

CopGruen Überstudienst – technische Dokumentation

21. Oktober 2024

Ariane Tapaß

Dr. Stefan Erasmi (stefan.erasmi@thuenen.de)

Inhalt

1. Konzeptionierung des Dienstes	2
2. Input Daten.....	3
2.1. Satellitendaten	3
2.2. Kulisse der organischen Böden.....	4
3. Methodik	5
3.1. Prozessierung der Satellitendaten	5
3.2. Referenzdaten	6
3.3. Erstellung monatlicher Überstaulayer	7
4. Technische Umsetzung des Dienstes	8
4.1. Wahl der Eingabeparameter	10
4.2. Überstudienst	10
4.2.1. Aufbereitung Inputpolygone und Verschneidung mit der Karte der organischen Böden ..	10
4.2.2. Analyse des Überstaus innerhalb der Flächen	10
6. Genauigkeit, Fehlerquellen und Einschränkungen des Dienstes	12
Zitierhinweis	16
Literatur	16

1. Konzeptionierung des Dienstes

Naturnahe Moorlandschaften sind ökologisch äußerst wertvoll und im ungestörten Zustand weitgehend klimaneutral. Entwässerte Moor- bzw. organische Böden stellen jedoch eine erhebliche Quelle von Treibhausgasemissionen dar, insbesondere wenn sie landwirtschaftlich genutzt werden. Daher stehen sie im Fokus von Klimaschutzmaßnahmen. Diese Maßnahmen können starke Synergien mit der Förderung oder Wiederherstellung standorttypischer Biodiversität erzeugen. Allerdings können auch Zielkonflikte auftreten, wenn geschützte Biotop auf entwässerten organischen Böden liegen.

Die Klimawirksamkeit von Mooren hängt im Wesentlichen vom hydrologischen Zustand (d.h. vom Moorwasserstand und dessen Veränderung), sowie von den Bodeneigenschaften und von der Nutzungsintensität ab. Da der Wasserstand von Mooren nicht direkt durch satellitenbasierte Erdbeobachtungsverfahren messbar ist, wurden im Rahmen des Projekts CopGruen verschiedene Indikatoren getestet, die eine indirekte Aussage zum Moorwasserstand bzw. dessen Dynamik erlauben (siehe hierzu auch die [CopGruen-Webseite am Thünen-Institut](#)). Der Fokus lag hierbei auf der Evaluierung und Weiterentwicklung von robusten (indirekten) Methoden und Indikatoren, die als Proxy für den Moorwasserstand herangezogen werden können. Die Nutzung von Verfahren mit denen direkt ein Rückschluss auf Änderungen von Moorwasserständen möglich wäre (z. B. Detektion von Geländehöhenveränderungen / Absackung als Folge von Wasserstandsänderungen über InSAR-Methoden) war aufgrund der Komplexität der Datengrundlage und Methodik nicht anvisiert.

Für die Dienste-Implementierung auf der Plattform des Offenlandmonitors wurde der Indikator „Überstau“ ausgewählt. Der Dienst „Überstau“ zielt auf die Erfassung der räumlichen und zeitlichen Dynamik von oberflächlich anstehendem Wasser auf organischen Böden in Folge einer Sättigung der Bodenschichten oder Überflutung von aktuell oder ehemals landwirtschaftlich oder industriell genutzten Flächen ab. Diese Information wird für benutzerdefinierte Gebiete (Schläge, Felder, Regionen), zeitlich (wie oft) und räumlich (welcher Anteil) ausgegeben und kann als indirekter Hinweis auf den Moorwasserstand und somit hydrologischen Zustand dienen.

Die zentrale Frage, die dieser Dienst beantwortet, lautet:

Wie kann der zeitliche und räumliche Verlauf von Überstau auf landwirtschaftlich genutzten organischen Böden flächendeckend über große Gebiete erfasst werden?

Zur Beantwortung dieser Frage wird auf bereits bestehendes Wissen, Datenprodukte, Satellitendaten des Copernicus-Programms und etablierte Algorithmen zurückgegriffen, um einen robusten Indikator zu generieren. Die anvisierten Hauptnutzenden dieses Dienstes sind Umweltbehörden und Forschende, die im Bereich des Umwelt- und Klimaschutzes tätig sind. Durch die Bereitstellung von regelmäßigen und flächendeckenden Informationen über das Vorhandensein von Überstau legt der Dienst eine Grundlage für die Evaluierung von Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung organischer Böden, die vermutlich insbesondere in moorreichen Bundesländern wie Schleswig-Holstein und Niedersachsen an Bedeutung gewinnen werden.

2. Input Daten

2.1. Satellitendaten

2.1.1. Sentinel-1

Der Überstaudienst nutzt als Basisdaten hochauflösende Satellitendaten von den Missionen Sentinel-1 und Sentinel-2. Die Sentinel-1- Mission war als Konstellation aus zwei Satelliten konzipiert und ist mit einem aktiven Sensor im Mikrowellenbereich (Radar) ausgestattet. Ein aktiver Sensor emittiert im Gegensatz zu einem passiven (wie Sentinel-2) Energie und misst die Intensität der Rückstreuung (backscatter) dieser Energie. Im Falle von Sentinel-1 wird die Erdoberfläche mit einem Radar-Sensor im C-Band (~6cm Wellenlänge) abgetastet. Die Aufnahme von Radardaten ist unabhängig vom Sonnenlicht und der jeweiligen Wetterlage, da die Strahlung auch Wolken durchdringt. Das Radarsignal wird selektiv in zwei Richtungen (Polarisierungen) sowohl ausgesendet als auch empfangen. Die zwei Richtungen sind horizontal (H) und vertikal (V). Die Rückstreuung, die wieder am Sensor ankommt, enthält zwei Informationen: die relative Phasenverschiebung und die Intensität des zurückgestrahlten Signals. Für den Überstau-Dienst wurde die Intensität der Rückstreuung verwendet. Diese wird von Sentinel-1 in zwei Polarisierungs-Kombinationen bezogen auf die ausgesendete und zurück am Sensor registrierte Strahlung gemessen (VV: vertikal-vertikal; VH: vertikal-horizontal). Die Radarrückstreuintensität wird von der Geländestruktur und der Oberflächenrauheit beeinflusst. Typischerweise führen größere Unebenheiten oder komplexes Gelände zu einer stärkeren Rückstreuung. Raue Oberflächen streuen die Radarenergie und senden einen erheblichen Teil zurück zur Antenne, so erscheinen diese als „helles“ Merkmal. Im Gegensatz dazu reflektieren flache Oberflächen, wie z.B. Wasseroberflächen, das Signal weg, was zu einem dunkleren Bild führt. Ebenso erscheinen strukturell komplexe Ziele wie Wälder heller, da durch die Wechselwirkung des Signals mit Blättern, Ästen und Stämmen ein größerer Teil des Signals zum Sensor zurückreflektiert wird.

Sentinel-1 erreichte mit zwei Satelliten eine Wiederholrate von sechs Tagen, d.h. in dieser Zeit konnten die Satelliten die gesamte Erde abbilden. Durch den Ausfall des Satelliten Sentinel-1B am 23.12.2021 verringerte sich diese auf derzeit 12 Tage. Sentinel-1B soll durch Sentinel-1C ersetzt werden, der Start dieses Satelliten soll im letzten Quartal 2024 stattfinden (Stand: 23.09.2024; European Space Agency, 2024). Die Sentinel-1 Bilddatensätze werden im Prozessierungslevel 1 Ground Range Detected (GRD) verwendet. GRD-Produkte sind verarbeitete Radarbilder in einer Auflösung von 10 Metern Pixelkantenlänge, bei denen die Daten auf ein flaches, erdbezogenes Gitter, bekannt als Ground Range, projiziert wurden, um die Interpretation zu erleichtern. Diese Bilder sind außerdem „multi-looked“, d. h. sie wurden verarbeitet, um Rauschen und Flecken durch Mittelung mehrerer Beobachtungen zu reduzieren. Die Pixelwerte repräsentieren dabei nur noch die detektierte Intensität der Rückstreuung. (Siehe auch <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentiwiki>, European Space Agency, 2024.)

2.1.2. Sentinel-2

Sentinel-2 liefert optische Bilder aus einem passiven Satellitensystem. Passive Fernerkundungssysteme basieren auf natürlicher Strahlung (wie Sonnenstrahlung) die vom zu detektierenden Ziel (die Erdoberfläche und Objekte darauf) an den Sensor reflektiert oder gestreut wird. Aus diesem Grund kann Sentinel-2 z.B. keine Nachtaufnahmen liefern. Die am Satelliten empfangene Strahlung wird von dort montierten multispektralen Sensoren in verschiedene Wellenlängenabschnitte aufgeteilt. Sentinel-2 detektiert 13 Wellenlängenabschnitte (Spektralkanäle) und es wird Strahlung von 443 bis 2190 Nanometer detektiert, d.h. vom menschlich sichtbaren Licht bis zum Infrarot-Bereich (Nahes und Kurzwellen-Infrarot). In Abbildung 1 sind die unterschiedlichen Spektralkanäle von Sentinel-2 und ihre korrespondierenden Wellenlängen abgebildet.

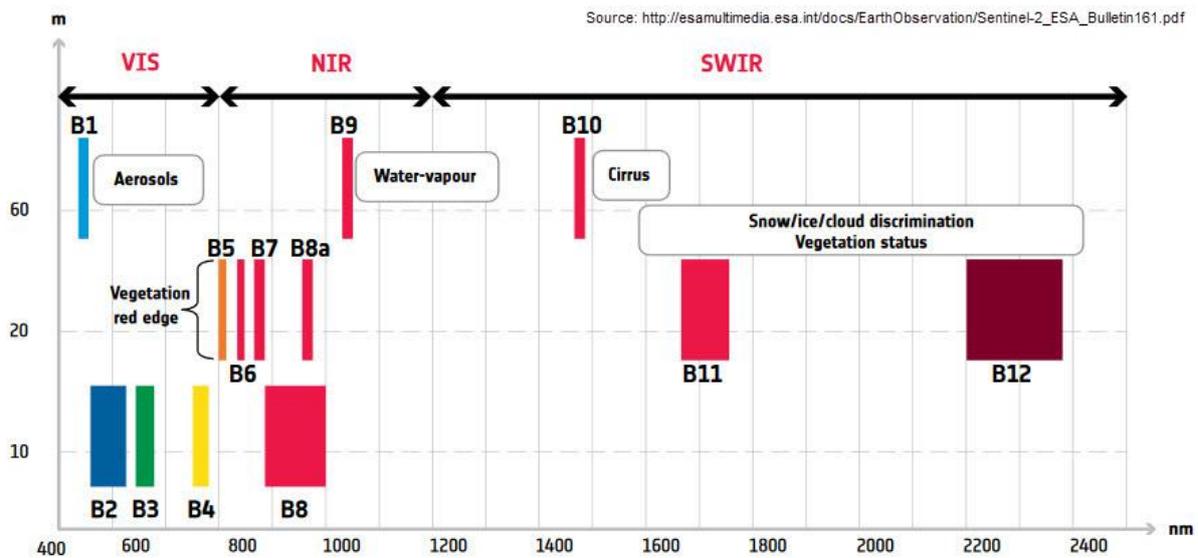


Abbildung 1: Die 13 Spektralkanäle von Sentinel-2, nummeriert. Die x-Achse bildet die Wellenlänge und die y-Achse die räumliche Auflösung ab. VIS = Sichtbares Spektrum, NIR = Nahes Infrarot, SWIR = Kurzwelliges Infrarot.

Die Spektralkanäle stehen in unterschiedlichen Prozessierungsleveln als Bilddatensätze mit einer Pixelauflösung von 10-60 Metern zur Verfügung. Für den Überstudienst werden die Sentinel-2 Datensätze mit einer Auflösung von 10 Metern und das Prozessierungslevel 2C verwendet. In diesem Prozessierungslevel wurden die Datensätze atmosphärisch korrigiert, um Erdoberflächenreflexionen in kartografischer Geometrie zu erhalten. Bei der Atmosphärenkorrektur werden die Auswirkungen der Atmosphäre auf die von Sensoren erfassten Reflexionswerte entfernt, um eine genaue Darstellung der Erdoberfläche sicherzustellen. Die Wiederholrate der Aufnahmen des Sentinel-2-Satellitenpaares beträgt 5 Tage (Siehe auch <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentiwiki>, European Space Agency, 2024).

Im Gegensatz zu Sentinel-1 besitzt Sentinel-2 die Einschränkung, dass die Detektion der Strahlung durch die Anwesenheit von Wolken behindert wird, sodass die Sensoren bei Bewölkung keine genauen Daten erfassen können. Diese Abhängigkeit von einem klaren Himmel ist auf die begrenzte Durchdringung der kurzwelligen Sonnenstrahlung zurückzuführen, die von Wolken entweder absorbiert oder gestreut wird. Die optischen Bilder von Sentinel-2 werden wolkenmaskiert, um sicherzustellen, dass nur Beobachtungen bei klarem Himmel in die Analysen einfließen und der Einfluss von Wolken und dadurch u.U. veränderte Pixelwerte auf weitere Berechnungen minimiert wird.

2.2. Kulisse der organischen Böden

Die Datengrundlage für die Verbreitung von Moorböden in Deutschland, auf der der Überstau-Dienst arbeitet, bietet die Kulisse der organischen Böden des Thünen-Instituts (Wittnebel et al., 2023). Diese enthält Informationen zum Vorkommen organischer Böden (Moorböden) unterschiedlich definierter Kategorien (Abbildung 2). Der Begriff „Organische Böden“ bezieht sich auf Bodengebiete, die reich an organischem Kohlenstoff sind; hierbei sind auch Flächen mit überdeckten und umgebrochenen organischen Böden einbezogen. Die Moorböden werden in sechs Kategorien eingeteilt, in Niedermoorboden, Hochmoorboden, Moorfolgeboden, flach und mächtig überdeckter Moorboden sowie Tiefumbruchboden aus Moor. In den letzten drei genannten Kategorien wurden zur Übersicht Niedermoor- und Hochmoorboden zusammengefasst. Die Kulisse entstand durch die Harmonisierung aktualisierter Boden- und Moordaten aller Bundesländer unter Berücksichtigung von Faktoren wie Bodengeneese, Torfdicke und hydrologischen Auswirkungen.

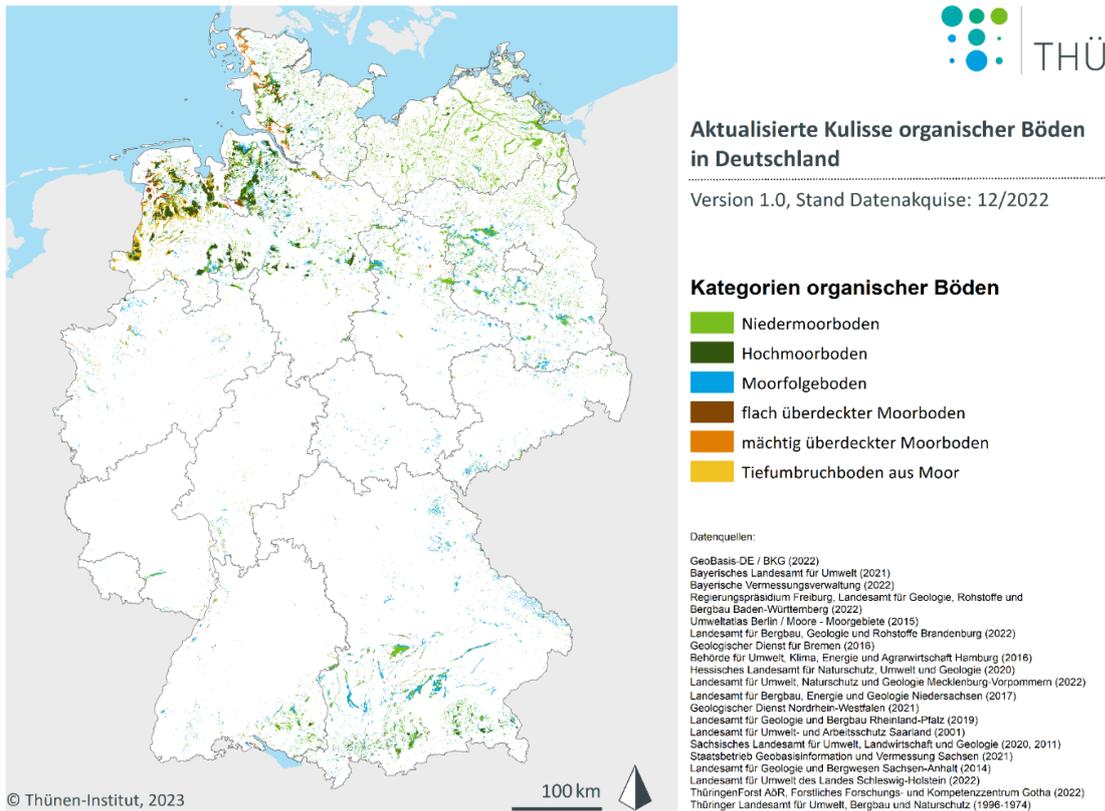


Abbildung 2: Aktualisierte Kulisse der organischen Böden des Thünen-Instituts.

3. Methodik

3.1. Prozessierung der Satellitendaten

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Datendichte und zur Verbesserung der Analysequalität wurden monatliche Komposite aus allen verfügbaren Satellitenbildern eines jeden Monats verwendet. Auf Basis dieser Monatskomposite wurden dann monatliche Referenzdaten sowie Klassifikationsraster generiert. Die Komposite wurden durch Mittelung der Pixelwerte aller Bilder innerhalb des Monats berechnet, was eine brauchbare Datendichte gewährleistet und dazu beiträgt, Rauschen und Flecken in den Radarbildern zu reduzieren sowie das Auftreten von Bewölkung in den Aufnahmen von Sentinel-2 zu kompensieren, wodurch die Zuverlässigkeit der abgeleiteten Informationen erhöht wird. Die Sentinel-1-Monatskomposite wurden von CODE-DE (Copernicus Data and Exploitation Platform – Deutschland) bereitgestellt, einer cloudbasierten Plattform, die für die Verarbeitung und Nutzung von Copernicus-Satellitendaten an deutschen Behörden entwickelt wurde (siehe auch: <https://code-de.org/de/>). Die Sentinel-1-Monatskomposite wurden in den VV- und VH-Polarisationen als Inputdaten für den Überstudienst verwendet. Aus den Sentinel-2-Daten wurden spektrale Indices als Inputdaten generiert. Die Monatskomposite der spektralen Indices wurden vom Thünen-Institut unter Verwendung von FORCE (Framework for Operational Radiometric Correction for Environmental Monitoring; Frantz, 2019) berechnet. FORCE ist ein umfassendes Open-Source-Toolset zur Verarbeitung von Satellitenbildern (siehe auch: <https://force-eo.readthedocs.io/en/latest/about.html>). Es bietet erweiterte Funktionen für die radiometrische Korrektur, Wolkenmaskierung und die Erstellung hochwertiger Zeitreihen und zusammengesetzter Datensätze, die für eine konsistente Umweltüberwachung unerlässlich sind.

Aus den Sentinel-2 Spektralkanälen wurden die in Tabelle 1 beschriebenen spektralen Indices berechnet. Die Formeln der jeweiligen Indices beziehen sich auf die Bandbenennungen von Sentinel-2, aufgezeigt in Abbildung 1.

Tabelle 1: Übersicht der im Überstudienst verwendeten spektralen Indices, basierend auf den Bändern von Sentinel-2.

Name	Formel	Beschreibung	Quelle
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	Der NDVI misst die Vegetationsgesundheit.	Rouse et al., 1974
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$	Der NDMI gibt den Feuchtigkeitsgehalt der Vegetation an.	Gao, 1996
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = 2,5 * \frac{B8 - B4}{B8 + 6 * B4 - 7,5 * B2 + 1}$	Der EVI liefert ebenfalls Aussagen über die Vegetationsgesundheit wie der NDVI, berücksichtigt aber atmosphärische Effekte.	Huete et al., 1997
NBR (Normalized Burn Ratio)	$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12}$	Der NBR wurde entwickelt, um von Bränden betroffene Bereiche zu monitoren. Im Überstudienst dient er zur Abgrenzung von offenem Boden zu anderen Oberflächenmerkmalen.	Key & Benson, 2006
TC-Wet (Tasseled Cap Wetness)	$TC-Wet = 0,15 * B1 + 0,197 * B3 + 0,33 * B4 + 0,71 * B11 + 0,46 * B12$	Der TC-Wet liefert Hinweise auf den Feuchtigkeitsgehalt von Boden und Vegetation, abgeleitet aus einer gewichteten Summe der Spektralbänder.	Crist & Cicone, 1984
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = \frac{B3 - B8A}{B3 + B8A}$	Der NDWI dient dazu, Gewässervorkommen und -ausdehnung in Satellitenbildern zu verdeutlichen und hilft bei der Unterscheidung von Wasserkörpern von anderen Landmerkmalen.	Gao et al., 1996

3.2. Referenzdaten

Die Referenzdaten für das Training und die Validierung des Klassifikationsalgorithmus wurden manuell auf Basis der in 3.1 beschriebenen Monatskomposite durch visuelle Interpretation erhoben. Für die Klasse „Überstau“ wurden permanente Wasserflächen, die sich in der Kulisse der organischen Böden befinden, sowie periodisch auftretende Überstauplächen einbezogen. In die Klasse „Kein Überstau“ fließen Flächen ein wie Landwirtschaft, Grünland, offener Boden. Die Referenzdaten wurden als monatliche Punktdaten für die Jahre 2018-2020 erzeugt und decken ausgewählte Moorgebiete in den moorreichen Regionen Deutschlands ab. Hierbei wurden Polygone des Thünen-Instituts mit kartierten Informationen über den hydrologischen Zustand von Flächen unter Wiedervernässungsmaßnahmen als zusätzliche Referenz verwendet. Die Werte für die erhobenen Punktdaten wurden systematisch aus

den korrespondierenden monatlichen Satellitenkompositen extrahiert, um repräsentative Daten für das Modelltraining zu erhalten. Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse des Dienstes wurde eine Validierung anhand von unabhängigen Referenzdaten durchgeführt (siehe Kapitel 6). Diese wurden beim Training der machine learning Modelle zurückgehalten, um räumliche Autokorrelation zu vermeiden. Die Validierungsdaten wurden, ebenso wie die restlichen Referenzdaten, in die zwei Klassen „Überstau“ und „Kein Überstau“ unterteilt, um sicherzustellen, dass für beide Klassen ausreichend Validierungsdaten vorhanden sind. Dies ermöglicht es, das Modell auf einer Teilmenge der Daten zu trainieren und seine Genauigkeit auf einer unabhängigen Testmenge zu überprüfen, um sicherzustellen, dass es sowohl räumlich als auch zeitlich generalisieren kann und nicht nur in den Regionen bzw. Jahren der Trainingsdaten eine gute Performance zeigt. Die Ratio von Trainings- zu Validierungsdaten ist 80:20, d.h. 80% der Referenzdaten wurden für das Modelltraining und 20% für die Validierung verwendet.

3.3. Erstellung monatlicher Überstaulayer

Auf Basis der Referenzdaten und der Sentinel-Monatskomposite wurden Random Forest Modelle trainiert (Random Forest Klassifikationsalgorithmus nach Breimann, 2001), um monatliche Rasterbilder für den Überstau auf organischen Böden zu generieren. In verschiedenen Tests ergaben zwei saisonal separat trainierte Modelle die besten Ergebnisse: Ein Modell wurde auf den Trainingsdaten beider Sensoren aus den Monaten Januar, Februar, März, November und Dezember der Jahre 2018-2020 trainiert und wird für die Generierung der monatlichen Rasterdatensätze von November bis März angewandt. Ein zweites Modell, trainiert auf Daten der beiden Sensoren aus April bis Oktober 2018-2020, generiert dementsprechend die Klassifikationsraster der Monate April-Oktober. So wird für jeden Monat eines Jahres ein Rasterdatensatz (Überstau und Nicht-Überstau) in der Auflösung der zugrunde liegenden Satellitendaten (10x10 m) erzeugt. In Abbildung 3 wird die Methodik zur Erstellung der Rasterdatensätze für Überstau schematisch dargestellt.

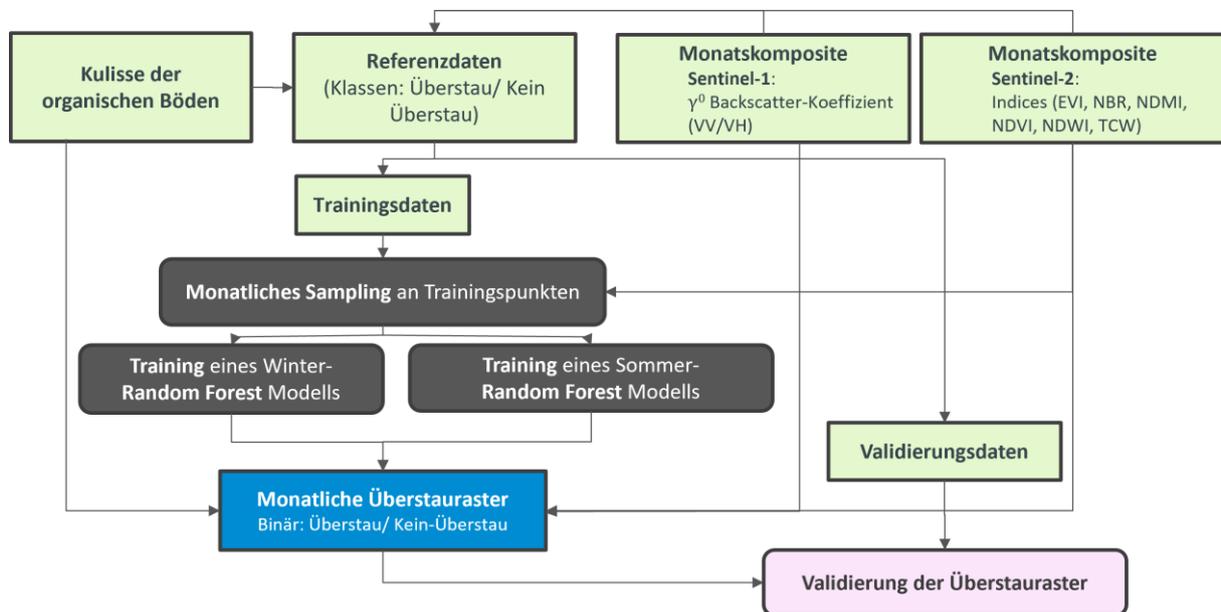


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Methodik des Überstau-Dienstes.

Die Erstellung der monatlichen Überstau-Klassifikationen für alle Moorflächen in Deutschland erfolgt als Hintergrundprozess unabhängig von der Dienst-Nutzung. Die monatlichen Rasterdatensätze liegen bundesweit flächendeckend vor und können auf Anfrage vom Thünen-Institut für vertiefende Untersuchungen zu räumlichen und zeitlichen Mustern zur Verfügung gestellt werden. In Abbildung 4 ist das Klassifikationsergebnis für das Gebiet südlich des Dümmer Sees für einen Monat (März 2018) dargestellt.

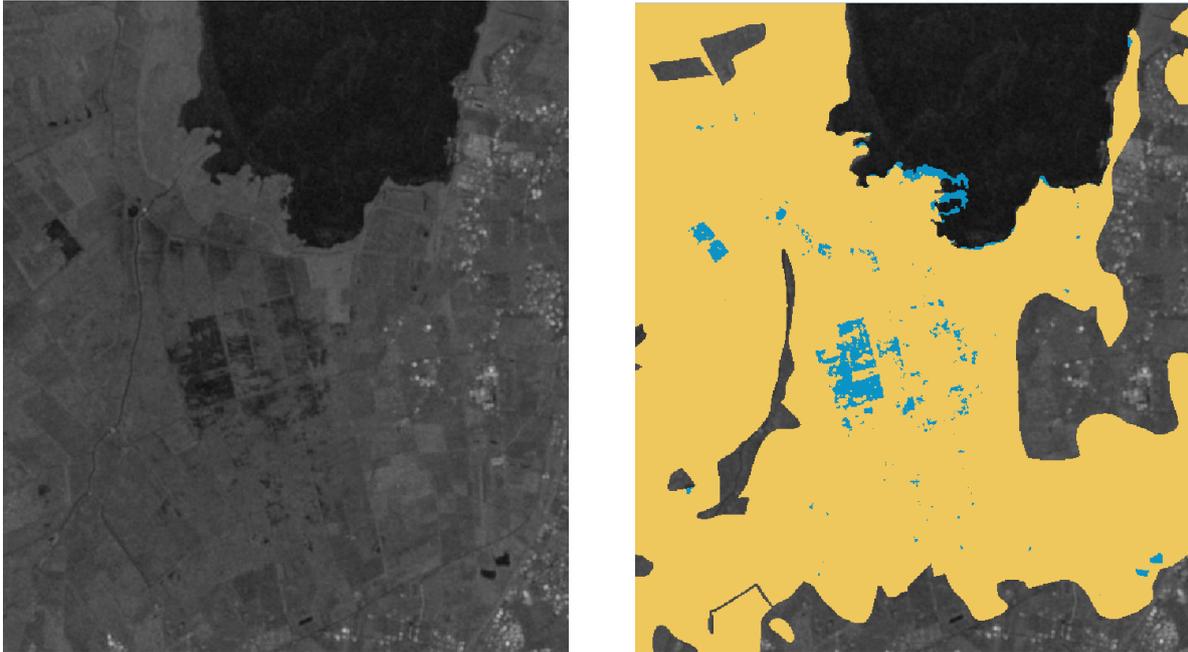


Abbildung 4: Untersuchungsgebiet südlicher Dümmer See, links das Sentinel-1- Monatskomposit (VV-Polarisierung) für März 2018, rechts das Klassifikationsraster von März 2018 (blaue Pixel: detektierter Überstau, braun: als „Kein Überstau“ klassifizierte Pixel in der Moorbodenkulisse).

4. Technische Umsetzung des Dienstes

Im Webportal des Offenlandmonitors laden Nutzende Polygone zur Analyse hoch und erhalten die Informationen des Dienstes in Form von den eingegebenen Polygonen mit einer erweiterten Attributtabelle. Die errechneten Informationen werden als neue Spalte an die Attributtabelle der Polygone angefügt.

Abbildung 5 zeigt einen Überblick über den Ablauf des Dienstes. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte und die ausgegebenen Informationen des Überstau-Dienstes näher erläutert.

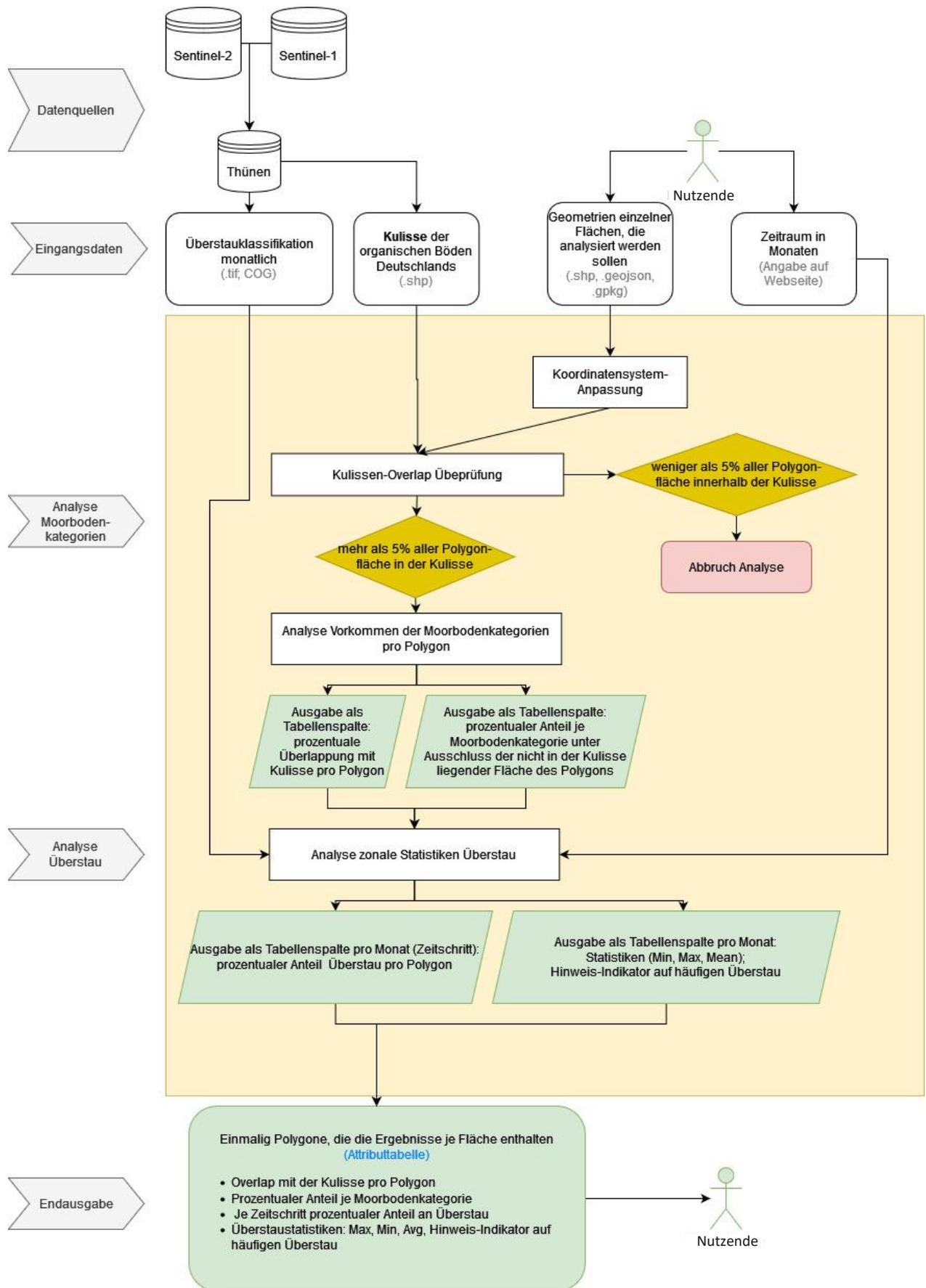


Abbildung 5: Technischer Ablauf des Dienstes.

4.1. Wahl der Eingabeparameter

Die Nutzung des Dienstes erfolgt auf der Basis von Polygonen (z. B. von Feldern, Schlägen, Parzellen, Gebieten), die durch die Nutzenden bereitgestellt werden müssen. Die zu prüfenden Polygone können in einem der folgenden Datenformate im Webportal hochgeladen werden: ESRI Shapefile, KML, GeoJSON und zip-Formate. Die Daten müssen mit einer eindeutigen ID Spalte versehen sein, da diese bei der Auswahl des Dienstes abgefragt wird.

Darüber hinaus kann der Zeitraum, für den die Flächen analysiert werden, bestimmt werden. Hier ist eine Selektion eines zusammenhängenden Zeitraums in monatlichen Zeitschritten ab 01/2017 (Aktualisierung fortlaufend und abhängig von der Verfügbarkeit der Satellitendaten) möglich.

4.2. Überstudienst

4.2.1. Aufbereitung Inputpolygone und Verschneidung mit der Karte der organischen Böden

Vor der Verschneidung der Inputpolygone mit den Vorhersagerastern werden die Polygone der Nutzenden geprüft und ggfs. aufbereitet. Dies beinhaltet eine Überprüfung ob die Polygone in einem definierten Koordinatensystem vorliegen.

Im ersten Verarbeitungsschritt erfolgt eine Überprüfung der Überlagerung der Polygone mit der Kulisse der organischen Böden. Wenn die Gesamtfläche aller Polygone weniger als 5 % mit der Kulisse überlappt, wird die Analyse nicht gestartet. Beträgt die Überlagerung 5 % oder mehr, wird die Analyse gestartet und der Anteil an Überlagerung für jede Einzelfläche berechnet (overlap). Einzelne Polygone, die außerhalb der Kulisse liegen, führen so nicht zu einem Abbruch des Dienstes, sondern haben als Ergebnis overlap = 0 und bei den folgenden Schritten No-Data-Werte. Pro Fläche wird nach der Überlagerungsprüfung die prozentuale Fläche der jeweiligen Moorbodenkategorie berechnet (Felder: ov_[...]).

4.2.2. Analyse des Überstaus innerhalb der Flächen

Im nächsten Schritt wird der Anteil des Überstaus pro Monat berechnet, ebenfalls prozentual pro Geometrie (pro_yy_xx). Sind alle gewünschten Monate berechnet, werden deskriptive Statistiken ausgegeben: der minimale prozentuale Anteil von detektiertem Überstau (pro_min), der maximale prozentuale Anteil von detektiertem Überstau (pro_max) und der durchschnittliche prozentuale Anteil bzw. der Mittelwert von detektiertem Überstau (pro_avg) über alle Monate innerhalb des ausgewählten Zeitraums hinweg. Zusätzlich wird ein Indikator ausgegeben, der einen Hinweis auf häufig wiederkehrenden, großflächigen Überstau liefert (indicat_pe). Dieser Indikator zählt, in wie vielen Monaten mehr als ein von den Nutzenden eingegebener prozentualer Überstau-Anteil berechnet wird. Wird von den Nutzenden kein Prozentanteil vorbestimmt, ist der vom Dienst vorgegebene Default-Wert 3%.

5. Output

Die Ausgabe des Dienstes erfolgt im selben Format, in dem die Polygone von den Nutzenden für den Dienst bereitgestellt wurden. Darüber hinaus werden die wesentlichen Kenngrößen, die der Dienst liefert (pro_min, pro_max, pro_avg, indicat_pe), den Nutzenden unmittelbar in Form einer online Karte (WebGIS) im Offenlandmonitor bereitgestellt. In der Attributtabelle werden an die bestehenden Informationen der Inputpolygone die abgeleiteten Statistiken angehängt (Abbildung 6). Die Beschreibung der Attribute ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Erklärungstabelle der im Durchlauf des Dienstes angehängten Tabellenspalten.

Attributname	Beschreibung
Originale ID aus Eingangsdatsatz	Flächenkennung entsprechend der Eingangs-Datei (falls vorhanden)
overlap	Prozent der Überlagerung der jeweiligen Geometrie mit der Kulisse der organischen Böden
ov_HH	Prozentualer Anteil von Hochmoorboden innerhalb der Geometrie
ov_NH	Prozentualer Anteil von Niedermoorboden innerhalb der Geometrie
ov_TR	Prozentualer Anteil von Tiefumbruchboden, sowohl auf Hochmoor- als auch Niedermoorboden, innerhalb der Geometrie
ov_MF	Prozentualer Anteil von Moorfolgeboden innerhalb der Geometrie
ov_DK_FL	Prozentualer Anteil von flach überdecktem Moorboden, sowohl Hochmoor- als auch Niedermoorboden, innerhalb der Geometrie
ov_DK_MA	Prozentualer Anteil von mächtig überdecktem Moorboden, sowohl Hochmoor- als auch Niedermoorboden, innerhalb der Geometrie
pro_yy_xx	Prozentualer Anteil an Überstau innerhalb der Geometrie; yy = Jahr, xx = Monat (Beispiel Juni 2017: pro_17_06)
pro_min	Minimaler prozentualer Anteil von detektiertem Überstau über alle Zeitschritte
pro_max	Maximaler prozentualer Anteil von detektiertem Überstau über alle Zeitschritte
pro_avg	Durchschnittlicher prozentualer Anteil von detektiertem Überstau über alle Zeitschritte
indicat_pe	Hinweis auf möglichen großflächigen/ permanenten Überstau

ID	overlap	ov_HH	ov_MF	ov_NH	ov_TR	ov_DK_FL	ov_DK_MA	pro_19_01	pro_19_02	pro_min	pro_max	pro_avg	indicat_pe
1	8	0	0	0	0	0	0	NULL	NULL	0	0	0	0
2	3	3,0000000000000000...	0	100,00000000000000...	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	18	14,0000000000000000...	0	100,00000000000000...	0	0	0	0	0	0	5,2100000000000000...	0,43	1
4	16	100,00000000000000...	100,00000000000000...	0	0	0	0	45,89000000000000...	49,34000000000000...	25,43000000000000...	72,56000000000000...	44,82000000000000...	12

Abbildung 6: Attributtabelle der prozessierten Nutzenden-Polygone. An die bestehenden Informationen (ID) angehängt sind die aus dem Überstaudienst ermittelten Informationen.

6. Genauigkeit, Fehlerquellen und Einschränkungen des Dienstes

Die Genauigkeit des Dienstes wurde mithilfe der aus den Referenzdaten zurückgehaltenen Validierungsdaten evaluiert (siehe Kap. 3.2). Anhand dieser Validierungsdaten wurde ein durchschnittlicher f1-Score von 0,79 (Mittelwert über alle Monate) für die Überstauflächen und die Jahre 2018-2020 berechnet. Der f1-Score kombiniert die Precision und den Recall und stellt das harmonische Mittel aus beiden dar, d.h. beides wird gleichwertig gewichtet. Bei der Evaluierung eines Machine-Learning-Modelles beschreiben die Gütemasse Precision und Recall die Vollständigkeit und Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse. Precision ist hierbei der Anteil der richtig klassifizierten Überstau-Ergebnisse an allen klassifizierten Überstau-Fällen, auch der falsch als Überstau klassifizierten Pixel. Recall ist der Anteil der richtig klassifizierten Überstau-Ergebnisse an allen realen Überstau-Ergebnissen, d.h. auch jener, die nicht als Überstau klassifiziert wurden. In Tabelle 3 sind die Formeln und Kurzbeschreibungen der genannten Gütemasse der Klassifikation aufgeführt.

Tabelle 3: Gütemaße zur Validierung der Genauigkeit der Überstauklassifikationen.

Gütemaß	Formel	Kurzbeschreibung
<i>Precision</i>	$\frac{TP}{TP + FP}$	Precision ist definiert als die Anzahl der true positives (TP) dividiert durch die Summe der TP und der false positives (FP). Positive bedeutet hierbei „zugehörig zur zu evaluierenden Zielklasse“. True positive bedeutet demnach, dass die Pixel sowohl in der Klassifikation als auch in den Validierungsdaten der Zielklasse zugehörig sind, also korrekt klassifiziert wurden. False positive heißt, dass diese Pixel in der Klassifikation als Zielklasse identifiziert wurden, aber nicht real der Zielklasse angehören, also falsch klassifiziert wurden. Precision beschreibt die Genauigkeit der Klassifikation.
<i>Recall</i>	$\frac{TP}{TP + FN}$	Recall ist definiert als die Anzahl der TP dividiert durch die Gesamtzahl der Elemente, die tatsächlich zur positiven Klasse gehören, d. h. die Summe der TP und false negatives. Bei Letzteren handelt es sich um Elemente, die nicht als zur positiven Klasse gehörend identifiziert wurden, aber eigentlich zur positiven Klasse gehören. Recall beschreibt die Vollständigkeit der Klassifikation.
<i>F1-Score</i>	$2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$	Das harmonische Mittel aus Precision und Recall.

Der f1-Score nimmt Werte von 0 bis 1 an, wobei höhere Werte eine bessere Modellleistung charakterisieren. In Abbildung 6 ist der Verlauf des monatlichen F1-Scores für die Klasse Überstau von

2018-2020 abgebildet. Die Werte liegen in den meisten Fällen über 0,75, was bedeutet, dass das Modell für die Zielklasse „Überstau“ eine gute Leistung erbringt.

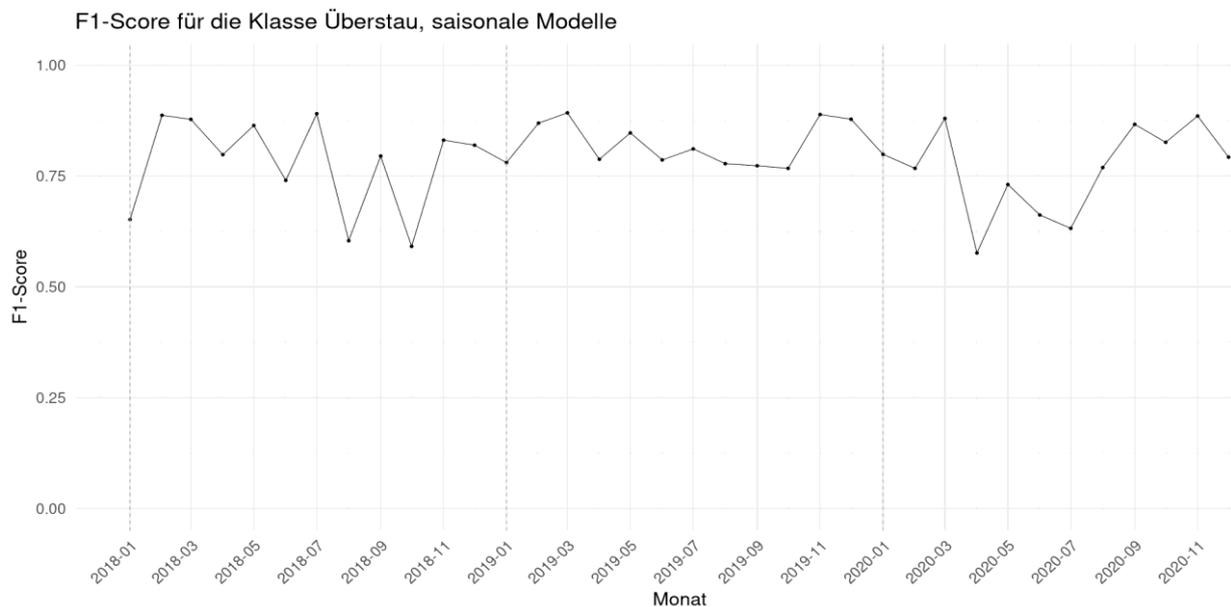


Abbildung 7: 3-jähriger Verlauf des F1-Scores der Klasse Überstau von 2018-2020.

In einigen Monaten (z.B. August + September 2018) fällt der f1-Score unter 0,75. In den auffälligen Monaten liegt das an einem niedrigen Precision-Wert der Klasse „Überstau“, was bedeutet, dass in diesen Monaten viele Pixel als Überstau klassifiziert werden, die in den Validierungsdaten kein Überstau sind. Überstau wird in diesen Monaten also tendenziell von den Modellen überschätzt. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Zum einen gibt es mehr Pixel der Klasse „Kein Überstau als „Überstau“-Pixel, sowohl in der Realität als auch in den Klassifikationsergebnissen. Die Klassen sind also ungleich gewichtet. Dies erhöht die Chancen auf eine falsch als Zielklasse identifizierte (positive) Klassifikation im Gegensatz zu einer falsch als Nicht-Zielklasse identifizierte (negative) Klassifikation. Viele negative Pixel können also als positiv klassifiziert werden und wenige positive Pixel als negativ. Zum anderen haben durch die unterschiedliche Häufigkeit der Klassen die als falsch positiv klassifizierten Pixel ein häufigeres Auftreten als falsch negative Pixel, die fehlerhafterweise nicht als Überstau klassifiziert wurden, und werden so, auch in relativ geringem Vorkommen, im f1-Score stärker gewichtet und beeinflussen den Wert negativ. Des Weiteren wurden die Validierungsdaten teilweise gezielt in problematischen Regionen der Klassifikation erhoben. Diese problematischen Regionen ergeben sich aus den auf unterschiedliche Art und Weise überlappenden Überflugsbahnen (Orbits) der Satelliten. Durch diese Orbitunterschiede werden einige Regionen in Deutschland häufiger überflogen als andere und besitzen dadurch in einzelnen Monaten eine geringfügig niedrigere Datendichte. Diese Regionen sind allerdings Ausnahmefälle.

Die Qualität und Verfügbarkeit der Satellitendaten kann einen Einfluss auf das Endprodukt des Dienstes haben, da die Erkennungsgenauigkeit von Überstau darauf beruht. Lücken in den Satellitendaten, die durch fehlerhaft detektierte oder gänzlich fehlende Werte in den Aufnahmen entstehen können, Orbitunterschiede und Fehler in der Wolkenmaskierung, z.B. durch nicht detektierte Cirruswolken oder Wolkenschatten, können die Ergebnisse beeinflussen, wie im Falle der Orbitunterschiede bereits in der Validierung aufgezeigt.

Das Auftreten von Wolken variiert im Laufe des Jahres und beeinflusst besonders in gemäßigten Klimazonen wie Deutschland saisonal die Häufigkeit und Dichte der Wolkendecke und damit die Datenverfügbarkeit von Sentinel-2. In den Sommermonaten sind Beobachtungen bei klarem Himmel

(Clear Sky Observations, CSO) im Allgemeinen häufiger. Im Herbst und Winter hingegen gibt es in der Regel eine stärkere Wolkendecke, wodurch die Verfügbarkeit wolkenfreier Sentinel-2-Aufnahmen zur fernerkundlichen Analyse verringert wird.

Tabelle 4 zeigt die durchschnittlichen CSO in den Monaten von 2017 bis 2023. Der Durchschnitt pro Monat zeigt den Mittelwert aus den deutschlandweiten maximalen CSO. Die Tabelle bietet einen Überblick darüber, wie bedingt durch saisonale Wolkenmuster in den Wintermonaten die Datenverfügbarkeit abnimmt. Da Sentinel-1 unabhängig von Wolken und Belichtung Daten aufnimmt, kann hier von einer durchschnittlich höheren Mindestabdeckung pro Pixel als bei Sentinel-2 und zusätzlich monatlich konsistenteren Daten ausgegangen werden. Ebenfalls in Tabelle 4 sind die deutschlandweit durchschnittlichen Sentinel-1 Aufnahmen pro Pixel und Jahr/ Monat ersichtlich. Für die Berechnung wurde der geringste Wert, also die durchschnittlich geringste gefundene Anzahl von Satellitenaufnahmen, als Mindestabdeckung gefiltert. Der Ausfall eines Satelliten des Satellitenpaares im Jahre 2021 zeigt sich in einer deutlichen Verminderung der Häufigkeit der Aufnahmen ab 2022.

Tabelle 4: Durchschnittliche maximale Anzahl von wolkenfreien Pixeln von Sentinel-2 und durchschnittliche Mindestabdeckung pro Pixel von Sentinel-1 nach Jahr und Monat.

Monat	2017/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2017/ Sentinel- 1	2018/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2018/ Sentinel- 1	2019/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2019/ Sentinel- 1	2020/ Sentinel-2 (ØMax CSO)
Jan	0,62	9,01	1,25	10,75	1,61	9,58	2,71
Feb	1,31	9,01	3,83	10,75	4,43	9,58	1,71
Mär	1,66	9,01	2,75	10,75	3,12	9,58	5,13
Apr	2,12	9,01	6,09	10,75	6,64	9,58	8,57
Mai	2,27	9,01	6,96	10,75	3,82	9,58	5,68
Juni	2,40	9,01	4,55	10,75	7,35	9,58	5,11
Juli	4,78	9,01	8,41	10,75	4,90	9,58	5,22
Aug	4,86	9,01	6,17	10,75	5,38	9,58	6,07
Sep	3,36	9,01	5,87	10,75	4,62	9,58	6,31
Okt	3,34	9,01	5,99	10,75	3,26	9,58	1,57
Nov	1,64	9,01	2,93	10,75	1,39	9,58	4,56
Dez	0,98	9,01	1.03	10,75	1,57	9,58	1,02

Monat	2020/ Sentinel-1	2021/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2021/ Sentinel- 1	2022/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2022/ Sentinel- 1	2023/ Sentinel-2 (ØMax CSO)	2023/ Sentinel- 1
Jan	9,83	1.03	8,58	2,19	4,67	1,02	4,83
Feb	9,83	2.97	8,58	2,94	4,67	2,89	4,83
Mär	9,83	4.15	8,58	7,95	4,67	2,05	4,83
Apr	9,83	4.17	8,58	3,92	4,67	3,74	4,83
Mai	9,83	2.98	8,58	5,31	4,67	4,51	4,83
Juni	9,83	5.26	8,58	7,18	4,67	7,47	4,83
Juli	9,83	4.17	8,58	5,66	4,67	4,4	4,83
Aug	9,83	2.78	8,58	6,81	4,67	3,55	4,83
Sep	9,83	5.12	8,58	3,76	4,67	6,74	4,83
Okt	9,83	4.03	8,58	4,04	4,67	2,83	4,83
Nov	9,83	1.21	8,58	1,90	4,67	1,08	4,83
Dez	9,83	1,61	8,58	1,39	4,67	0,62	4,83

Obwohl der Dienst mit einer etablierten und robusten Methode erstellt wurde, kann es zu Einschränkungen in der Analyse und Ergebnisausgabe kommen, wie z. B.:

- Der Dienst kann nicht zwischen Überstau und anderen Arten von Gewässern wie Flüssen oder Seen unterscheiden, wenn diese im Analysegebiet (bzw. in einzelnen Polygonen) enthalten sind.
- Trotz der hohen Genauigkeit des Random Forest Modells kann es zu falsch klassifizierten Pixeln innerhalb der monatlichen Vorhersageraster kommen, welches zu einer Über- oder Unterschätzung von Überstau in den Eingabe-Polygonen führen kann.
- Die Ergebnisse können des Weiteren von den bereitgestellten Polygonen abhängen. Wenn die Polygone nur in geringen Teilen mit der Kulisse überlappen, selbst fehlerhaft sind (z.B. durch invalide Geometrie / Topologie) oder für die Anwendung des Dienstes nicht sinnhaft ausgewählt wurden, kann die Nutzbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt sein.

Zitierhinweis

Tepaß, A., Schwieder, M., Tiemeyer, B., Erasmi, S.(2024): CopGruen – Überstudienst. Ein Verbundprojekt von Bful, LANUV, LfU Schleswig-Holstein, RLP AgroScience, Thünen Institut, TU Berlin.

Literatur

Breiman, L. (2001). *Random Forests*. Machine Learning 45, 5–32.

European Space Agency (2024). CEOS EO HANDBOOK – MISSION SUMMARY - Sentinel-1 C. Abrufbar unter: <https://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=577> (Stand: 23.09.2024).

Crist, E.P., & Cicone, R.C. (1984). *A physically-based transformation of Thematic Mapper data—the TM Tasseled Cap*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-22(3), 256-263.

Frantz, D. (2019). *FORCE – Landsat + Sentinel-2 Analysis Ready Data and beyond*. Remote Sensing 11, 1124.

Gao, B.-C. (1996). *NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257-266.

Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W. (1997). *A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS*. Remote Sensing of Environment, 59(3), 440-451.

Key, C.H., & Benson, N.C. (2006). *Landscape assessment: remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio*. In *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD: LA1-LA51.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. NASA Special Publication, 351, 309.

Wittnebel, M., Frank, S., Tiemeyer, B. (2023). *Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland, Thünen Working Paper*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.