

3.2 Ableitung des Versiegelungsgrades aus Bebauungsindizes

Für jeden Zeitpunkt wurden aus den atmosphärenkorrigierten Sentinel-2-Daten die zuvor genannten Bebauungsindizes errechnet. Für das resultierende Produkt können Schwellenwerte gewählt werden, um die bebauten Flächen gegenüber natürlichen Oberflächen hervorzuheben. Mit dem Ziel einer objektiven Auswahl des als versiegelt geltenden Wertintervalls, ergeben sich der obere und untere Schwellenwert aus dem Median und (+/-) der Standardabweichung der Pixelwertverteilung. Schließlich resultiert daraus ein binäres Raster (versiegelt/nicht versiegelt). Anschließend kann das Versiegelungsraster auf Geometrien des Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) umgelegt werden. Durch diesen Schritt wird ein spezifischer Versiegelungsgrad für jedes ATKIS-Polygon generiert. Fehlerhaft als versiegelte Fläche identifizierte vegetationsfreie Ackerstandorte lassen sich durch Maskierung von zum Freiraum gehörenden Klassen entfernen.

3.3 Validierung

Als Validierungsgrundlage dient ein Transekt durch verschiedene stadtstrukturelle Einheiten (z. B. suburban, Kernstadt, Gewerbegebiet). In diesem Transekt wurden anhand von digitalen Orthofotos (DOP) versiegelte Flächen manuell digitalisiert. Innerhalb des kartierten Transekts wurden per zufälliger Auswahl 1 000 Referenzpixel (50 % versiegelte Fläche und 50 % unversiegelte Fläche) festgelegt und die Bebauungsinformation (versiegelt/nicht versiegelt) übernommen. Teilversiegelte Flächen wurden der dominanten Klasse zugewiesen, also entweder als versiegelt oder als nicht versiegelt deklariert. Die Referenzpixel werden dann mit den Versiegelungsrastern verglichen. Durch Aufstellung einer Konfusionsmatrix werden die gängigen Genauigkeitsmaße, d. h. Overall Accuracy (OA), Producer Accuracy (PA), User Accuracy (UA) und Kappa (Congalton 1991, 36) berechnet.

4 Ergebnisse

Die Übereinstimmung zwischen indexbasierter Versiegelung und der tatsächlichen (manuell digitalisierten) Versiegelung ist während der Sommermonate im Allgemeinen höher (Abb. 3). So liegt die mittlere OA aller Indizes im August bei 83 %, während sie im Januar 64 % beträgt. Insbesondere die Performance des UI, des NBI und des NDBI ist während der Wintermonate deutlich herabgesetzt. Im Jahresverlauf liefert der BUI mit einer mittleren OA von 79 % und einer Standardabweichung von 3.7 Prozentpunkten die konstantesten Ergebnisse. Dahinter folgt der CBI mit einer mittleren OA von 77 %.

Die geringste Übereinstimmung mit den kartierten Referenzflächen verzeichnet der NDBI mit einer mittleren Gesamtübereinstimmung von 69 %, wobei dieser geringere Qualitätswert beinahe vollständig auf die schwächere Indexleistung während der Wintermonate zurückzuführen ist. Der IBI muss hier gesondert betrachtet werden, da die Streuungen der Pixelwertverteilungen über die betrachteten Monate eine sehr hohe Heterogenität aufwies. Die gewählte Herangehensweise zur Ermittlung der Schwellenwerte hat hier zu unzureichenden Übereinstimmungsmaßen geführt, weshalb sie individuell geprüft und manuell justiert wurden. Nach der Justierung lassen sich auch mit dem IBI vergleichsweise hohe Übereinstimmungen erreichen (die mittlere OA beträgt 76 %), jedoch ist eine objektive, automatisierte Ermittlung der Schwellenwerte nicht ohne weiteres umsetzbar.

Die höchste Übereinstimmung von indexbasierten Versiegelungsdaten und manuell kartierten Referenzdaten wurde mit dem CBI auf Basis von Erdbeobachtungsdaten während der phänologischen Hochphase erreicht. Für die Monate Mai und August wurden hier OA-Werte von mehr als 87 % und Kappa von über 0,75 berechnet. Aus den Konfusionsmatrizen lassen sich für beide Monate auch die höchsten Werte für die UA und PA ableiten. Für den August (Abb. 4) werden, ausgehend von den Testpixeln durch den CBI,

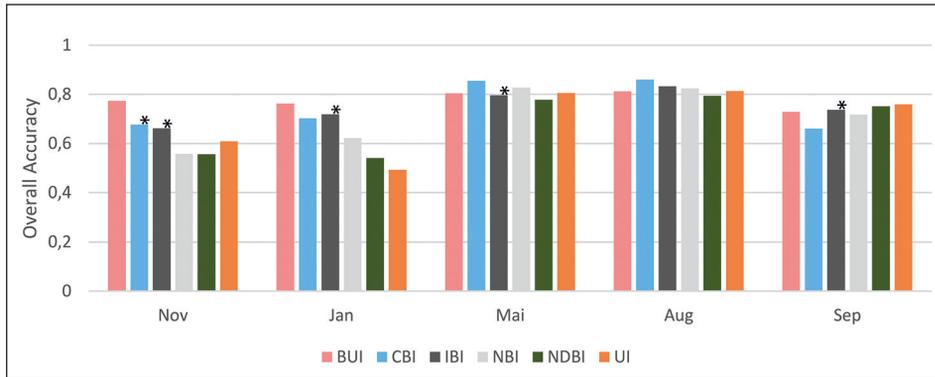


Abb. 3: Overall Accuracy der angewendeten Indizes zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Das „*“ Symbol kennzeichnet nachjustierte Fälle (Quelle: eigene Abbildung)

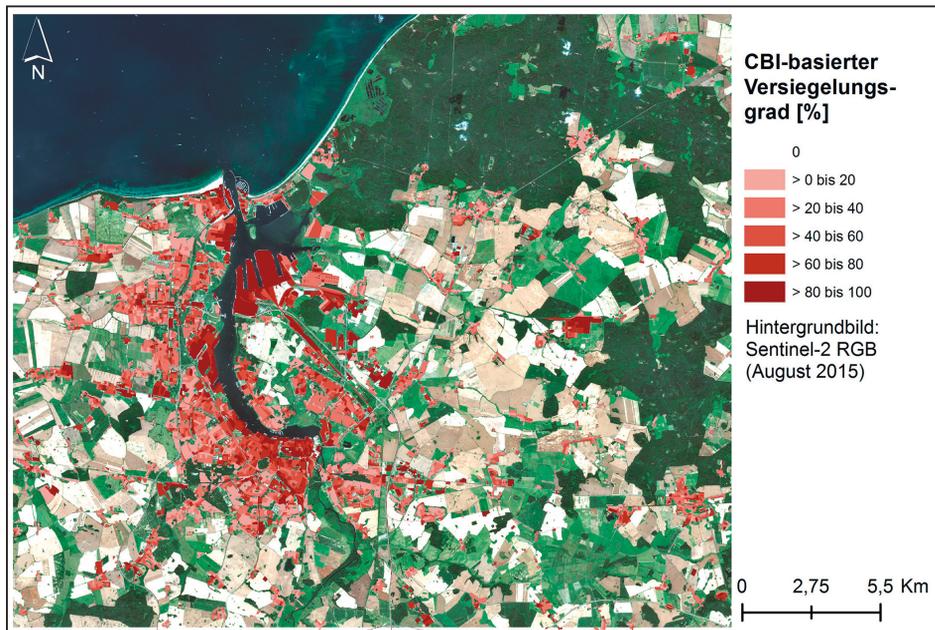


Abb. 4: ATKIS-Basis-DLM mit CBI-Versiegelungsgraden (Quelle: eigene Abbildung)

85 % der tatsächlich versiegelten Pixelflächen richtig identifiziert. Für die tatsächlich unversiegelten Flächen gilt dies für 90 % der Pixel. Im Umkehrschluss wurden knapp 10 % der unversiegelten Referenzfläche durch den CBI fälschlicherweise als versiegelte Fläche ausgewiesen.

Auch alle anderen Indizes übertreffen, basierend auf den Satellitendaten von Mai und August, 80 % für die OA oder liegen knapp darunter (NDBI). Mit einer OA von 85 %

befindet sich der NBI (Mai) nahezu auf demselben Niveau wie der CBI. Dies gilt in etwas schwächerer Ausprägung z. B. auch für den IBI (August) und den BUI (August). Bei näherer Betrachtung der Konfusionsmatrizen fallen jedoch weniger homogene Übereinstimmungswerte auf. Beispielsweise überschätzt der BUI (August) die unversiegelte Fläche um ca. 23 %. Zudem liegt Kappa etwas niedriger bei 0,66 und die Werte der Producer und User Accuracy weichen relativ stark ab. So ist die Trefferquote sehr hoch, was die unversiegelten Testflächen betrifft (93 %). Dieser hohe Wert wird jedoch zum Teil durch die zuvor erwähnte Überschätzung der unversiegelten Fläche begünstigt. Demgegenüber fällt die Trefferquote der versiegelten Referenzflächen mit 77 % eher niedrig aus. Ähnliche Diskrepanzen bei den Übereinstimmungsmaßen sind auch beim NBI (Mai) festzustellen. Auch dieser überschätzt die unversiegelte Fläche relativ deutlich (15 %). Während 463 von 500 unversiegelten Referenzpixeln durch den Index richtig erkannt werden (93 %), trifft dies nur auf 387 Pixel der versiegelten Referenzpixel zu.

5 Fazit

In der Untersuchung wurden verschiedene Bebauungsindizes hinsichtlich ihrer Eignung für die Abschätzung des Versiegelungsgrades getestet. Generell eignen sich Sommeraufnahmen besser für derartige Anwendungen, da die Fläche der vegetationslosen Böden hier reduziert ist. Im Mai und August lieferten alle Indizes ähnliche Gesamtübereinstimmungen mit den Referenzdaten. Bezüglich der Leistungsfähigkeit zu verschiedenen saisonalen Zeitpunkten generiert der BUI die konstantesten Ergebnisse. Für Satellitendaten die während der Wintermonate aufgenommen wurden, scheinen der UI, der NDBI und der NBI weniger gut geeignet zu sein. Die höchsten Maßzahlen bezüglich der Übereinstimmung mit den kartierten Versiegelungsdaten konnten durch Anwendung des CBI für sommerliche Aufnahmen erreicht werden. Die Herangehensweise basiert auf einer binären Gliederung der städtischen Landschaft (versiegelt/nicht versiegelt). Dies beschränkt die Anwendungen auf großräumige Betrachtungen (z. B. größere Stadtviertel oder Stadt-Umland-Gebiete). Auch die errechneten Qualitätsmaßzahlen müssen im Kontext der Vorgehensweise interpretiert werden. Zudem sollte im urbanen Anwendungsfeld das Potenzial der Sentinel-2-Daten noch weiter ausgelotet werden. Für Versiegelungsanalysen kleinerer Raumeinheiten (z. B. auf Wohngebietsebene) bieten sich kostenaufwändigere höchstauflösende Erdbeobachtungsdaten (z. B. WorldView-02) oder flugzeug- bzw. flugrobotergestützte Orthofotos an.

6 Literatur

Arnold, C. L.; Gibbons, C. J. (1996): Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. In: *Journal of the American Planning Association* 62 (2): 243-258.

- Artmann, M. (2014): Institutional efficiency of urban soil sealing management – From raising awareness to better implementation of sustainable development in Germany. In: *Landscape and Urban Planning* 131: 83-95.
- Congalton, R. G. (1991): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. In: *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46.
- Dams, J.; Dujardin, J.; Reggers, R.; Bashir, I.; Canters, F.; Batelaan, O. (2013): Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling. In: *Journal of Hydrology* 485: 84-95.
- Drusch, M.; Bello, U. D.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P.; Martimort, P.; Meygret, A.; Spoto, F.; Sy, O.; Marchese, F.; Bargellini, P. (2012): Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. In: *Remote Sensing of Environment* 120: 25-36.
- ESA – European Space Agency (2017): Sentinel-2.
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Zugriff: 22.03.2017).
- HRO – Hansestadt Rostock (2016): Städtisches Jahrbuch Hansestadt Rostock 2016. Hauptamt, Kommunale Statistikstelle.
- Huete, A. R. (1988): A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). In: *Remote Sensing of Environment* 25 (3): 295-309.
- Jieli, C.; Manchun, L.; Yongxue, L.; Chenglei, S.; Wei, H. (2010): Extract Residential Areas Automatically by New Built-up Index. In: 18th International Conference on Geoinformatics.
- Kaimaris, D.; Patias, P. (2016): Identification and Area Measurement of the Built-up Area with the Built-up Index (BUI). In: *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 5 (6): 1844-1858.
- Kawamura, M.; Jayamanna, S.; Tsujiko, Y. (1996): Relation between social and environmental conditions in Colombo, Sri Lanka and the Urban Index estimated by satellite remote sensing data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXI, Part B7*: 321-326.
- Meinel, G.; Krüger, T.; Schumacher, U.; Hennersdorf, J.; Förster, J.; Köhler, C.; Walz, U.; Stein, C. (2013): Flächennutzungsmonitoring – aktuelle Ergebnisse und Entwicklungen im IÖR-Monitor. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring V. Methodik – Analyseergebnisse – Flächenmanagement*. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 61: 117-129.
- Scalenghe, R.; Marsan, F. A. (2009): The anthropogenic sealing of soils in urban areas. In: *Landscape and Urban Planning* 90: 1-10.
- Strunz, G.; von Sassen, S. (2015): Das Copernicus-Satellitenprogramm Sentinel – Neue Anwendungsmöglichkeiten für die Erdbeobachtung. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring VII. Boden – Flächenmanagement – Analysen und Szenarien*. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 67: 163-170.

- Sun, G.; Chen, X.; Jia, X. Yao Y.; Wang, Z. (2016): Combinational Build-Up Index (CBI) for Effective Impervious Surface Mapping in Urban Areas. In: IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing 9 (5): 2081-2092.
- Weng, Q. (2012): Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. In: Remote Sensing of Environment 117: 34-49.
- Xu, H. (2006): Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. In: International Journal of Remote Sensing 27 (14): 3025-3033.
- Xu, H. (2008): A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. In: International Journal of Remote Sensing 29 (14): 4269-4276.
- Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S. (2003): Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. In: International Journal of Remote Sensing 24 (3): 583-594.