

LaVerDi - Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen

Knöfel, Patrick; Herrmann, David; Sindram, Marcus; Hovenbitzer, Michael

Veröffentlichungsversion / Published Version

Sammelwerksbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Knöfel, P., Herrmann, D., Sindram, M., & Hovenbitzer, M. (2021). LaVerDi - Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen. In *Flächennutzungsmonitoring XIII: Flächenpolitik - Konzepte - Analysen - Tools* (S. 275-286). Berlin: Rhombos-Verlag. <https://doi.org/10.26084/13dfns-p025>

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 XIII Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools

IÖR Schriften Band 79 · 2021

ISBN: 978-3-944101-79-8

LaVerDi – Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen

*Patrick Knöfel, David Herrmann, Marcus Sindram,
Michael Hovenbitzer*

Knöfel, P.; Herrmann, D.; Sindram, M.; Hovenbitzer, M. (2021): LaVerDi – Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIII. Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 79, S. 275-286.
DOI: <https://doi.org/10.26084/13dfns-p025>

LaVerDi – Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen

Patrick Knöfel, David Herrmann, Marcus Sindram, Michael Hovenbitzer

Zusammenfassung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Namen Landschaftsveränderungsdienst (LaVerDi) wurde vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) im Jahr 2017 initiiert. Im Rahmen des Projekts wurde eine Webanwendung zum Monitoring von Landschaftsveränderungen entwickelt und implementiert, die freie Copernicus-Satellitendaten für eine automatisierte Ableitung von potenziellen Landbedeckungsänderungen nutzt. Diese Veränderungshinweise sollen u. a. dazu dienen, BKG-eigene Produkte, wie das Digitale Landbedeckungsmodell Deutschland (LBM-DE), umfassend und in einer einheitlichen Qualität fortzuführen. Als Eingangsdaten verwendet LaVerDi vorprozessierte Sentinel-2-Daten des europäischen Copernicus-Satellitenprogramms sowie einen Bildsegmentierungsansatz zur Extraktion von Veränderungsobjekten. Unter Verwendung modifizierter Wolkenmasken werden Sentinel-2-Szenen mit einer maximalen Wolkenbedeckung von 60 % für die Analyse verwendet. LaVerDi wurde (inkl. Datenverarbeitung, Veränderungserkennung, Visualisierung) auf der deutschen Copernicus Data and Exploitation Platform (CODE-DE) implementiert. Die thematische Genauigkeit der generierten Veränderungslayer liegt über den gestellten Anforderungen von mindestens 80 %. Der bundesweit verfügbare Ergebnisdatensatz erfasst zuverlässig sowohl langfristige als auch saisonale Veränderungen.

Schlagwörter: Copernicus, Sentinel-2, Change Detection, raum-zeitliche Merkmale, Webanwendung

1 Einführung

Die Bestimmung von Veränderungen der Erdoberfläche ist eine häufige Anwendung der satellitengestützten Erdbeobachtung (Townshend et al. 1991). Erste Methoden zur Veränderungsanalyse wurden bereits in den 1980er Jahren vorgestellt (Singh 1989). Seitdem wurde eine Vielzahl von zunehmend verbesserten Methoden und Algorithmen entwickelt. Entsprechend hat sich die Verfügbarkeit von potenziell geeigneten Satellitenbilddaten stark erhöht. Neben der Anzahl der verfügbaren Sensoren mit hoher räumlicher Auflösung (z. B. Landsat, SPOT, Sentinel) ist ein großer Teil dieser Daten inzwischen kostenlos verfügbar und ermöglicht so multitemporale großflächige Auswertungen und Anwendungen in verschiedenen Disziplinen. Um diese großen Datenmengen (kosten-)effizient verarbeiten zu können, ist ein hoher Automatisierungsgrad notwendig.

Mit der Entwicklung und Durchführung des vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) 2017 initiierten Landschaftsveränderungsdienstes (LaVerDi) wurde ein Konsortium beauftragt, bestehend aus der GAF AG (Projektkoordination) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), welches in der Anfangsphase des Projekts als wissenschaftlicher Projektpartner fungierte. Ziel des Projektes war es, ein regelmäßiges Monitoring von Landschaftsveränderungen in Deutschland zu entwickeln und zu implementieren, das mit freien Copernicus-Daten die Aktualisierung und Validierung von BKG-internen Produkten mit dem Schwerpunkt LBM-DE (Landbedeckungsmodell für Deutschland) unterstützt. Die detektierten Veränderungen sollten mit einer Genauigkeit von mindestens 80 Prozent abgeleitet werden und primär als Aktualisierungshinweise für das LBM-DE (siehe Abschnitt 2.1) dienen. Neben der Entwicklung geeigneter Methodiken zur Landbedeckungsänderungsanalyse sollten die entwickelten Verfahren auf der CODE-DE-Plattform (Copernicus Data and Exploitation Platform – Deutschland) eingebettet und über eine Webanwendung zur Verfügung gestellt werden.

Das Hauptziel des Projekts war die Entwicklung einer performanten Webanwendung für eine regelmäßige und automatische, cloudbasierte Bereitstellung von Veränderungsindikationen für Deutschland. Konkret gliederte sich das Projekt in zwei Phasen, die Pilotphase und die Rollout-Phase. In der ersten Projektphase wurde ein Algorithmus zur Veränderungsanalyse auf Basis von Zeitreihen optischer Sentinel-2-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern entwickelt und in definierten Testgebieten mit dem LBM-DE demonstriert. Die zweite Phase konzentrierte sich auf die Integration der entwickelten Algorithmen auf der CODE-DE-Plattform mit dem Ziel der vollständigen Automatisierung. Dazu wurden bereits in der Pilotphase relevante Verarbeitungsketten und Schnittstellen standardisiert entwickelt. LaVerDi wurde Ende November 2020 vollständig auf CODE-DE implementiert und im Dezember 2020 an das BKG übergeben. Dort wird LaVerDi seit Mai 2021 operationell betrieben.

2 Daten und Verarbeitung

2.1 Landbedeckungs-Referenzmodell

Das Digitale Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE) wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt und vom BKG erstmals für das Stichjahr 2009 (damals in Anlehnung an das als Ausgangspunkt der Entwicklung dienende Digitale Basislandschaftsmodell der Bundesländer als DLM-DE bezeichnet) zur Verfügung gestellt (Hovenbitzer et al. 2014). Es beschreibt topographische Objekte der Landschaft im Vektorformat unter dem Aspekt der Landbedeckung (LB) und Landnutzung (LN). Es liefert Informationen zu 31 LB-Klassen mit einer Mindestkartierfläche (engl. Minimum

Mapping Unit; MMU) von 1 ha. Auf diese Weise wird der Zustand der Umwelt zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst, was Analysen nach verschiedenen Gesichtspunkten ermöglicht. Das LBM-DE wurde bisher für die Berichtsjahre 2012, 2015 und 2018 flächendeckend für Deutschland aktualisiert. Ausgehend von den Gebietsgrenzen, den Objekten des Basis-Landschaftsmodells (Basis-DLM), werden Informationen zur Landbedeckung und Landnutzung im Sinne der europäischen CORINE Land Cover (CLC)-Nomenklatur abgeleitet. Dies geschieht durch die Auswertung von multispektralen Satellitenbildzeitreihen aus dem jeweiligen Referenzjahr.

2.2 Copernicus-Daten

Seit 2014 stellt das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus eine moderne und leistungsfähige Infrastruktur für Erdbeobachtung und Geoinformation bereit. Die Erdbeobachtung umfasst Messungen von Satelliten, Flugzeugen, aber auch boden- und seegestützten Beobachtungsinfrastrukturen. Die Copernicus-Infrastruktur gliedert sich in eine Weltraumkomponente und eine In-situ-Komponente. Die Weltraumkomponente deckt die Kerndienste in den übergreifenden Themen Land, Klima und Atmosphäre, Ozeane, Krisen- und Katastrophenmanagement sowie Sicherheit mit den sogenannten Sentinel-Missionen ab, die sich gegenseitig ergänzen. Insbesondere die Sentinel-2-Satelliten wurde für die Erfassung von Informationen zur Landbedeckung und Vegetation entwickelt. Sentinel-2A wurde im Juni 2015 gestartet, gefolgt von Sentinel-2B im März 2017. Beide Sentinel-2-Satelliten verfügten mit dem MSI (engl. Multispectral Imager) über einen baugleichen multispektralen Sensor mit 13 Spektralkanälen. Die räumliche Auflösung liegt je nach Kanal zwischen 10 und 60 m (Clerk et al. 2021). Als Tandemmission hat Sentinel-2 ein zeitliches Wiederkehrintervall von 5 Tagen am Äquator. Die Anwendungsbereiche der optischen Daten sind äußerst vielfältig und reichen von land- und forstwirtschaftlichen Anwendungen bis hin zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern. LaVerDi verwendet Sentinel-2-Daten in Level-2A-Qualität (L2A). Dabei handelt es sich um kartographisch entzerrte und atmosphärisch korrigierte Bilddaten, die als Bottom-of-Atmosphere (BOA)-Reflexionsprodukte aus Level-1C (L1C) Produkten unter Verwendung von atmosphärischen und topographischen Korrekturalgorithmen erzeugt werden (Copernicus 2021).

2.3 Cloud-Verarbeitung

Die entwickelte Webanwendung zur Veränderungsanalyse sowie weitere relevante Daten werden entweder in einer Cloud-Infrastruktur bereitgestellt, gespeichert oder implementiert. Für diesen Zweck wurde die nationale Copernicus-Plattform CODE-DE gewählt. CODE-DE wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ins Leben gerufen, um eine schnellere und bessere Bereitstellung von Daten, Produkten und Anwendungen für nationale Nutzer zu gewährleisten.

Infrastruktur und Nutzerdaten von CODE-DE unterliegen dem nationalen Datenschutz und den Standards des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zur Nutzung externer Cloud-Systeme.

Die Verarbeitungs- und Speicherkapazitäten von CODE-DE werden von LaVerDi genutzt, um die hohe Anzahl von Copernicus Daten zu verarbeiten und die resultierenden Ergebnisse in Form einer Webanwendung (siehe Abschnitt 4) zu visualisieren. Die Umsetzung der thematischen Prozesskette (siehe Abschnitt 3) auf CODE-DE erfolgte in der Programmiersprache Python.

3 Methode

3.1 Datenvorverarbeitung

Der erste Schritt der LaVerDi-Verarbeitungskette ist die Integration aller auf CODE-DE verfügbaren Sentinel-2-Daten (L2A) mit einer Wolkenbedeckung von unter 60 % im jeweils gewählten Referenzzeitraum. Die Metadaten werden extrahiert und in eine relationale Datenbank übertragen. Anschließend werden die voreingestellten Bänder auf eine Referenzauflösung von 10 Metern Neuberechnet und einer Wolken- und Wolken-schattendetektion unterzogen. Für die Wolkenmaskierung wurde ein modifizierter Scene Classification Layer (SCL) berechnet, der bei der Wolken- und Schattenmaskierung bessere Ergebnisse erzielt als der native SCL des L2A-Produkts (Copernicus 2021). Diese modifizierten Wolkenmasken bilden in Kombination mit den L2A-Daten den Input für die Indexberechnung und die band-spezifische multitemporale, pixelbasierte Statistik. Als der am besten geeignete Index wurde der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) identifiziert. Weitere Indizes wie NDWI (Normalized Difference Water Index) und Brightness Index wurden ebenfalls getestet, aber im operationellen Dienst nicht berücksichtigt. Basierend auf dem szenenspezifischen, maskierten NDVI wird dann eine Reihe von raum-zeitlichen Merkmalen (sogenannte „Time Features“) berechnet, die bei Bedarf auch aus einzelnen Spektralbändern abgeleitet werden können. Die Merkmale werden entsprechend ihrer Ausprägung (Minimum, Maximum, Mittelwert, etc.) für den gewählten Bezugszeitraum als vertikaler Layerstack angelegt. Für die Anwendung wurden schließlich Time Features für Mittelwert, 10 %-Perzentil, 90 %-Perzentil und die Differenz von 90 % und 10 % Perzentil der Sentinel-2-Bänder für den vom Benutzer angegebenen Beobachtungszeitraum verwendet. In einem letzten Schritt werden diese Merkmale kalibriert und fließen dann direkt in die klassenspezifische Veränderungsanalyse ein.

3.2 Workflow zur automatischen Veränderungsdetektion

Die Erkennung von Veränderungen in LaVerDi basiert auf dem Konzept der räumlich-zeitlichen Merkmale (Probeck et al. 2019). Die Grundidee ist der Vergleich zweier Sentinel-2-Zeitreihen aus einem vordefinierten Referenzzeitraum (T_0/T_1) (siehe Abschnitt 3.3). Es werden Time Features für die historische Zeitreihe T_0 und die Referenzzeitreihe T_1 berechnet, die beide in den Workflow der Veränderungsdetektion einfließen (Abb. 1). Weiterhin ermöglicht die Berücksichtigung geeigneter statistischer Kennzahlen (z. B. Maximum, Minimum, Mittelwert, Perzentile etc.) die Vergleichbarkeit der Daten. Durch den zeitlichen Vergleich wird zudem sichergestellt, dass Einflüsse dynamischer saisonaler Effekte (wie z. B. Phänologie) weitgehend vermieden werden. Problematisch sind jedoch Veränderungen der Landbedeckung, die erst gegen Ende des Bezugszeitraums auftreten. Diese haben möglicherweise keine ausreichende Relevanz in der Zeitreihe, um durch das gewählte Merkmal adäquat dargestellt zu werden. Die Verwendung von Time Features minimiert damit weitgehend bekannte Probleme der optischen Fernerkundung, wie z. B. Datenlücken in den Zeitreihen in Folge von Wolkenbedeckung.

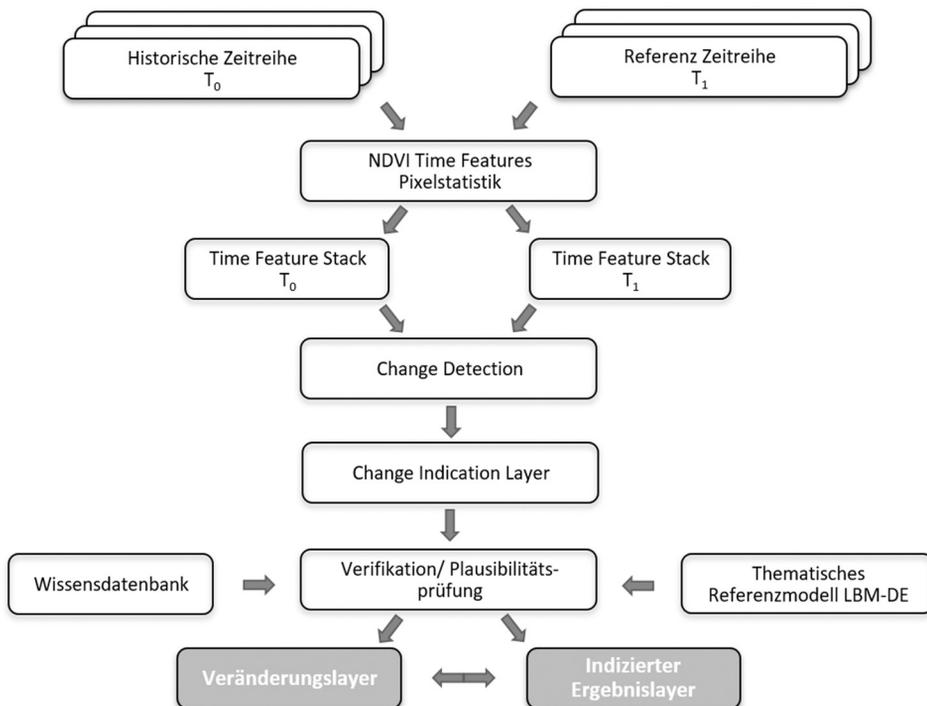


Abb. 1: LaVerDi Workflow zur automatischen Veränderungsdetektion
(Quelle: eigene Bearbeitung)

Veränderungsindikationen werden für jede relevante Landbedeckungskategorie separat in Form eines pixelbasierten Change Indication Layers (CIL) abgebildet. Die vom CIL gelieferten Änderungen werden einer landbedeckungsspezifischen MMU-Filterung und Plausibilitäts- bzw. Verifikationsprüfung unterzogen, wobei das LBM-DE als thematische Referenz in Kombination mit einer Wissensdatenbank verwendet wird. Letztere enthält empirische Informationen zu den a-priori-LB-Klassenübergängen und wird verwendet, um die Änderungsrichtung und Änderungswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Der resultierende Veränderungslayer wird für die endgültige Attribution mit dem LBM-DE verschritten.

3.3 Change Indication Layer

Der Change Indication Layer (CIL) ist das Herzstück von LaVerDi. Er wird für fünf Landbedeckungskategorien (Bebauung, Ackerland, Grünland, Wald und Wasser) des LBM-DE abgeleitet und stellt Landbedeckungsveränderungen auf Pixelebene dar. Abbildung 2 veranschaulicht das Prinzip zur Ableitung der CIL aus den beiden Referenzzeiträumen. Die eigentliche Veränderungsdetektion erfolgt über die Differenzbildung aus den relevanten Time-Feature-Datensätzen. Mittels Grenzwertbildung (x-fache Standardabweichung) werden aus dem Differenzbild Veränderungshinweise in Form von Pixelgeometrien extrahiert. Die aus dem CIL abgeleiteten Änderungspolygone werden in einem weiteren Schritt mit Hilfe des LBM-DE und einer empirischen Wissensdatenbank auf Plausibilität geprüft und einem Postprocessing (MMU-Filterung) unterzogen, um den finalen Veränderungslayer zu erzeugen.

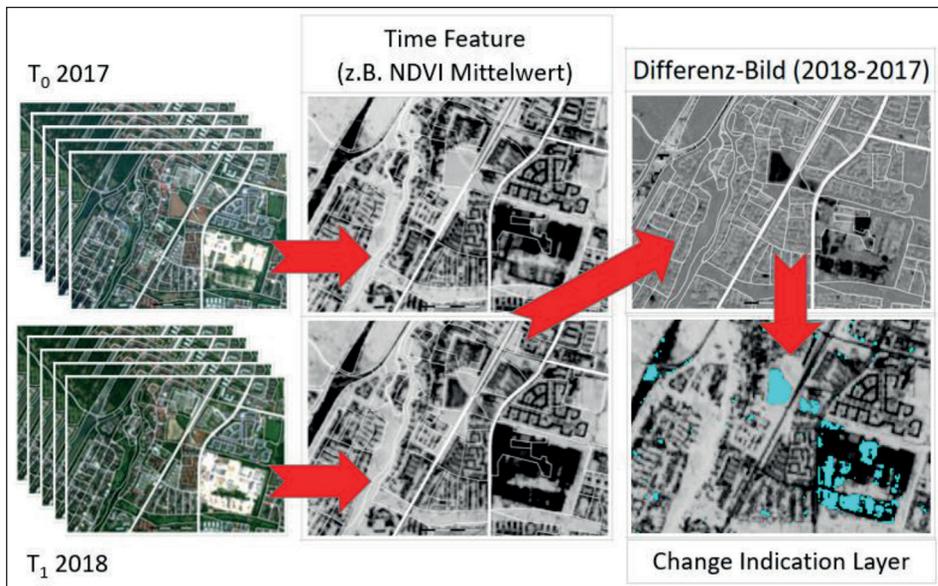


Abb. 2: Herstellung des Change Indication Layer (Quelle: eigene Bearbeitung)

3.4 Wissensdatenbank

Die Bewertung der detektierten Veränderungsindikationen erfolgt über eine Plausibilitätsprüfung. Dazu werden die Änderungsflächen mit zusätzlichen Informationen aus dem LBM-DE (Attribute und topologische Eigenschaften) und den Merkmalsstatistiken aus den Referenzzeiträumen (T_0/T_1) verknüpft. In Kombination mit den a-priori-Klassenübergängen bestimmter Landbedeckungsklassen kann so ein Regelwerk zur Bestimmung der Änderungsrichtung für detektierte Änderungspolygone aufgebaut werden. Dieses wissensbasierte Regelwerk wird im Projektkontext als Wissensdatenbank bezeichnet. In Bezug auf den LBM-DE-Referenzklassenschlüssel wurde dieser durch die Analyse der LBM-DE-Produkte 2015 und 2018 über die Häufigkeit bestimmter Arten von Landbedeckungsänderungen (Klassenübergänge) mit empirischen Richtungen der Landbedeckungsänderung gefüllt.

3.5 Resultierende Änderungsdatensätze

Veränderungslayer und indizierter Ergebnislayer bzw. Referenzdatensatz stellen die endgültigen Vektorprodukte dar, die dem Nutzer über die Webanwendung zur Verfügung gestellt werden. Dazu werden die in der 10-Meter-Rastergeometrie vorliegenden Änderungsinformationen aus dem CIL extrahiert und in eine binäre Maske umgewandelt, um performante Rasteroperationen durchführen zu können. Zunächst werden alle Lücken innerhalb der Änderungsmaske bis zur geltenden klassenspezifischen MMU mit einem 4 x 4-Konnektivitätsfilter aufgefüllt. Anschließend werden alle Pixelgruppen, die kleiner als die angegebene MMU sind, entfernt. Der endgültige Veränderungslayer wird durch die Verschneidung des MMU-gefilterten CIL mit der aktuellsten Version der LBM-Referenzdaten unter Berücksichtigung des vorherigen Plausibilitätsschritts erzeugt. Der Veränderungslayer wird unter Verwendung der Wissensdatenbank, des aktuellsten LBM-DE und einer Hintergrundklassifizierung des LBM-DE für beide Referenzzeiträume (T_0/T_1) mit Hilfe eines Algorithmus des maschinellen Lernens (LightGBM, vgl. Ke et al. 2017) attribuiert, um die wahrscheinlichste Änderungsrichtung in Kombination mit einer Änderungswahrscheinlichkeit in 25 %-Schritten für jedes Polygon zu bestimmen. Mit dem Veränderungslayer und dem indizierten Referenzdatensatz kann das Landbedeckungsmodell ziel- und objektgenau aktualisiert werden.

4 Webanwendung

Ziel des Projekts war die regelmäßige Bereitstellung von automatisch abgeleiteten Veränderungsflächen in Form einer leistungsfähigen Webanwendung, die detektierte Landbedeckungsveränderungen in Polygonform zu vorgegebenen Zeitpunkten erstellt. Die operationelle Webanwendung LaVerDi ist seit Mai 2021 für alle Nutzerinnen und Nutzer

kostenfrei unter der URL <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/landschaftsveraenderungsdienst.html> verfügbar. Die wesentliche Funktionalität der Anwendung wird in diesem Abschnitt vorgestellt. Die notwendige Rechenkapazität auf der CODE-DE-Cloud wurde in Form eines Standard-Rechenkontingents angefordert. Das Kontingent besteht aus 8 CPUs und 64 GB RAM, 2 TB Blockspeicher und einem 1 TB großen Dateispeicher, sowie einem öffentlichen IP-Zugang. Die Ressourcen wurden auf 5 Virtuelle PCs mit CentOS Linux als Betriebssystem verteilt. Das Verarbeitungskontingent ist für die Dauer von LaVerDi flexibel ausgelegt und beinhaltet Unterstützungsdienstleistungen seitens des Betreibers.

Das Frontend der Webanwendung wurde im Open-Source-Framework Angular Material entwickelt, während die Backend Programmierung derselben in ASP.NET Core umgesetzt wurde. Die Kommunikation zwischen dem Frontend und Backend der Webanwendung wird mittels WebSocket-Protokoll realisiert, während die Kommunikation zwischen dem Backend der Anwendung und dem Python-Backend auf CODE-DE mit der Open Source Message Broker Software RabbitMQ gesichert wird. Registrierung und Prozessstatus werden über das Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) gesteuert.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, gelangt man nach erfolgreicher Anmeldung zum LaVerDi-Viewer. Der bereits bundesweit vorberechnete Veränderungslayer 2018-2019 ist gemäß der Voreinstellung im Layerbaum aktiviert, aber aus Performancegründen ausgegraut, da die Darstellung der Änderungspolygone (ca. 57 000) in voller Auflösung andernfalls zu signifikanten Performanceeinbußen führen würde. Diese werden erst ab einem Maßstab von 1:200 000 im Fenster angezeigt. Der Viewer enthält eine Suchfunktion, die auf der linken Seite positioniert ist und einen Web Map Service (WMS) für die Grenzen der Bundesländer nutzt. Auf der rechten Seite des Viewers sind der Layerbaum, die Symbolleisten und die LBM-Legende positioniert. Bei der Entwicklung des Viewers und seiner Komponenten wurde Wert auf intuitive Gestaltung und Bedienung gelegt. Einzelne Bedienelemente werden durch Tooltips erläutert.

Der Benutzer kann die Reihenfolge oder Anordnung der Layer nach Wunsch steuern, um Überschneidungen mit anderen Informationen und Diensten zu ermöglichen. Für das 60 m Sentinel-2-WASP-Mosaik, ein monatliches, wolkenloses, kostenfreies Sentinel-2-Mosaik Deutschlands des DLR (DLR 2019), wurde zusätzlich am unteren Rand eine Zeitleiste implementiert, um den zeitlichen Ablauf möglicher Änderungen auf Monatsbasis zu visualisieren und ggf. direkt zu verifizieren. Ab einem Maßstab von 1:200 000 öffnet sich auf der linken Seite automatisch ein Menü mit einer Ergebnisliste aller innerhalb des angezeigten Fensters berechneten Änderungspolygone und der Veränderungslayer wird im Layerbaum aktiviert (Abb. 4). Innerhalb der Ergebnisliste kann der Nutzer mit der Lupe auf das gewünschte Änderungspolygon zoomen und sich über die Liste die Details der Änderungsdetektion ansehen.

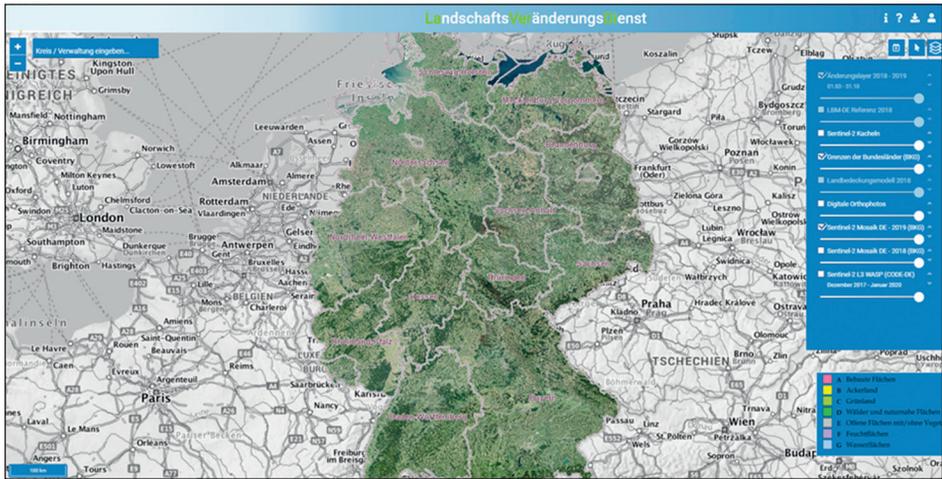


Abb. 3: Screenshot der Anwendung „LandschaftsVeränderungsDienst“ (Quelle: eigene Bearbeitung)

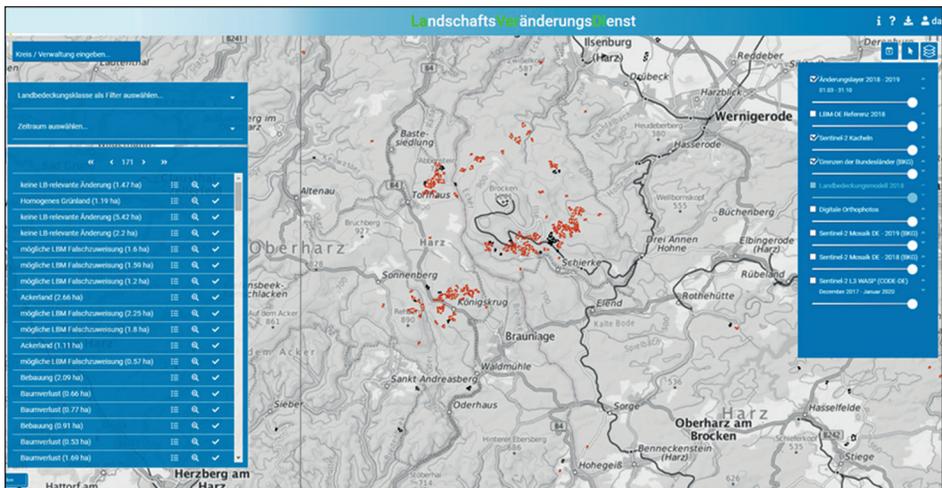


Abb. 4: Beispiel für den LaVerDi Änderungslayer mit Veränderungsindikationen (rot) (Quelle: eigene Bearbeitung)

Für jedes Änderungspolygon wird im oberen Teil des Fensters neben der Flächenstatistik die Änderungswahrscheinlichkeit in den Kategorien *nicht relevant*, *sehr gering*, *gering*, *mittel* und *hoch* angegeben. Danach folgt die Angabe der Änderungsrichtung (z. B. von Ackerland in T_0 zu bebautem Gebiet in T_1) mit den dazugehörigen Time-Feature-Metriken. Letztere werden immer angegeben, sind aber aufgrund der klassenspezifischen Auswertung immer nur für ein Merkmal relevant. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, sind die angegebenen NDVI-Metriken: NDVI-Mittelwert, NDVI-90 %-Perzentil, NDVI-10 %-Perzentil und NDVI-Perzentil-Differenz zu den 90 %-/10 %-Perzentilen.

Die Metriken sind untereinander normalisiert und daher nur zwischen den Jahren, aber nicht innerhalb eines Jahres vergleichbar. Zur Visualisierung und Analyse der Änderungspolygone stehen verschiedene Ebenen inklusive Transparenzschieber zur Verfügung.

5 Fazit

Die Genauigkeitsanalysen, die im Rahmen des Projektes mittels stratifizierter Zufallsstichproben durchgeführt wurden zeigen, dass die Methodik überwiegend gute Ergebnisse liefert. Die geforderte minimale Gesamtgenauigkeit von 80 Prozent wurde für jede LB-Klasse unter Berücksichtigung des 95 Prozent Konfidenzintervalls erreicht oder sogar überschritten, wobei zeitliche oder saisonale Effekte berücksichtigt wurden. Unter optimalen Wetter- und Klimabedingungen liefert die Methodik sehr gute Ergebnisse. Die für LaVerDi entwickelte Vorverarbeitungskette liefert standardisierte Bilddatenprodukte und wurde durch eine verbesserte Wolken- und Wolkenschattenerkennung zur Wolkenmaskierung (bis zu einer maximalen Wolkenbedeckung von 60 Prozent) im operationellen, cloud-basierten Dienst optimiert. Der entwickelte Change-Detection-Algorithmus stützt sich weitgehend auf die Eigenschaften und Fähigkeiten von räumlich-zeitlichen Merkmalen und ist vollständig automatisiert. Er berücksichtigt vorhandene Objektgeometrien aus dem Referenz-LBM zur Ableitung von Veränderungsindikationen und beinhaltet Elemente der objektbasierten Nachbearbeitung (MMU-Filter) und der thematischen Plausibilität (Wissensdatenbank). Die Wissensdatenbank ermöglicht als empirisches Regelwerk die Zuordnung einer Änderungsrichtung für erkannte Veränderungsindikationen (z. B. von Wald zu bebauter Fläche). Durch die Einführung von landnutzungsspezifischen MMU-Filtern wird das Rauschen in den initialen, pixelbasierten Veränderungsanzeigen minimiert und die Aussagekraft in Richtung einer tatsächlichen (realen) Veränderung deutlich erhöht.

Seit März 2021 finden sowohl die aktuelle Version des Global Reference Image (GRI, Clerk et al. 2021) als auch das neue Copernicus DEM mit 90 Metern Auflösung in der Sentinel-2-Prozessierung (für L1C- und L2A-Produkte) Anwendung. Dadurch werden zum einen eine verbesserte geometrische Lagegenauigkeit und zum anderen eine multitemporale Ko-Registrierung der Sentinel-2A- und -2B-Daten gewährleistet. Eine Reprozessierung des Sentinel-2-Archivs wurde von der ESA angekündigt (Clerk et al. 2021) und wird voraussichtlich im Laufe des Jahres 2021 beginnen. Ziel ist es, eine konsistente, multitemporale Registrierung der Sentinel-2-Daten zu erreichen und damit eine verbesserte Ausgangsbasis für Veränderungsanalysen in einer Vielzahl von Anwendungen und Themenbereichen zu ermöglichen. Je nach Zeitpunkt und Umfang der Reprozessierung wird LaVerDi frühestens ab 2022 in vollem Umfang von der verbesserten geometrischen Genauigkeit der multitemporalen Satellitenbilddaten profitieren können.

Weitere technologische Entwicklungen und Verbesserungen des derzeit verwendeten Prozessors (Sen2Cor) zur Produktion der L2A-Eingangsdaten sind in Zukunft zu erwarten. Hier sind insbesondere die Wolken- und Wolkenschattenerkennung sowie die topographische Normalisierung zu nennen.

Darüber hinaus wurde ein europaweiter Phänologie-Layer auf Basis von Sentinel-2-Daten von der Europäischen Umweltagentur (EEA) ausgeschrieben und erste Ergebnisse sind hier für den Spätsommer 2021 zu erwarten. Diese Phänologieprodukte können in Zukunft verwendet werden, um Extremereignisse (wie die europäische Dürre von 2018) zu adressieren und die Daten zeitlich zu kalibrieren oder zusätzliche Informationen für den Dienst bereitzustellen.

6 Literatur

- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (2019): Monatlich wolkenlose, kostenfreie Sentinel-2-Mosaik Deutschlands.
https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-13247/23165_read-59599
(Zugriff: 31.08.2021).
- Copernicus (2021): Sentinel-2 MSI User Guide.
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
(Zugriff: 31.08.2021).
- Clerc, S; MPC Team (2021): Sentinel-2 L2A Data Quality Report; August 2021, Issue 40.
<https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-L2A-Data-Quality-Report.pdf/8fbbe100-19ce-4d87-acac-a68fff5f57d0?t=1623227995628>
(Zugriff: 07.09.2021).
- Ke, G.; Meng, Q.; Finley, T.; Wang, T.; Chen, W.; Ma, W.; Ye, Q.; Liu, T. (2017): LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA.
- Knöfel, P.; Herrmann, D.; Sindram, M.; Hovenbitzer, M. (2021): Germany's first cloud-based web service for land monitoring using Copernicus Sentinel-2 data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. V-3-2021: 133-140.
- Hovenbitzer, M.; Emig, F.; Wende, C.; Arnold, S.; Bock, M.; Feigenspan, S. (2014): Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland - DLM-DE. In: Manakos, I.; Braun, M. (Eds): Land use and land cover mapping in Europe: practices & trends. Remote Sensing and Digital Image Processing, 18. Springer, Dordrecht, 255-272.
- Probeck, M.; Schwab, K.; Sevillano Marco, E.; Herrmann, D.; Sandow, C.; Richter, R.; Moser, L. (2019): Prototypes of future Copernicus Land Monitoring Products: The ECoLaSS Project. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W16, 2019 PIA19+MRSS19, München, Deutschland.
DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-201-2019 (Zugriff: 31.08.2021).

- Singh, A. (1989): Review article – Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10: 989-1003.
- Snedecor, G. W.; Cochran, W. F. (1967): *Statistical methods*. 6th Edition. State University Press, Ames, Iowa, 517.
- Townshend, J.; Justice, C.; Li, W.; Gurney, C.; McManus, J. (1991): Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment* 35: 243-255.