

SENSchiene - Satellitengestützte Erfassung von Flächeneigenschaften und Nutzungsveränderungen im Umfeld des Verkehrsträgers Schiene

VRENI PREUßLER¹, KATHARINA FRICKE¹, FREDERICK BOTT¹,
CHRISTIAN SCHULZ², BIRGIT KLEINSCHMIT² & GREGOR TINTRUP³

***Zusammenfassung:** Die Nutzung und die Eigenschaften von Flächen im Umfeld des Verkehrsträgers Schiene sowie deren zeitliche Änderung sind für verschiedene behördliche Überwachungsaufgaben relevant: Dies betrifft u. a. die Vollzugskontrolle von naturschutzrechtlichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen im Rahmen von Planfeststellungsverfahren sowie die Überwachung und Nutzungsanalyse von Strecken und Serviceeinrichtungen der Eisenbahninfrastruktur bei Stilllegungsverfahren. In SENSchiene werden basierend auf den frei verfügbaren Sentinel-1 und -2 Daten des Copernicus-Programms, Flächeneigenschaften und Nutzungsveränderungen im Gleisumfeld detektiert und für behördliche Überwachungsaufgaben nutzbar gemacht. Mit einem webbasierten Demonstrator können vom Nutzer automatisierte Abfragen von satellitenbasierten Informationen für ausgewählte Flächen durchgeführt werden.*

1 Einleitung

Im Bereich Schienenverkehr gibt es einen hohen Bedarf an Informationen zu Nutzung, Eigenschaften und zeitlichen Veränderungen im Gleisumfeld. Das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) ist nach § 18 AEG und § 74 VwVfG für die Planfeststellung bei Bau und Änderung von Eisenbahnbetriebsanlagen und für deren Vollzugskontrolle und Überwachung zuständig. Die im Rahmen von Planfeststellungsverfahren festgesetzten naturschutzrechtlichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen (AuE) bilden in dem Projekt SENSchiene den ersten von zwei Anwendungsfällen. Sie werden vom EBA im Rahmen der Vollzugskontrolle nach ihrem Herstellungs- und Pflegezustand überwacht. Hinsichtlich der Kontrollaufgaben ergeben sich in diesem Themenfeld besondere Herausforderungen durch die Vielfalt der angewandten Maßnahmen und das breite Spektrum der naturschutzrechtlichen Ausprägung und Gestaltung der Flächen.

In einem zweiten Anwendungsfall geht es um die Feststellung der Nutzungsintensität von Gleisen. Ausgehend von der gesetzlichen Verpflichtung des Infrastrukturbetreibers (z. B. der DB Netz AG) zum Betrieb seiner Anlagen muss vom EBA als der zuständigen Genehmigungs- und Kontrollbehörde jede signifikante Verringerung der Kapazität von Strecken vorab genehmigt werden. Dies betrifft auch die geplante Einstellung des Betriebes (Stilllegung) einer Eisenbahnstrecke oder eines Teilabschnittes. Bei Anträgen auf Stilllegung gibt der Infrastrukturbetreiber an, dass das Gleis für mindestens 24 Monate nicht genutzt worden sei. Eine Nutzung kann dabei bereits das zeitweise Abstellen eines Wagens oder einer Lok auf dem als stillgelegt deklarierten Gleis darstellen. Die Kontrolle und Prüfung der Nicht-Nutzung der Infrastruktur

¹ Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt, August-Bebel-Straße 10, D-01219 Dresden, E-Mail: [PreusslerV, FrickeK, BottF]@dzsf.bund.de

² TU Berlin - Fachgebiet Geoinformation in der Umweltplanung, Straße des 17. Juni 145, EB 5, D-10623 Berlin, E-Mail: [christian.schulz.1, birgit.kleinschmit]@tu-berlin.de

³ RLP AgroScience GmbH, Breitenweg 71, D-67435 Neustadt an der Weinstraße, E-Mail: gregor.tintrup@agroscience.rlp.de

zur Bearbeitung des Antrags gestaltet sich entsprechend schwierig, da häufig keine eindeutigen, objektiven und zeitlich hochauflösenden Informationen über die Nutzung in der Vergangenheit vorliegen.

In beiden Anwendungsfällen sind regelmäßige Kontrollen sowie stichprobenhafte Vor-Ort-Begehungen im gesamten Bundesgebiet notwendig, um die Umsetzung gemäß dem Planfeststellungsbeschluss bzw. dem Antrag auf Stilllegung zu überprüfen. Diese Kontrollen sind mit einem hohen Personal- und Zeitaufwand verbunden. Die Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Digitalisierung und Automatisierung ermöglicht eine deutlich höhere zeitliche Informationstiefe und kann so zu einer besseren Informationsgrundlage beitragen.

2 Stand der Forschung

Es haben sich in den letzten Jahren bereits verschiedene Projekte damit beschäftigt, Fernerkundungsdaten mit KI-basierten Klassifikationsalgorithmen in Verbindung mit In-situ-Daten für das Monitoring von umweltrelevanten Flächen oder zur Überprüfung von Infrastrukturobjekten zu nutzen. Abhängig von den Datengrundlagen und den spezifischen Projektzielen haben die Projekte unterschiedliche Anforderungen an die räumliche und inhaltliche Auflösung.

Auf europäischer Ebene stellt beispielsweise das Copernicus-Projekt COP4N2K, basierend auf dem existierenden Prototyp von EU Grassland Watch, einen Dienst zum Monitoring von Graslandflächen in ausgewiesenen Natura2000-Schutzgebieten zur Verfügung. Das Projekt kombiniert optische Daten von Sentinel-2 und Landsat mit SAR-Daten von Sentinel-1, um ein zeitreihenbasiertes Tool für Oberflächen- und Nutzungsklassifikation zu entwickeln (EU GRASSLAND WATCH 2021). Der Copernicus Kerndienst CORINE Land Cover bietet basierend auf einem dafür entwickelten Machine-Learning-Algorithmus konsistente Landbedeckungsinformationen und erarbeitet hierfür auch eine umfassende Trainingsdatenbank. Das Tool bietet damit die Möglichkeit, flächendeckend großräumige Habitatgebiete zu überwachen, zu klassifizieren und die zeitlichen Veränderungen der Graslandflächen zu visualisieren (BÜTTNER et al. 2004).

Für Deutschland gibt es bereits einige Ansätze, die sich mit der automatisierten Klassifikation von Grünlandflächen bzw. Landbedeckungsklassen mittels Fernerkundungsdaten beschäftigen. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie bietet eine auf CODE-DE implementierte und durch den LaVerDi Viewer visualisierte Veränderungsanalyse ausgewählter Landbedeckungsklassen des Landbedeckungsmodells Deutschland (LBM-DE), beruhend auf Sentinel-Daten, an (KNÖFEL et al. 2021).

Auch der Zustand von Infrastrukturobjekten kann mithilfe von Satellitendaten überwacht werden. ZIEMER et al. (2023) zeigen, dass durch Einsatz von Radar-Satellitendaten unterschiedlicher Wellenlänge und Auflösung (Sentinel-1 und TerraSAR-X) und SAR-Interferometrie Deformationen an verschiedenen Staudämmen in Deutschland beobachtet werden können.

Für die Verstetigung des fernerkundungsbasierten Monitorings ist neben den entwickelten Algorithmen der günstige und regelmäßige Zugriff auf die benötigten Eingangsdaten notwendig. Das Copernicus-Programm bietet Behörden kostenfreien Zugang zu Satellitendaten. Die cloud-basierte Prozessierungsumgebung CODE-DE stellt aktuelle und hochfrequente Zeitreihen von Sentinel-Daten vorprozessiert und flächendeckend zur Verfügung und erlaubt damit hocheffiziente und automatisierte Flächenkontrollen für Behörden. Trotz wachsenden Interesses sind lediglich wenige Anwendungen von Zeitreihen aus optischen und SAR-Daten für die Kontrolle

von einzelnen naturschutzrechtlichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmentypen aus der Umweltprüfung bekannt. Auch beim behördlichen Monitoring von Infrastruktur und insbesondere dem Monitoring von einzelnen Zügen gibt es einen hohen Forschungsbedarf für Potential und Nutzbarkeit von Copernicus-Daten. Das gesteigerte Interesse an der Analyse von Sentinel-Zeitreihen bezogen auf diese fachlich behördlichen Fragestellungen geht eng mit einem hohen Interesse an niedrighschwelligen Zugangsmöglichkeiten einher. Fehlende fernerkundliche Kenntnisse sowie fehlende technische Ressourcen sind wesentliche Hürden bei der Nutzung und Analyse von Satellitendaten durch behördliche Nutzergruppen. Bisher gibt es nur einzelne Fallstudien, die das Potential von Copernicus-Daten für einen behördlichen Nutzerkreis aufzeigen (PLÜCKERS et al. 2022) und wenige Lösungen, die auch die einfache Nutzung der Informationen für den behördlichen Alltag erlauben, ohne fernerkundliche Kenntnisse vorauszusetzen. TimeStamp ist ein Beispiel für eine cloudbasierte Webanwendung von CODE-DE, welche auf der Grundlage von Sentinel-2 Satellitenbild-Zeitreihen die temporale Dynamik auf Flächen analysiert und den Anwendern Hinweise zu Nutzungsänderungen zur Verfügung stellt. Ein Anwendungsfall ist die Analyse von Agrarförderflächen mit Greening-Zwischenfrüchten. Dabei erhält der Nutzer flächenspezifische Auswertungsergebnisse und visuelle Kontrollhinweise in Form eines Ampelsystems. Ein solcher Dienst ermöglicht durch den Einsatz moderner Technologie in Form von KI-basierten Analysemethoden und fernerkundlichen Zeitreihen eine zielgerichtete Planung von Vor-Ort-Kontrollen, z. B. auf Förderflächen.

In diesem Artikel werden die bisherigen Ergebnisse des Projekts SENSchiene vorgestellt. Das Vorhaben wird durch Mittel des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) zur „Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“ gefördert. Es zielt darauf ab, mit frei verfügbaren Satellitendaten des Copernicus-Programms, insbesondere Sentinel-1 und -2 Daten und frei verfügbaren Geodaten, Algorithmen zur automatisierten Detektion von Flächeneigenschaften und Nutzungsänderungen im Gleisumfeld zu entwickeln und für behördliche Nutzer zur Verfügung zu stellen. Dafür werden die behördenseitigen Nutzeranforderungen erarbeitet und ergänzend durch spezifische Flächeneigenschaften und Nutzungsklassen in einem Anforderungskatalog zusammengefasst. Für die erforderlichen Klassen und die Entwicklung der Algorithmen wird ein entsprechender Referenzdatensatz erstellt. Dazu werden Referenzdaten aus dem Kompensationskataster der DB Netze AG (FINK) sowie Gleislagedaten des EBA genutzt. Die entwickelten Dienste werden in CODE-DE implementiert und über einen auf dem existierenden Dienst timeStamp basierenden Web-Demonstrator einem behördlichen Nutzerkreis zur Verfügung gestellt.

3 Problemstellung

Der Vorteil von Satellitendatendiensten im Rahmen behördlicher Nutzung liegt vor allem in der großräumigen und flächendeckenden Informationsgewinnung und Darstellung. Automatisierte Auswertungsalgorithmen ermöglichen die Analyse und Detektion z. B. von räumlich-zeitlichen Gradienten und Mustern oder von Einzelereignissen. Dafür können Einzelaufnahmen oder auch relativ eng getaktete Zeitreihen von Bildern zum Einsatz kommen. Demgegenüber können visuelle Auswertungsmethoden oder Feldbegehungen nur punktuelle Informationen in aufwandsbedingt meist langen Analyse-Zyklen liefern.

Eine Herausforderung dieses fernerkundlichen Ansatzes liegt darin, einen belastbaren Zusammenhang zwischen den Informationen in den Satellitendaten und dem fachlich und behördlich

relevanten Zustand vor Ort herzustellen (sog. semantic gap). Häufig liefern fernerkundliche Analysen auf der Basis spektraler und anderer Geoinformation keine direkten, auch juristisch belastbaren Antworten, sondern lediglich Indikatoren, die noch vor dem Hintergrund des jeweiligen fachlichen Kontextes interpretiert werden müssen.

Eine weitere Herausforderung ist es, einen Dienst zu implementieren, welcher durch seine Nutzerfreundlichkeit, Effizienzsteigerung und Objektivität für die Erfüllung der behördlichen Pflichten einen erheblichen Mehrwert zu den bisherigen Verfahren anbietet.

SENSchiene konzentriert sich auf zwei behördliche Problemstellungen, die sich mit der Überwachung und Kontrolle von Nutzung und Eigenschaften von Gleisnebenflächen beschäftigen. Im Folgenden wird auf beide Anwendungsproblematiken sowie die Möglichkeiten, die Satellitendaten für diese Anwendungen bieten, näher eingegangen.

3.1 Monitoring von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen

Bei der Umsetzung der Eingriffsregelung wurde bereits mehrfach festgestellt, dass große Differenzen zwischen dem geplanten und tatsächlich umgesetzten Zustand von Kompensationsmaßnahmen auftreten (ECKER et al. 2016; JESSEL et al. 2003; RABENSCHLAG et al. 2019; SCHWOON 1999). Obwohl der Ausgleich bzw. Ersatz von versiegelten Flächen verpflichtend ist, wird ein hoher Anteil der festgesetzten Maßnahmen nur schlecht und im schlimmsten Fall überhaupt nicht umgesetzt. Bei einer Studie in Passau wurden 44 % der planfestgestellten Maßnahmen nicht umgesetzt, lediglich 24 % aller Maßnahmen zeigen eine gute bis sehr gute Umsetzung (ECKER et al. 2016). Eine weitere Studie in Süddeutschland zeigt, dass 40 % der geplanten Ausgleichsmaßnahmen nicht umgesetzt sind, d. h. sie erfüllen die Planungsvorgaben um weniger als 20 %. Lediglich ein Drittel der geplanten Maßnahmen wird als vollständig umgesetzt eingestuft (SEDLMEIER 2003). Umgesetzte Kompensationsmaßnahmen weisen außerdem große qualitative Unterschiede im Sinne des Naturschutzes auf (JESSEL et al. 2003). Bei der Untersuchung von baurechtlichen Ausgleichsmaßnahmen bei Freiburg, zeigen RABENSCHLAG et al. (2019), dass von den in der Studie betrachteten umgesetzten Kompensationsmaßnahmen 66 % erhebliche Diskrepanzen zum angestrebten Zielzustand aufweisen. Es bestehe jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen Flächengröße und fehlender Umsetzung. Zwar werden kleinflächige und strukturreiche Maßnahmen weniger häufig umgesetzt, großflächige Maßnahmen zeigen aber das größte absolute Umsetzungsdefizit.

Es sind umfangreiche und regelmäßige Kontrollen notwendig, um die Realisierung im Sinne der festgesetzten Kompensationsziele und die Qualität der Ausgleichsflächen zu gewährleisten. Von Seiten der Kontrollbehörden setzt das einen großen Zeit- und Personalaufwand voraus. Außerdem ist ein hohes Maß an naturschutzfachlichen Kenntnissen notwendig, um die Realisierung der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen im Sinne des Naturschutzes zu bewerten und zu überprüfen (EGNER 1999). Eine regelmäßige naturschutzfachliche Kontrolle aller Kompensationsmaßnahmen kann mit den aktuell gültigen Prozessen und Mitteln dementsprechend nicht flächendeckend durchgeführt werden.

SENSchiene hat zum Ziel, multispektrale Sentinel-2 Daten zu nutzen, um über deren Zeitreihen und die daraus resultierenden jahresübergreifenden Vegetationstrends die Kontrolle von Kompensationsmaßnahmen hinsichtlich Begrünung und Gehölzpflanzung substantiell zu unterstützen. Zu den überprüften Maßnahmen gehören beispielsweise das Anlegen von Gras- und Staudenfluren, von Streuobstwiesen, von Hecken und Grünland sowie die Entsiegelung und Rekultivierung von Grünlandflächen. Somit sollen die Effizienz und Qualität der

naturschutzfachlichen Kontrolle von Kompensationsmaßnahmen verbessert werden. Die Herausforderung ist dabei, naturschutzfachlich relevante Eigenschaften der Kompensationsflächen verlässlich aus den Sentinel-Satellitendaten abzuleiten. Je nach Zielzustand müssen der Vitalitätszustand, das Vorhandensein oder die Abwesenheit einer Reihe von Vegetationsarten oder -typen, die Diversität oder der Pflegezustand überprüft werden.

3.2 Nutzungsveränderungen im Gleisumfeld bei Stilllegungsverfahren

Im Rahmen von Stilllegungsverfahren muss der Antragsteller zum Zeitpunkt der Antragstellung nachweisen, dass die letzte Nutzung der stillzulegenden Infrastruktur bereits mindestens 24 Monate zurückliegt. Das Abstellen oder Rangieren von Zügen auf einem Gleisabschnitt sind Indizien für eine andauernde Nutzung, die das EBA als Kontrollbehörde jedoch nicht bzw. nur schwer rückwirkend kontrollieren kann. Veränderungen im Gleisbett sowie eine von Vegetation überwachsene Infrastruktur sind Indizien für fehlende Instandhaltung und somit Indizien für eine unterbliebene Nutzung. In zahlreichen Studien wird dargestellt, dass sich Sentinel-Daten gut für die Detektion und Klassifizierung von Landbedeckung, insbesondere Grünland (WANG et al. 2022; SCHWIEDER et al. 2022; REINERMANN et al. 2020) und Wald (KÖNIG et al. 2023; AHLWEDE et al. 2023; BLICKENSDÖRFER et al. 2022) eignen. Durch die vorhandenen Sentinel-Daten und deren Zeitreihen seit 2014 besteht außerdem der Vorteil, die angesprochenen Indikatoren auch rückblickend zu überprüfen.

Das Projekt zielt darauf ab, eine wahrscheinliche Nutzung des Gleises zu detektieren, indem abgestellte Fahrzeuge (Züge oder einzelne Wagen) auf dem Gleis durch die Nutzung von dem Rückstreuungseffekt von Metallobjekten in Sentinel-1 SAR-Daten detektiert werden sollen, wie es bereits z. B. für Schiffe (GROVER et al. 2018) und Lkw (FISSER et al. 2022) demonstriert wurde. Dadurch soll eine erweiterte Informations- und Entscheidungsgrundlage für die Durchführung der behördlichen Überwachungsaufgaben geschaffen werden.

4 Daten und Methoden

4.1 Satellitendaten und terrestrische Referenzdaten

Für die Algorithmusentwicklung werden Satellitenbild-Zeitserien des europäischen Copernicus-Programms genutzt, welche auf CODE-DE für Deutschland flächendeckend und vorprozessiert zur Verfügung stehen.

Für das Monitoring von Kompensationsmaßnahmen wird auf die multispektralen Zeitserien der Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2A und Sentinel-2B zurückgegriffen. Terrestrische Referenzdaten der DB Netze AG bilden die Grundlage für den zu entwickelnden Algorithmus. Im Fachinformationssystem Naturschutz und Kompensation (FINK) werden Daten zu naturschutzfachlichen Kompensationsverpflichtungen zusammengeführt, um der Berichtspflicht an die zuständige Kontrollbehörde, das EBA, nachzukommen. Der Referenzdatensatz aus FINK, der für SENSchiene genutzt wird, enthält über 15.000 Geometrien von Kompensationsmaßnahmsflächen in allen Lebenszyklusphasen von Planung über Genehmigung, Herstellung und Entwicklung bis zur dauerhaften Unterhaltung. Die Referenzdaten werden Maßnahmenkategorien zugeordnet und aufgrund der 10m-Auflösung der Sentinel-Daten u. a. nach Flächengröße gefiltert. Außerdem gehen frei verfügbare Daten der Kompensationskataster der Umweltlandesämter von Sachsen, Thüringen, Bayern, Bremen, Berlin, Hamburg, Schleswig-Holstein und Brandenburg als zusätzliche Referenzdaten in die

Algorithmusentwicklung ein (Abb. 1). Aus der FINK-Datenbank wurden für die Prototypenentwicklung für ausgewählte Maßnahmentypen Referenzflächen ausgewählt.

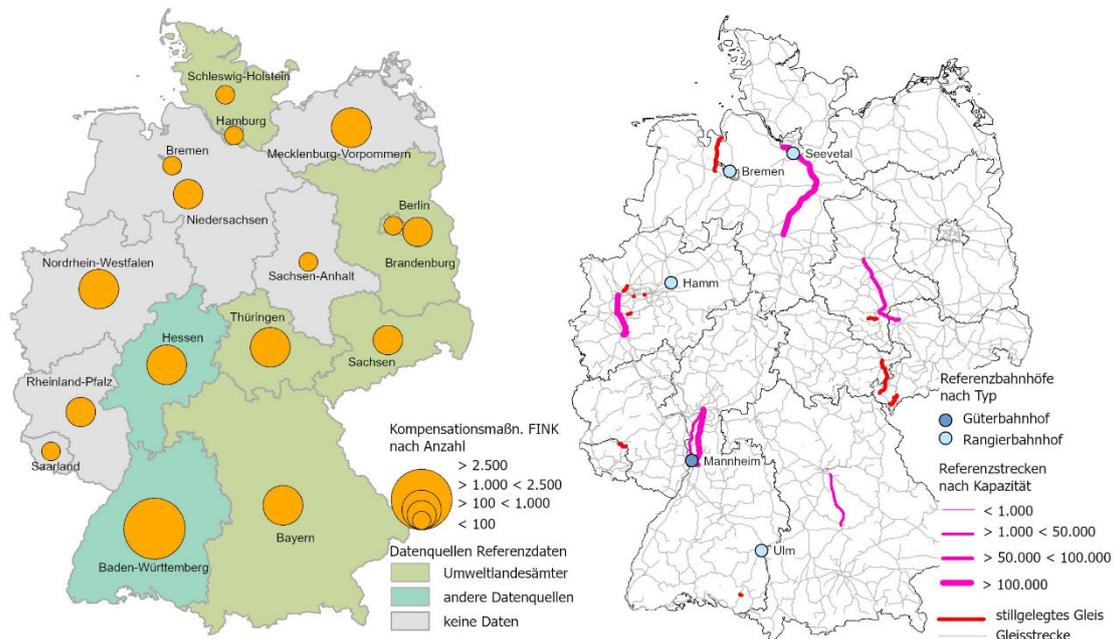


Abb. 1: Deutschlandkarte mit Darstellung der Datenquellen der terrestrischen Referenzdaten für den Anwendungsfall Kompensationsmaßnahmen (links) und für den Anwendungsfall Gleisstilllegungen (rechts)

Bei der Nutzungsdetektion auf Gleisen werden vor allem SAR-Daten des Copernicus-Programms verwendet (Sentinel-1A). Gleislagedaten des EBA dienen als Referenzdaten für die Nutzungsdetektion auf Gleisen. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden sowohl bereits stillgelegte Strecken berücksichtigt als auch Strecken verschiedener Auslastungen und verschiedener Typen (Rangiergleis, Normalgleis), die sich in Betrieb befinden. Ebenso dienen Gleislagepläne einzelner Beispielbahnhöfe, differenziert nach Auslastung, Typ sowie geografischem Standort im Naturraum, als Grundlage für die Algorithmusentwicklung.

4.2 Methodenentwicklung

Um die nötigen inhaltlichen und technischen Anforderungen vollständig zu erfassen, wurden im Rahmen einer Anforderungsanalyse Recherchen in Regelwerken und Fachliteratur, Umfragen und Experteninterviews mit den beteiligten EBA-Referaten als behördliche Endnutzer durchgeführt. Die aktuellen behördlichen Arbeitsprozesse wurden erfasst und dokumentiert, um mögliche Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Dabei sind auch erste Abfragen zur Integration des zu entwickelnden Demonstrators in die behördlichen Arbeitsabläufe erfolgt, z. B. Zeithorizont, Formen der Dateneingabe, Datenabruf etc. (Abb. 2). Aufgrund dieser Recherchen wurden Oberflächen- und Nutzungsklassen erfasst, welche die identifizierten Anwendungsfälle des EBA beschreiben. Abhängig vom Mehrwert, insbesondere der inhaltlichen Priorität, Häufigkeit und Umsetzbarkeit, wurden konkrete Bedarfe in den Arbeitsprozessen ausgewählt und als User-Stories formuliert. Gemeinsam mit den in einem Anforderungskatalog gesammelten behördenseitigen Nutzeranforderungen bilden die User-Stories die Basis für die Algorithmusentwicklung sowie die Entwicklung des webbasierten Demonstrators.

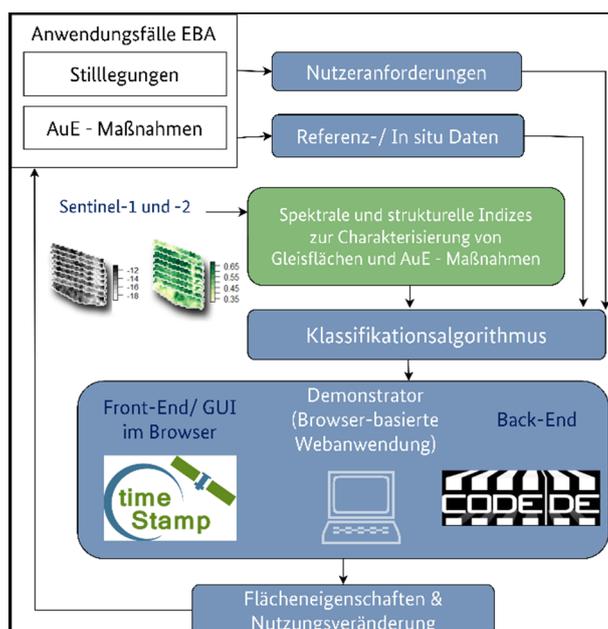


Abb. 2: Schematische Darstellung des Projektablaufes

Basierend auf den gesammelten Anforderungen und Anwendungsfällen wurde ein einheitlicher In-situ-Datensatz erstellt, der die für das Projekt relevanten Nutzungsklassen enthält. Die Datenpunkte wurden sowohl aus Dokumentationen zu Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen und Stilllegungen als auch aus existierenden Klassifikationen und Datensätzen abgeleitet. Die gesammelten Datenpunkte wurden in einen einheitlichen Datensatz überführt, der zum Training der Machine-Learning-Algorithmen und zur Validierung der entstehenden Dienste genutzt wird.

Zu Beginn der Algorithmusentwicklung wurden in der Prozessierungskette äquidistante Zeitreihen aus Sentinel-1 GRD und Sentinel-2 LSA für die Referenzdaten und die geplanten Prüfgeometrien generiert. Die Referenzdaten wurden vorprozessiert, aufbereitet und in Trainingsdaten für maschinelle Lernverfahren überführt. Basierend auf den multi-temporalen Datensätzen wurden die vordefinierten Nutzungsveränderungen (Stilllegungen) und Oberflächeneigenschaften (AuE-Maßnahmen) mit Hilfe von überwachten KI-Klassifikationsmodellen (Random Forest) detektiert und klassifiziert.

Die multispektralen Sensoren der Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2A und -2B geben in mehrtägigem Abstand Aufschluss über den Chlorophyllgehalt von Oberflächen, was bei dem Monitoring von Kompensationsflächen genutzt wurde. Verschiedene spektrale Indizes (z. B. NDVI) geben Aufschluss über den steigenden Chlorophyllgehalt, zunehmende Biomasse, Vernässung oder Versiegelung von Flächen im zeitlichen Verlauf und wurden bei der Algorithmusentwicklung berücksichtigt. Weitere Ansätze wurden für die Entwicklung des Algorithmus getestet: die Bruchpunkt- und Wendepunktdetektion (VERBESSELT et al. 2010), Ableitung von temporalen Trends, Summen, Minima und Maxima sowie die Ableitung von Korrelationswerten zu Phänoprofilen (SCHULZ et al. 2021; FÖRSTER et al. 2012; VERGER et al. 2016). Eine besondere Herausforderung bei der Algorithmusentwicklung liegt in der diversen Ausprägung der Kompensationsflächen hinsichtlich Flächengröße und Ausdehnung. Die Länge des Prüfzeitraumes ist uneinheitlich und wird durch den Nutzer bestimmt, was eine weitere Herausforderung an den Algorithmus darstellt.

Für die Nutzungsdetektion auf Gleisen wurden Sentinel-1-SAR-Daten (S1A und bis Ende 2021 S1B) getestet, insbesondere der Effekt des verstärkten Radar-Rückstreusignals bei Metallobjekten. Dabei wurde zwischen Zügen und Gleisbett unterschieden. Abgestellte Züge zeigten höhere Reflektanzwerte als das Gleisbett und sind daher eindeutig voneinander zu unterscheiden. Objekte wie Gebäude im Gleisumfeld oder großflächigere Parkplätze zeigen höhere Werte als abgestellte Züge. Somit konnten über Schwellenwertfilter und -analysen potenzielle Nutzungen eines Gleises detektiert und als potenzielle abgestellte Züge identifiziert werden. Dadurch wurde eine verbesserte Abschätzung zur mehrtägigen Nutzungsaktivität auf den Prüfflächen ermöglicht. Durch die vorliegenden Sentinel-1-Zeitreihen konnten ebenso Aussagen über den Tag der Schwellenwertüberschreitungen, den Tag bzw. Zeitraum der maximalen Rückstreuung oder die Standzeit von potenziellen Zügen im Prüfzeitraum getroffen werden, die im Web-Demonstrator ausgegeben und für die weitere Verwendung durch die behördlichen Nutzer dargestellt werden. Die Herausforderung bei der Algorithmusentwicklung liegt in der radiometrischen Korrektur der Einzelszenen, um konstante Schwellenwerte zu erhalten und Ungenauigkeiten oder Fehler in der Klassifikation zu reduzieren.

Die zu entwickelnden Machine-Learning-Modelle wurden in der Skriptsprache R geschrieben, auf CODE-DE implementiert und können dort von den Nutzenden ausgeführt werden.

Die Analyseergebnisse werden durch den Vergleich mit terrestrischen Referenzdaten bereits erfolgreich umgesetzter Kompensationsmaßnahmen sowie stillgelegten Strecken, Abschnitten oder Serviceeinrichtungen validiert. Die Detektion von möglichen Nutzungen auf dem Gleis wird mit bekannten Abstellungen auf sich in Betrieb befindlichen Strecken verglichen und validiert.

4.3 Webanwendung

Die aufbereiteten Datensätze und entwickelten Methoden werden auf der cloudbasierten Plattform CODE-DE implementiert und über eine Webanwendung nutzbar gemacht. Als Grundlage dient hierbei die bestehende modulare und skalierbare Webanwendung timeStamp, welche im Rahmen eines Projektes zur allgemeinen Bereitstellung fernerkundlicher Analyse-Algorithmen entwickelt und über die deutsche Copernicus-Plattform CODE-DE verfügbar gemacht wurde. Durch die Weiterentwicklung der bestehenden Anwendung können Synergien geschaffen und die bestehenden Schnittstellen wiedergenutzt werden. Mit dem niedrigschwelligen Zugang können die entwickelten Dienste in den behördlichen Prozessablauf eingebunden und über eine Weboberfläche abgerufen und verwaltet werden. Außerdem ermöglicht der modulare Aufbau von der Plattform auch, die Dienste perspektivisch anderen Behörden oder Nutzergruppen zur Verfügung zu stellen bzw. deren Funktionsumfang zu erweitern.

5 Vorläufige Ergebnisse

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurden zunächst die aktuellen behördlichen Prozesse abgebildet. Hier hat sich gezeigt, dass im Rahmen der Planfeststellung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen großes Einsatzpotential in der Vollzugskontrolle von bereits festgestellten Maßnahmen vorhanden ist. In unregelmäßigen Abständen werden die Maßnahmen auf ihre Herstellung und den aktuellen Zustand hin kontrolliert. Hierfür soll ein Dienst entwickelt werden, der die AuE-Maßnahmen automatisiert auf den aktuellen Status sowie die zeitlichen Veränderungen der Flächeneigenschaften der Maßnahmenfläche in einem vom Nutzer gewählten

Prüfungszeitraum kontrolliert. Außerdem soll ein Warnsystem erarbeitet werden, das Flächen angibt, bei denen eine persönliche Vor-Ort-Kontrolle notwendig wäre (Abb. 3). Das sind zum einen Flächen, die eine signifikante unerwünschte Änderung in ihren Oberflächeneigenschaften zeigen, und zum anderen Flächen, die in dem angegebenen Zeitraum kaum oder keine Veränderung aufweisen, obwohl sie es sollten. Letzteres weist auf eine mangelhafte Umsetzung der Maßnahme hin.

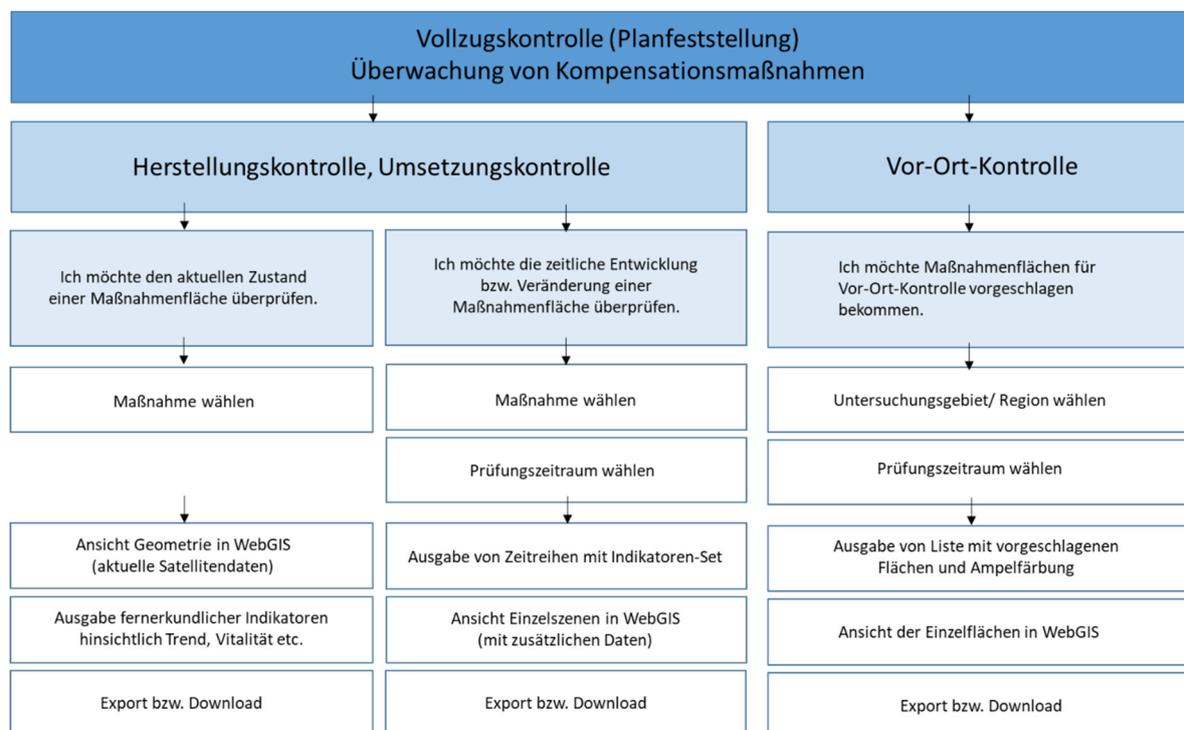


Abb. 3: Schematische Darstellung der User-Stories im Anwendungsfall der Vollzugskontrolle im Rahmen von Planfeststellungsverfahren

Initiale Untersuchungen zeigen, dass die Berechnungen von multispektralen Indizes, z. B. dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), es erlauben basierend auf jahresübergreifenden Vegetationstrends einen Großteil der festgesetzten Kompensationsmaßnahmenflächen hinsichtlich eindeutiger Merkmale zu kontrollieren. Zum einen sind das Maßnahmen mit ansteigendem Grünanteil (u. a. Bepflanzung, Begrünung, Anlage von Grünland, Umwandlung von Acker in Grünland, Grünlandextensivierung), wie in Abbildung 4 beispielhaft gezeigt ist. Zum anderen können Maßnahmen hinsichtlich zunehmender Biomasse (u. a. Pflanzung von Einzelbäumen, Anlage von Feldhecken, Anlage von Waldrand, Aufforstung) kontrolliert werden. Da es eine große Breite an unterschiedlich ausgestalteten naturschutzfachlichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen gibt und die genannten Maßnahmentypen bereits vielversprechende Ergebnisse geliefert haben, wird sich SENSchiene auf die genannten Merkmale: Maßnahmen mit ansteigendem Grünanteil und Maßnahmen mit Biomassezuwachs, fokussieren.

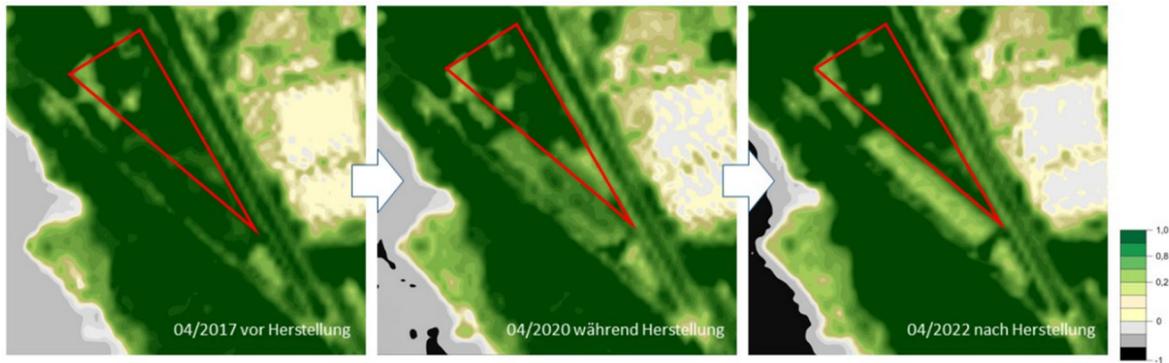


Abb. 4: Darstellung der Herstellung einer Kompensationsmaßnahme in Lindau am Bodensee (rot, Aufwertung von mäßig extensiv genutzten artenarmen Grünland zu artenreichem Extensivgrünland mit Streuobstbestand) von 2017 bis 2022. Dargestellt ist der NDVI, abgeleitet aus Sentinel-2-Daten. Die Veränderung des Oberbodens während der Umsetzung der Maßnahme ist deutlich am sinkenden NDVI-Wert zu erkennen. Nach Herstellung ist die Fläche deutlich von der nebenliegenden Mahdfläche abgegrenzt und zeigt einen hohen NDVI-Wert, was auf eine vitale Grünfläche schließen lässt

Bei der Prüfung von Anträgen zur Stilllegung soll ein Dienst entwickelt werden, mit dem ausgewählte Gleisgeometrien auf eine vorangegangene Nutzung kontrolliert werden können. Hinsichtlich der Nutzung sind zwei Indizien relevant: einerseits kann die Anwesenheit bzw. Abwesenheit von Fahrzeugen auf dem Gleis detektiert werden, andererseits indizieren Unterhaltungs- und Pflegezustand eine Nutzung bzw. eine längerfristige unterbliebene Nutzung. Es sollen Indikatoren zu den detektierten wahrscheinlichen Nutzungen der Eisenbahninfrastruktur mit Datums- und Ortsangabe ausgegeben werden, wie in der nachfolgenden Abbildung 5 schematisch dargestellt ist.

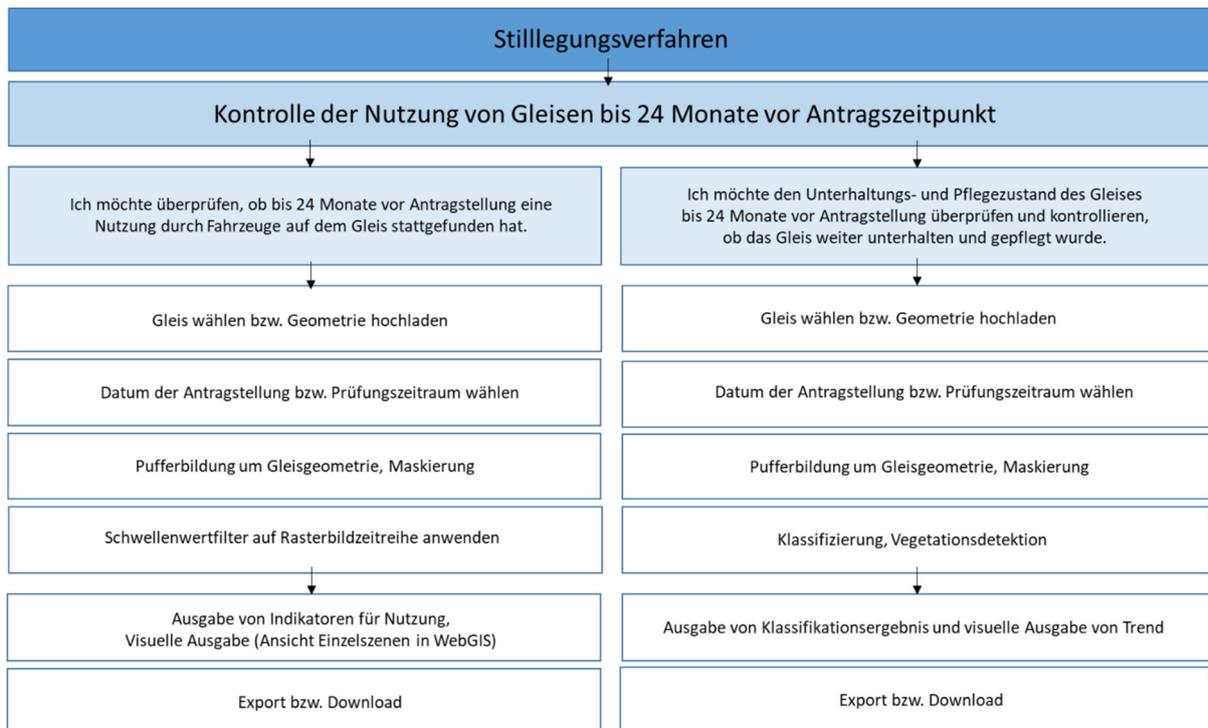


Abb. 5: Schematische Darstellung der User-Stories im Anwendungsfall der Stilllegungsverfahren

Bei ersten Auswertungen wies die An- oder Abwesenheit von Schienenfahrzeugen die größte Auswirkung auf das erfasste Signal in den Radar-Satellitenbildszenen auf, da diese in der Regel

aus Metall bestehen. Hierbei zeigt sich, dass Gleise mit sich darauf befindlichen Zügen anhand ihrer Rückstreuungsmuster eindeutig von anderen Objektklassen im Gleisumfeld (z. B. Gebäude, Gleisbett) zu erkennen sind. Wie in Abb. 6 zu sehen ist, zeigt das Gleisbett auf einer normierten Skala aufgrund des vorhandenen Schotters keine Rückstreuungswerte über 300. Gebäude oder andere großflächige Versiegelungen im Gleisumfeld, wie z. B. Parkplätze oder Fuhrparke, zeigen hingegen deutlich höhere Rückstreuungswerte von bis zu 1000. Züge auf Gleisen sind als Ausschläge von der Baseline durch das Schotterbett bis zu 600 zu identifizieren.

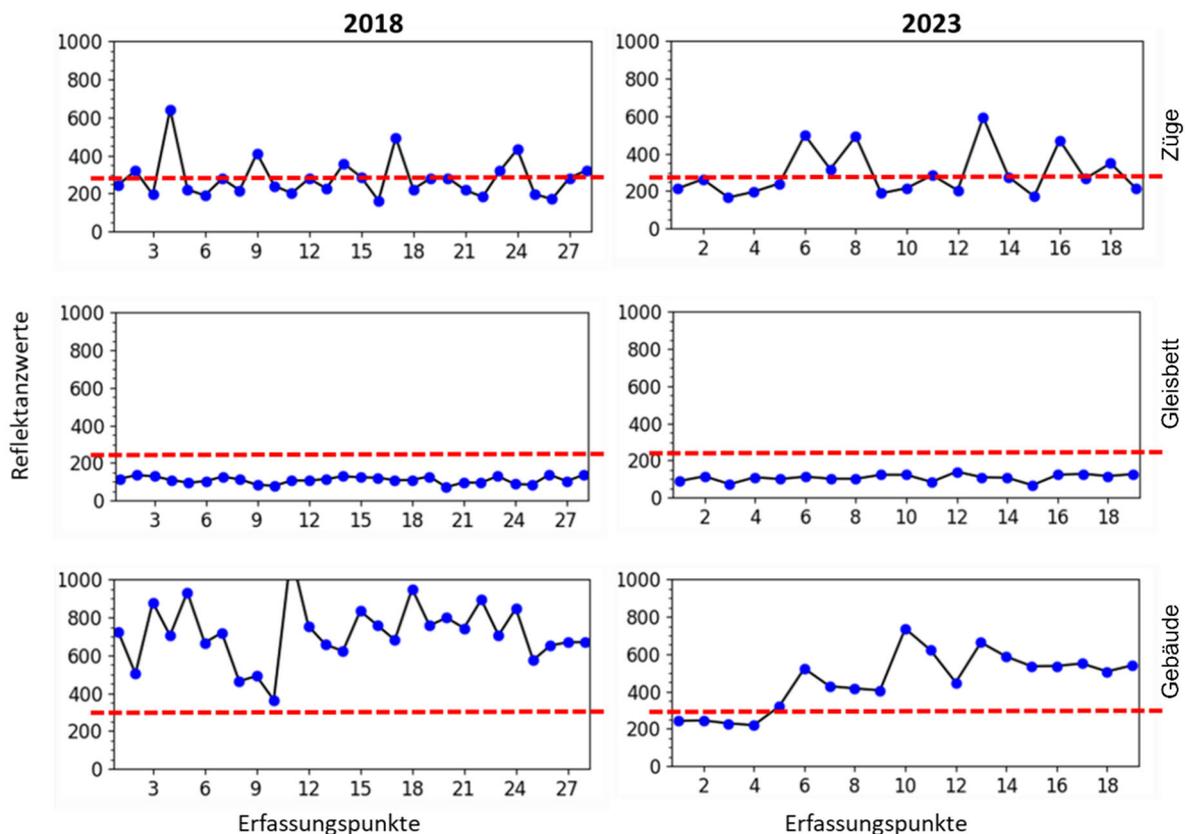


Abb. 6: Vergleich von Sentinel-1-Zeitreihen dreier Objektklassen (Züge, Gleisbett, Gebäude) zweier Jahre 2018 und 2023 am Beispiel des Güterbahnhofes Mannheim anhand normierter Reflektanzwerte und Erfassungspunkte. Die charakteristischen Reflektanzmerkmale der einzelnen Klassen sind auch über mehrere Jahre ersichtlic. (Quelle: Sentinel-1 GRD L1 IW Produkte/CODE-DE)

In Abbildung 6 ist zu sehen, dass die charakteristischen Rückstreuungswertverläufe der einzelnen Objektklassen auch zeitlich übertragbar sind, da die drei dargestellten Objektklassen sowohl in 2018 als auch in 2023 ähnliche Verläufe der Rückstreuungswerte zeigen. Diese initialen Analyseergebnisse sind bereits vielversprechend. Daher soll des Weiteren getestet werden, inwieweit terrestrische Referenzdaten und aus Sentinel-1 SAR-Daten abgeleitete Texturmatrizen die Genauigkeit der Anomaliedetektion verbessern können.

Zur Entwicklung der automatisierten Dienste wurden die gesammelten behördenseitigen Nutzeranforderungen in a) inhaltliche Anforderungen und b) technische Anforderungen eingeteilt. Die inhaltlichen Anforderungen umfassen fachliche Anforderungen an eine mögliche Plattform zur Analyse und Nutzung von Fernerkundungsdaten. Besonders hervorzuheben ist hier der niedrighschwellige Zugang zu den Informationen. Die Anwendungsfälle müssen einfach

und ohne tiefergehende GIS- oder Fernerkundungskennnisse zu bearbeiten sein. Darüber hinaus müssen kurzfristig neue Flächen prozessiert und kontrolliert werden können. Zudem sind auch Datenschutz und -sicherheit als wichtige Anforderungen zu adressieren. Bei den technischen Anforderungen ist ebenfalls die einfache und intuitive Bedienbarkeit der Plattform ein wichtiges Kriterium für die behördlichen Nutzer. Die Bearbeitung der Anwendungsfälle soll sich in den bestehenden Prozess eingliedern, ohne Mehraufwand zu generieren oder hohen Interpretationsspielraum zu zulassen. Bei beiden Anwendungsfällen sind die Aktualität und die räumliche sowie zeitliche Auflösung der Satellitendaten relevant.

Die bereits vorliegenden Daten zu Kompensationsmaßnahmen und Gleislage werden derzeit aufgearbeitet, um sie in Referenzdaten zu überführen. Sie werden dafür genutzt, erste methodische Ansätze bei der Algorithmusentwicklung zu testen und zu validieren. Die terrestrischen Referenzdaten sowie die anderen ergänzenden Daten des In-situ-Referenzdatensatzes werden zukünftig zur einfachen Weiterverwertung der Ergebnisse sowie der Ergebnissicherung in einer Datenbank gespeichert und bereitgehalten.

6 Fazit & Ausblick

Mit dem Erreichen der angestrebten Projektziele kann die automatisierte satellitengestützte Überwachung von Flächeneigenschaften und Nutzungsveränderungen im Schienenbereich die Effizienz der behördlichen Vor-Ort-Begehungen steigern. Durch eine erweiterte Informations- und Entscheidungsgrundlage werden die Möglichkeiten und Genauigkeiten der behördlichen Kontrollen in Bezug auf Qualität und Quantität verbessert. Die Implementation eines auf der bestehenden *timeStamp*-Web-Anwendung basierenden Demonstrators ermöglicht es den behördenseitigen Nutzern, automatisiert satellitengestützte Informationen und Klassifikationsergebnisse abzufragen. Die Ergebnisse werden bundeslandübergreifend, kostenlos und einheitlich zur Verfügung stehen. Die Dienste können intuitiv ohne detaillierte Kenntnisse in der Geoinformation oder Fernerkundung genutzt werden. SENSchiene wird den bestehenden Dienst *timeStamp* funktionell erweitern und einer neuen behördlichen Zielgruppe den Zugang zu Fernerkundungsdaten und deren Analyseergebnissen ermöglichen.

Vorläufige Auswertungen zeigen, dass ausgewählte, für die Kontrollen in den Anwendungsfällen benötigte Informationen aus Satellitendaten abgeleitet werden können. Im Falle der Stilllegungen sind dies die Identifikation von ungenutzten Gleisen und das Vorhandensein von Schienenfahrzeugen. Im Falle der Kompensationsmaßnahmen konnten u. a. aus den Satellitendaten abgeleitete Vegetationsindizes und der Anteil an Grünland und Biomasse Rückschlüsse auf den Zustand der überwachten Maßnahmen geben.

So kann mit Hilfe von SENSchiene eine innovative Dienstleistung zur Unterstützung öffentlicher Aufgaben im Bereich des Umwelt- und Naturschutzes und der Bereitstellung von Geoinformationen geschaffen, nachhaltig verwendet und weiterentwickelt werden. Im Bereich der Eisenbahn wird hiermit ein wichtiger Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung von anspruchsvollen und umfangreichen behördlichen Prozessen geleistet.

7 Literaturverzeichnis

- AHLWEDE, S., SCHULZ, C., GAVA, C., HELBER, P., BISCHKE, B., FÖRSTER, M., ARIAS, F., HEES, J., DEMIR, B. & KLEINSCHMIT, B., 2023: TreeSatAI Benchmark Archive: A multi-sensor, multi-label dataset for tree species classification in remote sensing. *Earth System Science Data*. <https://doi.org/10.5194/essd-15-681-2023>.
- BLICKENS DÖRFER, L., OEHMICHEN, K., PFLUGMACHER, D., KLEINSCHMIT, B. & HOSTERT, P., 2022: Dominant Tree Species for Germany (2017/2018). *Datensatz*. <https://doi.org/10.3220/DATA20221214084846>.
- BÜTTNER, G., FERANEC, J., JAFFRAIN, G., MARI, L., MAUCHA, G. & SOUKUP, T., 2004: The CORINE land cover 2000 project. *Environmental Entomology*, **3**, 331-346.
- ECKER, S. & PRÖBSTL-HAIDER, U. 2016: Erfolgskontrolle von Ausgleichsflächen im Rahmen der Bauleitplanung in Bayern. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, **48**(5), 161-167.
- EGNER, M., 1999: Rechtliche Aspekte bei der Umsetzung, Sicherung und Kontrolle von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen. *Laufener Seminarbeiträge der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege* (Hrsg.), **1**(99), 10-17.
- EU GRASSLAND WATCH, 2021: Copernicus for Natura 2000 EU Grassland Watch Project Page, <http://www.cop4n2k.eu/>, letzter Zugriff 25.01.2024
- FISSER, H., KHORSANDI, E., WEGMANN, M. & BAIER, F., 2022: Detecting Moving Trucks on Roads Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, **14**(7), 1595, <https://doi.org/10.3390/rs14071595>.
- FÖRSTER, S., KADEN, K., FÖRSTER, M. & ITZEROTT, S., 2012: Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. *Computers and Electronics in Agriculture*, **89**, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.07.015>.
- GROVER, A., KUMAR, S. & KUMAR, A., 2018: Ship detection using Sentinel-2 data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **IV**(5), 317-324. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-317-2018>.
- KNÖFEL, P., HERRMANN, D., SINDRAM, M. & HOVENBITZER, M., 2021: LaVerDi – Webanwendung zur automatischen Ableitung von Landschaftsveränderungen. *Flächennutzungsmonitoring XIII: Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools*, IÖR Schriften, Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung e.V. (Hrsg.), **79**, 275-286. <https://doi.org/10.26084/13dfns-p025>.
- KÖNIG S., THONFELD, F., FÖRSTER, M., DUBOVYK, O. & HEURICH, M., 2023: Assessing Combinations of Landsat, Sentinel-2 and Sentinel-1 Time series for Detecting Bark Beetle Infestations. *GIScience & Remote Sensing*, **60**(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2226515>.
- JESSEL, B., RUDOLF, R., FEICKERT, U. & WELHÖFER, U., 2003: Nachkontrollen in der Eingriffsregelung – Erfahrungen aus 4 Jahren Kontrollpraxis in Brandenburg. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg*, **12**(4), 144-149.
- PLÜCKERS, C., ERASMI, S., FÖRSTER, M., GUERNICHE, D., HERKT, M., HINTERLANG, D., HOLTGRAVE, A., KLEINSCHMIT, B., KOLLER, C., KÜNZEL, A., LANGNER, K., LINS, M., RATTAY, M., SCHROIFF, A. & TINTRUP, G., 2022: Copernicus leuchtet Grün – Integration und Praxistransfer von Copernicus-Aktivitäten für ein umfassendes behördliches Monitoring von Grünland. *Fernerkundung und Drohneneinsatz in Naturschutz und Grünlandmanagement – Berichte aus der Landschafts- und Umweltplanung, Tagungsdokumentation zur Fachtagung am 07.09.2022*, Pietsch, M., Schlaugat, J., Huth, L., Yong Kim, D. & Wulf, T. (Hrsg.), Hochschule Anhalt, Bernburg, 27-35.

- RABENSCHLAG, J., SCHOOF, N., SCHUMACHER, J. & REIF, A., 2019: Evaluation der Umsetzung baurechtlicher Ausgleichsmaßnahmen – Fallbeispiel Schönberg bei Freiburg. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, **51**(9), 434-442.
- REINERMANN, S., ASAM, S. & KUENZER, C., 2020: Remote Sensing of Grassland Production and Management – A Review. *Remote Sens.*, **12**(12), 1949. <https://doi.org/10.3390/rs12121949>.
- SCHULZ, C., HOLTGRAVE, A.-K. & KLEINSCHMIT, B., 2021: Large-scale winter catch crop monitoring with Sentinel-2 time series and machine learning—An alternative to on-site controls? *Computers and Electronics in Agriculture*, **186**, 106173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106173>.
- SCHWIEDER, M., WESEMAYER, M., FRANTZ, D., PFACH, K., ERASMI, S., PICKERT, J., NENDEL, C. & HOSTERT, P., 2022: Mapping grassland mowing events across Germany based on combined Sentinel-2 and Landsat 8 time series. *Remote Sensing of Environment*, **269**, 112795. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112795>.
- SCHWOON, G., 1999: Ausgleich und Ersatz: Planung Ja, Ausführung vielleicht? Pflege und Kontrolle nein?! Ein Situationsbericht am Beispiel Straßenbau. Laufener Seminarbeiträge der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (Hrsg.), **1**(99), 18-26.
- SEDLMEIER, H. 2003: Ausgleich oder grünes Mäntelchen? Ausgleichsmaßnahmen für die Eingriffe in Natur und Landschaft beim Bau der A99 – Studie zur Umsetzungspraxis und zum Erfolg der planfestgestellten Massnahmen. Publikation der Gregor Louisoder Umweltstiftung (Hrsg.), **1**, 148.
- VERBESSELT, J., HYNDMAN, R., NEWNHAM, G. & CULVENOR, D., 2010: Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, **114**(1), 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>.
- VERGER, A., KANDASAMY, S. & BARET, F., 2016: Temporal Techniques in Remote Sensing of Global Vegetation. *Multitemporal Remote Sensing, Remote Sensing and Digital Image Processing*, **20**, 217-232. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_11.
- WANG, Z., MA, Y., ZHANG, Y. & SHANG, J. 2022: Review of Remote Sensing Applications in Grassland-Monitoring. *Remote Sens.*, **14**(12), 2903. <https://doi.org/10.3390/rs14122903>.
- ZIEMER, J., JÄNICHEN, J., STUMPF, N., WICKER, C., KLÖPPER, D., LAST, K., DEMISCH, G., SCHMULLIUS, C. & DUBOIS, C., 2023: Sensor Fusion for Detecting Deformation Patterns of Gravity Dams in Germany Using Sar Interferometry. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4664696>, https://tandemx-science.dlr.de/Terra-SAR-X_TanDEM_X_Science_Team_Meeting_2023/PDF-Documents/Oral/Session_6-1-1_Ziemer.pdf, letzter Zugriff 02.02.24.