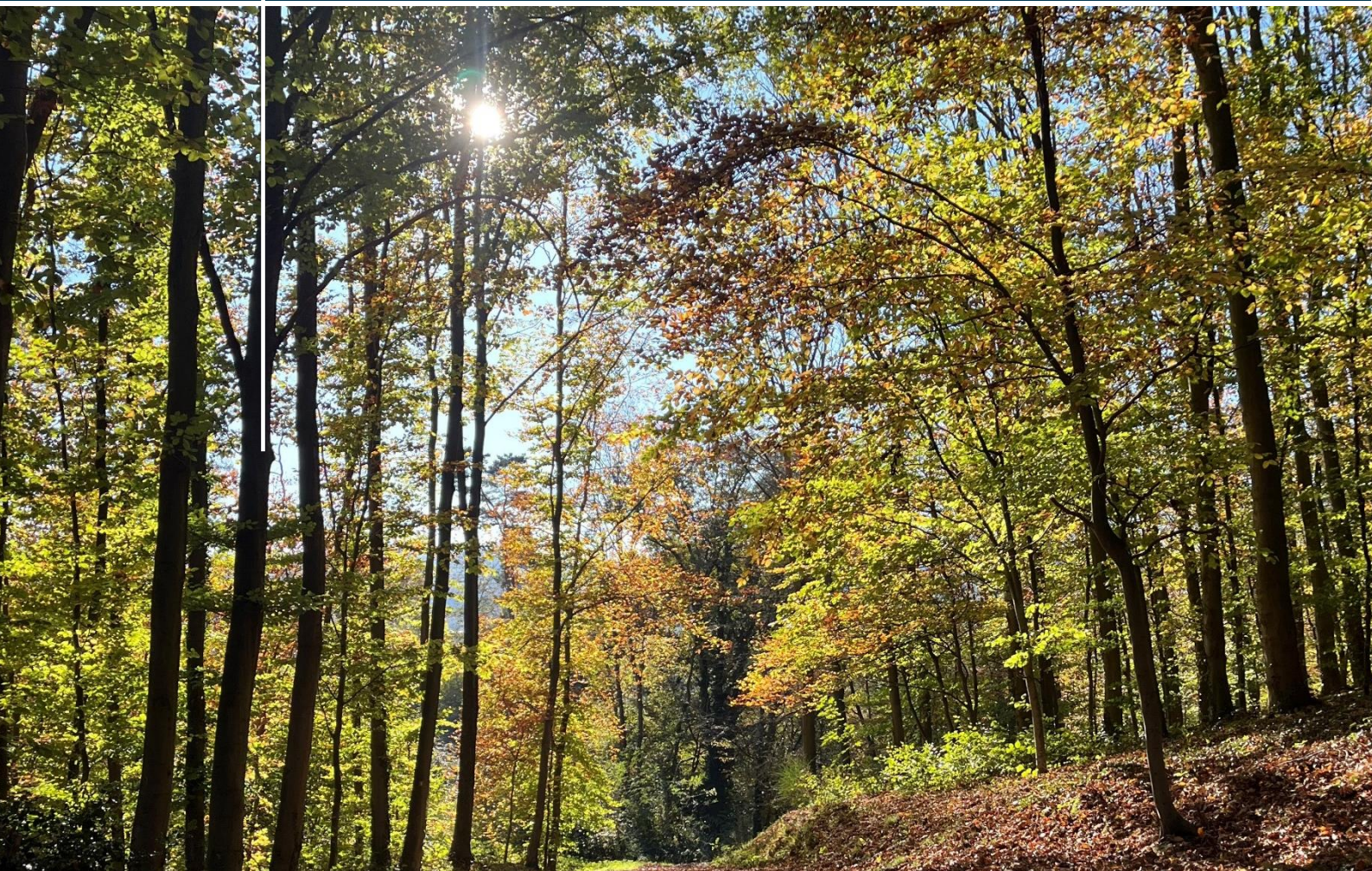


ZEITLICH-RÄUMLICHE ANALYSE DES ZUSTANDES  
DER WALDÖKOSYSTEME IN DEUTSCHLAND UND  
MULTIVARIATE UNTERSUCHUNG DER RELEVANZ  
VON FORSTLICHEN SOWIE NICHT-FORSTLICHEN  
EINFLUSSFAKTOREN

Januar 2026 26/01



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Wissenschaftlicher Beirat für Natürlichen Klimaschutz

Geschäftsstelle beim Bundesamt für Naturschutz

DLR Projektträger

Heinrich-Konen-Str. 1

53227 Bonn

Telefonnummer: +49 228 3821 2900

E-Mail: WBNK-GS@dlr.de

### **Autorinnen und Autoren**

Dr. Torsten Welle, Dr. Michael Förster, Dr. Jonas Franke, Dr. Daniel Doktor, Dr. Maximilian Lange

### **Zitiervorschlag**

Welle T., Förster, M., Franke, J., Doktor, D., Lange, M., (2025). Zeitlich-räumliche Analyse des Zustandes der Waldökosysteme in Deutschland und multivariate Untersuchung der Relevanz von forstlichen sowie nicht-forstlichen Einflussfaktoren – Machbarkeitsstudie. Gutachten 26/01 im Auftrag des Wissenschaftlichen Beirats für Natürlichen Klimaschutz (WBNK).

ISBN 978-3-949245-40-4

### **Stand**

Juni 2025

### **Bildnachweis**

Titelbild: Vanessa Krohn-Trinius

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des WBNK übereinstimmen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Ziele der Machbarkeitsstudie.....	6
1.2	Aufbau des Berichts .....	6
2	Verfügbarkeit und Eignung von Fernerkundungsdaten für die Waldzustandsanalyse.....	7
2.1	Ziele von Arbeitspaket 1.....	7
2.2	Hintergrund und Einleitung: Aktuelle Situation, Fernerkundung und Wald .....	7
2.3	Erdbeobachtungsdaten .....	8
2.4	Übersicht existierender Nah- und Fernerkundungssysteme und -daten.....	10
2.4.1	Optische Satellitendaten.....	13
2.4.2	Optische Luftbilddaten .....	15
2.4.3	LiDAR.....	16
2.4.4	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	18
2.5	Übersicht über bestehende Monitoringsysteme .....	19
2.5.1	Globale/kontinentale Waldmonitoringsysteme und -produkte .....	19
2.5.2	Nationale Waldmonitoringsysteme und -produkte (Deutschland) .....	21
2.6	Eignung von existierender Nah- und Fernerkundungssysteme und -daten für Waldanalysen.....	26
2.6.1	Eignung existierender Nah- und Fernerkundungssysteme zur Erfassung von Waldzustand und Bewirtschaftungseinflüssen.....	26
2.6.2	Eignung existierender Nah- und Fernerkundungssysteme zur Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion.....	27
2.7	Übersicht über Fernerkundungssysteme und Erfassung von Forstparametern .....	29
3	Zusätzliche Datengrundlage für die Faktorenanalyse.....	34
3.1	Ziele von Arbeitspaket 2.....	34
3.2	Hintergrund und Einleitung.....	34
3.3	Übersicht bestehender Waldmonitoringprogramme .....	35
3.3.1	Bundeswaldinventur (BWI).....	36
3.3.2	Kohlenstoffinventur (CI).....	36
3.3.3	Bodenzustandserhebung Wald (BZE).....	37
3.3.4	Intensives forstliches Umweltmonitoring – ICP Forests Level II .....	37
3.3.5	Waldzustandserhebung (WZE) .....	37
3.3.6	Naturwald-Monitoring.....	38
3.3.7	Ökosystem-Monitoring (LTER-D) .....	38
3.3.8	Brutvogel-Monitoring (MhB) .....	39

3.4	Übersicht über zusätzlich relevante Daten zur Erfassung von Forstparametern.....	41
3.5	Bewertung zusätzlicher Daten zur Eignung von Waldzustandsanalysen .....	46
4	Bewertung der Relevanz, Eignung, Erhebungsaufwand und Kosten von Fernerkundungsdaten und Zusatzdaten für die Waldanalysen .....	47
4.1	Ziel des Kapitels.....	47
4.2	Angewandte Methodik für die Bewertungsmatrix.....	48
4.3	Ergebnisse der Bewertungsmatrix .....	51
4.3.1	Bewertungsmatrix zur Waldzustandsanalyse: Vorgehen und Ergebnisse .....	58
4.3.2	Bewertungsmatrix zur Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüssen: Vorgehen und Ergebnisse.....	62
4.3.3	Bewertungsmatrix zur Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion: Vorgehen und Ergebnisse.....	67
5	Integration der unterschiedlichen Datensätze in einem konsistenten methodischen Rahmen und Beispielanalyse .....	71
5.1	Ziele von Arbeitspaket 3.....	71
5.2	Methodischer Rahmen zur fernerkundlichen Erfassung von forstbezogenen Zielgrößen.....	71
5.2.1	Problemanalyse .....	72
5.2.2	Datenintegration.....	74
5.2.3	Ableitung der Zielgröße .....	75
5.2.4	Ergebnisverwertung.....	76
5.3	Einordnung nationaler Fernerkundungs-basierter Waldmonitoring Systeme.....	77
5.3.1	UFZ-Waldzustandsmonitor .....	77
5.3.2	Waldmonitor Deutschland und Waldmonitor Arnsberg.....	78
5.3.3	ForestWatch.....	78
5.4	Beispielanalyse zur Integration und Verschneidung unterschiedlicher Datenquellen anhand der Baumartenklassifikation .....	80
5.4.1	Prozessbeschreibung .....	80
5.4.2	Ergebnisse.....	84
6	Konzeptionell-methodischer Rahmen für die weitere Bearbeitung.....	88
6.1	Ziele von Arbeitspaket 4.....	88
6.2	Entwicklung eines konzeptioniell-methodischen Rahmens .....	89
6.3	Beantwortung der Fragen aus der Leistungsbeschreibung:.....	90
6.3.1	Wie könnten perspektivisch die o.g. nationalen Monitoring-Programme und -berichte mit Hilfe dieses Ansatzes weiterentwickelt und ergänzt werden? Welchen Mehrwert hätte das konkret?..	91

6.3.2	Wie könnten die Daten einer möglichst breiten Akteurslandschaft (Behörden, Institute, wissenschaftliche Einrichtungen sowie der Öffentlichkeit) zugänglich gemacht werden? .....	93
7	Zusammenfassende Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Nutzung von Fernerkundungsdaten im Kontext waldbezogener Monitoring-Vorhaben.....	93
8	Literatur .....	96

# 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf die öffentliche Ausschreibung nach Unterschwellenvergabeordnung (UVgO): Machbarkeitsstudie "Zeitlich-räumliche Analyse des Zustandes der Waldökosysteme in Deutschland und multivariate Untersuchung der Relevanz von forstlichen sowie nicht-forstlichen Einflussfaktoren", Kennziffer: 313/2025/8455510. Die Machbarkeitsstudie entstand im Auftrag des Wissenschaftlichen Beirates für Natürlichen Klimaschutz und wurde über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Auftrag gegeben.

## 1.1 Ziele der Machbarkeitsstudie

Die Ziele der Machbarkeitsstudie lassen sich anhand der Leistungsbeschreibung wie folgt innerhalb der einzelnen Arbeitspakete (AP) einordnen:

**Arbeitspaket 1** hat zum Ziel vorhandene Fernerkundungsdatensätze aufzuzeigen und zu bewerten, die für eine Analyse des Waldzustandes bzw. der Ökosystemgesundheit sowie der Quellen- und Senkenfunktion geeignet sind.

In **Arbeitspaket 2** werden zusätzliche verfügbare Datensätze analysiert und bewertet, die das Potenzial besitzen, bestehende fernerkundungsbasierte Verfahren gezielt zu verbessern und damit die Analyse des Waldzustandes sowie die Ableitung von Quellen- und Senkenfunktionen zu präzisieren.

**Arbeitspaket 3** sieht die Entwicklung eines Anwendungsvorschlags bzw. einer Beispielanalyse vor, die auf den Ergebnissen aus AP1 und AP2 basiert und der Bewertung von Machbarkeit und Umsetzbarkeit dient.

In **Arbeitspaket 4** wird ein konzeptionell-methodischer Rahmen für ganz Deutschland entwickelt, der auf den Erkenntnissen aus AP1 bis AP3 aufbaut und die Grundlage für eine räumlich explizite Analyse der Ökosystemgesundheit der Wälder bildet. Eine zweite Aufgabe besteht in der Beantwortung der in der Leistungsbeschreibung formulierten Fragen.

## 1.2 Aufbau des Berichts

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut. Das erste Kapitel umfasst die Einleitung und Zielsetzung. Das zweite Kapitel beinhaltet die Ziele und Umsetzung des ersten Arbeitspaketes. Kapitel 3 befasst

sich mit dem zweiten Arbeitspaket. Im vierten Kapitel wird AP 1 und AP 2 zusammengefasst und die Eignung, Relevanz, Erhebungsaufwand und Kosten für die Waldanalysen bewertet. Das fünfte Kapitel erläutert die Umsetzung des dritten Arbeitspaketes. Im sechsten Kapitel erfolgt die Bearbeitung des vierten Arbeitspaketes. Kapitel 7 endet mit einer zusammenfassenden Empfehlung zur Nutzung von Fernerkundungsdaten im Kontext waldbezogener Monitoring-Vorhaben.

## **2 Verfügbarkeit und Eignung von Fernerkundungsdaten für die Waldzustandsanalyse**

### **2.1 Ziele von Arbeitspaket 1**

Die Ziele in diesem Arbeitspaket lassen sich wie folgt unterteilen:

- Auflistung von Fernerkundungsdaten, die für die Analyse und Bewertung von:
  - Waldökosystemgesundheit
  - Bewirtschaftungseinflüssen
  - Quellen- und Senkenfunktion verfügbar und geeignet sind
- Auflistung von bestehenden fernerkundungsbasierten Monitoringsystemen
- Verfügbarkeit von Datensätzen
- Abschätzung des Erhebungsaufwandes für fernerkundungsbasierte Waldinformation
- Abschätzung des Kostenaufwandes für fernerkundungsbasierte Waldinformation

### **2.2 Hintergrund und Einleitung: Aktuelle Situation, Fernerkundung und Wald**

Wälder speichern Kohlenstoff, tragen wesentlich zur Neubildung von Grundwasser bei, sorgen für Kühlung und bieten zahlreichen Arten einen einzigartigen Lebensraum. Zudem bieten sie zahlreiche ökologische, soziale und wirtschaftliche Vorteile, die allgemein als essenzielle Ökosystemdienstleistungen bezeichnet werden (Bonan 2008; Bolte et al. 2023). Die Dürrejahre in großen Teilen Mitteleuropas haben jedoch gezeigt, wie anfällig viele Wälder sind. In den Jahren 2018, 2019 und 2020 wurden insbesondere Nadelholz-Monokulturen in Deutschland durch Dürreperioden und Schädlinge wie den Borkenkäfer stark geschädigt (Thonfeld et al. 2022). Darüber hinaus haben Waldbrände sowie die Ausweitung des Tagebaus (z. B. für Kohle, Kies, Sand) zur Schädigung und zum Verlust von Waldbeständen beigetragen. Angesichts globaler Umweltveränderungen wie dem Klimawandel und der Umwandlung von Landnutzung ist die Überwachung und Bewertung der Waldstruktur und des Waldzustands in einem detaillierten

zeitlichen und räumlichen Maßstab zu einer zentralen Voraussetzung für eine effektive und nachhaltige Forstwirtschaft geworden (Patacca et al. 2023).

Seit den Dürrejahre variiert das Auftreten von Borkenkäfern und anderen Schadfaktoren stark zwischen den Regionen, wodurch das Ausmaß der Waldschäden regional sehr unterschiedlich ist. Um zu erfassen, wie stark die Wälder in Deutschland geschädigt sind, wird jährlich die Waldzustandserhebung an festen Stichprobenpunkten durchgeführt (BMEL 2023). Da diese Erhebungen jedoch keine flächendeckende Erfassung ermöglichen, wird ein satellitengestütztes Monitoringsystem benötigt, um Waldschäden und Waldverluste hochauflösend, regionalisiert und landesweit zu kartieren. Diese Notwendigkeit wird durch die steigende Häufigkeit und Intensität von Störungen wie Dürren, Waldbränden und Insektenbefall weiter verstärkt, die die Vitalität und Produktivität der Wälder erheblich beeinträchtigen können (Buras et al. 2021; Schelhaas et al. 2003; Senf und Seidl 2021a, 2021b).

Auch die neue EU-Waldstrategie für 2030, welche Maßnahmen zur Stärkung des Waldschutzes und der Wiederherstellung von Waldökosystemen sowie die Förderung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung zum Gegenstand hat, sieht Maßnahmen zur Verbesserung der Überwachung von Wäldern vor. Im Hinblick auf das Waldmonitoring beinhaltet die Strategie einen Gesetzesvorschlag für ein Rahmenwerk zur Waldbeobachtung, -berichterstattung und Datenerhebung. Ziel dieses Rahmens ist es, eine EU-weite Beobachtungsstruktur für Wälder zu entwickeln, die einen offenen Zugang zu detaillierten, genauen, regelmäßigen und zeitnahen Informationen über den Zustand und die Bewirtschaftung der Wälder ermöglicht (EEA 2016). Fernerkundung stellt in diesem Zusammenhang eine Schlüsseltechnologie dar, da sie die Überwachung und Kartierung von Ökosystemen über große Flächen hinweg erlaubt (Zeug et al. 2018; Hansen et al. 2013).

Das Ziel dieses Arbeitspaketes und ein Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist es, einen Überblick über Verfügbarkeit und Eignung von Fernerkundungsdaten für die Waldzustandsanalyse in Deutschland und Europa zu schaffen. Dies beinhaltet einen Vergleich unterschiedlicher Satelliten-basierter Erdbeobachtungsdaten sowie Luftbild-gestützte Analysen.

## 2.3 Erdbeobachtungsdaten

Fortschritte in der Fernerkundung, insbesondere durch die stark gestiegene Datenverfügbarkeit und -qualität, eröffnen neue Möglichkeiten zur Bewertung des Waldzustands. Grundsätzlich basieren solche Bewertungen entweder auf multispektralen und hyperspektralen Bilddaten oder auf Technologien wie dem Synthetic Aperture Radar (SAR) oder der Light Detection and Ranging (LiDAR)-Technologie. Diese Technologien erfassen Daten über die Rückstrahlungseigenschaften der Vegetation und ermöglichen so die Erfassung von Vitalitäts- und Strukturcharakteristika der Waldbestände. Die Fernerkundung misst die Waldparameter dabei zumeist nicht direkt, sondern nutzt deren Einfluss auf die Rückstrahlung zur indirekten Erfassung. Daraus ergeben sich unterschiedliche Zielsetzungen von Datenanalysen, eine Vielzahl an Datenverarbeitungs- und Erkennungstechniken sowie die Nutzung verschiedener Datentypen und deren Kombinationen etc.

Um dem Bedarf an detaillierten, räumlich expliziten Informationen über den Waldzustand gerecht zu werden, bietet die Satellitenfernerkundung eine einzigartige Möglichkeit, da sie Informationen über große Flächen hinweg und in regelmäßigen Abständen erfassen kann (Verbesselt et al. 2010; Hermosilla et al. 2015). Insbesondere der Analyse von Zeitreihen von Satellitenbildern sowie Algorithmen zur Veränderungserkennung kommt eine besondere Rolle im Waldmonitoring zu. Dieser Ansatz kann wertvolle Einblicke in kurz- und langfristige Trends und räumliche Muster von Veränderungen der Waldflächen liefern (Fassnacht et al. 2024). In Bezug auf Erdbeobachtungsdaten sind daher solche Aufnahmesysteme von besonderer Bedeutung, die in regelmäßigen und kurzen Abständen Daten aufnehmen.

Ein Satelliten-basiertes Waldmonitoring kann auch durch den Einsatz von sehr hoch aufgelösten Flugzeug- oder UAV-basierten Erfassungssystemen ergänzt werden. Dadurch können Waldinformationen nicht nur auf Bestandsebene, sondern auch auf Einzelbaumebene erfasst werden. Die durch diese Systeme erzeugten Daten sind jedoch aufgrund Ihrer in der Praxis meist geringen zeitlichen Wiederholrate insbesondere für großflächiges Monitoring nur eingeschränkt verwendbar.

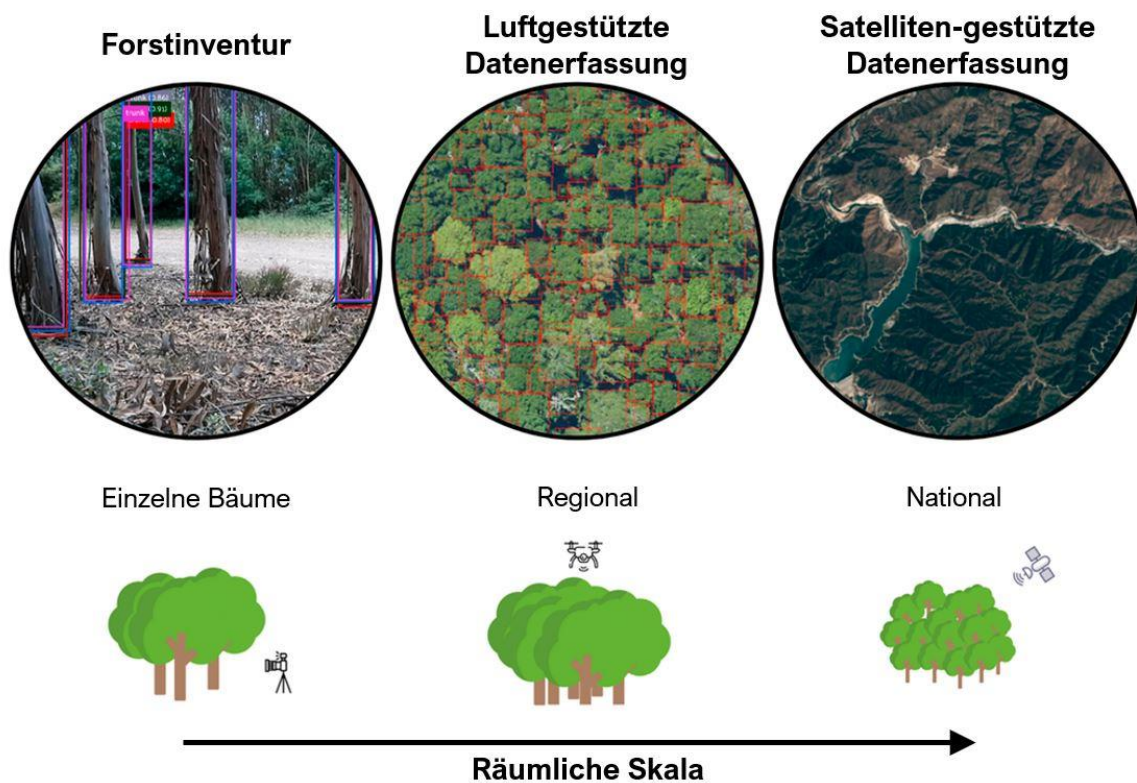


Illustration 1 | Darstellung von Waldüberwachungsdatensätzen in verschiedenen Maßstäben. Modifiziert von: Ouaknine et al. 2025)

Für eine Beurteilung der technischen Machbarkeit einer zeitlich-räumlichen Analyse des Zustands der Waldökosysteme mittels Fern- und Naherkundung sind aufgrund der Vielzahl der relevanten Waldparameter, der Aufnahmesysteme, der Analysealgorithmen und der Zielsetzungen eines Monitoringsystems zunächst wichtige Kriterien zur Nutzung von Fernerkundungsdaten zu klären:

- Welche Daten der unterschiedlichen Aufnahmesysteme haben die technische Eignung, relevante Waldinformation abzuleiten?
- Reicht die räumliche Auflösung der Daten aus, um die Waldinformationen innerhalb einer zu betrachtenden Fläche in ihrer Variabilität zu erfassen?
- Sind multitemporale Daten notwendig, um die zu betrachtende Waldinformation zu erfassen?
- Falls ja, reicht die zeitliche Auflösung und die Observationlänge (Zeitraum der Verfügbarkeit) der Daten aus, um die Waldinformation abzuleiten?
- Welche Kosten sind mit dem jeweiligen Datenbezug verbunden?

Um einen Überblick über die Eignung verschiedener Aufnahmesysteme zur Erfassung verschiedener forstlich relevanter Parameter bereitzustellen, werden diese im folgenden Kapitel näher beschrieben.

## 2.4 Übersicht existierender Nah- und Fernerkundungssysteme und -daten

Daten von Nah- und Fernerkundungssystemen lassen sich anhand von Spezifikationen wie Aufnahmeart, räumliche Auflösung, räumliche Abdeckung, spektrale Auflösung, zeitliche Auflösung sowie dem Gesamtzeitraum der Datenverfügbarkeit beschreiben. Je nach Spezifikation eignen sich die Daten unterschiedlich gut zur Ableitung von Forst- bzw. Waldparametern. Illustration 2 zeigt eine schematische Übersicht der am häufigsten verwendeten Systeme im Waldmonitoring. Die Hauptcharakteristika satellitenbasierter Systeme sind in Tabelle 1 aufgeführt.

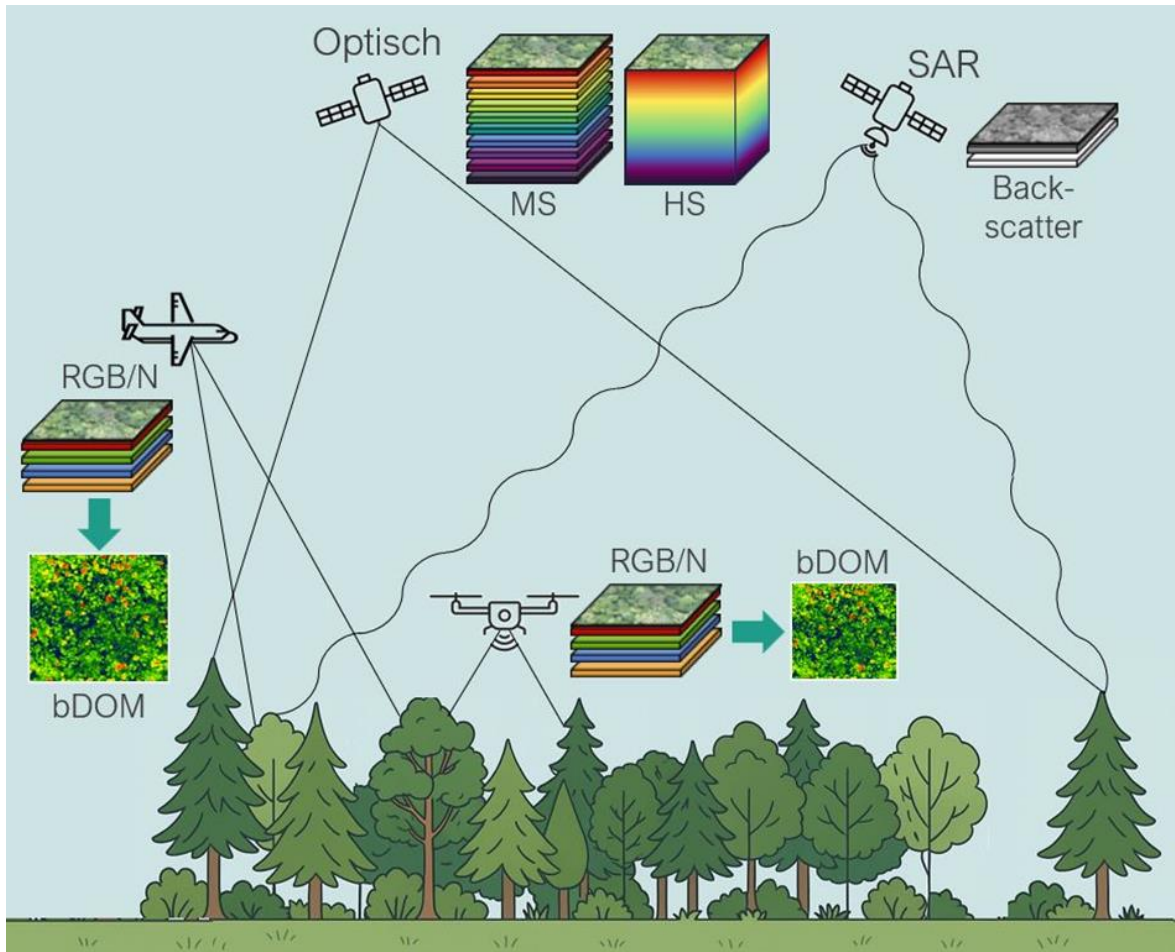


Illustration 1 | Schematische Darstellung der im Waldmonitoring am häufigsten verwendeten Fern- und Naherkundungssysteme. Luftbild- und Drohnengestützt RGB/N: Rot/Grün/Blau/NIR Aufnahmen, aus denen Orthophotos und bildbasierte Digitale Oberflächenmodelle (bDOM) erzeugt werden können. Passive optische Satellitendaten liefern meist multispektrale Daten (MS), vereinzelt auch hyperspektrale Daten (HS); aktive Synthetic Aperture Radar (SAR) liefern Rückstreuwerte der Erdoberfläche.

Tabelle 1 | Hauptcharakteristika unterschiedlicher Satelliten-Fernerkundungssysteme. Diese Tabelle hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

FE-System	Typ	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Zeitliche Auflösung (Wiederholrate)	Zeitraum Datenverfügbarkeit	Schwarzbreite	Kostenfaktor	Bezugsquelle
MODIS	optisch	250m – 1000m	36 Bänder (VIS, NIR, SWIR, TIR)	1-2 Tage	2000 - geplant bis 2026	2.330 km	Gering (Kostenfrei)	NASA

Sentinel-3	optisch	300m – 1000m	21 Bänder (VIS, NIR, SWIR, TIR)	1-2 Tage	2016 - geplant bis ~2038	1.030 km	Gering (Kostenfrei)	ESA, Copernicus
Sentinel-2	optisch	10m - 60m	13 Bänder (VIS, NIR, SWIR)	3-5 Tage (je nach Region)	2015 - geplant bis ~2036	290 km	Gering (Kostenfrei)	ESA, Copernicus
Landsat	optisch	15m - 100m	7 bis 11 Bänder (VIS, NIR, SWIR, TIR)	16 Tage	1972 - geplant bis ~2030	185 km	Gering (Kostenfrei)	USGS, NASA
SPOT	optisch	1,5m - 20m	4 bis 5 Bänder (VIS, NIR, SWIR)	1-3 Tage (je nach Region)	1986 - unbekannt	60 km	Hoch	Airbus Defence & Space
Planet	optisch	3m - 5m	4 bis 5 Bänder (VIS, NIR, SWIR)	1 Tag (PlanetScope und SuperDoves)	2014 – unbekannt (Flotte wird durch SuperDoves ersetzt)	24 km	Hoch	Planet Labs
Sentinel-1	SAR	5m	C-Band (Radar)	6 Tage (je nach Region)	2014 – geplant bis ~2028	250 km	Gering (Kostenfrei)	ESA, Copernicus
Pleiades	optisch	0,50 cm	4 Bänder (VIS, NIR)	1-3 Tage (je nach Region)	2011 - unbekannt	20 km	Hoch	Airbus Defence & Space
WorldView	optisch	0,31 cm (höchste Auflösung)	4 Bänder (VIS, NIR)	1-3 Tage (je nach Region)	2007 - unbekannt	16,4 km	Sehr hoch	EUSI/Maxar Technologies
GeoEye	optisch	0,41 cm (höchste Auflösung)	4 Bänder (VIS, NIR)	1-3 Tage (je nach Region)	2008 - unbekannt	15 km	Hoch	EUSI/Maxar Technologies

GEDI (Global Ecosystem Dynamic Systems Investigation)	LiDAR	~25m footprints	-	keine direkte Wiederholrate, da nicht flächendeckend	2018 - geplant bis 2030 mit zeitlichen Lücken	-	Gering (Kostenfrei)	NASA
----------------------------------------------------------------------	-------	--------------------	---	------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---	------------------------	------

### 2.4.1 Optische Satellitendaten

Optische Sensortechnologien ermöglichen die Erfassung eines deutlich größeren Spektrums elektromagnetischer Wellenlängen als das menschliche Auge wahrnehmen kann, das im Wesentlichen auf drei Farben (Rot, Grün, Blau) reagiert. Im Bereich der Fernerkundung von Wäldern erweisen sich Aufnahmen im kurzwelligen Infrarot als besonders nützlich, da sie detaillierte Informationen über die Vegetation liefern können. Zu den am weitesten verbreiteten Satellitenbildern zählen die der Satellitenkonstellationen Sentinel-2, Landsat und MODIS. Die Daten dieser von staatlichen Institutionen betriebenen Systeme stehen kostenfrei zur Verfügung. Alle drei Systeme erfassen multispektrale Daten im sichtbaren Licht sowie dem nahen und kurzwelligen Infrarotbereich und eignen sich aufgrund ihrer zeitlichen Auflösung, und insbesondere Sentinel-2 und Landsat auch aufgrund der räumlichen Auflösung, zur Analyse einer Vielzahl an Forst- bzw. Waldparametern wie zum Beispiel Baumkronendichte (Ottosen et al. 2020), Bestandesvitalität (Thonfeld et al. 2022), Baumarten (Welle et al. 2022), Kronengrünheit/Kronenverlichtung (Buras & Rammig 2023) und der historischen Entwicklung von Waldgebieten (Senf & Seidl 2021a). Besonders Landsat, welches seit 1984 in Betrieb ist, bietet dabei wertvolle Langzeitdaten, beispielsweise zur Dynamik von Waldverlusten (Hansen et al. 2013, Viana-Soto & Senf 2024).

Trotz ihrer geringeren Auflösung haben Aufnahmesysteme, wie beispielsweise MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), einen hohen praktischen Nutzen für großflächige Analysen. Ihre Fähigkeit, die gesamte Erdoberfläche täglich zu erfassen, macht sie aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung zu einem wichtigen Instrument für die Überwachung von Waldbränden, die Beobachtung saisonaler Veränderungen (Phänologie) sowie die Analyse langfristiger Trends. Allerdings wird das MODIS System voraussichtlich nur bis 2026 zur Verfügung stehen, was eine Umstellung auf ähnliche Systeme wie beispielsweise VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) notwendig macht. Die Daten der räumlich hochauflösenden optischen Sensoren wie die von SPOT, Pleiades oder Planet werden üblicherweise kommerziell vertrieben und sind entsprechend mit zusätzlichen Datenkosten verbunden.

Hyperspektrale Satellitendaten, die eine sehr feine spektrale Auflösung besitzen, erfassen Hunderte von schmalen, eng beieinanderliegenden Spektralbändern über einen großen Teil des elektromagnetischen Spektrums. Mit Hilfe dieser nahezu kontinuierlichen Spektren, lassen sich

feinste Unterschiede im Reflexionsverhalten von Bäumen erkennen und detaillierte Analysen der Blattpigmente, Wassergehalte und Zellstruktur und somit auch Stresszustände durchführen. Aktuell verfügbare Systeme sind EnMAP (seit 2022 im Orbit) oder PRISMA, welche allerdings aufgrund Ihrer geringen räumlichen Abdeckung und eingeschränkten Wiederholrate nur für bestimmte Zwecke im Waldmonitoring geeignet sind. Zukünftige Missionen wie ESA's CHIME können hyperspektrale Daten weiter für die operationelle Ableitung von Forst- bzw, Waldparametern in Wert setzen.

Die Eignung optischer Daten für Anwendungen im Waldmonitoring wird häufig anhand Ihrer räumlichen Auflösung beschrieben. Illustration 3 zeigt einen Vergleich der räumlichen Auflösung unterschiedlicher Daten und Tabelle 2 zeigt beispielhaft die räumliche Auflösung/Anzahl Pixel unterschiedlicher Daten in Bezug auf unterschiedliche Flächengrößen.

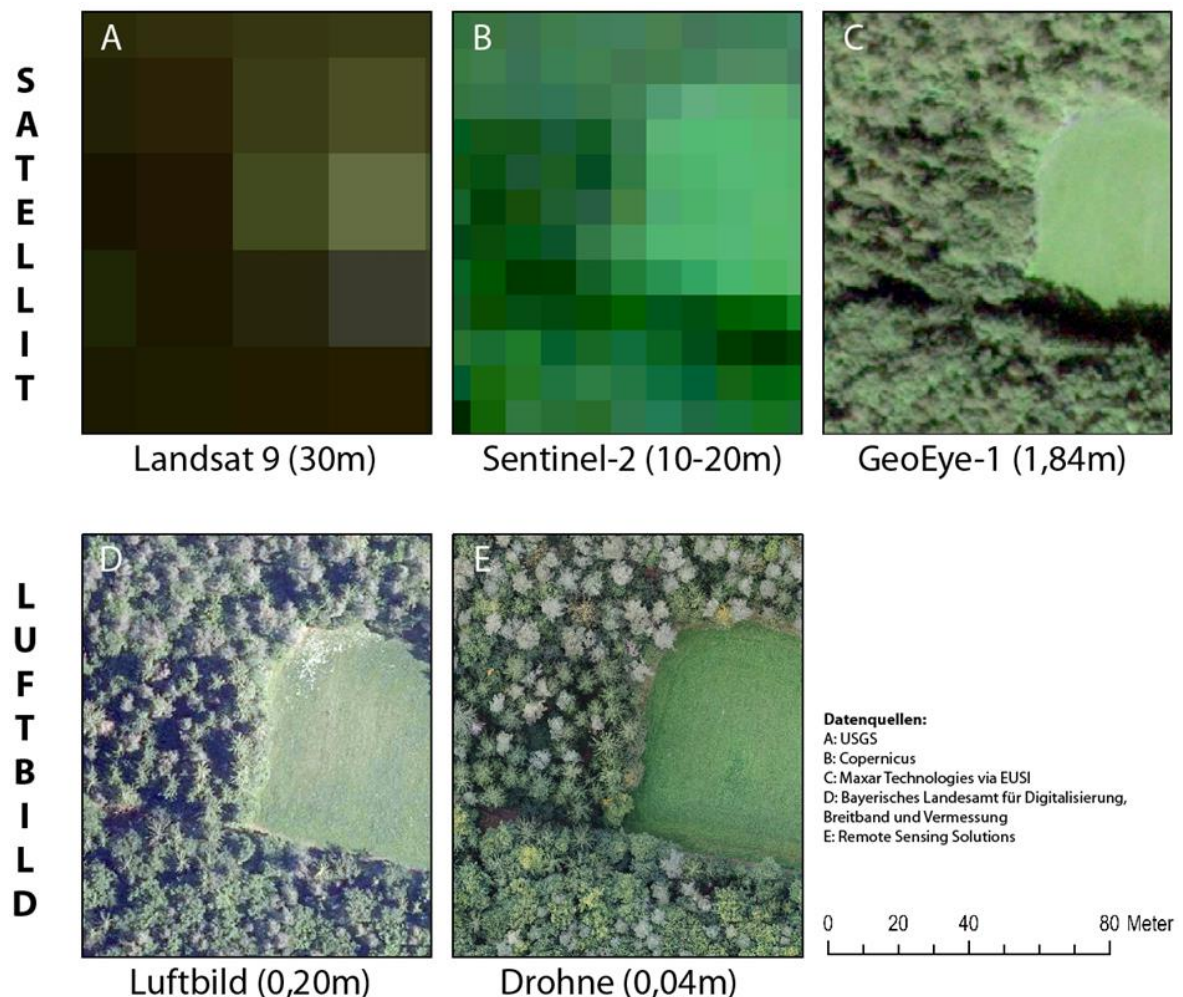


Illustration 2 | Visualisierung der räumlichen Auflösung verschiedener Fernerkundungsdaten optischer Sensoren (RGB Echtfarbandarstellung; Bilder stammen von unterschiedlichen Aufnahmequellen).

Tabelle 2| Räumliche Auflösung der Fern- und Naherkundungsdaten dargestellt im Verhältnis zur Flächengröße. Grün hervorgehoben: Auflösung und Monitoringfläche haben ein mindest geeignetes Verhältnis.

Datenquelle	Pixelauflösung [m]	Flächengröße [ha]					
		0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10,0
		<b>Theoretische Anzahl Pixel pro Flächeneinheit</b>					
Landsat 8/9	30	1	2	6	11	56	111
Sentinel-2	10	10	20	50	100	500	1000
PlanetScope	3,7	73	146	365	730	3652	7305
Befliegungsdaten	0,2	25.000	50.000	125.000	250.000	1.250.000	2.500.000
UAV Daten	0,05	400.000	800.000	2.000.000	4.000.000	20.000.000	40.000.000

## 2.4.2 Optische Luftbilddaten

Aus sehr hochauflösten Luftbildern lassen sich mittels Photogrammetrie Oberflächenmodelle (bDOM) ableiten, welche zur Berechnung von Baumhöhenmodellen herangezogen werden können. Photogrammetrie ist ein Verfahren, bei dem aus 2D-Bildern – z. B. von Drohnen- oder Flugzeug-getragenen Sensoren – mithilfe trigonometrischer Berechnungen 3D-Modelle erstellt werden, um z. B. Baumhöhen von Wäldern abzuleiten.

Diese Baumhöhenmodelle wiederum spielen nebst Informationen über die Baumartenzusammensetzung eine sehr wichtige Rolle für das Abschätzen der auf einer Fläche bestehenden Biomasse. Somit können Luftbild- oder UAV-basierte optische Daten, welche bisher meist nur eine geringe spektrale Auflösung haben (RGB/NIR), besonders für kleinräumige Analysen eine ergänzende Rolle spielen. Während sich optische Satellitendaten für Analysen auf Bestandesebene eignen, können Luftbild-gestützte Verfahren Informationen auf Einzelbaumebene liefern. Aber hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass auch die räumliche Abdeckung sowie die zeitliche Auflösung der Daten für Waldanwendungen sehr relevant sind. Da Drohnen in ihrer Reichweite begrenzt sind, und großflächige Luftbilderfassung mittels Flugzeugen sehr teuer ist, ist deren Einsatz für operationelles Waldmonitoring, das regelmäßig wiederkehrende Informationen benötigt, nur bedingt geeignet. Illustration 3 zeigt die Abdeckung und Aktualität der Luftbilddaten der Landesvermessungsämter in Deutschland, welche bisher in mehrjährigen und unterschiedlichen Rhythmen aufgenommen werden. Zudem gibt es zwischen den Bundesländern verschiedene Strategien, zu welcher Jahreszeit die Befliegungen durchgeführt werden. Eine deutschlandweit einheitliche Erfassung von Waldinformationen mittels der Daten der Landesvermessungsämter ist deswegen nicht möglich.

In Zukunft könnte Photogrammetrie auf Basis von Satellitendaten relevant werden, was das Skalierungsproblem lösen würde. Die Technologie ist derzeit jedoch noch in der Weiterentwicklung und zudem sehr teuer.

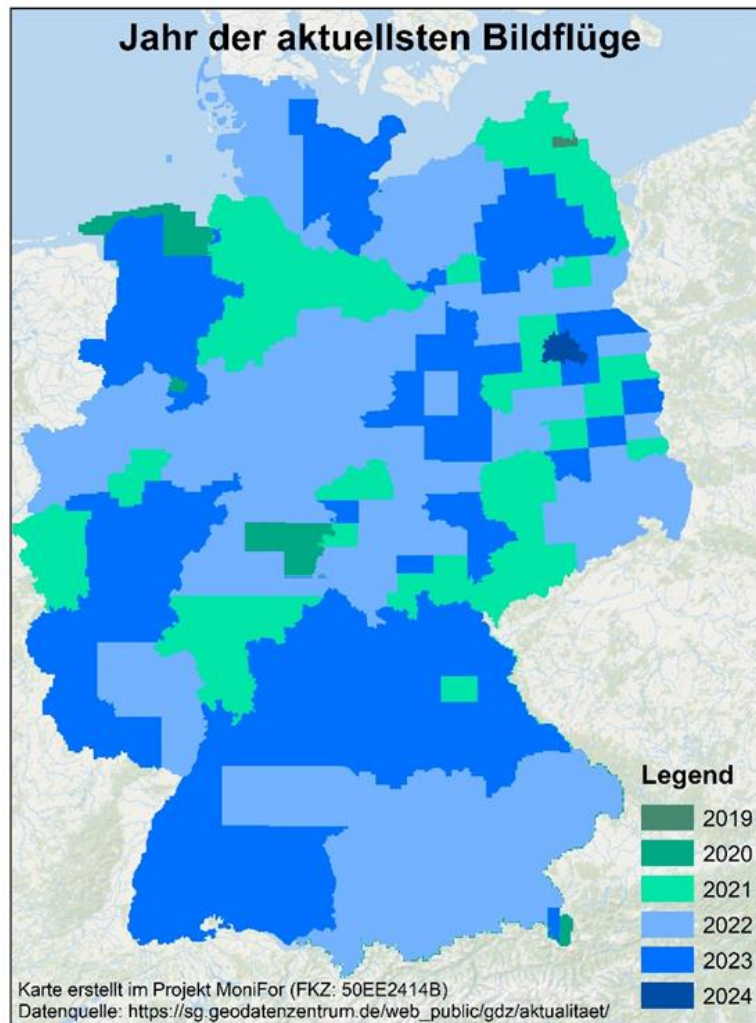


Illustration 3 | Abdeckung und Aktualität der Bildflüge, deren Daten über die Landesvermessungsämter zur Verfügung stehen. Diese Abdeckungen beinhalten Sommer- und Winterbefliegungen.

### 2.4.3 LiDAR

Light Detection and Ranging (LiDAR) gilt als führende Technologie in der Fernerkundung, um die 3D Struktur von Wäldern zu erfassen. Dabei wird vom Sensor ein Laserstrahl ausgesendet, dessen Rückstreuung nach dem Auftreffen auf Objekte gemessen wird, um präzise Entfernungen zu berechnen. Durch die hohe Dichte an Einzelmessungen bei Flugzeug-getragenen Sensoren kann so ein dreidimensionales Abbild der Waldstruktur erzeugt werden. Im Gegensatz zur Photogrammetrie wird dabei auch der Waldboden erfasst (Digitales Geländemodell DGM), da der Laser die Vegetationsdecke durchdringen kann. Diese Technologie ermöglicht die Erfassung von genauen Digitalen Oberflächenmodellen (DOM), welche unter Verrechnung mit dem DGM ein sehr genaues digitales Baum- und Vegetationshöhenmodell liefert (Illustration 4).

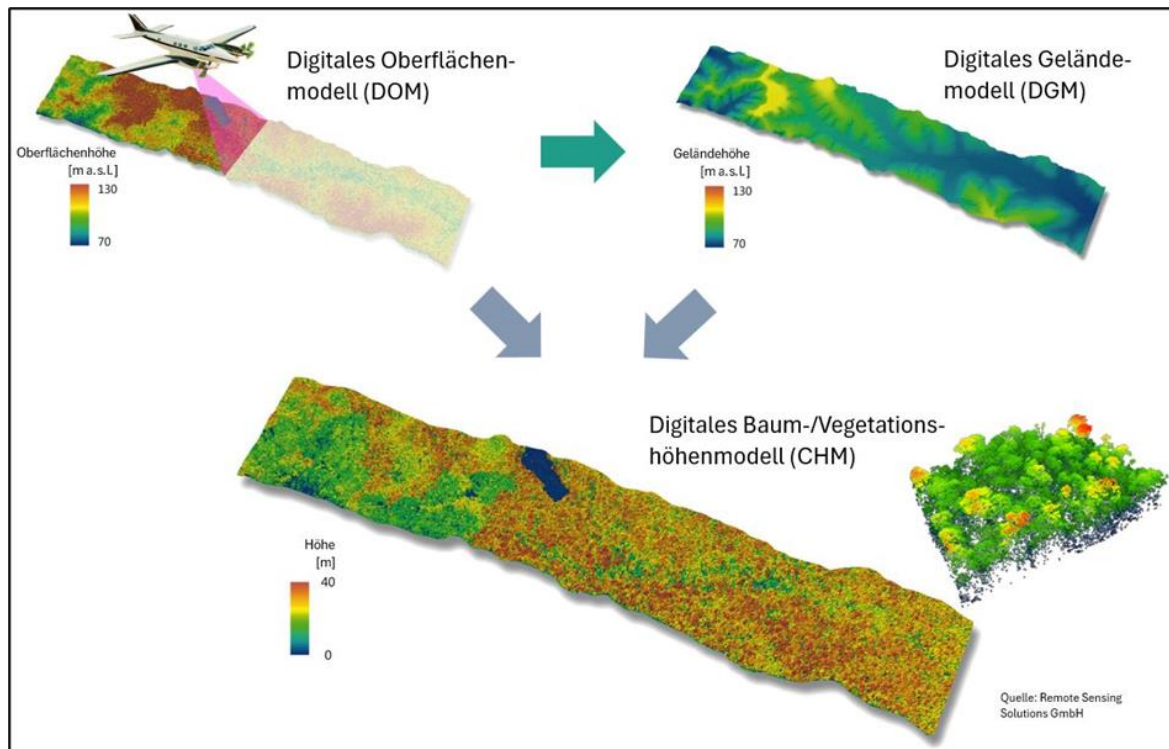


Illustration 4 | Airborne Laserscanning-abgeleitetes Digitales Oberflächenmodell (DOM) einer Waldfläche, Digitales Geländemodell sowie das resultierende Digitale Baumkronen-/Vegetationshöhenmodell (canopy height model CHM). Quelle: Remote Sensing Solutions GmbH

Diese detaillierte Erfassung ermöglicht die Ableitung vielfältiger forstlicher Parameter wie Kohlenstoffvorrat, Baumanzahl, Basalfläche und Holzvolumen, mit Ausnahme von Vitalitätsparametern und der Baumartenbestimmung. Die Bundesländer verfügen bereits über meist frei verfügbare, wenn auch veraltete LiDAR-Daten; einzelne Bundesländer stellen multitemporale LiDAR-Datensätze zur Verfügung. Der Erwerb aktueller LiDAR-Datensätze ist hingegen kostenintensiv und vergleichbar mit traditionellen terrestrischen Forstinventuren. Das Projekt „Digitaler Zwilling Deutschland“ des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) verfolgt das Ziel, ein umfassendes, dreidimensionales digitales Abbild Deutschlands zu erstellen. Ein zentrales Element des Projekts ist die Verwendung von LiDAR-Technologie, um hochauflösende 3D-Daten mit einer Punktdichte von mindestens 40 Punkten pro Quadratmeter zu erfassen. Diese Daten würden erstmalig eine aktuelle Abdeckung ganz Deutschlands liefern und könnten zur einheitlichen Ableitung von Waldstrukturparametern hervorragend genutzt werden. Allerdings muss auch hier die eingeschränkte Wiederholbarkeit einer solch großflächigen und teuren Datenerfassung für zukünftiges Waldmonitoring berücksichtigt werden.

Weltraumgestützte LiDAR-Systeme, wie das GEDI-Instrument (Global Ecosystem Dynamics Investigation), arbeiten mit deutlich geringerer Punktdichte und liefern keine vollständigen 3D-Modelle, sondern punktuelle Höhenprofile entlang der Flugbahn. Der Footprint einer Messung ist kreisförmig mit einem Durchmesser von 25 m. Die Daten liefern keine flächendeckenden Informationen, sondern in 60 m auseinanderliegenden Footprints entlang von Flugbahnen und auch nur bis ca. 51 Grad nördlicher Breite. Diese Daten eignen sich zur großflächigen Abschätzung

von Waldstrukturen (Kacic et al. 2023), sind jedoch für die Anwendung auf lokaler Ebene nur eingeschränkt nutzbar.

#### 2.4.4 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Radarsatelliten verfügen über aktive Sensoren, die Mikrowellen (Radarstrahlen) zur Erdoberfläche aussenden und die Rückstreuung von verschiedenen Erdoberflächen messen. Die verwendete Wellenlänge bestimmt dabei, wie tief die Strahlung in die Vegetation oder den Boden eindringen kann, was wiederum verschiedene Anwendungsmöglichkeiten bietet. Kurzwellige Radarsysteme wie C- und X-Band reflektieren hauptsächlich an der Baumkrone, was sie beispielsweise für die Ableitung von Strukturparametern der Waldoberfläche oder der Überwachung von Entwaldung eignet. Langwelliges Radar (L- und P-Band) hingegen kann in die Vegetation eindringen und Informationen über Strukturparameter im Waldbestand liefern, wobei das L-Band in dichten Wäldern an seine Grenzen stößt (Illustration 6). Mit dem erfolgreichen Start der neuen Biomass-Mission der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) wurde am 29. April 2025 ein neuartiges P-Band Radar System gestartet, um die Biomasse von Wäldern weltweit zu vermessen. Die gewonnenen Daten sollen helfen, die Kohlenstoffspeicherung in Wäldern besser zu verstehen und Veränderungen durch Entwaldung zu überwachen. Allerdings sind keine Aufnahmen über Mitteleuropa geplant (Carreiras et al. 2017).

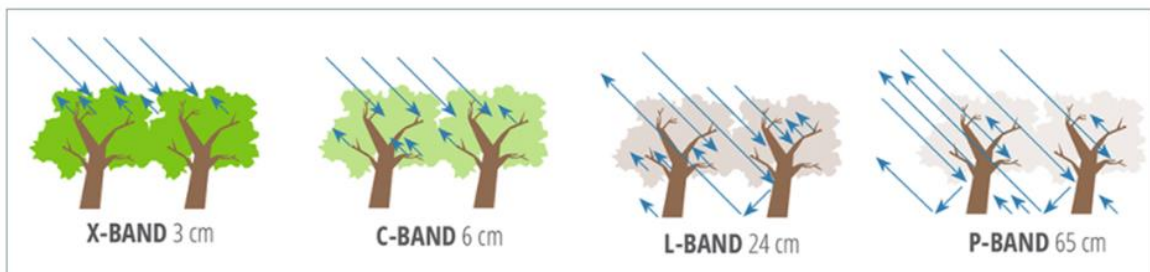


Illustration 5 | Sensitivität von SAR-Messungen gegenüber der Waldstruktur und dem Eindringen in das Blätterdach bei verschiedenen Wellenlängen, die für luft- oder satellitengestützte Fernerkundungsbeobachtungen der Landoberfläche verwendet werden. Quelle: NASA SAR Handbook.

Da Radardaten die Rückstreuung der Mikrowellen erfasst, welche in erster Linie durch die Struktur, Rauigkeit, Wassergehalt und Typ unterschiedlicher Erdoberflächen bestimmt wird, sind diese Daten nur komplementär zu optischen Daten geeignet (Schellenberg et al. 2023), um Vitalitätsparameter von Waldbeständen abzuleiten, da sie nicht die photosynthetische Aktivität wie optische Daten abbilden können. SAR-Daten werden insbesondere im Kontext tropischer Entwaldung verwendet (Reiche et al. 2021). Neueste Entwicklungen zeigen aber auch Anwendungen zur Detektion von Kahlflecken in den gemäßigten Breiten Mitteleuropas (Mermoz et al. 2024).

## 2.5 Übersicht über bestehende Monitoringsysteme

Es gibt eine Reihe an bereits bestehenden Waldmonitoringsystemen, bzw. auch operationelle Informationsprodukte, die zur Ableitung forstlich relevanter Parameter verwendet werden. Diese bestehenden Systeme/Produkte lassen sich in zwei Kategorien je nach räumlicher Skala unterscheiden, nämlich globale/kontinentale Systeme und nationale/regionale Systeme. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 3 dargestellt.

### 2.5.1 Globale/kontinentale Waldmonitoringsysteme und -produkte

Eines der am häufigsten verwendeten Systeme ist **Global Forest Watch (GFW)**, eine Online-Plattform, die vom World Resources Institute (WRI) betrieben wird (<https://www.globalforestwatch.org/>). Sie stellt Informationen zur weltweiten Waldbedeckung bereit, welche in erster Linie mittels Landsat Satellitendaten erfasst werden. GFW liefert Informationen zur Entwaldung, Wiederaufforstung und andere Veränderungen der Waldfläche und stellt diese visuell dar. Die Plattform kombiniert öffentlich zugängliche Datenquellen (wie Landsat, MODIS) mit cloudbasierter Verarbeitung über z. B. Google Earth Engine. Obwohl GFW wertvolle globale Einblicke liefert, stößt die Plattform bei regionalen oder lokalen Monitoring-Anforderungen oft an Grenzen. Die Gründe liegen hauptsächlich in der räumlichen Auflösung, Datenfrequenz und fehlender regionaler Kalibrierung. Die übliche Auflösung von 30 m (Landsat) mit einer zudem geringen zeitlichen Auflösung ist für einige Anwendungen zu grob. Zudem haben globale Systeme wie GFW meist eine gute globale Genauigkeit der Ergebnisse, jedoch eine geringere regionale/lokale Präzision, da keine Kalibrierung an regionalen Gegebenheiten stattfindet. Daher können selektive Holzentnahmen, Windwurf oder Krankheiten teilweise unentdeckt bleiben. Der Fokus von GFW liegt auf den Tropen, für die es Nahe-Echtzeitfrühwarnsysteme gibt, sogenannte Near-Real Time Alerts, sowie kombinierte Produkte aus einzelnen Monitoringsystemen (Reiche et al. 2024).

Der **Waldzustandsmonitor Europa** ([app.forestmonitoringhub.eu](http://app.forestmonitoringhub.eu)) verwendet einen auf MODIS-basierenden Vegetationsindex (NDVI) und deckt seit 2001 große Teile Europas (~1.580.000 km<sup>2</sup>) mit einer räumlichen Auflösung von 5,5 ha pro Pixel ab. Zwei Produkte werden angeboten: pixel- und taggenaue NDVI-Quantile sowie proportionale Abweichungen vom Median (Buras et al., 2021). Aus den Zeitreihen werden die beiden oben genannten Produkte abgeleitet. Die Studie zeigt, dass diese Produkte verschiedene Störungsursachen wie Trockenheit, Spätfrost, Absterben oder Eisbruch zuverlässig widerspiegeln. Es existiert auch eine deutsche Variante, der Waldzustandsmonitor Deutschland, welcher im nächsten Kapitel beschrieben ist.

Zudem werden fernerkundungsbasierte Waldinformationen vom **Copernicus-Landüberwachungsdienst (CLMS)** bereitgestellt, mit dem Ziel, allen europäischen Bürgerinnen und Bürgern Informationen über die Umwelt zur Verfügung zu stellen (Website: <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/land>). Der Dienst stellt verschiedene Waldrelevante Daten zur Verfügung, wie zum Beispiel die CORINE Landbedeckungsklassifikation, die in drei Klassen unterteilt ist (Laubwald, Nadelwald und Mischwald) und eine räumliche Auflösung

von einem Hektar pro Pixel aufweist. Zusätzlich sind mit dem „High Resolution Layer Forest Type“ höher auflösende Karten verfügbar, die Informationen über die Waldfläche sowie den vorherrschenden Blatttyp (Laubbäume oder Nadelbäume) mit einer räumlichen Auflösung von 10 bzw. 20 m liefern (<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover>).

Das **Joint Research Center (JRC)** bietet eine globale Karte der Waldbedeckung für das Jahr 2020 mit einer räumlichen Auflösung von 10 m an (<https://forobs.jrc.ec.europa.eu/GFC>). Das Jahr 2020 entspricht dem Stichtag der EU-Entwaldungsverordnung (EUDR). Im Rahmen der EUDR kann die Karte der globalen Waldbedeckung als nicht obligatorische, nicht exklusive und nicht rechtsverbindliche Informationsquelle verwendet werden.

Die **Climate Change Initiative (CCI) der Europäischen Weltraumorganisation (ESA)** bietet einen globalen Datensatz der Schätzung oberirdischer Biomasse von Wäldern für die Jahre 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 und 2021 an (<https://climate.esa.int/en/projects/biomass/data/>). Die Daten basieren je nach Jahr auf Daten der Copernicus Sentinel-1-Mission, dem ASAR-Radarinstrument von Envisat und den ALOS-Satelliten (ALOS-1 und ALOS-2) der japanischen Raumfahrtagentur JAXA. Ergänzend wurden weitere Erdbeobachtungsdaten einbezogen.

Das **Global Land Analysis and Discover team der University Maryland** hat eine globale Waldhöhenkarte mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern erstellt (zwischen 52°N und 52°S), indem Messungen der Vegetationsstruktur des GEDI-Lidar-Instruments mit Zeitreihendaten von Landsat kombiniert wurden (Potapov et al. 2020). Das UMD GLAD-Team integrierte GEDI-Daten (April–Oktober 2019) mit Landsat-Daten aus dem Jahr 2019. Zur Kalibrierung wurde der GEDI-RH95-Wert (relative Höhe bei 95 %) verwendet, während Landsat-Zeitreihenmetriken zur Modellierung der globalen Waldhöhe dienten. Die resultierende Karte ist ein Prototyp und weist bekannte Probleme auf, etwa eine Überschätzung der Baumhöhe in Hanglagen sowie Ungenauigkeiten durch Kalibrierungsfehler, z. B. bei der Standortgenauigkeit oder der Einschätzung der Bodenhöhe. Außerdem sättigt das Modell ab einer Höhe von 30 m und erfasst sehr hohe Bäume nicht zuverlässig. Auch **Lang et al. (2023)** haben eine globalen Baumhöhenlayer, den „**ETH Global Sentinel-2 10m Canopy Height (2020)**“ Datensatz veröffentlicht, welcher Baumkronenhöhen mit einer räumlichen Auflösung von 10m für das Jahr 2020 wiedergibt (<https://gee-community-catalog.org/projects/canopy/>). Er wurde durch die Anwendung maschinellen Lernens auf Sentinel-2-Satellitenbilder in Kombination mit GEDI-Lidar-Daten entwickelt. Ein weiteres globales Baumhöhenmodell wurde im Rahmen einer Kooperation zwischen **Meta und dem World Resources Institute** entwickelt (Tolan et al. 2024). Der Global Canopy Height Maps-Datensatz liefert Informationen zur weltweiten Baumkronenhöhe im Zeitraum von 2009 bis 2020 auf Basis von Luftbildern, wobei etwa 80 % der zugrunde liegenden Bilddaten aus den Jahren 2018 bis 2020 stammen. Es wird eine mittlere absolute Höhenabweichung von 2,8 Metern angegeben, jedoch bestehen sehr große lokale Unsicherheiten, da sehr unterschiedliche Luftbilddaten verwendet wurden, was einen Vergleich zweier Waldstandorte erschwert.

Eine weitere Arbeit mit Bezug zur Waldstruktur zielte auf die Erstellung einer Baumhöhenkarte und einer Biomassenkarte für Europa ab (Liu et al. 2023). Dabei wurde ein Modell mittels flugzeuggetragenen LiDAR-Daten aus Dänemark, Niederlande, Schweiz, Estland, Spanien, Finnland und Wales trainiert, um flächendeckend für Europa auf Basis hochauflösender optischer Planet-Daten (mit 3 m räumlicher Auflösung) Baumhöhen für alle Bäume größer als 3 m zu erfassen. Der Fokus der Arbeit lag auf Bäumen außerhalb geschlossener Waldflächen, allerdings sind alle Waldflächen im Produkt enthalten. Die Daten repräsentieren das Jahr 2019, könnten aber theoretisch für jedes weitere Jahr modelliert werden, sofern die optischen Daten verfügbar sind. Eine Version in reduzierter Auflösung von 30 m ist frei verfügbar (<https://zenodo.org/records/8154445>); die volle Auflösung kann bei den Autoren angefragt werden.

Allerdings leiden viele der globalen/kontinentalen Systeme und Informationsprodukte entweder unter einer geringen räumlichen Auflösung oder unter fehlender Informationstiefe, meist bedingt durch fehlende nationale oder regionale Kalibrierung, was ihre Nutzbarkeit zur Unterstützung von Managemententscheidungen und ökologischen Bewertungen auf nationaler und subnationaler Ebene einschränkt (EC JRC, 2016). Aus diesem Grund wurden verschiedene Waldmonitoringsysteme und Informationsprodukte auf nationaler Ebene mithilfe hochauflösender Satellitendaten und neuer Ansätze im Bereich des maschinellen Lernens entwickelt, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden.

## **2.5.2 Nationale Waldmonitoringsysteme und -produkte (Deutschland)**

### **2.5.2.1 Waldzustandsmonitor für Deutschland (TUM)**

Eine deutsche Variante des oben beschriebenen Europäischen Waldzustandsmonitors, der Waldzustandsmonitor, bietet eine höhere zeitliche Auflösung (8 Tage statt 16 Tage) und kürzere Verzögerungszeiten (5-6 Wochen). Dieser berücksichtigt die jahreszeitlich bedingte Phänologie und verbessert die Darstellung tatsächlicher Störungen. Die Produkte des Waldzustandsmonitors werden laufend aktualisiert und stehen mit einer Verzögerung ca. 6 Wochen für den Download zur Verfügung ([app.waldmonitoringzentrum.de](http://app.waldmonitoringzentrum.de)).

Eine kürzlich erschienene Studie konnte einen statistisch signifikanten Zusammenhang ( $r^2$  zwischen 25 % und 64 %) zwischen der in der Waldzustandserhebung erfassten Kronenverlichtung und den Produkten des Waldzustandsmonitors nachweisen (Buras und Rammig, 2023). Im Rahmen des Projektes Wald-PULS (Waldklimafonds, Laufzeit bis Juni 2026) ist eine weitere Optimierung des Waldzustandsmonitors geplant.

### 2.5.2.2 Forest Condition Monitor (UFZ)

Das vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) geleitete Projekt „Forest Condition Monitor“ (<https://web.app.ufz.de/waldzustandsmonitor/>) zielt darauf ab, Informationen über den Zustand der Wälder in Deutschland auf nationaler Ebene für Entscheidungsträger, Wissenschaft und Öffentlichkeit bereitzustellen. Es verwendet einen kontinuierlichen Index namens Forest Condition Anomaly (FCA), entwickelt von Lange et al. (2024). Der FCA-Index berechnet regionalisierte, baumartenspezifische Reflexionsabweichungen in Sentinel-2-Zeitreihen zur Schätzung von Anomalien im Waldzustand. Dabei werden Wellenlängenbereiche integriert, die indikativ für Produktivität, Blattfläche und Wassergehalt stehen. Zur Korrektur regional variierender Phänologie wird das R-Paket „phenex“ (Lange & Doktor, 2017) verwendet. Die daraus resultierenden, baumartenspezifischen Zeitreihen bilden die natürliche Bandbreite der Reflexionswerte ab. Auf Basis dieser Referenzzeitreihen wird ein Ähnlichkeitsmaß (FCA) für jede Beobachtung berechnet. Die zeitliche Aggregation ermöglicht die Erstellung von FCA-Karten mit 20 m Auflösung seit 2016.

### 2.5.2.3 Waldmonitor Deutschland (RSS/NWA)

Die kostenfreie Anwendung Waldmonitor Deutschland (<https://waldmonitor-deutschland.de/>) wurde von der Naturwald Akademie (NWA) und der Remote Sensing Solutions (RSS) zur kontinuierlichen Überwachung des Waldzustands in Deutschland entwickelt. Der Waldmonitor beinhaltet eine Karte der dominanten Hauptbaumarten (Welle et al. 2022), liefert Vitalitätstrends für Laub- und Nadelwälder und Feuchtigkeitsgehaltstrends für Laubwälder seit 2017, sowie Schadflächen seit 2017, alles basierend auf Sentinel-2 Daten in 10m räumlicher Auflösung. Der Waldvitalitätstrend basiert auf Änderungen der saisonalen maximalen NDVI-Werte sowie Änderungen des Feuchtigkeitsgehalts basierend auf dem NDWI zur Hauptvegetationszeit (2016–2024). Ebenfalls werden fortlaufend aktuelle Feuer der letzten 7 Tage dargestellt.

### 2.5.2.4 ForestWatch (LUP)

ForestWatch, bereitgestellt von der LUP - Luftbild Umwelt Planung GmbH (<https://forestwatch.lup-umwelt.de/>), bietet eine umfassende Darstellung von Vitalitätsveränderungen im deutschen Wald in Form prozentualer Vitalitätsveränderungen (*VCP - Vitality Change Percentage*). Der verwendete Index reagiert besonders empfindlich auf Veränderungen bei Blattpigmenten und Wassergehalt in den Blättern. Die aktuelle VCP-Version basiert auf Sentinel-2-Bildern unter Ausschluss von Szenen mit einer Wolkenwahrscheinlichkeit von über 15 %. Zur Verbesserung der Genauigkeit wird eine eigene Gehölzflächenmaske verwendet. Die Analyse basiert auf prozentualen Vergleichen monatlicher Komposite des *Disease Water Stress Index* (Galvão et al. 2005), wobei das Jahr 2017 als Referenz dient. Für jedes Jahr werden drei Monatskomposite von Juni bis August gebildet und zur Medianbildung verwendet. Anschließend wird die prozentuale Abweichung zum Referenzjahr berechnet. Die resultierenden Abweichungen werden in sechs Klassen eingeteilt (aktuelle Version: 7 Klassen), was eine

vergleichende Visualisierung der letzten sechs Jahre bei 10 m räumlicher Auflösung ermöglicht. Zusätzlich sind in der aktuellen Version von ForestWatch weitere Analyseergebnisse (z.B.: Harmonisches Modell, Stehendes Totholz) und Auswertemethoden (z.B.: Zeitreihenanalyse) integriert.

#### 2.5.2.5 Produkte des FNEWs Projekts (Thünen Institut)

Das Projekt "Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden" (FNEWs) hat ein nationales fernerkundungsbasiertes Erfassungssystem für Waldschäden aufgebaut. Die Laufzeit war vom 01.05.2020 bis zum 31.12.2023. Die Ergebnisse des Projekts sind wie folgt:

- Entwicklung eines weitgehend automatisierten Systems, das durch biotische und abiotische Schadereignisse abgestorbene Waldflächen erkennt und ausweist.
- Die minimal erfasste Schadflächengröße des Jahresproduktes wurde von 0,25 ha auf 0,1 ha verbessert.
- Die Flächenvorgabe wurde für die Schnellerkennung von 0,5 ha auf 0,25 ha verbessert.
- Ein Bewertungsrahmen für die ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden wurde entwickelt, der die wichtigsten Schadenskomponenten umfasst.
- Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass die langfristigen ökonomischen Auswirkungen einen Großteil der wirtschaftlichen Verluste für die Forstwirtschaft ausmachen.
- Die Genauigkeit des Jahresproduktes liegt bei  $\geq 95\%$ , was gute bis sehr gute Genauigkeiten aufweist.
- Die Validierung des Jahresproduktes bestätigt dessen hohe Aussagekraft und gute Anwendbarkeit für die Praxis.
- Die Ergebnisse des Projekts wurden in Form von Geodaten und einer Datenbasis für die Auswertungen des Projektes bereitgestellt, darunter die Holzbodenmaske 2018, die Baumartengruppenkarte und die Holzvorratskarte.

Insgesamt hat das Projekt FNEWs die Grundlagen für ein kontinuierliches bundesweites Monitoring der ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden gelegt und einen wichtigen Schritt in Richtung einer verbesserten Waldschadensdetektion und -bewertung gemacht. Die Ergebnisse des Projekts können als Grundlage für weitere Forschungen und Anwendungen in der Forstwirtschaft und Umweltüberwachung dienen.

#### 2.5.2.6 Produkt zur Erfassung von Baumkronenverlusten (DLR)

Das Produkt zur Erfassung von Baumkronenverlusten (FCCL), bereitgestellt vom Earth Observation Center (EOC) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) (<https://geoservice.dlr.de/web/datasets/tccl>), nutzt monatliche Disturbance Index Komposite, um Flächen mit Baumkronenverlust zu identifizieren, d. h. Bereiche mit entfernten Bäumen wie Kahlschläge oder Flächen mit abgestorbenen Bäumen. Durch den Vergleich dieser Komposite mit

einem Referenzkomposit, wie von Thonfeld et al. (2022) beschrieben, erfasst das Produkt effektiv Baumkronenverluste in Deutschland von Januar 2018 bis April 2021. Der Datensatz wurde mit einer verbesserten Methode neu prozessiert und umfasst nun den Zeitraum September 2017 bis September 2024 in monatlicher Auflösung (<https://doi.org/10.15489/ef9wwc5sff75>). Die Ergebnisse werden zudem auf <https://eowald.dlr.de/> visualisiert. pixelbasierte Ansatz nutzt Sentinel-2- und Landsat-8/9-Oberflächenreflexionsdaten mit weniger als 80 % Wolkenbedeckung bei einer Pixelauflösung von 10 m zur Analyse von Wäldern. Basierend auf sechs Spektralbändern im sichtbaren, nahen Infrarot- und kurzwelligen Infrarotbereich wird die Methode der Tasseled Cap (TC) Komponenten verwendet, wobei Helligkeit, Grünanteil und Feuchtigkeit anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen aus einer repräsentativen Waldmaske standardisiert werden. Zur Erstellung monatlicher Komposite aus der DI-Zeitreihe wird der 10. Perzentilwert als konservatives Maß verwendet, um Ausreißer durch Restwolken oder Wolkenschatten zu minimieren. Anschließend wird ein fester Schwellenwert auf die Abweichung der monatlichen DI-Komposite im Vergleich zum Median-DI von 2017 angewendet. Das finale FCCL-Produkt kartiert alle Vorkommnisse, bei denen dieser Schwellenwert mindestens sechsmal in Folge überschritten wurde. Der vom DLR verwendete

#### 2.5.2.7 Produkt zur Waldstrukturkartierung (DLR)

Dieses Waldinformationsprodukt liefert jährliche Informationen zur Waldstruktur in Deutschland mit einer räumlichen Auflösung von 10 m ([https://geoservice.dlr.de/web/datasets/forest\\_structure](https://geoservice.dlr.de/web/datasets/forest_structure)). Es umfasst Daten zur Baumkronenhöhe, Gesamtbaumkronenbedeckung und oberirdischen Biomassedichte (AGBD) für die Jahre 2017-2023. Die Datensätze wurden mittels eines maschinellen Lernverfahrens erstellt, das verschiedene satellitengestützte Fernerkundungssysteme kombiniert: GEDI (NASA, Full-Waveform-LiDAR), Sentinel-1 (ESA, C-Band Radar) und Sentinel-2 (ESA, multispektral). Die GEDI-Stichproben wurden auf Grundlage raum-zeitlicher Komposite von Sentinel-1 und -2 auf 10 m aufgelöst modelliert. Es handelt sich um die ersten konsistenten deutschlandweiten Datensätze dieser Art, die eine quantitative Analyse der jüngsten Waldstrukturveränderungen, etwa infolge wiederholter Dürreereignisse seit 2018, ermöglichen. Eine ausführliche Methodendarstellung findet sich in der Publikation von Kacic et al. (2023).

#### 2.5.2.8 Produkt zur bestockten Holzbodenfläche und zu dominierenden Hauptbaumarten (Thünen Institut)

Das Thünen-Institut bietet in seinem Thünen-Atlas ([atlas.thuenen.de](https://atlas.thuenen.de)) Karten zum Wald an, die eine deutschlandweite Übersicht geben zur bestockten Holzbodenfläche ([https://atlas.thuenen.de/catalogue/csw\\_to\\_extra\\_format/792b588a-5acf-11ed-862a-0242ac130006/bestockte-holzbodenkarte-2018.html](https://atlas.thuenen.de/catalogue/csw_to_extra_format/792b588a-5acf-11ed-862a-0242ac130006/bestockte-holzbodenkarte-2018.html)) – also der Fläche, auf der Bäume wachsen – und zu den dominierenden Baumarten (Blickensdörfer et al. 2024; <https://atlas.thuenen.de/catalogue/#/dataset/100>). Die Karten sind nicht nur wichtige Informationsquellen für Behörden, Politik, NGOs und Verbände, sondern können auch für

weiterführende Forschung und für Bildungszwecke im Bereich Wald und Umwelt genutzt werden. Die digitalen Karten haben eine Auflösung von 10 m x 10 m. Die Karte der dominierenden Baumarten basiert auf Sentinel-Satellitendaten.

Tabelle 3| Räumliche Übersicht bestehender Waldmonitoringsysteme und -produkte auf nationaler Skala. Diese Tabelle hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gibt eine Vielzahl an Produkten zu Waldzustand, Waldschäden, Waldstruktur, Baumarten usw. auf Ebene der Bundesländer.

Monitoringsystem/Informationsprodukt	Verwendete EO-Daten	Abdeckung
<b>Global Forest Watch (GFW)</b>	Landsat, MODIS	Global
<b>Waldzustandsmonitor Europa</b>	MODIS	Kontinental (Europa)
<b>HRL Forest - Copernicus Landüberwachungsdienst (CLMS)</b>	Sentinel-2, Landsat, weitere EO-Daten	Kontinental (Europa)
<b>JRC Global Tree Cover Map (2020)</b>	Sentinel-2	Global
<b>ESA CCI Biomass</b>	Sentinel-1, ASAR, ALOS-1/-2, weitere EO-Daten	Global
<b>UMD Waldhöhenkarte (2019)</b>	GEDI LiDAR (RH95), Landsat	Global (52°N–52°S)
<b>ETH Waldhöhenkarte (2020)</b>	GEDI, Sentinel-2	Global
<b>Global Canopy Height (Meta/WRI)</b>	Luftbilddaten (80 % aus 2018–2020)	Global
<b>Waldzustandsmonitor Deutschland (TUM)</b>	MODIS	National (Deutschland)
<b>Forest Condition Monitor (UFZ)</b>	Sentinel-2	National (Deutschland)
<b>Waldmonitor Deutschland (RSS/NWA)</b>	Sentinel-2, MODIS, VIIRS	National (Deutschland)
<b>ForestWatch (LUP)</b>	Sentinel-2	National (Deutschland)
<b>Produkt Forest Change Index (Thünen Institut)</b>	MODIS	National (Deutschland)
<b>Produkt Baumkronenverluste (DLR)</b>	Sentinel-2, Landsat-8	National (Deutschland)
<b>Produkt Waldstrukturprodukt (DLR)</b>	GEDI LiDAR, Sentinel-1, Sentinel-2	National (Deutschland)
<b>Produkt Holzbodenfläche &amp; Baumarten (Thünen-Atlas)</b>	Sentinel-2	National (Deutschland)

## 2.6 Eignung von existierender Nah- und Fernerkundungssysteme und -daten für Waldanalysen

Folgendes Kapitel gibt einen Kurzüberblick über methodisches Vorgehen bzw. state-of-the-art Methoden um Waldzustandserfassung und Bewirtschaftungseinflüsse sowie Quellen- und Senkenfunktion mittels Fernerkundungsdaten abzubilden.

### 2.6.1 Eignung existierender Nah- und Fernerkundungssysteme zur Erfassung von Waldzustand und Bewirtschaftungseinflüssen

Der Waldzustand umfasst verschiedene Aspekte wie Baumgesundheit, Wachstum und Widerstandsfähigkeit, die wesentliche Indikatoren für das allgemeine Wohlbefinden des Ökosystems sind. Das Verständnis der Faktoren, die den Waldzustand beeinflussen, und die Fähigkeit, diesen genau zu bewerten, sind entscheidend für rechtzeitige Interventionen, Strategien zur Schadensbegrenzung und den Erhalt von Waldökosystemen angesichts von Umweltstressoren (Anderegg et al. 2013). Der Zustand des Waldes kann daher gemäß der hier vorgestellten Forstparameter definiert werden (Kapitel 2.7).

Mittels optischer Satellitendaten gibt es mehrere Optionen zur Erfassung von Veränderungen des Waldzustands (Fassnacht et al., 2024; Kennedy et al. 2010; Lechner et al. 2020). Die bisher am häufigsten verwendeten Satellitenmissionen sind MODIS, Sentinel-2 und Landsat. Alle diese Satelliten liefern Informationen des spektralen Rückstreuerverhaltens von Vegetation, was eine Ableitung der photosynthetischen Aktivität ermöglicht (Myneni et al. 1995). Die Intensität der Absorption/Rückstreuung von Vegetation des sichtbaren Lichts (RGB) und des nahen Infrarots (NIR, 750-1400 nm) wird stark von der Vitalität der Vegetation beeinflusst (Singh et al. 2022), und das Absorption-/Rückstreuerverhalten im kurzwelligen Infrarot (SWIR, 1400-3000 nm) ist insbesondere durch die Zellstruktur und den Feuchtigkeitsgehalt in den Blättern der Vegetation beeinflusst. Durch die Kombination dieser spektralen Bänder können somit beispielsweise verschiedene Indizes berechnet werden, welche in Bezug zur Vitalität von Vegetationsbeständen stehen. Unter Verwendung dieser spektralen Informationen optischer Fernerkundungsdaten, wurde eine Reihe von Informationsprodukten zur Erfassung von Waldvitalität entwickelt (siehe Tabelle 3). Die dort aufgeführten sechs nationalen Produkte (Waldzustandsmonitor Deutschland (TUM), Forest Condition Monitor (UFZ), Waldmonitor Deutschland (RSS/NWA), ForestWatch (LUP), Produkt Forest Change Index (TI), Produkt Produkt Baumkronenverluste (DLR)) basieren alle auf verschiedenen Spektralbandkombinationen und Indizes wie den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, (Tucker et al. 1979)) den Enhanced Vegetation Index (EVI, (Huete et al. 2002)), den Disease Water Stress Index (DWSI, (Apan et al. 2004)), oder den Normalized Difference Moisture Index (NDMI, (Hardisky et al. 1983)). Diese bestehenden Methoden/Produkte der Fernerkundung bilden eine fundierte Basis für ein zukünftiges nationales Verfahren zum Monitoring von Waldvitalität.

Da unterschiedliche Einflüsse und Störungen sehr ähnliche Veränderungen des Absorptions-/Rückstreuverhalten von Waldbeständen bewirken können, lassen sich ohne Kontext- oder Bodeninformationen häufig keine gesicherten Rückschlüsse auf den Grund der Veränderung ableiten. Somit ist ein Monitoring von Vitalitätsveränderungen möglich, aber eine Bewertung von Bewirtschaftungseinflüssen kann nur bedingt erfolgen. Zudem erlaubt die optische Fernerkundung ein Monitoring der obersten Vegetationsschicht (Kronen), wodurch eine Erfassung von Bewirtschaftungseinflüssen die nur im Unterstand erfolgen (z.B. Pflanzungen im Unterstand, Rückegassen) nicht erfasst werden können. Lediglich LiDAR Daten könnten diese Phänomene teilweise abbilden.

### **2.6.2 Eignung existierender Nah- und Fernerkundungssysteme zur Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion**

Die CO<sub>2</sub> Speicherkapazität von Wäldern ist bedeutend für den Klimaschutz. Diese Senkenfunktion, bzw. bei negativer Bilanz die Quellenfunktion, lässt sich anhand von Änderungen der oberirdischen Biomasse abschätzen, da darin das von den Bäumen aufgenommene CO<sub>2</sub> als Kohlenstoff C gespeichert wird. Methoden zur Schätzung der oberirdischen Biomasse mittels Nah- und Fernerkundung sind vielfältig, je nachdem welche Eingangs- und Referenzdaten zur Verfügung stehen. Keine Nah- und Fernerkundungstechnologie erfasst Biomasse direkt, sondern nutzt meist fernerkundlich abgeleitete Struktureigenschaften des Waldbestandes und setzt diese in Bezug zur Biomasse. Daher sind repräsentative Referenzdaten zur Biomasse unerlässlich. Die genaueste Methode ist die Verknüpfung der aus der Fernerkundung abgeleiteten Indikatoren der Bestandsstrukturen mit vor Ort erhobenen Waldinventurdaten, was eine gebietsspezifische Biomasse-Modellierung über allometrische Modelle ermöglicht. Je genauer die Allometrien, die aus Gebiets-repräsentativen Inventurdaten abgeleitet wurden, sind, desto genauere Informationen über den gebietsspezifischen Kohlenstoffvorrat können fernerkundlich abgeleitet werden. Globale Biomasseprodukte sind sehr gut geeignet um den globalen Kohlenstoffgehalt in der Vegetationsbedeckung zu schätzen, sind aber meist für die Schätzung nationaler, regionaler oder lokaler Quellen- und Senkenfunktionen von Wäldern zu ungenau, da keine Gebiets-spezifische Kalibrierung mit repräsentativen Referenzdaten erfolgt ist.

Zur Schätzung der Biomasse über Strukturparameter werden meist Satelliten-basierte SAR-Sensoren (unterschiedlicher Frequenzen; siehe Illustration 6), Flugzeug-getragene Laserscanner (LiDAR) oder eine Kombination aus verschiedenen Sensoren (z.B. Satelliten-basiertes LiDAR mit optischen und/oder SAR-Satellitendaten) verwendet. Bei den SAR-basierten Methoden, haben Daten die in einer längeren Wellenlänge aufgenommen werden (z.B. L-Band, P-Band), Vorteile für die Biomasseschätzung, da kürzere Wellenlängen wie das C-Band (z.B. wie Sentinel-1) das Blätterdach des Waldes nicht so leicht durchdringen kann und somit hauptsächlich die Struktur des oberen Blätterdach erfasst wird. Daher bringen die zukünftigen Daten der kürzlich gestarteten ESA Biomass Mission (P-Band SAR) die notwendigen technischen Möglichkeiten mit,

Strukturinformationen des Waldes durch tiefere Durchdringung zu erhalten. Leider werden über Deutschland keine Daten des Biomass-Sensors zur Verfügung stehen.

Da das Laserscanning (LiDAR) es ermöglicht die Vegetationsstruktur in 3-dimensionalen Punktwolken abzubilden, sind diese Daten am Besten geeignet um Biomasseschätzungen durchzuführen. Dabei kann die Vegetationsstruktur durch verschiedene Metriken gut beschrieben werden, um die Biomasseschätzung zu präzisieren. Neben der sehr wichtigen Baumhöheninformation kann dabei auch das Vegetationsvolumen im Unterstand abgeleitet werden. Somit stellen Flugzeug-getragene LiDAR-Daten die beste Datengrundlage zur Biomasseschätzung dar, wobei ein flächendeckendes Monitoring (also eine regelmäßig wiederkehrende Erfassung) der Quellen- und Senkenfunktion von Wäldern auf nationaler Ebene aufgrund der großen finanziellen und technischen Aufwände keine realistische Option darstellt. Zwar soll mit dem digitalen Zwilling Deutschland zum ersten Mal ein flächendeckender Datensatz erhoben werden, eine regelmäßige Datenerfassung für ein Monitoring ist jedoch nicht geplant.

Um die oben genannten Limitationen zu überwinden und ein Monitoring der Quellen- und Senkenfunktion von Wäldern zu ermöglichen, wurden Verfahren entwickelt, die eine Kombination aus verschiedenen Sensoren mit Methoden des maschinellen Lernens verknüpft. Zum Beispiel haben Kacic et al. (2023) die Bestandeshöhe Deutschlandweit mittels Satelliten-basierter Daten von GEDI, Sentinel-1 und Sentinel-2 in 10m räumlicher Auflösung modelliert. Um zusätzlich Schätzungen der Biomasse zu ermöglichen, wurden zudem Daten eines globalen Biomassemodells der aus GEDI-Daten abgeleitet wurde (GEDI L4A) verwendet (Kellner et al. 2023). Das Potential der Methode zur Anwendung für ein Deutschlandweites Monitoring von Quellen- und Senkenfunktionen ist dadurch eingeschränkt, dass ein globales Biomassemodell verwendet wurde (GEDI L4A), welches mit Daten trainiert wurde, die nicht ausreichend repräsentativ für Deutsche Wälder sind. Diese Verfahren könnte durch die Verwendung von Biomasseerhebungen aus Deutschland wesentlich verbessert werden und somit das Potential für ein Monitoring erhöhen. Eine weitere Methode für ein großflächiges Monitoring in Deutschland ist die Verwendung von Baumhöhenmodellen die mittels maschinellen Lernens aus hochaufgelösten Baumhöhenmodellen (LiDAR- oder Luftbildbasiert) und optischen Fernerkundungsdaten regelmäßig aktualisiert erzeugt werden (Wagner et al. 2024, Liu et al. 2023). Diese Baumhöhenmodelle können dann unter Anwendung nationaler Allometrien verwendet werden, um regelmäßig aktualisierte Biomasseschätzungen durchzuführen. Dafür sind nationale Referenzdaten zur Biomasse notwendig, die beispielsweise aus der BWI gewonnen werden könnten. An einem solchen Verfahren arbeitet zurzeit das Projekt MoniFor (FKZ: 50EE2414A; Laufzeit: 07/2024 - 06/2026; gefördert mit Mitteln des BMWF).

## 2.7 Übersicht über Fernerkundungssysteme und Erfassung von Forstparametern

Der Waldzustand umfasst verschiedene Aspekte, darunter die Gesundheit, das Wachstum und die Resilienz des Waldbestands, welche wichtige Indikatoren für das allgemeine Wohlergehen des Ökosystems darstellen. Das Verständnis der Faktoren, die den Waldzustand beeinflussen, sowie die Fähigkeit, diesen präzise zu erfassen, sind entscheidend für rechtzeitige Eingriffe, geeignete Minderungsstrategien und den Erhalt von Waldökosystemen angesichts zunehmender Umweltbelastungen (Anderegg et al. 2013). In dieser Studie werden verschiedene Forst- bzw. Waldparameter (sh. Tabelle 4) verwendet, die in der klassischen Forstplanung angewendet werden. Diese Forstparameter werden innerhalb der Instrumente der Forstplanung, wie bspw. Forsteinrichtung, Forstinventuren mit Stichprobenpunkten, Waldbiotopkartierung und forstliche Standortkartierung erhoben (Knöke et al. 2012). Die folgende Tabelle 4 liefert einen Überblick über die Fernerkundungssysteme, mit denen die unterschiedlichen Forst- bzw. Waldparameter derzeit ableitbar sind, und gibt Beispiele aus Deutschland mit Vor- und Nachteilen der Nutzung.

Tabelle 4 | Forstparameter und die Eignung verschiedener Fernerkundungssysteme um diese ableiten zu können. Die Tabelle gibt auch Beispiele der genutzten Verfahren in Deutschland sowie deren Hauptvor- und Nachteile.

Forstparameter	FE- System	Beispiele in DE	Vorteile	Nachteile
Baumarten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitreihenanalyse optischer Satellitendaten mit einer räumlichen Auflösung von mind. 10m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoffels et al. 2015 (basierend auf RapidEye Zeitreihen)</li> <li>• Welle et al. 2022 (basierend auf Sentinel-2 Zeitreihe, Teil des Waldmonitor Deutschland)</li> <li>• Blickensdörfer et al. 2024 (basierend auf Sentinel-2 Zeitreihe, ergänzt durch Sentinel-1)</li> <li>• Klehr et al. 2025 (basierend auf Sentinel-2 Zeitreihen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großflächige und wiederholbare Erfassung möglich.</li> <li>• Weitere Baumarten möglich, sofern ausreichend Referenzdaten existieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung auf Bestandsebene, nicht auf Einzelbaumebene, daher schwierig in kleinskaligen Mischbeständen.</li> <li>• Benötigt ausreichende Referenzdaten, die häufig nicht zur Verfügung stehen.</li> <li>• Ausschließliche Erfassung der Baumarten, die eine</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftbilder</li> </ul>			Baumarten-spezifische Reflexions-Phänologie zeigen.
Baumdurchmesser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Erfassung nur bedingt möglich mit Flugzeug-getragenen LiDAR.</li> <li>• Indirekte Schätzung über Baumhöhe (wie forstliche Ertragstafel).</li> </ul>			
Baumhöhe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flugzeug-getragenes LiDAR</li> <li>• Luftbild Photogrammetrie (bDOM)</li> <li>• GEDI (ISS-LiDAR), kombiniert mit optischen Satellitendaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiser et al. 2022</li> <li>• Waldmonitor Arnsberg (<a href="https://map3d.remotesensing-solutions.de/waldmonitor/arnsberg/">https://map3d.remotesensing-solutions.de/waldmonitor/arnsberg/</a>)</li> <li>• Kacic et al. 2023</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höchste Genauigkeit aller Systeme</li> <li>• Gute Genauigkeit, günstiger als LiDAR</li> <li>• Großfläche Erfassung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teuer und nicht großskalig möglich</li> <li>• Nur geringe Wiederholrate bei großflächiger Erfassung möglich</li> <li>• Geringe Auflösung, sättigt bei hohen Beständen</li> </ul>
Baumanzahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzelbaumerkennung mittels Luftbilder oder LiDAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DeepForest</li> <li>• Kuang et al. 2024</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr hohe Auflösung ermöglicht genaue Einzelbaumerkennung</li> <li>• LiDAR-basierte Erfassung ist genauer als Luftbild-basierte Erfassung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftbilder oder LiDAR nicht überall und wiederholbar verfügbar</li> <li>• Kleinere Bäume im Unterstand schwer zu erfassen</li> </ul>

Kronenschlussgrad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optische Satellitendaten</li> <li>• Luftbilder oder LiDAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High Resolution Layer Tree Cover Density (Buras &amp; Rammig 2023)</li> <li>• DeepTrees</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großfläche Erfassung möglich</li> <li>• Höchste Genauigkeit aufgrund sehr hoher Auflösung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingeschränkte Genauigkeit für kleinskalige Analysen</li> <li>• Luftbilder oder LiDAR nicht überall und wiederholbar verfügbar</li> </ul>
Grundfläche/Basalfäche	Kombination aus Baumdurchmesser und Baumanzahl			
Biomasse/Vorrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasseschätzung mittels Baumhöhenmodelle (untersch. Art (Sat/Luftbild/LiDAR))</li> <li>• Biomasseschätzung mittels langwelligem L-Band/P-Band SAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kacic et al. 2023 (Sat) Waldmonitor Arnsberg (bDOM) (<a href="https://map3d.remote-sensing-solutions.de/waldmonitor/arnsberg/">https://map3d.remote-sensing-solutions.de/waldmonitor/arnsberg/</a>)</li> <li>• ESA Biomass project (<a href="https://eebiomass.org/de/">https://eebiomass.org/de/</a>)</li> <li>• ESA's Biomass Mission (<a href="https://portal.maap.eo.esa.int/biomass/">https://portal.maap.eo.esa.int/biomass/</a>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit hochaufgelösten Baumhöhenmodellen zusammen mit Baumarten erfassung ist eine gute Genauigkeit erreichbar</li> <li>• Großflächige Biomasseschätzungen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Referenzdaten benötigt</li> <li>• Setzt einen Zusammenhang zwischen Baumhöhe und DBH/Biomasse voraus</li> <li>• Gute Referenzdaten benötigt</li> </ul>
Zuwachs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indirekt über multitemporale Biomasseschätzungen</li> </ul>			
Vitalität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optische Satellitendaten (Vegetationsindizes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Waldzustandsmonitor für Deutschland (TUM)</li> <li>• Forest Condition Monitor (UFZ)</li> <li>• Waldmonitor Deutschland (RSS/NWA)</li> <li>• ForestWatch (LUP)</li> <li>• Produkt Forest Change Index (Thünen Institut,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großflächige und wiederholbare Erfassung möglich.</li> <li>• Landesweite Erfassung in hoher räumlicher Auflösung.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ursache der Vitalitätsänderung nicht immer eindeutig zu bestimmen.</li> </ul>

		<p>Gnilke &amp; Sanders, 2022)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt zur Erfassung von Baumkronenverlusten (DLR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Genauigkeiten für die meisten Vitalitätsstörungen</li> </ul>	
Strukturvielfalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• Auf Basis von Baumhöhenmodellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiser et al. 2022</li> <li>• Kacic et al. 2023</li> <li>• Kacic et al. 2025</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung von 3D-Strukturvielfalt im Bestand</li> <li>• Großflächige Erfassung von Variabilitäten möglich (je nach Baumhöhenmodell)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teuer und nicht großskalig (wiederholbar) möglich</li> <li>• Lediglich Erfassung der Oberflächenstruktur, nicht im Bestand</li> </ul>
Naturnähe	Keine operationelle FE-Methode verfügbar			
Habitatbäume	Keine operationelle FE-Methode verfügbar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kacic et al. 2024</li> </ul>		
Stehendes Totholz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optische Satellitendaten</li> <li>• Luftbilder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schiefer et al. 2023</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großflächige und wiederholbare Erfassung möglich</li> <li>• Einzelbaumerkennung inkl. Höhe möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Einzelbaumerkennung</li> <li>• Benötigt aktuelle Luftbilddaten die nur bedingt zur Verfügung stehen.</li> </ul>
Liegendes Totholz	Nur bedingt möglich; Methoden noch in der Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thiel et al. 2020</li> </ul>		
Bodeninformationen (Standortforstkarten/-kartierungen)	Keine operationelle FE-Methode verfügbar			
Humusform	Keine operationelle FE-Methode verfügbar			

Rückegassen/Be fahrung	LiDAR-basiertes Geländemodell; FE- Methoden noch in der Entwicklung			
Bodenfeuchte/ Wasserhaushalt	SAR- und optische Satellitendaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interaktive Bodenfeuchtekarten und -profile des DWD (<a href="https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html">https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html</a>)</li> <li>• Feuchtegehalt in der Kronenbedeckung: Waldmonitor Arnsberg</li> <li>• Feuchtegehalt in der Kronenbedeckung: Waldmonitor Deutschland (RSS/NWA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großflächige und wiederholbare Erfassung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur indikative, keine quantitative Erfassung möglich</li> </ul>
Relief	LiDAR-basiertes Digitales Geländemodell			
Zerschneidung/ Konnektivität/Fr agmentierung	GIS-Analyse; Anwendung auf Waldinformationspro dukte wie oben beschrieben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/forest-connectivity-in-europe">https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/forest-connectivity-in-europe</a></li> </ul>		
Temperatur	Landoberflächentem peratur mittels Sentinel-3 oder Landsat. Methoden noch in der Entwicklung.			
Schutzgebietsst atus	GIS-Analyse; Einbindung Daten zu Schutzgebieten (z.B. FFH)			

## 3 Zusätzliche Datengrundlage für die Faktorenanalyse

### 3.1 Ziele von Arbeitspaket 2

- Auflistung von bestehenden forstlichen Feld- und Monitoringprogrammen des Bundes, der Länder und von weiteren Stellen
- Beschreibung und Analyse zusätzlicher Datenquellen im Hinblick auf Flächen- und Zeitabdeckung, methodischer Kompatibilität, thematischer Tiefe und Datenzugang für eine Integration in Fernerkundungsverfahren
- Abschätzung der Eignung von Zusatzdaten für eine Integration in Fernerkundungsverfahren für ein übergreifendes Monitoring von Waldökosystemen

### 3.2 Hintergrund und Einleitung

Wälder sind in Mitteleuropa unverzichtbare Kohlenstoffsinken, Wasserfilter und Klimaregulatoren; gleichzeitig liefern sie Rohstoffe, Erholungs- und Kulturleistungen und beherbergen einen Großteil der terrestrischen Biodiversität (Bonan 2008; Bolte et al. 2023). Die Abfolge extremer Dürre- und Borkenkäferjahre von 2018 bis 2020 hat jedoch verdeutlicht, wie verletzlich diese Ökosysteme sind und welchen hohen gesellschaftlichen Preis ihr Ausfall nach sich zieht (Thonfeld et al. 2022; Seidl & Senf 2021). Vor diesem Hintergrund rückt auch die zuverlässige, langfristige und standardisierte terrestrische Beobachtung oder Modellierung des Waldzustands und seiner Steuerfaktoren in den Fokus von Politik, Verwaltung und Forschung.

Deutschland verfügt bereits seit den 1980er-Jahren über eine außergewöhnlich dichte, methodisch standardisierte Infrastruktur an Inventur- und Monitoringprogrammen. Die jährliche Waldzustandserhebung (WZE) liefert Vitalitätsindikatoren wie Kronenverlichtung, Kronenfarbe und Schädlingsbefall an einem systematischen Linienstichproben-Raster und fungiert damit als Frühwarnsystem für akute Stressereignisse. In größerem zeitlichen Abstand, aber mit deutlich tieferer Detailtiefe, erfasst die Bundeswaldinventur (BWI) im Zehn-Jahres-Turnus Baumarten-zusammensetzung, Vorräte, Totholz und Bewirtschaftungsmerkmale an mehr als 25.000 dauerhaft markierten Probepunkten. Seit der Erstinventur 1987 erlaubt dieses Design robuste Trendanalysen zu Strukturveränderungen, Biomasse-Entwicklung und Kohlenstoffdynamiken (Bauhus et al. 2025).

Ergänzt werden diese Programme durch die Bodenzustandserhebung Wald (BZE), die an rund 2.000 Punkten Informationen zu physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften liefert und damit die Standortperspektive einbringt (Wellbrock et al. 2022). Das ICP-Forests-Netz verbindet die nationalen Aktivitäten mit europäischen Berichtspflichten: Level I deckt Deutschland in einem 16 × 16-km-Raster ab, während Level II auf 77 Intensivflächen Stoffflüsse, Depositions- und Phänologieparameter misst (Michel et al. 2024). Spezialisierte Reihen wie das Naturwald-Monitoring, LTER-Ökosystemstationen oder Citizen-Science-Programme zum

Brutvogelbestand erweitern das Spektrum um Biodiversitäts- und Prozessdaten, die für die EU-Biodiversitätsstrategie und das geplante Forest Monitoring Law (FML) an Relevanz gewinnen werden (EEA 2016, Berger et al. in review).

Diese Programme erfüllen mehrere, teils überlappende Funktionen. Erstens liefern sie die empirische Grundlage für hochrangige politische Prozesse – von der nationalen Waldstrategie über die LULUCF-Berichterstattung bis hin zur Anpassung an den Klimawandel. Zweitens sichern sie die Vergleichbarkeit zwischen Bundesländern und über lange Zeiträume hinweg. Drittens erzeugen sie Kalibrier- und Validierungsdaten, die zwingend notwendig sind, um satellitengestützte Produkte aus AP 1 in einen physisch interpretierbaren Kontext zu stellen. Schließlich sind sie für das forstliche Betriebs- und Ressourcenmanagement relevant, indem sie Trends bei Holzvorräten, Nutzungsintensität oder Totholzanteilen sichtbar machen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt Arbeitspaket 2 drei eng miteinander verknüpfte Ziele. Erstens soll eine detaillierte Bestandsaufnahme der forstlichen Feld- und Monitoringprogramme vorgenommen werden. Zweitens werden diese Datenquellen im Hinblick auf Flächen- und Zeitabdeckung, methodische Kompatibilität, thematische Tiefe und Datenzugang bewertet, um ihre Eignung für eine Integration in Fernerkundungsmethoden abzuleiten. Drittens werden die identifizierten Daten- und Prozesslücken beschrieben und priorisiert, sodass tragfähige Empfehlungen für den Aufbau einer integrierten Waldmonitoring-Infrastruktur entstehen können.

### 3.3 Übersicht bestehender Waldmonitoringprogramme

Deutschland verfügt heute über eines der dichtesten Wald-Beobachtungsnetze Europas. Seit dem den 1980er-Jahren hat sich ein mehrstufiges System etabliert, das von stichprobenbasierten Großinventuren (z. B. Bundeswaldinventur) über jährliche Vitalitätserhebungen (Waldzustandserhebung) bis hin zu prozessorientierten Intensivflächen (ICP Forests Level II, LTER-D) reicht. Jede Ebene deckt dabei unterschiedliche zeitliche Frequenzen, räumliche Auflösungen und Indikatoren ab und erfüllt zugleich spezifische Berichtspflichten. Es entsteht dadurch ein Mix aus punktuellen Detailmessungen, die durch flächendeckende Satelliten- oder Fernerkundungsprodukte ergänzt werden könnten.

Aktuell rückt die Frage in den Vordergrund, wie sich diese gewachsenen Einzelprogramme strategisch verzahnen lassen. Das Nationale Monitoringzentrum für Biodiversität pflegt bereits einen zentralen Steckbrief-Katalog, der Aufbau, Zielgrößen und Methodik sämtlicher forstlicher Monitoringreihen vereinheitlicht. Parallel legt das im Frühjahr 2025 vorgelegte NaBioWald-Konzept (Bolte et al. 2025) ein Stufenmodell vor, das die bestehenden Inventur-, Vitalitäts- und Prozessprogramme zu einem integrativen, bundesweit repräsentativen Biodiversitätsmonitoring ausbauen will – inklusive klarer Schnittstellen zur Fernerkundung und zu sozio-ökonomischen Begleitindikatoren. Damit entsteht erstmals ein übergreifender Rahmen, der

Datenlücken systematisch schließt und Doppelstrukturen vermeidet, ohne die langjährigen Zeitreihen der etablierten Programme zu gefährden.

### **3.3.1 Bundeswaldinventur (BWI)**

Die BWI erfüllt einen gesetzlichen Auftrag (§ 41a BWaldG) und liefert seit 1987 ein flächenrepräsentatives, zeitsynchrones Abbild der Waldressourcen Deutschlands. Grundlage ist ein 4 × 4-km-Raster mit dauerhaft markierten Kreuz-Clustern: An jedem Rasterknoten liegen vier 500 m voneinander entfernte Satellitenpunkte, in denen alle Bäume  $\geq 7$  cm Brusthöhendurchmesser in 25-m-Radiuskreisen vermessen werden; ein zentraler Mikroplot erfasst Naturverjüngung und Krautschicht (Bauhus et al. 2025). Im letzten Inventurzyklus (2021/22) bestimmten rund 100 Inventurtrupps auf mehr als 80.000 Aufnahmen über 150 Einzelmerkmale – von Baumart und Dimension über Mischungs- und Altersstruktur bis hin zu biotischen Schäden.

Seit dem ersten Zyklus dokumentiert die BWI eine deutliche Verschiebung von Nadel- zu Laubbaumdominanz (+7 Prozentpunkte Laub seit 1987), eine Alterung der Wälder (30 % > 100 Jahre) und einen historisch hohen Holzvorrat von  $336 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Bauhus et al. 2025). Die Probepunkte fungieren zudem als Ground-Truth für satellitenbasierte Karten: So trainieren aktuelle Sentinel-2-Zeitreihen die bundesweite Baumartenkarte des Waldmonitor Deutschland (Welle et al. 2022) und bilden den Referenzdatensatz eines offenen Machine-Learning-Algorithmus für eine nationale Baumartenklassifikation (Freundenberg et al. 2024) oder der Baumartenkarte des Thünen Instituts (Blickensdörfer et al. 2024).

Die Stärken der BWI liegen in ihrer methodisch harmonisierten Langzeitreihe, der hohen Merkmalstiefe und der rechtlichen Verankerung. Schwächen sind das zehnjährige Wiederholungsintervall, der limitierte flächenscharfe Zugang und die Punktstichprobe, die nur mit Inter-/Extrapolation in flächendeckende Rastermodelle überführt werden kann. Kopplungen mit Fernerkundung können diese Defizite mindern.

### **3.3.2 Kohlenstoffinventur (CI)**

Die CI baut auf dem BWI-Raster auf, reduziert die Netzdichte jedoch auf ein Viertel, um den C-Haushalt kosteneffizient zu erfassen. Neben oberirdischer Biomasse werden Wurzel-C, Totholz-C und ausgewählte Bodenkohlenstoffprofile gemessen; allometrische Modelle und Dichtetabellen konvertieren Volumina in Vorräte (Schwitzgebel und Riedel 2019). Die zweite Kampagne (CI 2017) wies einen mittleren Wald-C-Vorrat von  $113,7 \text{ t C ha}^{-1}$  aus und bestätigte, dass der Waldsektor 2012-17 netto  $1,1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  akkumulierte (Schmitz et al. 2019). CI-Punkte können als Kalibrierungs- und Validierungsquelle für EO-basierte Biomasse-Schätzungen dienen. Vorteilhaft ist die CI-Kompatibilität zur BWI sowie ihr direkter Nutzen für Kohlenstoff-Berichtspflichten. Grenzen entstehen durch das grobe Stichprobennetz und den bislang erst zwei

Beobachtungszeitpunkte, was Trendanalysen erschwert. Die geplante CI 2027 soll das Intervall auf zehn Jahre verkürzen und über LiDAR Daten ergänzt werden.

### **3.3.3 Bodenzustandserhebung Wald (BZE)**

Die BZE verfolgt das Ziel, chemische, physikalische und biologische Bodentrends großräumig zu dokumentieren. Auf einem 8 × 8-km-Raster werden an rund 1 900 Standorten Bodenprofile bis 90 cm Tiefe aufgeschlossen, horizontweise beprobt und im Labor gemäß „Aufnahmeanleitung BZE“ analysiert (Wellbrock et al. 2022). Ergebnisse zeigen eine anhaltende Pufferung der Versauerung, aber persistente Stickstoffüberschüsse; zwischen 2008 und 2024 sank der pH-Wert im Oberboden bundesweit um weitere 0,05 Einheiten, während Basensättigung in trockenen Regionen stabil blieb.

Die BZE liefert analytisch detaillierte Informationen und hat einen Bezug zur Waldstruktur (gemeinsame Punkte mit BWI). Einschränkend wirken der 15-Jahres-Turnus, hohe Labor-kosten und eine mangelnde zeitliche Synchronität zu aktuellen Trockenstress-ereignissen. Fernerkundungsgestützte Bodenfeuchtemodelle (z. B. SMAP/L-Band) könnten temporäre Lücken schließen, benötigen aber die BZE zur Kalibrierung.

### **3.3.4 Intensives forstliches Umweltmonitoring – ICP Forests Level II**

ICP Forests Level II Flächen ergänzen die großflächigen Stichproben durch 77 hochinstrumentierte Intensivflächen, an denen seit den frühen 1990er-Jahren in 14 Erhebungsbereichen mit einem Schwerpunkt auf Depositions- und meteorologischen Messungen, ergänzt durch Zustandserhebungen und Zuwachs, Bodenerhebungen und der chemischen Analyse von Blättern, Streu und Bodenlösung kontinuierlich Daten erhoben werden (Michel et al. 2024). Level II – Flächen liefern einzigartige Prozessdaten und sind unverzichtbar für Kausalmodelle. Gleichzeitig bleibt die Flächenabdeckung gering, und hohe Personal-/Laboraufwände begrenzen Netzerweiterungen. Level II verwendet harmonisierte Messprotokolle des ICP Forests und führt regelmäßige Methodenvergleiche, Abstimmungskurse und Laborvergleiche durch (<http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>).

### **3.3.5 Waldzustandserhebung (WZE)**

Die WZE ist Deutschlands einziges jährliches Vitalitätsmonitoring. In einem 16 × 16-km-Linienstichprobennetz beurteilen Teams etwa 10.000 Bäume hinsichtlich Kronenverlichtung, Blatt-/Nadelverfärbung und Befall. Parallel erheben sie Stamm-beschädigungen, Wipfelschnitt und abiotische Stressfaktoren (Wellbrock et al. 2018).

Die Berichte 2018 bis 2023 dokumentieren eine markante Vitalitätsdepression: 2020 wiesen 35 % aller Bäume starke Kronenverlichtung (> 25 %) auf, insbesondere Fichte und Buche. Studien koppeln WZE-Defoliationswerte mit Sentinel-2-Vegetationsindices, digitalen Relief- und

Bodendaten; Random-Forest-Modelle ermöglichen hier flächendeckende Defoliationskarten (Xu et al. 2025).

Die WZE überzeugt durch hohe zeitliche Dichte, reagiert jedoch empfindlich auf Beobachter- und Wettereinflüsse. Ihre visuelle Methode begrenzt die Objektivität; jüngste KI-gestützte Bildauswertungen von Drohnen könnten hier Abhilfe schaffen. Flächendeckende Ableitungen aus Satellitendaten zeigen gutes Potenzial, erfordern aber kontinuierliche Kalibrierung mit WZE-Feldwerten (Lange et al., 2024).

### **3.3.6 Naturwald-Monitoring**

In derzeit über 320 Naturwaldreservaten (45.000 ha) finden periodische Daueraufnahmen statt. Auf Repräsentationsflächen von 0,5 – 5 ha werden alle Bäume und Totholzstrukturen vermessen, ihr Zustand kartiert und standortkundliche Begleitdaten erhoben. Methodisch werden Stammfußkarten und 3D-UAV-Photogrammetrie- sowie LiDAR-Scans genutzt, um Mikrohabitate, Baum-dimension und Zersetzungsgrade hochaufgelöst zu erfassen (Endres & Förster 2014).

Langzeitdaten zeigen, dass auf unbewirtschafteten Standorten die Totholzvorräte innerhalb von 30 Jahren signifikant anwachsen und die Artenvielfalt höher liegt als in Bewirtschaftungswäldern (Nagel et al. 2023). Das Naturwald-Monitoring liefert Referenzwerte für naturnahen Waldzustand und Biodiversität; die Hauptnachteile sind heterogene Länderkonzepte, lange Wiederholungsintervalle und eine geringe Abdeckung (< 0,4 % der Waldfläche). Fernerkundungsintegration verspricht Skalierbarkeit, erfordert aber valide Ground-Truth-Daten, die derzeit nur in wenigen Reservaten verfügbar sind.

### **3.3.7 Ökosystem-Monitoring (LTER-D)**

Das deutsche LTER-D-Netzwerk (Long-Term Ecological Research) wurde Anfang der 1990er-Jahre aufgebaut, um Prozessdaten zu Stoff-, Energie- und Biodiversitäts-flüssen in repräsentativen Ökosystemen langfristig und hoch-frequent zu erfassen. Von den gut 50 Stationen sind derzeit 15 im Wald verankert, darunter die Buchenwälder Hainich (Thüringen) und Leinefelde (Niedersachsen), die Fichten-Fichtenmix-Standorte Waldstein/Weidenbrunnen (Bayern) und der montane Fichtenwald Conventwald (Schwarzwald). Kerninstrumente sind Eddy-Covariance-Türme (Messhöhe 42–50 m), die im 10-Hz-Takt vertikale Flüsse von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und sensiblem/latentem Wärmefluss aufzeichnen. Ergänzt werden automatische Boden-feuchte-, Bodentemperatur- und Lysimeter-sensoren, sap-flow-Sonden in ausgewählten Bäumen sowie automatische Kammer-systeme für Boden-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Flüsse (Müller et al. 2010). Alle Stationen dokumentieren meteorologische Standardgrößen, phänologische Beobachtungen und wiederholen alle fünf Jahre struktur- und biodiversitäts-bezogene Inventuren gemäß dem eLTER Standard Observation Protocol (Zacharias et al. 2023).

Die LTER-D-Flüsse fungieren zudem als Kalibrier-/Validierungs-anker für Fernerkundungs-produkte: HOLAPS (High-Observation-based Land-Atmosphere Partitioning & Evapotranspiration) validierte seine ET-Schätzungen unter anderem an LTER-Stationen (Loew et al. 2016). Aktuell dient der Hainich als zentrale EnMAP-Cal/Val-Fläche (Storch et al., 2023). Die Stärke des Programms liegt damit in seiner prozess- und variablen-reichen Langzeitbasis, die skalenübergreifende Modelle robust verankert. Schwächen bleiben die punktuelle Repräsentativität, hohe Betriebs-kosten und methodische Heterogenität historischer Zeitreihen, die erst sukzessive durch standardisierte eLTER-Protokolle nivelliert wird.

### 3.3.8 Brutvogel-Monitoring (MhB)

Das MhB-Grundraster von 1 km<sup>2</sup> erfasst sämtliche Lebensraumtypen, aber rund 45 % der Probeflächen weisen > 50 % Baumbedeckung auf und liefern damit belastbare Informationen zu Waldvogel-gemeinschaften. Auf diesen Waldplots werden pro Saison vier Besuche absolviert; die Routen führen dabei systematisch sowohl durch Alt- als auch Jungbestände. Die Datenerfassung folgt der etablierten Linienkartierung, doch seit 2021 werden zusätzlich Habitatcodierungen nach der *European Forest Bird Indicator*-Systematik vermerkt. Dadurch lassen sich Indikatoren für Altholzspezialisten wie Schwarzspecht *Dryocopus martius* oder Hohltaube *Columba oenas* von Strukturgeneralisten (z. B. Buchfink *Fringilla coelebs*) trennen und differenziert auswerten.

Tabelle 5 | Vergleichende Übersicht bestehender Waldmonitoring- und Inventurprogramme

Programm	Träger	Typ / Design	Zeitraum & Frequenz	Haupterfasste Parameter	Stärken	Grenzen
Bundeswaldinventur (BWI)	Thünen-Institut	System. Stichprobennetz (≈ 25.000 Punkte)	1987, 2002, 2012, 2022 (10-jährig)	Baumart, BHD, Höhe, Vorrat, Totholz, Bewirtschaftung	Bundesweit, langjährige Zeitreihe	10-Jahres-Intervall, Punkt- statt Flächen-deckung
Kohlenstoff-inventur (CI)	Thünen-Institut	Zusatzmessung an BWI-Punkten	2008, 2017	C-Bestände in Biomasse & Boden	Harmonisiert mit BWI	Nur zwei Stichjahre
Bodenzustandserhebung Wald (BZE)	Thünen-Institut	≈ 2.000 Punkte	1987-93, 2006-08, 2022-24	Phys./chem. Bodeneigenschaften, Vegetation	Tiefe Bodendaten	Punktuell, 15-Jahres-Turnus
Waldzustandserhebung (WZE)	Länder + BMEL	Jährliche Linienstichprobe	1984 – heute	Kronenverlichtung, Kronenfarbe, Schädlingsbefall	Jährlicher Vitalitäts-indikator	Begrenzte Parameterbreite, Subjektivität
ICP Forests Level I & II	Thünen-Institut + ICP Forests	Level I: 16×16 km Raster; Level II: 77 Intensivflächen	seit 1985	Depositions- & Vitalitäts-messungen, Baumwachstum, Stoffflüsse	EU-Berichtspflicht, wissenschaftlicher Tiefgang	Geringe Flächenabdeckung
Naturwald-Monitoring	Länder / Naturschutz	Dauerbeobachtungsflächen	seit 1990	Waldstruktur, Biodiversität, Totholz	Referenz für Naturnähe	Heterogene Methoden
Ökosystem-Monitoring (LTER)	Helmholtz-Zentren, Universitäten	Langzeitökolog. Forschungsflächen	seit 2000	Stoffflüsse, Biodiversität, Phänologie	Ganzheitlicher Ansatz	Punktuell
Brutvogel-Monitoring (DDA)	Dachverband Deutscher Avifaunisten	Stichproben	seit 1990	Indikatorarten, Habitatnutzung	Bundesweit, jährlich	Artspezifisches Bias

### 3.4 Übersicht über zusätzlich relevante Daten zur Erfassung von Forstparametern

Ein ganzheitliches Monitoring forstlicher Ökosysteme erfordert zusätzlich zu den in Kapitel 2.5 beschriebenen Fernerkundungsparametern weitere, komplementäre Informationsquellen. Dazu zählen vor allem boden-gestützte Inventurdaten (z. B. NFI-Dauermessungen), terrestrisches Laser-scanning zur hoch-auflösenden 3-D-Erfassung von Stamm- und Kronengeometrien sowie kontinuierliche Klima-, Boden- und phänologische Beobachtungen. Solche Datensätze tragen dazu bei, Messunsicherheiten der Fernerkundung zu verringern, saisonale Dynamiken aufzulösen und Struktur-/Funktions-Beziehungen über verschiedene Skalen hinweg zu verknüpfen.

Die nachfolgende Tabelle 6 fasst diese „zusätzlich relevanten Daten zur Erfassung von Forstparametern“ zusammen und stellt ihre Stärken, Limitationen und exemplarische Anwendungen in Deutschland gegenüber. Sie ergänzt damit die Resultate aus Kapitel 2.5, indem sie Datenquellen aufzeigt, die nicht primär aus der Fernerkundung stammen, sondern diese um entscheidende Prozess- und Detailinformationen erweitern.

Tabelle 6 | Forstparameter und die Eignung verschiedener zusätzlicher Daten um diese ableiten zu können. Die Tabelle gibt auch Beispiele der genutzten Verfahren in Deutschland sowie deren Hauptvor- und Nachteile.

Forstparameter	relevante Zusatzdaten	Vorteile	Nachteile
Baumarten	Bundeswaldinventur (BWI 2022) in Relation mit Zeitreihendaten, erprobt, u.a. in Welle et al. 2022, Blickensdörfer et. al. 2024 und Freudenberg et al. 2024)	Referenz-Datensatz mit taxonomischer Detailtiefe; Stichproben langfristig vergleichbar	Nur 10-jähriger Aufnahmerhythmus und kein Zugang zu den Originaldaten, aber als zum Kalibrieren und Validieren von Fernerkundungsdaten hervorragend geeignet
Baumdurchmesser (BHD)	BWI-Einzelbaumdaten, ICP Forests Level II Intensivplots TLS und ALS Messung bisher auf Experimentierfeldern (z.B Weiser et al. 2022)	Informationen auf hohem Detailgrad vorhanden; Level II liefert zudem eine jährliche Wiederholung	bisher keine direkte Relation zur satelliten-basierten optischen Fernerkundung möglich (ggf. über Baumhöhe)
Baumhöhe	BWI-Baumhöhendaten TLS und ALS Messung bisher auf Experimentierfeldern (z.B Weiser et al. 2022)	Informationen auf hohem Detailgrad vorhanden	TLS noch Forschungsstadium, nicht flächendeckend, aber ggf. zur Kalibrierung und Validierung von Fernerkundungsdaten verwendbar
Baumanzahl	Baumkataster (häufig in urbanen Gebieten zu finden), beispielsweise verfügbar unter <a href="https://baumcloud.org/#/">https://baumcloud.org/#/</a>	genaue Informationen zu Bäumen und deren Verteilung	häufig unterschiedliche Aktualität nicht außerhalb von urbanen Gebieten oder Parks verfügbar
Kronenschlussgrad	BWI-Kronenparameter	Visuell oft aufwändig validierte Werte mit langer Historie	Heterogene Methoden der Länder Aktualität variiert

Forstparameter	relevante Zusatzdaten	Vorteile	Nachteile
	Landesweite Luftbildinterpretationen oft als Bestandteil der Forsteinrichtung		
Grundfläche	ebenfalls aus der BWI ableitbar	Informationen auf hohem Detailgrad vorhanden	Nur 10-jähriger Aufnahmerhythmus und kein Zugang zu den Originaldaten
Vorrat / Biomasse	Relevante Informationen in der BZE zu finden, abgeleitet aus der BWI über verschiedene Allometrien, welche zur Ableitung mittels der Fernerkundung verwendet werden (z.B. zusammengefasst in Fassnacht et al. 2023 oder Fassnacht et al. 2024)	Konsistente Kohlenstoff-Bilanzierung; Verknüpfbar mit Fernerkundungs-Biomassekarten	BZE-Intervall 15 J.; Holz-C nur punktuell, Unsicherheiten in Abschätzung und Auswahl der jeweiligen Allometrien
Zuwachs	Vergleich der Wiederholungsmessungen der BWI seit 1992	Ableitbar über die BWI und BZW, wie bei den oberen Kriterien	Ableitung mit Fernerkundung kritisch, da multi-temporale Abdeckung nur eingeschränkt möglich
Vitalität	Waldzustandserhebung in jährlicher Auflösung, auch schon mit Fernerkundungsansätzen (Lange et al. 2024, Xu et al. 2025 geprüft)	jährliche Zeitreihen, die über den Laub-Nadelverlust ein exaktes Kriterium punktuell abbilden	Zugänglichkeit nur eingeschränkt möglich  subjektive Einschätzung und Variabilität zwischen den Ländern  Methodik der Aufnahme nicht 100%ig kompatibel zur Fernerkundungserhebung
Struktur(vielfalt)	Flächendeckendes Laserscanning des digitalen Zwillings (sh auch Kapitel 2);  Bundesweite Naturwaldreservate mit detaillierten Strukturaufnahmen	Waldstrukturparameter können abgeleitet werden (geplant in Projekten ForestPulse EO4Nature und MoniFor)	Erhebungsintervall von ca. 5 Jahren  Bisher nicht operationell eingesetzt  Parameterwahl bisher nicht geklärt
Naturnähe	Biotoptypenkartierung  Informationen des Ökosystemmonitoring und der Flächen des Nationalen Naturerbes  NATURA 2000 Waldflächen  BfN Ermittlung der Naturnähe aus BWI Daten ( <a href="https://www.bfn.de/daten-und-fakten/naturnaehe-der-aelteren-und-juengeren-baumbestaende-haupt-und-jungbestockung">https://www.bfn.de/daten-und-fakten/naturnaehe-der-aelteren-und-juengeren-baumbestaende-haupt-und-jungbestockung</a> )	Detaillierte Informationen aller Datenarten, oft mit Altersstufungen und Informationen zu Arteninventar	Keine der Datensätze ist flächendeckend vorhanden (z.B. Biotoptypen je nach Bundesland) und in unterschiedlichem Detailgrad und unterschiedlicher Aktualität - Homogenisierung zur fernerkundlichen Nutzung wäre notwendig

Forstparameter	relevante Zusatzdaten	Vorteile	Nachteile
Habitatbäume	Eher in Einzelprojekten zu finden (Zusammenfassung hier: <a href="https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/buetler/pdf/Habitatbaume_KapitelRBR.pdf">https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/buetler/pdf/Habitatbaume_KapitelRBR.pdf</a> ), am erfolgversprechenden bisher wahrscheinlich die Habi App ( <a href="https://totholz.wsl.ch/de/habitatbaeume/erhaltung-von-habitatbaeumen/aufnahme-mit-dem-smartphone/">https://totholz.wsl.ch/de/habitatbaeume/erhaltung-von-habitatbaeumen/aufnahme-mit-dem-smartphone/</a> )	Citizen Science - einfach zugänglich und schnell wachsender Datensatz	Validität der Daten unsicher  Datensatz geht von der Schweiz aus, ggf. bisher wenige Daten in Deutschland
Stehendes /liegendes Totholz	aus der BWI ableitbar, schon in Kombination Fernerkundung erprobt (siehe Schiefer et al. 2023)	einzig bundesweite Stichprobe mit nachvollziehbaren Samplingverfahren	Nur 10-jähriger Aufnahmehythmus und kein Zugang zu den Originaldaten
Bodeninformationen, inkl. Humusform	BGR-Bodenatlas (1 : 1 000 000);  Digitale Bodenkarten der Länder  Bodenzustandserhebung (BZE)  Forstliche Standortkartierungen der Länder (1 : 25 000 – 1 : 50 000)	Flächendeckende physikal./chem. Bodeneigenschaften  Bodeneigenschaften der Länder in relativ hoher und standortangepasster Auflösung  bundesweite Stichproben mit klarer Struktur und Sampling  Standorttyp-Auflösung bis Bestandesniveau	sehr grobe Einheiten - oft nicht für lokale Planungen verwendbar  genauere Informationen, aber heterogen und tw. nicht digital verfügbar  Stichproben, Aktualisierung nur im 15-jahres Turnus  heterogen und teils nur analog
Klima (inkl. Temperatur)	RADOLAN-Niederschläge  DWD Datenbank (inkl. Temperatur)	Frei verfügbar, Stündliche Werte, Flächendeckende Niederschlagserfassung  Hoch aufgelöst Auch historische Daten	relativ grobe Auflösung, leichte methodische Inkonsistenzen  nur Stationen des DWD Messnetzes integriert
Wasserhaushalt	UFZ-Dürremonitor (1 km, tgl.)  ICP Forests Level I & II	Modellbasiert, historisch 1954-heute; Web-API  Bodenwasserchemie verfügbar	Keine Direktmessung; Modell-unsicherheit bei Moor-/Felsstandorten  nur punktuell verfügbar, Messfrequenz gering

Forstparameter	relevante Zusatzdaten	Vorteile	Nachteile
Relief	<p>Copernicus DEM (25 m)</p> <p>nationales DEM (1m)</p> <p>LiDAR Daten der Länder (1m)</p> <p>perspektivisch: digitaler Zwilling des BKG</p>	<p>Vollflächig, open data</p> <p>nicht kostenfrei für alle Nutzenden verfügbar in Kombination mit DOM gute Auswertungsmöglichkeiten</p> <p>national hochaufgelöst</p>	<p>limitiert die Informationen über das Kleinrelief</p> <p>Aktualisierungsturnus unklar heterogene Verfügbarkeit</p> <p>bisher nicht verfügbar (und ggf. nicht für alle Nutzenden)</p>
Standortstyp (Standortskarten)	Forstliche Standortkartierungen der Länder (1 : 25 000 – 1 : 50 000)	Höchste Praxisrelevanz für Baumarteneignung & Wachstumsmodellierung	Uneinheitliche Klassifikation; Digitalisierung bis 2027 im Aufbau
Zerschneidung	IÖR Monitor ( <a href="https://www.ioer-monitor.de/">https://www.ioer-monitor.de/</a> )	100 m-Indikatoren Straßendichte, Konnektivität - zeigt mögliche direkte Effekte von Zerschneidung	<p>Nur indirekt - Straßennetz ggf. nicht vollständig und Grünbrücken nicht integriert</p> <p>Aktualität ggf. nicht ausreichend ( 3 Jahre)</p>
Atmosphäre	<p>ICP Forests Level I &amp; II</p> <p>Stickstoffbelastungsinformationen des UBA (<a href="https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html">https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html</a>)</p>	<p>Luftqualität, Deposition, Wetter, Sichtbarer Ozon-Schaden</p> <p>gute Modellierungsgrundlage</p>	<p>nur punktuell verfügbar, Messfrequenz gering</p> <p>räumliche Auflösung gering / 3-Jahres Mittelwerte</p>
Schutzgebietsstatus	<p>Informationen zu Schutzgebieten des BfN (<a href="https://www.bfn.de/daten-und-fakten/naturschutzgebiete-deutschland">https://www.bfn.de/daten-und-fakten/naturschutzgebiete-deutschland</a>)</p> <p>NATURA 2000 Datenbank (<a href="https://www.bfn.de/natura-2000-gebiet">https://www.bfn.de/natura-2000-gebiet</a>)</p> <p>Nationalpark-informationen (z.B. Bayerischer Wald)</p>	<p>Alle Schutzgebiete auf einen Blick</p> <p>Oft sehr fachspezifische Informationen</p> <p>sehr detailliert</p>	<p>Nicht alle Informationen sofort zum Download verfügbar</p> <p>Aktualität nicht sehr hoch</p> <p>nur punktuell (speziell NPs) verfügbar</p>
Waldbrände	<p>EFFIS - Datenbank (<a href="https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/applications/data-and-services">https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/applications/data-and-services</a>)</p> <p>ZKI Waldbrand Monitoring System (<a href="https://www.dlr.de/de/zki/diens">https://www.dlr.de/de/zki/diens</a>)</p>	<p>Echtzeit-Info &amp; Historie ab 2000; EU-weit frei verfügbar</p> <p>Aktuelle und schnelle Informationen über</p>	<p>8 km-Raster recht grob</p> <p>immer noch nur mittlere Auflösung (ca. 300 m)</p>

Forstparameter	relevante Zusatzdaten	Vorteile	Nachteile
	<a href="https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/waldbrandatlas.html">te-und-projekte/zki-feuer-und-wasser-service/zki-waldbrand-monitoring-system</a>  Digitaler Waldbrandatlas des BKG ( <a href="https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/waldbrandatlas.html">https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/waldbrandatlas.html</a> )	Waldbrände in Europa der letzten 31 Tage  Hohe Detailtiefe bei Bedarf (inkl. Planet Daten)	und keine manuelle Qualitätskontrolle  Lizenzabhängige Bilddaten (nur für Bundesbehörden)
Sozioökonomische Daten	Destatis Holzpreisindex; BWI-Nutzungsdaten; Holzeinschlags-meldungen (BMEL)	Zeitnahe Preis-& Mengen-Signale zur Management-einordnung	Daten nicht räumlich genau verortet (ggf. trotzdem Hilfestellung mit Unterstützung von Fernerkundungsmethoden)
Eigentumsart	Eigentümer und Flurstücksnummer  in Kombination mit:  Liegenschaftskataster (ALKIS-Daten)	Grundbuch ist das offizielle Register, in dem alle Eigentümer von Grundstücken eingetragen sind.  Das Liegenschaftskataster enthält kartografische und beschreibende Informationen zu Grundstücken (Flurstücksnummern, Grenzen, Nutzung)	<b>Zugang nur mit berechtigtem Interesse</b> (z. B. Eigentumsnachweis, berechtigtes wirtschaftliches Interesse, öffentliches Interesse als Behörde/Forschungseinrichtung)

Die zusätzlich aufgeführten Boden-, Klima- und Managementdaten lassen sich auf drei Ebenen nutzbringend in ein integriertes Waldmonitoring einbinden. **Erstens** dienen sie als Prädiktoren oder Stratifikationslayer: Boden- und Geländedaten wie das Copernicus-DEM oder die BGR-Bodenübersicht schaffen einen ökologischen Kontext, der Fernerkundungsmodelle aus Kapitel 2.5 stabilisiert und standortabhängige Unterschiede in Biomasse- oder Vitalitätsschätzungen erklärt. **Zweitens** fungieren Inventur- und Monitoringnetze – etwa Bundeswaldinventur, ICP Forests oder terrestrische Laserscans – als hochaufgelöste Referenz- und Validierungsdaten. Sie ermöglichen es, satellitengestützte Produkte kalibriert auf Einzelbaum- oder Plotebene zu prüfen und dadurch Modellunsicherheiten systematisch zu quantifizieren. **Drittens** entscheidet die Aktualität der jeweiligen Quelle über ihre Gewichtung im operationellen Einsatz: Daten mit kurzen Wiederholzyklen wie RADOLAN-Niederschläge, die jährliche Waldzustandserhebung oder der tägliche UFZ-Dürremonitor liefern zeitnah Warnsignale und eignen sich für Frühinterventionen, während zehn- oder fünfzehnjährige Surveys wie Bundeswaldinventur oder Bodenzustandserhebung in erster Linie robuste Basislinien und Trendanalysen bereitstellen.

Zusammengenommen ergänzen diese Zusatzdaten die in Kapitel 2.5 beschriebenen Fernerkundungsprodukte komplementär und schaffen eine belastbare, mehrskalige Datengrundlage für die Bewertung von Waldökosystemen und forstlichen Eingriffen.

### 3.5 Bewertung zusätzlicher Daten zur Eignung von Waldzustandsanalysen

Zusatzdaten, die bundesweit für Waldzustandsanalysen benötigt werden, lassen sich grob in drei Verfügbarkeits- und Kostenklassen einteilen. Erstens existiert ein wachsender Pool frei zugänglicher Felddatensätze und Modellreihen, die nach unkomplizierter Registrierung ohne Gebühren heruntergeladen werden können – etwa RADOLAN-Niederschlagsfelder oder der UFZ-Dürremonitor. Solche Quellen lassen sich ohne lange Vorlaufzeit als standort- oder witterungsbezogene Prädiktoren in deutschlandweiten Vitalitäts- und Zuwachsmodellen nutzen. Die zweite Gruppe umfasst klassische Inventur- und Intensivmessnetze wie Bundeswaldinventur oder Kohlenstoff- und Bodenzustandserhebung. Sie liefern die entscheidende Kalibrier- und Validierungsbasis für Fernerkundungsprodukte, unterliegen jedoch Forschungs- oder Datennutzungsverträgen. Projektanträge, Datenschutz- und Publikationsvereinbarungen verursachen durchaus Bearbeitungszeiten. Die Datennutzung ist in der Regel kostenfrei, erfordert aber einen eigenständigen administrativen Aufwand. Zudem sind die Daten zwar gut dokumentiert, ihre Relation zu den Fernerkundungsdaten erfordert aber eine intensive Beschäftigung mit der jeweiligen Erhebungsmethodik, die nicht unbedingt an die Bedürfnisse der Fernerkundung angepasst sind (z.B. Stichprobenkreise anstatt pixelweise Erhebung). Am kostenintensivsten sind deutschlandweit konsistente Zusatzdaten, die speziell erhoben oder in Laboren nachanalysiert werden müssen, beispielsweise flächig harmonisierte Bodenchemie-Nachproben oder eine neue Messkampagne zur Aktualisierung von ICP-Forests-Level-II-Flächen. Hier würden gänzlich neue Kosten in der fernerkundungsbasierten Aufbereitung und Bereitstellung der Daten entstehen.

Die Ausgaben verlagern sich dabei zunehmend von der Beschaffung hin zur Datenveredelung: Harmonisierung unterschiedlicher Messprotokolle, automatisierte Verarbeitung großer Zeitreihen sowie Versionierung und Archivierung bedürfen bereits heute große Teile des Gesamtbudgets bundesweiter Monitoringvorhaben. Personal-kosten sind der größte Posten, insbesondere wenn Spezialwissen für Bodenkartierung oder Taxonomie gefordert ist. Projekte minimieren Kosten, wenn sie frei verfügbare Referenz- und Kontextdaten konsequent ausschöpfen, frühzeitig bundeslandspezifische Daten- und Lizenzanforderungen bündeln und wiederverwendbare Workflows etablieren. Für ein operationelles Waldmonitoring ergibt sich damit ein klares Prioritätenschema: Zuerst werden alle offen zugänglichen Zusatzdaten integriert, weil sie bundesweit konsistente Zeitreihen ermöglichen. Vertragsgebundene Inventur- und Intensivmessdaten folgen, sobald die administrativen Hürden genommen sind. Teure, neu zu erhebende Datensätze sind nur dort sinnvoll, wo bestehende Quellen eine deutschlandweit

angestrebte räumliche oder thematische Detailtiefe eindeutig nicht abdecken.

## 4 Bewertung der Relevanz, Eignung, Erhebungsaufwand und Kosten von Fernerkundungsdaten und Zusatzdaten für die Waldanalysen

### 4.1 Ziel des Kapitels

Dieses Kapitel beschreibt die Bewertung der in Kapitel 2 und Kapitel 3 dargestellten Fernerkundungssysteme, Zusatzdaten und der 23 Forstparameter anhand einer Bewertungsmatrix (sh. Tabelle), die von jedem Mitglied des Projektteams ausgefüllt wurde. Das Ziel der Bewertungsmatrix soll die Relevanz und Eignung verschiedene Datensätze, ihr Erhebungsaufwand und eine Kostenschätzung in Bezug auf Waldanalysen ermitteln. Dabei kommen vier Bewertungskategorien zum Einsatz.

Die **erste Kategorie** bewertet die allgemeine Relevanz und Eignung eines Forstparameters für folgende Anwendungen:

- die Waldzustandserfassung,
- die Einschätzung der Bewirtschaftungsintensität und
- die Ableitung der Quellen- und Senkenfunktion von Wäldern.

Zunächst wird eingeschätzt, wie bedeutsam der jeweilige Parameter für die Analyse des Waldzustands ist – also ob er für entsprechende Bewertungen notwendig oder eher nachrangig ist. Anschließend erfolgt eine Bewertung seiner Relevanz für die Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüssen sowie für die Analyse der Kohlenstoff Quellen- und -senkenfunktion.

In Anlehnung an Tabelle 4 folgt danach eine Übersicht der Fernerkundungssysteme, die zur Ableitung der jeweiligen Forstparameter genutzt werden können. Abschließend wird beurteilt, wie gut sich diese Systeme für die Ableitung eignen und in welchen zeitlichen Abständen eine Aktualisierung der Forstparameter erfolgen sollte, um für die genannten Waldanalysen aussagekräftig zu bleiben.

Die **zweite Kategorie** befasst sich mit den Zusatzdaten (häufig auch als „ground-truthing data“ bezeichnet), die erforderlich sind, um die Forstparameter aus Fernerkundungsdaten abzuleiten. Dieser Teil bezieht sich auch auf die Erkenntnisse aus AP3 Kapitel 3.4. In der ersten von vier Spalten wird eingeschätzt, inwieweit der jeweilige fernerkundungsbasierte Forstparameter von Zusatzdaten abhängig ist. Anschließend werden in der zweiten Spalte der Datentyp bzw. die genaue Bezeichnung der benötigten Zusatzdaten angegeben. Die dritte Spalte beschreibt die Voraussetzungen für den Zugang zu diesen Daten. Abschließend nennt die vierte Spalte die Institution, die den jeweiligen Datensatz bereitstellt.

In der **dritten Kategorie** wird der personeller, kognitiver/konzeptioneller und technischer Aufwand zur Ableitung des Forstparameters aus FE-Daten abgeschätzt. Es werden auch Forstparameter bewertet, die schon für Deutschland flächig zur Verfügung stehen. Der personelle Aufwand wird mittels Personenmonate (PM) eingestuft. Ein Personenmonat ist definiert als Arbeitszeit einer Person in Vollzeit über einen Monat bei einer 40h Woche. Der kognitive oder auch konzeptionelle Aufwand wird anhand von Fachwissen zur Ableitung dieses Forstparameters eingestuft. Analog erfolgt die Abschätzung zur technischen Infrastruktur. Zum Abschluss wird der Gesamtaufwand qualitativ bewertet.

Die **vierte Kategorie** beinhaltet eine Kostenabschätzung auf Basis der Bewertung in der Kategorie Erhebungsaufwand. Die Kosten für die Datenbeschaffung richten sich nach den Zugangsvoraussetzungen, die in der zweiten Kategorie genannt sind. Für das Personal wird der Arbeitgeberkostenaufwand einer TVÖD 13/3 Stelle (Vollzeit) von derzeit ca. 6500 Euro angenommen. Die Kosten für die technische Infrastruktur werden danach abgeschätzt. Abschließend erfolgt eine Gesamtkostenabschätzung.

## 4.2 Angewandte Methodik für die Bewertungsmatrix

Die Bewertungen erfolgten durch die Expertise des Projektteams mittels einer Likertkala für die einzelnen Kategorie (Tabelle 7).

Für die erste Kategorie: Relevanz und Eignung der Forstparameter steht folgende Erläuterung zur Verfügung.

Tabelle 7 | Bewertungskriterien für Relevanz und Eignung der Forstparameter

Relevanz und Eignung der Forstparameter		
Beschreibung	Wert	empfohlenes Aktualisierungsintervall
<b>überhaupt nicht relevant</b> – Hat keinen erkennbaren Einfluss auf den Indikator.	1 (--)	wöchentlich
<b>Wenig relevant</b> – Trägt nur in Ausnahmefällen oder sehr geringfügig zum Indikator bei.	2 (-)	monatlich
<b>Mäßig relevant</b> – Hat eine gewisse Bedeutung, aber ist nicht zentral	3 (o)	jährlich
<b>Relevant</b> – Trägt substantiell zur Aussagekraft des Indikators bei.	4 (+)	alle 3 Jahre
<b>Sehr relevant</b> – Unverzichtbar, zentrale Grundlage für die Berechnung oder Interpretation.	5 (++)	alle 5 Jahre

Für die zweite Kategorie: Externe Zusatzdaten zur Erstellung der Forstparameter dient folgende Ausfüllanleitung (Tabelle 8).

Tabelle 8 | Bewertungskriterien für Abhängigkeiten und Zugangsmöglichkeiten der Forstparameter

Abhängigkeiten und Zugangsmöglichkeiten		
Beschreibung	Wert	Beschreibung Zugangsmöglichkeiten
<b>Sehr hohe Abhängigkeit</b> – Der Indikator ist ohne spezifische Zusatzdaten nicht berechenbar oder aussagekräftig.	1 (--)	<b>Nicht zugänglich</b> – Daten sind nicht öffentlich oder nicht verfügbar (z. B. proprietär, geschützt, existieren nur intern).
<b>Hohe Abhängigkeit</b> – Zusatzdaten sind notwendig für die Berechnung oder Interpretation; ohne sie ist der Indikator unvollständig.	2 (-)	<b>Stark eingeschränkt</b> – Zugang nur unter speziellen Bedingungen (z. B. kostenpflichtig, nur für Behörden/Forschungseinrichtungen).
<b>Moderate Abhängigkeit</b> – Zusatzdaten sind hilfreich und verbessern die Aussagekraft, aber der Indikator bleibt auch ohne sie interpretierbar.	3 (o)	<b>Eingeschränkt verfügbar</b> – Daten sind grundsätzlich zugänglich, aber nur über Antrag, Projektbeteiligung oder institutionelle Kooperation.
<b>Geringe Abhängigkeit</b> – Zusatzdaten werden optional genutzt, beeinflussen aber das Ergebnis nur minimal.	4 (+)	<b>Offen mit Bedingungen</b> – Daten sind frei, aber erfordern z. B. eine Registrierung oder Lizenzangabe.
<b>Keine Abhängigkeit</b> – Der Indikator basiert ausschließlich auf Primärdaten oder direkt messbaren Größen.	5 (++)	<b>Uneingeschränkt offen</b> – Daten sind frei verfügbar, öffentlich zugänglich und ohne Registrierung nutzbar.

Die Dritte Kategorie: Erhebungsaufwand der Forstparameter orientiert sich an folgenden Instruktionen (Tabelle 9).

Tabelle 9 | Bewertungskriterien für den Erhebungsaufwand

Erhebungsaufwand	Personeller Aufwand	Kognitiver/konzeptioneller Aufwand	Technischer Aufwand	Wert
sehr gering	< 1 PM	Ohne spezielle Vorkenntnisse verständlich	Minimale PC Ausstattung (z.B. Laptop) und Onlineprogramme (SNAP)	1 (--)
gering	2-5 PM	Grundlagenwissen, wie im Studium vermittelt wird	Standardgeräte mit Standardsoftware (QGIS)	2 (-)
mittel	6 -9 PM	Solides Fachwissen erforderlich, aber keine Spezialisierung erforderlich	Schneller PC mit gängigen Softwareprogrammen (Google Earth Engine)	3 (o)
hoch	10-18 PM	Vertieftes fachwissen mit Anwendung komplexer Konzepte oder Methoden	Spezialhardware (PC und Serverstruktur), komplexe Softwareumgebung, evtl. Programmierung	4 (+)

sehr hoch	19-36 PM	Expertenwissen oder forschungsnahes Spezialwissen	Komplexe Systemintegration, eigene Entwicklungen von PC und Server sowie hochgradig spezialisierte oder selbst entwickelte Software	5 (++)
-----------	----------	---------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------

Die vierte Kategorie: Kostenschätzung für Datenbeschaffung, Personal, technisch Umsetzung / Infrastruktur sowie eine Gesamtkostenabschätzung (Tabelle 10).

Tabelle 10 | Bewertungskriterien für den Kostenaufwand

Kostenabschätzung	Beschreibung	Wert
< 10.000 Euro	<b>Sehr gering</b> – Praktisch keine oder minimale Kosten (z. B. freie Daten, vorhandene Ressourcen)	1 (--)
10.001 - 50.000 Euro	<b>Gering</b> – Geringe Ausgaben, gut im Projektbudget integrierbar	2 (-)
50.001 - 150.000 Euro	<b>Mittel</b> – Moderate Kosten, ggf. Aufwand für Budgetierung oder Fördermittel notwendig	3 (o)
150.001 - 300.000 Euro	<b>Hoch</b> – Deutlich spürbare Kosten, spezifische Finanzierung oder Ressourcenumverteilung nötig	4 (+)
300.001 - >600.000 Euro	<b>Sehr hoch</b> – Sehr kostenintensiv	5 (++)

Zur Darstellung der Ergebnisse der vier beteiligten Institutionen wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Die Bewertung der Ergebnisse orientierte sich an den Klassifikationskriterien in Tabelle 11.

Tabelle 11 | Bewertungskriterien für Mittelwerte und Standardabweichung

Mittelwerte	Beschreibung	Standardabweichung	Beschreibung
1,0 bis 1,49	sehr geringe Zustimmung/Tendenz	>1,0	Geringer Konsens
1,5 bis 2,49	geringe Zustimmung	0,5 bis 1,0	Mäßiger Konsens
2,5 bis 3,49	Neutrale / mittlere Tendenz	0,5 bis 0	Sehr hoher Konsens
4,5 bis 5,0	Sehr hohe Zustimmung		

### 4.3 Ergebnisse der Bewertungsmatrix

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier Kategorien dargestellt. Die Excel-Datei wird dem Wissenschaftlichen Beirat für Natürlichen Klimaschutz zur Verfügung gestellt.

Tabelle 12 | Bewertungsmatrix mit allen vier Kategorien

		1 Relevanz und Eignung der Forstparameter						2.Externe Zusatzdaten zur Erstellung der Forstparameters				3.Erhebungsaufwand zur Ableitung der Forstparameter				4. Kostenabschätzung für....			
Nr.	Forstparameter	Relevanz des Forstparameters für die Analyse des Waldzustandes	Relevanz des Forstparameters für die Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüssen	Relevanz des Forstparameters für die Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion	Aus welchen FE-Systeme kann dieser Forstparameter abgeleitet werden. (Existierende FE-Systeme/Produkte (basierend auf Tabelle in 2.5))	Eignung existierender FE-Systeme zur Erfassung des Forstparameters (Wie gut kann man diesen Parameter aus den bestehenden FE-Systemen ableiten?)	empfohlenes Aktualisierungsintervall	Abhängigkeit von externen Zusatzdaten zur Erstellung/Kalibrierung des Forstparameters	Datenbezeichnung/Datentyp	Zugänglichkeiten zu den externen Zusatzdaten	Trägerschaft der Daten	Personeller Aufwand (Einschätzung nach Personennominate)	Kognitiver/konzeptueller Aufwand (fachliche Komplexität der Methoden, Analyse und Ergebnisinterpretation)	Technischer Aufwand (Bedarf an Geräten, Software, IT-Infrastruktur und technischer Wartung)	Einschätzung des Gesamtaufwands	Datenbeschaffung	Personal	Technische Umsetzung/Infrastruktur	Gesamtkostenabschätzung
1	Baumarten	4,8	5,0	5,0	Zeitreihen optischer Satellitendaten mit einer räumlichen Auflösung	4,3	5,0	1,0	Forstinventuren (Bund und Länder)	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	4,0	4,3	3,8	4,1	1,0	3,8	2,8	3,2

					<=10m (z.B. Sentinel-2)														
					Luftbildern	4,0	5,0	1,0		2,0		5,0	4,3	4,8	5,0	2,0	5,0	3,8	4,2
2	Baumhöhe	4,0	4,5	4,5	LiDAR (Flugzeuggestützt)	5,0	4,0	4,3	Forstinventuren (Bund und Länder)	2,5	Thünen Institut/Landsforstalten	4,8	4,5	4,8	5,0	5,0	4,8	4,0	4,8
					Luftbild (Photogrammetrie, bDOM)	4,3	4,0	4,0		2,5		4,3	4,3	4,3	4,3	1,3	4,3	3,5	3,8
					GEDI (ISS-LiDAR) + optische Satellitendaten	3,3	4,0	3,5		2,5		4,0	4,0	4,0	3,8	1,0	4,0	3,3	3,4
3	Baumdurchmesser	3,3	4,5	4,8	LiDAR (Flugzeuggestützt)	4,0	4,0	2,3	Forstinventuren (Bund und Länder)	2,0	Thünen Institut/Landsforstalten	5,0	4,8	4,5	4,9	3,3	4,8	4,0	4,6
					Abschätzung über Baumhöhe (Ertragstafel, Allometrien)	3,7	4,0	2,0		2,0		3,3	3,7	3,0	3,3	1,0	3,3	2,7	3,0
4	Baumanzahl	2,8	4,0	4,5	Luftbilder	3,5	4,0	1,5	Forstinventuren (Bund und Länder)	2,5	Thünen Institut/Landsforstalten	5,0	3,8	3,8	4,3	1,8	4,8	3,3	4,0
					LiDAR (Flugzeuggestützt)	3,8	4,0	1,8		2,5		5,0	4,5	4,5	4,9	3,3	4,8	4,0	4,6
5	Grundfläche/Basalfäche	3,3	4,3	4,8	Kombination aus Baumdurchmesser und Baumanzahl	4,5	4,0	1,5	Forstinventuren (Bund und Länder)	1,5	Thünen Institut/Landsforstalten	4,0	3,7	3,7	4,1	3,0	3,3	3,0	3,0

6	Kronenschlussgrad	4,0	4,3	4,0	Optische Satellitendaten	4,3	3,0	3,3	BWI-Kronenparameter oder Landesweite	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	3,0	3,3	3,0	3,1	1,5	2,5	2,8	2,5
					Luftbilder	4,3	3,3	3,3	Luftbildinterpretationen oft als Bestandteil der Forsteinrichtung, Waldzustandserhebung	2,0		4,0	3,7	3,7	3,9	1,3	3,3	3,3	3,1
					LiDAR (Flugzeuggestützt)	4,8	3,3	3,3	2,0	4,3		4,7	3,7	4,4	4,0	3,7	3,3	3,9	
7	Vorrat/Biomasse	2,8	3,8	4,8	Biomasseabschätzung über Baumhöhe (LiDAR)	4,7	3,0	2,7	Forstinventuren (Bund und Länder)	1,7	Thünen Institut/Landsforstanstalten	4,5	4,5	3,8	4,4	3,8	4,0	3,5	4,3
					Biomasseabschätzung über Baumhöhe (Luftbilder, bDOM))	4,3	3,0	2,7		1,7		4,7	4,7	3,7	4,6	1,3	4,0	2,7	3,2
					Biomasseabschätzung über Baumhöhe (GEDI+Soptische Satellitendaten)	3,0	3,3	2,7		1,7		3,0	3,7	3,3	3,4	1,3	3,0	3,0	2,8
					Biomasseabschätzung mittels L-Band/P-Band SAR	3,0	3,0	2,0		2,0		3,0	4,0	3,0	3,4	1,0	3,0	3,0	3,2
8	Zuwachs	2,5	3,8	5,0	indirekt über multitemporale	3,0	4,0	3,3	Vergleich der Wiederholungsmessung	1,7	Thünen Institut/Landsforstanstalten	3,3	4,0	3,7	3,6	2,3	3,3	3,7	3,3

					Biomasseabschätzung				gen der BWI seit 1992											
9	Vitalität	5,0	2,5	4,0	Optische Satellitendaten	4,8	1,7	3,3	Waldzustandserhebung (WZE)	1,5	Thünen Institut/Landsforstanstalten	2,8	3,3	3,3	3,2	1,3	2,5	2,8	2,3	
10	Strukturvielfalt	3,8	3,8	2,5	LiDAR (Flugzeuggestützt)	4,5	4,0	3,0	Forstinventuren und oder Waldbiotopkartierungen (Bund und Länder)	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	4,8	4,8	4,5	4,7	4,0	4,5	3,8	4,6	
					auf Basis von Baumhöhenmodellen (LiDAR)	4,0	4,0	3,0		2,0		5,0	5,0	4,3	4,9	4,0	4,7	3,7	4,8	
					auf Basis von Baumhöhenmodellen (Luftbilder, bDOM)	3,3	4,0	3,0		2,0		4,0	4,7	4,0	4,1	2,3	4,0	3,3	4,0	
					auf Basis von Baumhöhenmodellen (GEDI + optische Satellitendaten)	2,3	4,0	3,0		2,0		3,3	4,3	3,7	3,7	2,3	3,3	3,7	3,7	
11	Habitatbäume	3,5	3,0	1,8	Keine operationelle FE-Methode verfügbar	1	4	1	Einzelprojekte	2	keine Angaben	5	5	5	5	3,5	4,5	4,5	5	
12	Stehendes Totholz	4,0	2,5	2,3	Optische Satellitendaten (Bestandsebene)	2,8	4,3	1,7	Forstinventuren (Bund und Länder)	1,5	Thünen Institut/Landsforstanstalten	4,0	4,0	4,3	4,0	1,8	3,5	3,8	3,6	

					Luftbilder (Einzelbauebene)	3,8	4,3	1,7		1,5		3,7	3,7	4,0	3,7	1,0	3,3	3,3	3,4
13	Liegendes Totholz	4,0	2,5	2,3	nur bedingt möglich; Methoden noch in der Entwicklung	2,0	4,0	1,0	Forstinventuren (Bund und Länder)	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	5,0	5,0	5,0
14	Zerschneidung/Fragmentierung	3,0	3,5	2,0	GIS-Analyse; Anwendung auf Waldinformationsprodukte	5,0	5,0	3,0	Administrative Daten (ATKIS)	2,0	Landesvermessungsämter, ggf IÖR-Monitor	1,8	1,5	1,8	1,5	1,3	1,8	1,5	1,8
15	Rückegassen/Befahrung	3,0	5,0	2,3	LiDAR-basiertes Geländemodell; FE-Methoden noch in der Entwicklung	3,0	4,3	2,3	ggf. Forstinventuren der Länder	2,0	Landesforstanstalten	4,0	3,5	4,0	3,7	2,7	4,0	4,0	4,3
16	Standorttyp (Bodeninformation)	3,0	3,3	3,0	Keine operationelle FE-Methode verfügbar	1,0	5,0	1,0	Bodenatlas, BZW, Standortkartierungen	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	4,5	4,5	4,5	4,5	3,0	4,5	4,5	4,5
17	Bodenfeuchte/Wasserhaushalt	3,5	1,8	2,8	SAR- und optische Satellitendaten	3,0	1,7	2,3	Dürremonitor, Level I, II Flächen	5,0	UFZ, Thünen Institut	3,5	4,5	4,0	4,0	3,0	3,5	3,5	3,5
18	Niederschlag	1,8	1,5	2,3	DWD-Produkte	5,0	1,0	5,0	Wetterinformationen	5,0	DWD, Climate Data Center	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0
19	Relief	2,0	2,3	1,8	LiDAR-basiertes Digitales Geländemodell	5,0	5,0	5,0	nationales DGM	4,3	BKG, Landesvermessungsämter	1,8	1,8	2,0	1,8	1,3	1,3	1,3	1,3

20	Temperatur	3,0	2,0	1,8	Landoberflächentemperatur mittels Sentinel-3 oder Landsat. Methoden noch in der Entwicklung	4,0	2,3	3,7	ggf. Wetterinformationen	5,0	DWD, Climate Data Center	2,8	3,0	3,3	2,8	1,3	2,5	2,8	2,6
21	Schutzgebietssstatus	1,8	4,5	1,8	GIS-Analyse; Einbindung Daten zu Schutzgebieten (z.B. FFH)	5,0	5,0	1,0	Schutzgebietsgrenzen	3,7	BfN	1,3	1,3	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
22	Naturnähe	3,0	4,8	2,8	keine operationelle FE-Methode verfügbar	1,5	4,3	1,0	Biotoypenkartierung / Ökosystem monitoring	1,5	Landesforstanstalten, DESTATIS	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5	5,0	5,0	5,0
23	Humusform	2,8	2,0	3,3	keine operationelle FE-Methode verfügbar	1,0	5,0	1,0	Bodenatlas, BZW, Standortkartierungen	2,0	Thünen Institut/Landsforstanstalten	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5	5,0	5,0	5,0

### 4.3.1 Bewertungsmatrix zur Waldzustandsanalyse: Vorgehen und Ergebnisse

Auf Grundlage der Bewertungen in der Matrix (Tabelle 12) wurden in diesem Kapitel die Ergebnisse im Hinblick auf die Analyse des Waldzustandes ausgewertet.

Im ersten Schritt wurden die 23 Forstparameter gefiltert, die eine hohe Relevanz (Mittelwert >3,49) für die Analyse des Waldzustandes aufweisen. Dadurch reduzieren sich die 23 Forstparameter auf neun. In kursiver Schrift sind diejenigen Bewertungen dargestellt, deren Bewertung einen geringen Konsens erzielten. Dies wurde mittels der Standardabweichung > 1,0 berechnet. Ergänzend erfolgt eine Darstellung der derzeit verfügbaren Fernerkundungssysteme zur Erfassung der identifizierten Forstparameter sowie eine Empfehlung zu deren Aktualisierungsintervallen. Darüber hinaus wird die hohe bis sehr hohe Abhängigkeit von externen Zusatzdaten und deren Trägern aufgezeigt. Zusätzlich wurden der erforderliche Erhebungsaufwand sowie eine Kostenschätzung zur Erstellung der Forstparameter ermittelt. Im zweiten Schritt der Analyse wurden ausschließlich jene Forstparameter berücksichtigt, deren Ableitbarkeit durch Fernerkundung mit hoher Zustimmung bewertet wurde. Diese geeigneten Systeme sind in der Spalte "Eignung existierender FE-Systeme" abgebildet. Von den neun genannten Forstparametern (Tabelle 13) können sechs mittels Fernerkundung abgeleitet werden (Illustration 7-9).

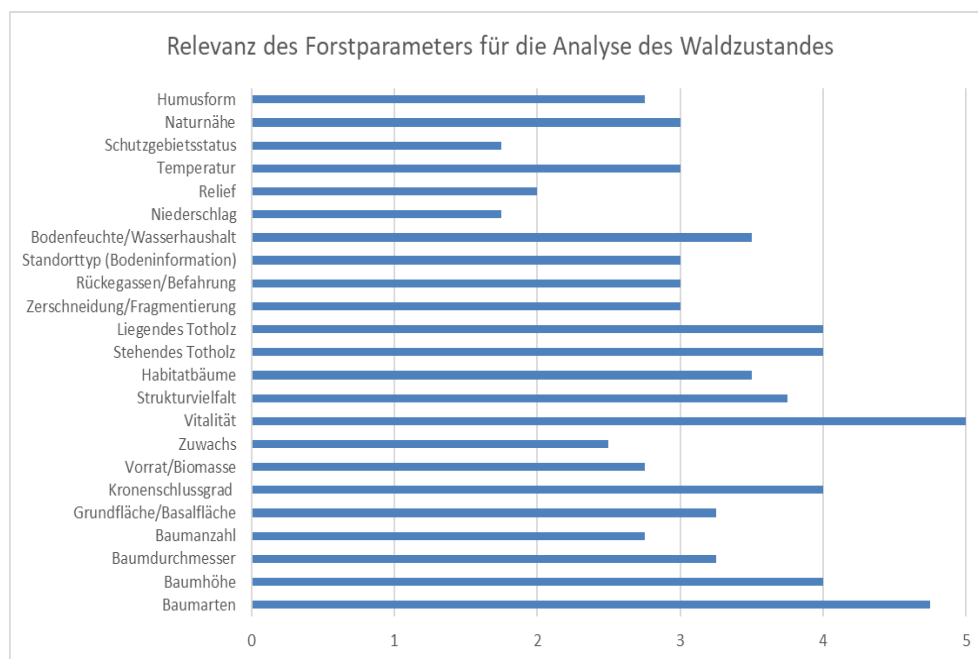


Illustration 6 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Waldzustand

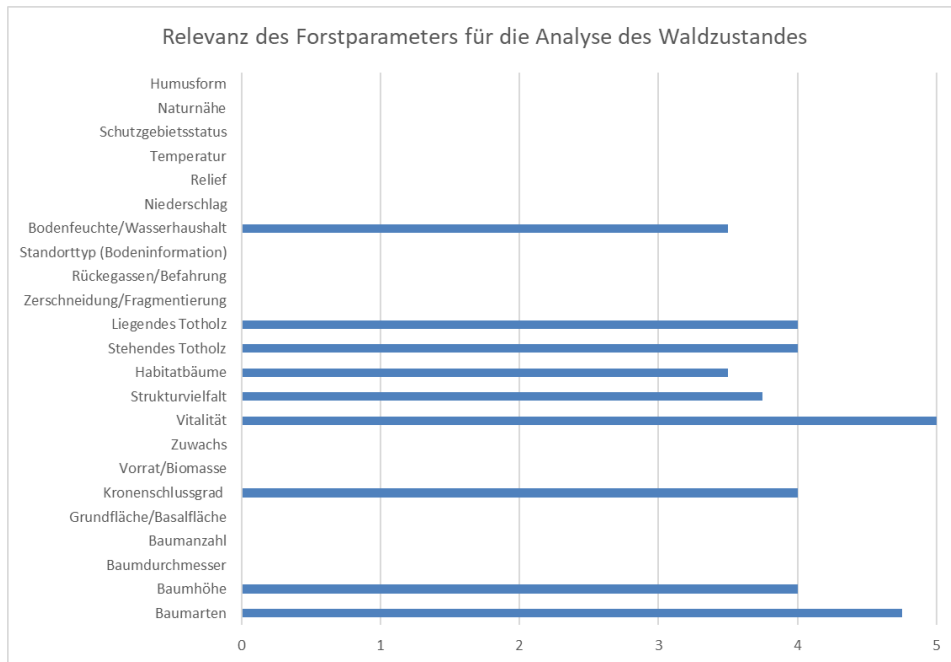


Illustration 7 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Waldzustand (Mittelwert >3,49)

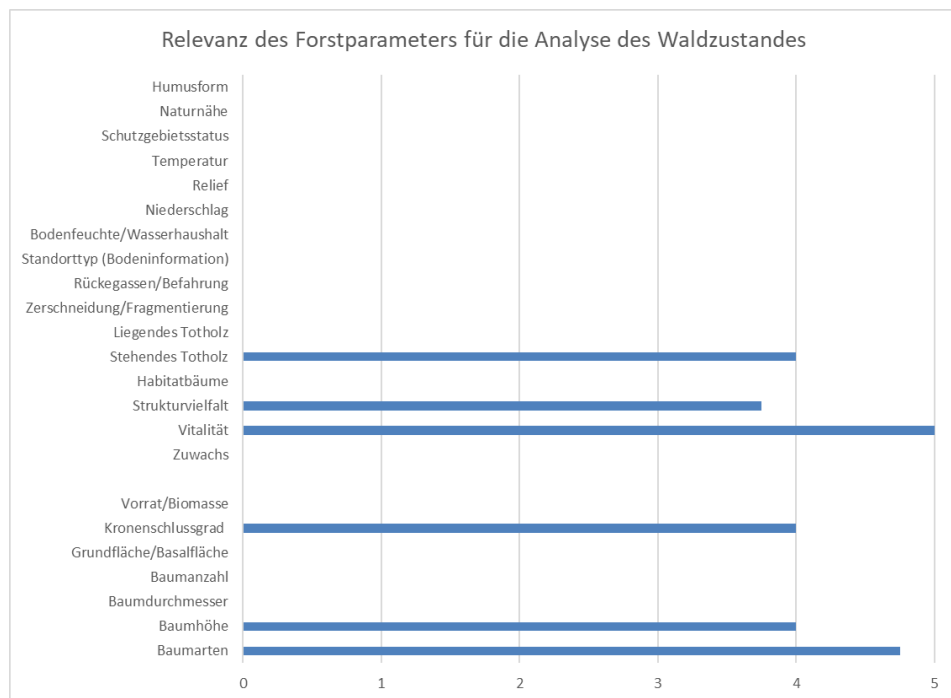


Illustration 8 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Waldzustand (Mittelwert >3,49) und Eignung existierender FE Systeme (Mittelwert >3,49)

Tabelle 13 | Die neun Forstparameter, die für die Erfassung des Waldzustandes geeignet sind.

Forstparameter (In kursiv mit niedrigem Konsens zwischen Experten)	Eignung existierende r FE- Systeme, Ansätze und Methoden	Aktualisierungsintervall	Abhängigkeiten und Zugangsmöglichkeit von Zusatzdaten/Träger	Erhebungsaufwand	Kostenabschätzung	Umsetzung
Baumart	Luftbilder oder Sentinel-2	5 Jahre	sehr hoch und Stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen: 215.000 und 484.000 Euro (Personalkosten sind Hauptkostentreiber)	Datensätze vorhanden, Methodik bekannt
<i>Baumhöhe</i>	LiDAR oder Luftbilder (bDOM)	3 Jahre	geringe aber eingeschränkt verfügbar / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen 500.000 und 1.200.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren
Kronenschlussgrad	Optische Satellitendaten oder Luftbilder oder LiDAR	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	bei LiDAR und Luftbildern hoch	zwischen 200.000 und 500.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Datensatz muss erstellt werden
Vitalität	Optische Satellitendaten	wöchentlich, monatlich, jährlich	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	<i>mittel</i>	gering ca. 50.000 Euro	Datensätze vorhanden, Methodik bekannt

<i>Strukturvielfalt</i>	<i>LiDAR, auf Basis von LiDAR</i>	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen 417.000 und 1.017.000 Euro bei Verwendung von LiDAR Daten	Datensatz muss erstellt werden
<i>Habitatbaume</i>	Keine operationelle FE-Methode verfügbar	3 Jahre	sehr hoch und sehr eingeschränkt / Landesforsten	sehr hoch	schwer bezifferbar	kein Deutschlandweiter flächiger Datensatz vorhanden
<i>Stehendes Totholz</i>	<i>Optische Satellitendaten oder Luftbilder</i>	3 Jahre	sehr hoch und sehr eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch	zwischen 208.500 und 417.000 Euro	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren
<i>Liegendes Totholz</i>	<i>nur bedingt möglich; Methoden noch in der Entwicklung</i>	3 Jahre	sehr hoch und sehr eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	sehr hoch	ca. 834.000 Euro	kein Deutschlandweiter flächiger Datensatz vorhanden
Bodenfeuchte/Wasserhaushalt	SAR- und optische Satellitendaten, besser externe Zusatzdaten	wöchentlich, monatlich	stark aber uneingeschränkt offen	hoch	ca. 215.000 ( bei Nutzung von fertigen Zusatzdaten, wie UFZ-Dürremonitor günstiger)	Deutschlandweiter flächiger Zusatzdatensatz vorhanden

### 4.3.2 Bewertungsmatrix zur Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüssen: Vorgehen und Ergebnisse

Analog zu 4.3.1 erfolgte in diesem Kapitel die Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse im Hinblick auf die Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüssen. Im ersten Schritt wurden die 23 Forstparameter gefiltert, die eine hohe Relevanz (Mittelwert >3,49) für die Abschätzung des Bewirtschaftungseinflusses aufweisen. Dadurch reduzieren sich die 23 Forstparameter auf dreizehn. In kursiver Schrift sind diejenigen Bewertungen dargestellt, deren Bewertung einen geringen Konsens erzielte. Dies wurde mittels der Standardabweichung > 1,0 berechnet. Ergänzend erfolgt eine Darstellung der derzeit verfügbaren Fernerkundungssysteme und Verfahren zur Erfassung der identifizierten Forstparameter sowie eine Empfehlung zu deren Aktualisierungsintervallen. Darüber hinaus wird die hohe bis sehr hohe Abhängigkeit von externen Zusatzdaten und deren Trägern aufgezeigt. Zusätzlich wurden der erforderliche Erhebungsaufwand sowie eine Kostenschätzung zur Erstellung der Forstparameter ermittelt. Im zweiten Schritt der Analyse wurden ausschließlich jene Forstparameter berücksichtigt, deren Ableitbarkeit durch Fernerkundung mit hoher Zustimmung bewertet wurde. Diese geeigneten Systeme sind in der Spalte "Eignung existierender FE-Systeme" abgebildet. Von den dreizehn genannten Forstparametern (Tabelle 14) können zehn mittels Fernerkundung abgeleitet werden (Illustration 10-12).

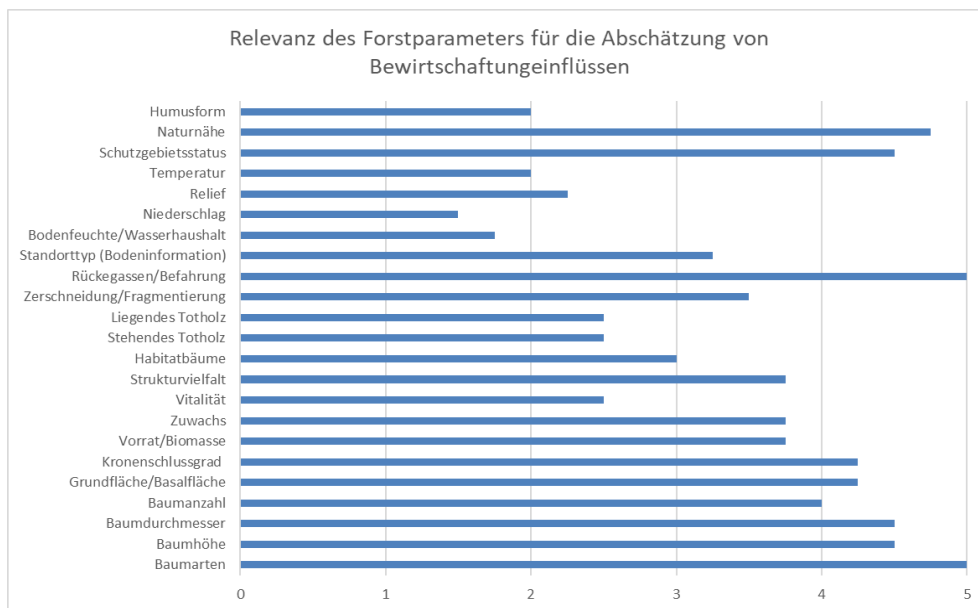


Illustration 9 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Bewirtschaftungseinflüsse

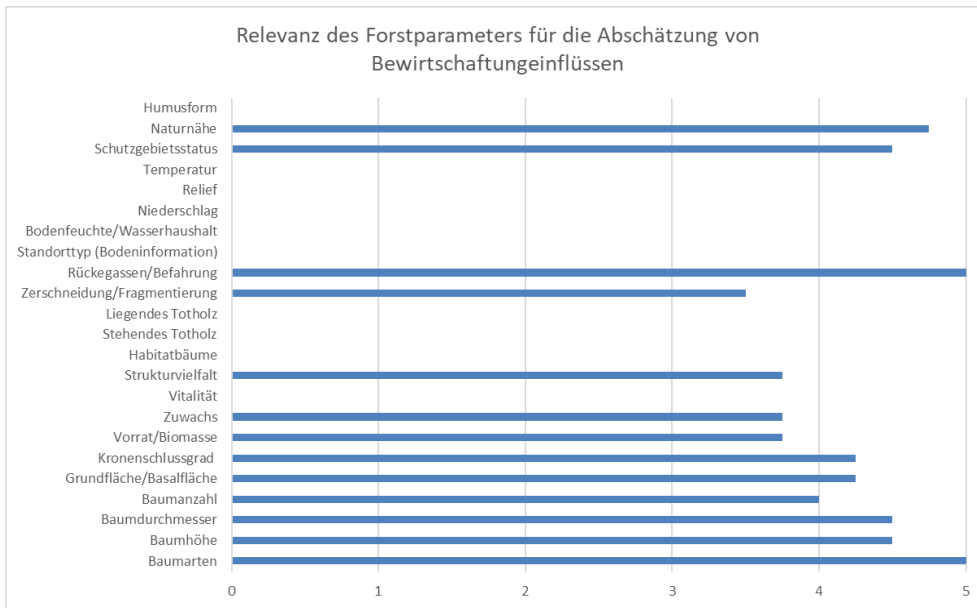


Illustration 10 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Bewirtschaftungseinflüsse (Mittelwert >3,49)

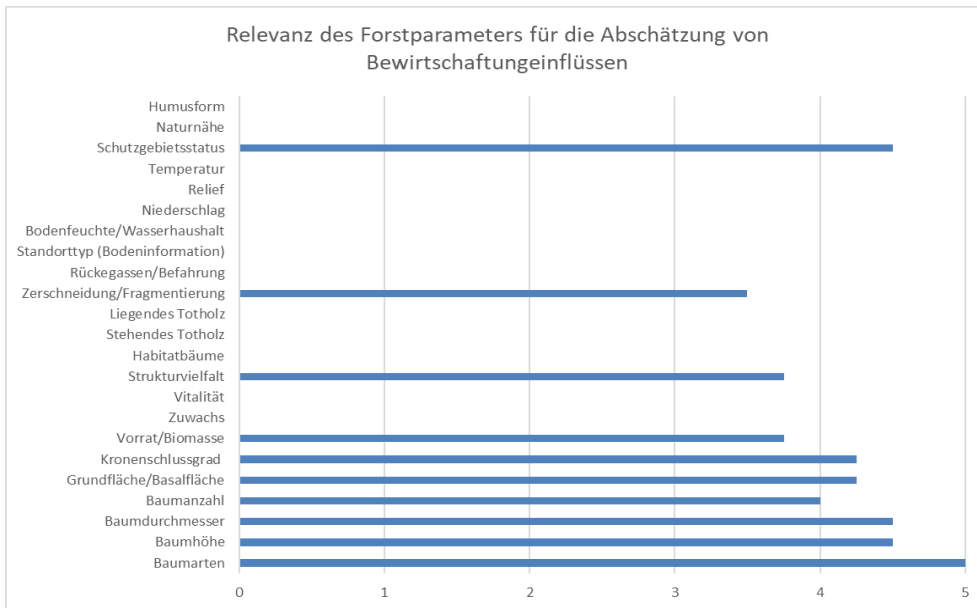


Illustration 11 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Bewirtschaftungseinflüsse (Mittelwert >3,49) und Eignung existierender FE Systeme (Mittelwert >3,49)

Tabelle 14 | Die dreizehn Forstparameter, die für die Abschätzung von Bewirtschaftungseinflüsse geeignet sind.

Forstparameter (In kursiv mit niedrigem Konsens zwischen Experten)	Eignung existierende r FE- Systeme, Ansätze und Methoden	Aktualisierungintervall	Abhängigkeiten und Zugangsmöglichkeit von Zusatzdaten/Träger	Erhebungsaufwand	Kostenabschätzung	Umsetzung
Baumart	Luftbilder oder Sentinel-2	5 Jahre	sehr hoch und Stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen: 215.000 und 484.000 Euro (Personalkosten sind Hauptkostentreiber)	Datensätze vorhanden, Methodik bekannt
<i>Baumhöhe</i>	LiDAR oder Luftbilder (bDOM)	3 Jahre	geringe aber eingeschränkt verfügbar / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen 500.000 und 1.200.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren
Baumdurchmesser	LiDAR oder Abschätzung über Baumhöhen aus Luftbildern	3 Jahre	hoch und stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	sehr hoch	ca. 534.000 Euro	Datensatz flächendeckend nicht vorhanden
Baumanzahl	<i>LiDAR oder Luftbilder</i>	3 Jahre	hoch und stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	sehr hoch	ca. 534.000 Euro	Datensatz flächendeckend nicht vorhanden, nur regional

Grundfläche /Basalfläche					ca. 10.000 wenn Datensätze vorhanden	der Datensatz berechnet sich primär aus Baumanzahl und Baumbrusthöhendurchmesser
Kronenschlussgrad	Optische Satellitendaten oder Luftbilder oder LiDAR	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	bei LiDAR und Luftbildern hoch	zwischen 200.000 und 500.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Datensatz muss erstellt werden
Vorrat/ Biomasse	LiDAR oder Luftbilder und bDOM	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	ca. 367.000 Euro	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren auch flächendeckend
Zuwachs	indirekt über LiDAR Messungen	3 Jahre	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	ca 58.500 wenn Biomasse Daten vorher aus LiDAR berechnet wurden	Datensatz muss erstellt werden
Strukturvielfalt	LiDAR, auf Basis von LiDAR	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen 417.000 und 1.017.000 Euro bei Verwendung von LiDAR Daten	Datensatz muss erstellt werden
Zerschneidung / Fragmentierung	mittels GIS Analysen aus flächendeckendem Forstparameter (bspw. Baumart)	5 Jahre	moderat aber stark eingeschränkt / Landesvermessungsämter	gering	ca. 13.000 Euro	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren

Rückegasse/ Befahrung	LiDAR basierte FE- Methoden noch in der Entwicklung	3-5 Jahre	hoch und stark eingeschränkt / Landesforsten	hoch	ca. 417.000 Euro	Datensatz muss erstellt werden
Schutzgebiete- status	GIS Analysen, externe Zusatzdaten	5 Jahre	sehr hoch und eingeschränkt verfügbar / BfN	sehr gering	ca. 10.000 Euro	Datensatz extern beschaffen
Naturnähe	keine operationell e FE- Methode verfügbar	5 Jahre	sehr hoch und stark eingeschränkt / Landesforstanstalten	sehr hoch	ca, 834.000 Euro	Datensatz muss erstellt werden

### 4.3.3 Bewertungsmatrix zur Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion: Vorgehen und Ergebnisse

Analog zu 4.3.1 erfolgte in diesem Kapitel die Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse im Hinblick auf die Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion. Im ersten Schritt wurden die 23 Forstparameter gefiltert, die eine hohe Relevanz (Mittelwert >3,49) für die Abschätzung des Bewirtschaftungseinflusses aufweisen. Dadurch reduzieren sich die 23 Forstparameter auf Neun. In kursiver Schrift sind diejenigen Bewertungen dargestellt, deren Bewertung einen geringen Konsens erzielte. Dies wurde mittels der Standardabweichung > 1,0 berechnet. Ergänzend erfolgt eine Darstellung der derzeit verfügbaren Fernerkundungssysteme zur Erfassung der identifizierten Forstparameter sowie eine Empfehlung zu deren Aktualisierungsintervallen. Darüber hinaus wird die hohe bis sehr hohe Abhängigkeit von externen Zusatzdaten und deren Trägern aufgezeigt. Zusätzlich wurden der erforderliche Erhebungsaufwand sowie eine Kostenschätzung zur Erstellung der Forstparameter ermittelt. Im zweiten Schritt der Analyse wurden ausschließlich jene Forstparameter berücksichtigt, deren Ableitbarkeit durch Fernerkundung mit hoher Zustimmung bewertet wurde. Diese geeigneten Systeme sind in der Spalte "Eignung existierender FE-Systeme" abgebildet. Von den neun genannten Forstparametern (Tabelle 15) können acht mittels Fernerkundung abgeleitet werden (Illustration 13-15).

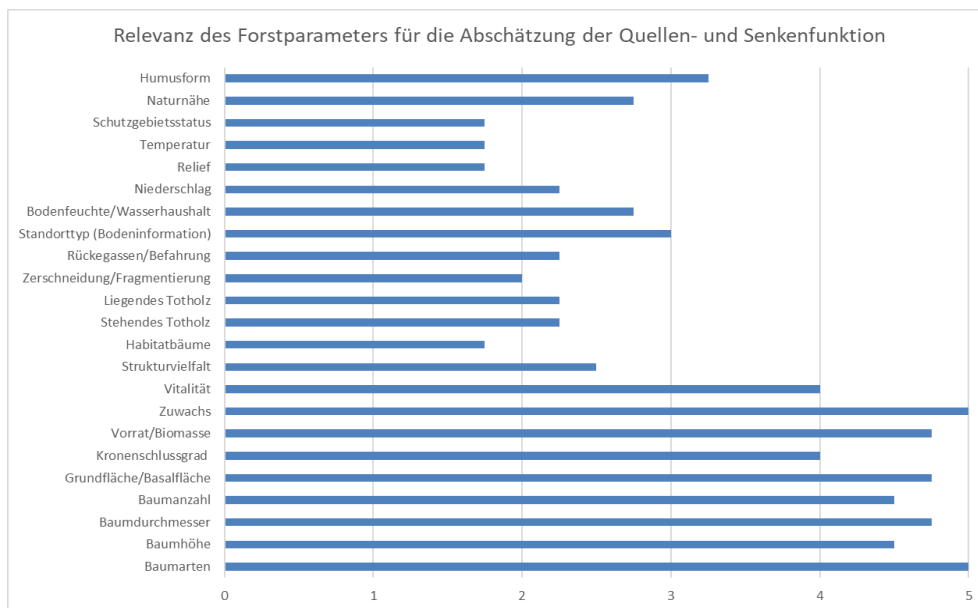


Illustration 12 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Quellen- und Senkenfunktion

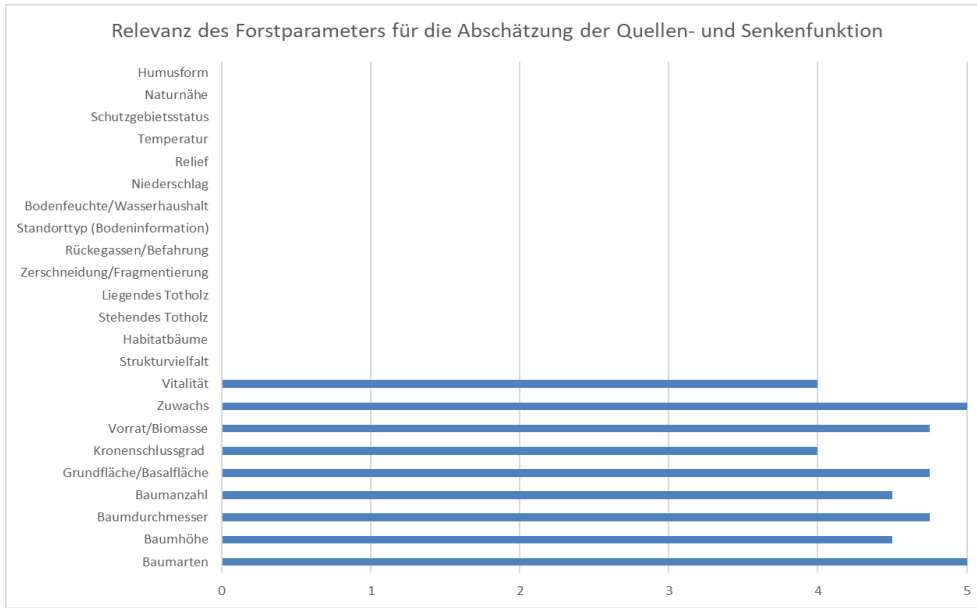


Illustration 13 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Quellen- und Senkenfunktion (Mittelwert >3,49)

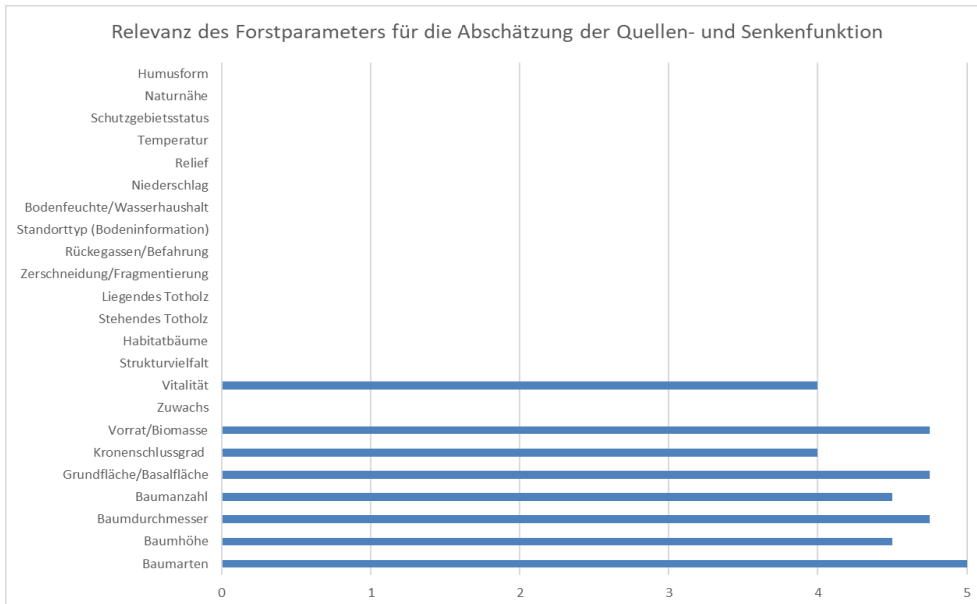


Illustration 14 | Bewertung aller 23 Forstparameter im Kontext Quellen- und Senkenfunktion (Mittelwert >3,49) und Eignung existierender FE Systeme (Mittelwert >3,49)

Tabelle 15 | Die neun Forstparameter, die für die Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion geeignet sind.

Forstparameter (In kursiv mit niedrigem Konsens zwischen Experten)	Eignung existierende r FE- Systeme, Ansätze und Methoden	Aktualisierungintervall	Abhängigkeiten und Zugangsmöglichkeit von Zusatzdaten/Träger	Erhebungsaufwand	Kostenabschätzung	Umsetzung
Baumart	Luftbilder oder Sentinel-2	5 Jahre	sehr hoch und Stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen: 215.000 und 484.000 Euro (Personalkosten sind Hauptkostentreiber)	Datensätze vorhanden, Methodik bekannt
<i>Baumhöhe</i>	LiDAR oder Luftbilder (bDOM)	3 Jahre	geringe aber eingeschränkt verfügbar / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	zwischen 500.000 und 1.200.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren
Baumdurchmesser	LiDAR oder Abschätzung über Baumhöhen aus Luftbildern	3 Jahre	hoch und stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	sehr hoch	ca. 534.000 Euro	Datensatz flächendeckend nicht vorhanden
Baumanzahl	<i>LiDAR oder Luftbilder</i>	3 Jahre	hoch und stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	sehr hoch	ca. 534.000 Euro	Datensatz flächendeckend nicht vorhanden, nur regional

Grundfläche /Basalfläche					ca. 10.000 wenn Datensätze vorhanden	der Datensatz berechnet sich primär aus Baumanzahl und Baumbrusthöhendurchmesser
Kronenschlussgrad	Optische Satellitendaten oder Luftbilder oder LiDAR	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	bei LiDAR und Luftbildern hoch	zwischen 200.000 und 500.000 Euro (Hoher Wert wegen LiDAR-Daten)	Datensatz muss erstellt werden
Vorrat/Biomasse	LiDAR oder Luftbilder und bDOM	1 Jahr	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	ca. 367.000 Euro	Methodik vorhanden, Datenbeispiele existieren auch flächendeckend
Zuwachs	indirekt über LiDAR Messungen	3 Jahre	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	hoch bis sehr hoch	ca 58.500 wenn Biomasse Daten vorher aus LiDAR berechnet wurden	Datensatz muss erstellt werden
Vitalität	Optische Satellitendaten	wöchentlich, monatlich, jährlich	moderat aber stark eingeschränkt / Thünen Institut und Landesforsten	<i>mittel</i>	gering ca. 50.000 Euro	Datensätze vorhanden, Methodik bekannt

Bei der Kostenschätzung in (Tabelle 12) ist zu beachten, dass die Entwicklungsarbeit zur Ableitung des Forstparameters aus Fernerkundungsdaten mit berücksichtigt wurde. In den Folgejahren ist daher mit geringeren Kosten für aktualisierte Produkte zu rechnen. Für die Nutzung von LiDAR-Daten wurden auch die Kosten für deren Beschaffung berücksichtigt, wodurch die Datenerhebung einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt. Bei frei verfügbaren Daten – wie beispielsweise Fernerkundungsdaten aus dem Copernicus-Programm – würden sich die Kosten entsprechend verringern.

Die Kosten klassischer, bisherige Verfahren der Walddatenerhebung, wie bspw. die Kohlenstoffinventur belaufen sich insgesamt auf 3,3 Mio. Euro für 10 Jahre und die Bundeswaldinventur auf 30. Mio Euro für 10 Jahre (nach Bolte et al. 2025).

## 5 Integration der unterschiedlichen Datensätze in einem konsistenten methodischen Rahmen und Beispielanalyse

### 5.1 Ziele von Arbeitspaket 3

- Entwicklung eines methodischen Rahmens zur fernerkundlichen Erfassung von forstbezogenen Zielgrößen
- Prüfung bestehender Plattformen und Projekte zum Waldmonitoring und deren Möglichkeiten zur Integration weiterer Datensätze
- Entwicklung eines Anwendungsvorschlages bzw. Beispielanalyse zur Integration und Verschneidung unterschiedlicher Datenquelle

### 5.2 Methodischer Rahmen zur fernerkundlichen Erfassung von forstbezogenen Zielgrößen

Die Analyse und Bewertung der Ökosystemgesundheit der Wälder erfordert die Verschneidung von Fernerkundungsdaten mit *in-situ* Informationen. Fernerkundungs-, als auch *in-situ* Daten liegen hierbei aus unterschiedlichen Quellen und in unterschiedlichen Formaten vor. Ein konsistenter methodischer Rahmen ist daher unerlässlich, um nutzbare Informationen über Waldökosysteme zu erzeugen. Ein solcher ist in Illustration 16 schematisch dargestellt und in Kapitel 6.2. (Illustration) spezifiziert.

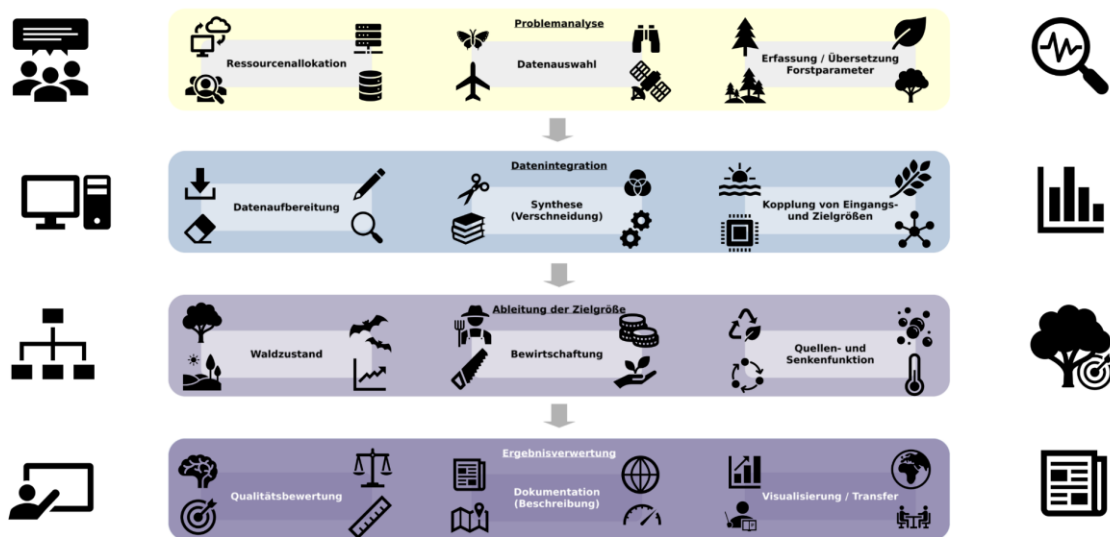


Illustration 15 | Zur fernerkundlichen Erfassung von Informationen über Waldökosystemen ist ein konsistenter methodischer Rahmen unerlässlich. Zentral ist hierbei a) die Analyse des Problems zur Auswahl geeigneter Eingangsdaten und Forstparameter, b) die Auswahl und Anwendung geeigneter Datenverarbeitungsmethoden zur c) Ableitung der Zielgröße und d) die Analyse und Verwertung der erzeugten Ergebnisse.

## 5.2.1 Problemanalyse

Die genaue Vorgehensweise hängt stark vom Problem selbst ab und ist mitunter äußerst komplex. Daher besteht der erste Schritt in einer detaillierten Problemanalyse, um sowohl Eingangsdaten als auch notwendige Forstparameter und deren Verknüpfung zu bestimmen, sowie geeignete Analysemethoden bzw. Modelle zu finden, die diese Daten später zur Zielgröße übersetzen können.

### 5.2.1.1 Erfassung verfügbarer Ressourcen

Diese Ressourcen bestimmen maßgeblich, welche Daten und Methoden eingesetzt werden können und wie effizient und nachhaltig das System arbeitet. Besonders entscheidend sind dabei die finanziellen, personellen und technischen Ressourcen sowie die Wahl der technischen Infrastruktur.

#### Finanzielle Ressourcen

Finanzielle Mittel bestimmen nicht nur den Umfang der Datenerhebung und -verarbeitung, sondern auch die Auswahl der Sensorik, die Tiefe der Analysen und die Dauer des Projekts. Die Finanzierung muss Kosten für Personal, Daten (sofern nicht frei verfügbar) und technische Infrastruktur abdecken. So sind für ein nationales Monitoring erhebliche Investitionen nötig, um sowohl die Entwicklung als auch den laufenden Betrieb eines operationellen Systems zu gewährleisten. Die Kosten für die technische Infrastruktur variieren stark je nach gewähltem Ansatz: Während der Betrieb eigener Server und Hochleistungsrechner (HPC) hohe Anfangsinvestitionen erfordert, können Cloud-Lösungen wie Google Earth Engine (GEE) oder CODE-DE mit nutzungsabhängigen Kosten punkten, aber laufende Gebühren verursachen.

## Personelle Mittel

Die Komplexität der Datenauswertung und -interpretation im Bereich der Fernerkundung erfordert interdisziplinäre Teams. So werden Fachkräfte aus den Bereichen Fernerkundung bzw. Geoinformatik, Forstwissenschaften, Datenanalyse und IT-Administration benötigt, um ein nationales Monitoringsystem zu entwickeln, zu betreiben und zu warten. Zusätzlich ist Personal für die Qualitätssicherung, das Management von großen Datenmengen und die Validierung der Ergebnisse erforderlich. Die Integration von Ground-Truth-Daten, also bodengestützten Referenzmessungen, erfordert weiteres Fachpersonal, das sowohl im Gelände als auch in der Datenverarbeitung versiert ist. Die Ergebnisverwertung und der Kontakt mit Zielgruppen erfordert zudem Personal mit Expertise im Bereich Öffentlichkeitsarbeit.

## Technische Infrastruktur

Die technische Ausstattung muss auf die Anforderungen der Datenmengen und -verarbeitung zugeschnitten sein. Dazu gehören:

- **Rechenleistung:** Die Verarbeitung von großen Datenmengen, wie sie bei der Analyse Zeitreihen aus Satellitendaten und der Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens nötig ist, erfordert leistungsfähige Hardware. Für kleinere Projekte kann ein leistungsstarker PC ausreichend sein; für großflächige oder zeitkritische Anwendungen sind HPC-Systeme oder Cloud-Plattformen oft notwendig.
- **Speicher:** Die Speicherung und Verwaltung großer Mengen an Fernerkundungsdaten stellt hohe Anforderungen an die Infrastruktur. Hier bieten Cloud-Lösungen Vorteile hinsichtlich Skalierbarkeit und Verfügbarkeit.
- **Software:** Neben Programmierumgebungen, Standard-GIS- und Bildverarbeitungssoftware werden zunehmend spezialisierte Tools für Big Data und KI-basierte Analysen benötigt. Open-Source-Software kann Kosten sparen, erfordert aber oft mehr Fachwissen.

Die Entscheidung für eine technische Infrastruktur sollte sich an den Projektzielen, dem Datenvolumen und den verfügbaren Ressourcen orientieren:

- **PC-basierte Lösungen** eignen sich für kleinere Projekte, Testgebiete oder die Entwicklung von Prototypen. Sie sind kostengünstig, aber in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt.
- **Hochleistungsrechner (HPC)** sind für die Verarbeitung großer Datenmengen und komplexer Analysen notwendig, etwa bei bundesweiter Analyse von hochaufgelösten Satellitendaten, sowie von langen Zeitreihen. Sie erfordern jedoch hohe Investitionen und einen großen Wartungsaufwand.
- **Cloud-Plattformen** wie Google Earth Engine (GEE) oder CODE-DE etc. bieten skalierbare Rechen- und Speicherressourcen. Sie ermöglichen den Zugriff auf umfangreiche, vorprozessierte Satellitendaten und leistungsfähige Analysewerkzeuge, ohne dass eigene Hardware betrieben werden muss. Dies senkt die Einstiegshürden und erlaubt eine flexible

Anpassung an wechselnde Anforderungen, verursacht aber laufende Kosten und erfordert Kenntnisse im Umgang mit Cloud-Technologien. Zudem spielen hier Datennutzungsvereinbarungen und Datenschutzbedenken eine Rolle, da hier unter Umständen die Kontrolle über die Daten an einen externen Dienstleister abgetreten wird.

Die Auswahl und Kombination der Ressourcen ist entscheidend für den Erfolg eines Fernerkundungsprojekts im Bereich Waldökosysteme. Finanzielle Mittel bestimmen den Handlungsspielraum, qualifiziertes Personal sichert die methodische Qualität, und eine adäquate technische Infrastruktur gewährleistet die effiziente Verarbeitung und Analyse der Daten. Die Wahl zwischen PC, HPC oder Cloud sollte stets projektbezogen und ressourcenorientiert erfolgen, wobei sich Cloud-Lösungen zunehmend als flexibel und zukunftsfähig erweisen, insbesondere bei großflächigen und langfristigen Monitoringaufgaben.

#### 5.2.1.2 Datenauswahl

Die Auswahl geeigneter Eingangsdaten ist ein zentraler Schritt einer fernerkundlichen Erfassung von Umweltvariablen. Dafür müssen zuerst mögliche Einflussfaktoren auf die Zielvariable ermittelt werden, bevor Daten gesucht werden, welche diese Faktoren abdecken. Anhand dieser Datenquellen kann nun geprüft werden, ob die Daten mit den zur Verfügung stehenden personellen, finanziellen und technischen Ressourcen beschaffbar und nutzbar sind. Die so ermittelten Daten können dann akquiriert und gespeichert werden.

#### 5.2.1.3 Erfassung / Übersetzung von Forstparametern

Die Datenauswahl und die Erfassung der Forstparameter sind eng miteinander verzahnt, wie in Kapitel 2- Kapitel 4 dargestellt wurde. Daher muss hier schon die Verknüpfung einzelner Forstparameter zur Ableitung der Zielgröße definiert werden.

### 5.2.2 Datenintegration

Der nächste Schritt besteht darin, Daten und Forstparameter, die meist in unterschiedlichsten Formaten und Strukturen vorliegen, so zu verarbeiten, dass ein analysebereiter Datensatz entsteht. Hierfür müssen in der Regel Koordinatensysteme und Auflösungen angeglichen werden, sodass ein gemeinsames Referenzsystem verwendet werden kann. Ebenso werden räumliche Auflösungen durch Resampling, Aggregation oder Disaggregation angeglichen. Flächen- und Punktdaten müssen je nach Anwendung thematisch verschnitten werden. Zudem muss eine Vorgehensweise zur Auflösung von Datenlücken gefunden werden, wie z.B. Interpolations- oder Datenaggregationsmethoden. Eine Übersicht über die verschiedenen Aspekte der Datenintegration ist in Illustration 17 zu sehen.

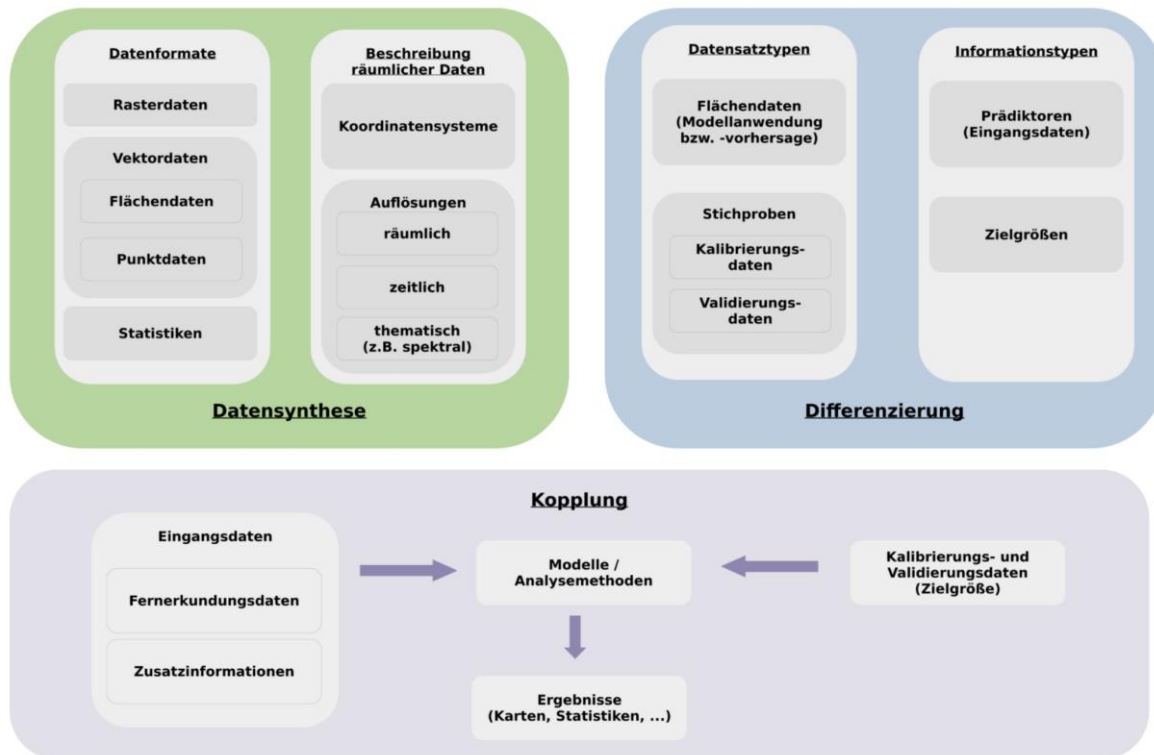


Illustration 16 | Die Datenintegration in fernerkundlichen Projekten hat drei zentrale Aspekte. Der erste ist die Datensynthese: Hierbei werden die verschiedenen Formate, hier im Beispiel Rasterdaten, Vektordaten und statistische Informationen, sowie die Beschreibung der räumlichen Daten, wie Koordinatensysteme und räumliche sowie zeitliche Auflösungen, vereinheitlicht. Der zweite Aspekt ist die Differenzierung: Aus den Daten werden zum einen flächige Daten für die spätere Modellanwendung, aber auch Stichproben entnommen, um das Modell zu kalibrieren und zu validieren. Zum anderen muss in den Datensätzen eine Unterscheidung zwischen Prädiktoren und Zielgrößen erfolgen. Der letzte Aspekt ist die Kopplung dieser Datensätze mit Analysen, Methoden und Modelle, um Informationen über die Zielgrößen zu generieren.

Nach der Harmonisierung können die Daten in einen analysebereiten Datensatz überführt werden. Hierfür werden die Daten zumeist zusätzlich in einen Kalibrierungs- bzw. Trainings- und einen Validierungs- bzw. Testdatensatz aufgeteilt, welche insbesondere für KI-Methoden von Relevanz sind.

Vor der weiteren Verarbeitung erfolgt eine Qualitätsprüfung, um Inkonsistenzen, Ausreißer oder fehlende Werte zu identifizieren und zu korrigieren. Die Pflege standardisierter Metadaten ist essenziell, um Herkunft, Verarbeitungsschritte und Eigenschaften der Datensätze nachvollziehbar zu dokumentieren.

### 5.2.3 Ableitung der Zielgröße

Der so erzeugte Datensatz kann dann zur Ableitung der Zielgröße bzw. Zielvariable verwendet werden. Dafür kommen zuvor definierte bio-physikalische oder statistische Modelle, KI-Modelle oder andere Methoden zum Einsatz. Das Modell wird i) kalibriert, ii) auf einen Test- bzw. Validierungsdatensatz angewendet, um die Ergebnisqualität zu erfassen, sowie iii) auf den Gesamtdatensatz angewendet, um ein flächendeckendes Produkt zu erstellen.

## 5.2.4 Ergebnisverwertung

Im letzten Schritt werden die erzeugten Ergebnisse analysiert, dokumentiert und verwertet.

### 5.2.4.1 Erfassung der Ergebnisqualität

Die Ergebnisverwertung beginnt mit der systematischen Auswertung der erzeugten Produkte. Hierbei werden die Ergebnisse auf Genauigkeit, Plausibilität und Vollständigkeit geprüft.

Validierungsmaßnahmen, z.B. durch Vergleich mit Ground-Truth-Daten aus terrestrischen Erhebungen, sind essentiell, um die Aussagekraft der Produkte zu sichern. Statistische Kennzahlen (z. B. Gesamtgenauigkeit, Nutzer- und Produzentengenauigkeit) werden berechnet und dokumentiert, um die Qualität der Ableitungen transparent zu machen. Diese systematische Auswertung schafft die Basis für wissenschaftliche Analysen und die Weiterentwicklung von Methoden. Sie ermöglicht zudem den Vergleich verschiedener Ansätze und die Verbesserung der beteiligten Algorithmen.

### 5.2.4.2 Dokumentation der Ergebnisse

Eine umfassende Dokumentation ist die Grundlage für Nachvollziehbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Ergebnisse. Dazu gehören:

- **Beschreibung der Methoden:** Detaillierte Darstellung der eingesetzten Algorithmen, Datenquellen, Vorverarbeitungsschritte und Validierungsverfahren.
- **Qualitätsberichte:** Veröffentlichung von Validierungs- und Unsicherheitsanalysen, um die Aussagekraft der Ergebnisse für Dritte einschätzbar zu machen.
- **Metadatenmanagement:** Pflege standardisierter Metadaten (z. B. zu Auflösung, Zeitpunkten, Koordinatensystemen), um die Herkunft und Eigenschaften der Datensätze transparent zu machen.
- **Offene Datenbereitstellung:** Bereitstellung der Ergebnisse über Geodatenportale oder als Download, um die Nutzung durch Verwaltung, Wissenschaft und Öffentlichkeit zu ermöglichen.

### 5.2.4.3 Verwertung und Visualisierung der Ergebnisse

Die Verwertung der Fernerkundungsergebnisse erfolgt zielgruppenspezifisch und anwendungsorientiert, in allen Fällen aber ist eine ansprechende Visualisierung der Projektergebnisse unerlässlich:

- **Politik:** Nutzung der Daten für nationale und internationale Berichtspflichten (z.B. Waldzustandsberichte, Klimaschutzberichte) und zur Bewertung von Maßnahmen im Rahmen von Förderprogrammen.
- **Forstpraxis:** Bereitstellung von Karten und Statistiken zur Unterstützung des Waldmanagements, z.B. für die Planung von Maßnahmen im Schadensfall oder zur Optimierung der Holznutzung.

- **Forschung und Entwicklung:** Weiterentwicklung von Analyseverfahren und Methoden auf Basis der dokumentierten Ergebnisse sowie Integration in zukünftige Monitoringkonzepte.
- **Öffentlichkeitsarbeit:** Aufbereitung der Ergebnisse in verständlicher Form, z.B. über interaktive Karten oder Berichte, um die Transparenz zu erhöhen und die Akzeptanz in der Gesellschaft zu stärken.

## 5.3 Einordnung nationaler Fernerkundungs-basierter Waldmonitoring Systeme

In diesem Abschnitt werden beispielhaft bestehende Waldmonitoringsysteme (siehe Tabelle 4) vorgestellt, um deren Erweiterungspotenzial für die Integration zusätzlicher fernerkundungsbasierter Forstparameter oder ergänzender Datenquellen aufzuzeigen.

### 5.3.1 UFZ-Waldzustandsmonitor

Der UFZ-Waldzustandsmonitor trifft in seiner jetzigen Form Aussagen zur Waldvitalität und -phänologie, zu Baumartenvorkommen und zur künftigen Baumartenverbreitung unter Berücksichtigung des Klimawandels. Um Aussagen zum Waldzustand, zur Bewirtschaftung und zur Kohlenstoffquellen- und Senkenfunktion zu treffen, stehen einige Erweiterungsmöglichkeiten offen.

Die Waldzustandsinformation könnte von einer regelmäßigen Ableitung der Holzbodenmaske und der Baumartenklassen profitieren, da sie aktuell statische Produkte darstellen. Hier ist insbesondere die Verfügbarkeit von Validierungsdaten limitierend und aktuell Gegenstand der Forschung. Damit können bisher dimensionslose oder kategorische Werte forstlichen Einheiten besser zugeordnet werden. Neue Baumhöhendaten aus LiDAR-Datensätzen der Bundesländer ermöglichen eine immer genauere Erfassung der Baumhöhe. Somit ist auch potenziell eine Ableitung des Waldalters denkbar. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Studie liegen jedoch noch keine bundesweit einheitlichen und qualitativ hochwertigen Daten vor. Zudem könnten Strukturinformationen (z.B. Einzelbaum/Kronenerkennung, Mugabowindekwe et al. 2023) gewonnen sowie die Waldbiomasse besser abgeschätzt und in den Monitor integriert werden. Mit diesen zusätzlichen Zustandsinformationen ist auch eine indirekte Abschätzung der Waldbewirtschaftung denkbar. Aktuell liegen jedoch keine flächendeckenden Bewirtschaftungsinformationen vor, um solche Ansätze zu explorieren, zu kalibrieren oder zu validieren.

Zur Abschätzung der Kohlenstoffquellen- und Senkenfunktion eines Waldes sind sowohl Informationen über die Biomasse, den Zustand, als auch die Bewirtschaftung und Standortinformationen notwendig. Letztlich braucht es für solide Aussagen dazu auch eine Modellkomponente, die Prognosen unter Klimaszenarien erlaubt. Hierzu müssen somit die beiden anderen Zielgrößen mit Klima- und Bodeninformationen in Bezug gesetzt werden. Damit kann eine Veränderung der Biomasse potenziell in Relation zur Speicherkapazität des Waldes gesetzt werden. Problematisch ist hierbei die genaue Erfassung der Biomasse in Wäldern, diese ist Gegenstand der Forschung.

### 5.3.2 Waldmonitor Deutschland und Waldmonitor Arnsberg

Der Waldmonitor Deutschland und der Waldmonitor Arnsberg wurden gemeinsam von der Naturwald Akademie und Remote Sensing Solutions entwickelt, wobei der Waldmonitor Arnsberg in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Arnsberg entstanden ist. Der Waldmonitor Deutschland bietet derzeit eine sehr gute Datengrundlage für die Erfassung des Waldzustandes. Seit 2017 werden hier deutschlandweit die Vitalitätstrends für Laub- und Nadelwälder sowie der Feuchtigkeitsgehaltstrends für Laubwälder dargestellt. Daneben erfolgt noch eine gesonderte Darstellung der Schadflächen, die im Rahmen der Dürrejahre 2018, 2019 und 2020 sowie im Anschluss entstanden sind. Die Waldvitalität basiert auf Änderungen der saisonalen maximalen NDVI-Werte sowie Änderungen des Feuchtigkeitsgehalts basierend auf dem NDWI zur Hauptvegetationszeit (2016–2024). Zusätzlich enthält der Waldmonitor eine Karte der dominanten Hauptbaumarten (Welle et al. 2022). Derzeit wird im Rahmen des vom DLR geförderten Projektes MoniFor (FKZ: 50EE2414A; Laufzeit: 07/2024 - 06/2026) zusätzliche Forstparameter entwickelt, die für ein Waldmonitoring von Bedeutung sind. Zum einen werden mittels KI-basierten Verfahren dabei Baumhöhen, Kronenbedeckung und Oberirdische Baumbiomasse abgeleitet und zum anderen die Oberflächentemperatur als Proxy-Indikator für das Kühlungspotential von Wäldern. Durch diese zusätzlichen Forstparameter ist eine Abschätzung der Bewirtschaftungsintensität in Kombination mit externen Zusatzdaten möglich. Die Bewertung der Quellen- und Senkenfunktion auf nationaler Ebene kann über die Veränderung der oberirdischen Biomasse erfolgen.

Der Waldmonitor Arnsberg (<https://map3d.remote-sensing-solutions.de/waldmonitor/arnsberg>) ist ein öffentlich zugängliches, interaktives Online-Portal, das Daten- und Satellitenbildanalyse nutzt, um den Zustand der Wälder im Stadtgebiet Arnsberg sichtbar und nachvollziehbar zu machen. Es ist das erste öffentliche, datenbasierte Werkzeug zur Analyse von Waldzustandsinformationen auf Flurstücksebene. Jede Parzelle kann angeklickt werden, um spezifische Kennzahlen folgender Waldinformationen im Dashboard anzuzeigen:

- **Jährliche Veränderungen der Indikatoren zur Waldvitalität und -wassergehalt** von Laub- und Nadelbäumen erzeugt aus Sentinel-2 Zeitreihen.
- **Jährliche Schadflächenanalyse** basierend auf oben genanntem Indikator der Waldvitalität
- **Schätzung der Waldbiomasse sowie der Kohlenstoffspeicherung** auf Basis sehr hoch aufgelöster Luftbilddaten, daraus abgeleiteten Baumhöhen, Einzelbaumerkennungen und Allometrien die aus Daten der Bundeswaldinventur abgeleitet wurden.

Der Waldmonitor Arnsberg wurde initiiert von der Stadt Arnsberg und integriert in deren Smart City-Strategie (Integriert in das Modellprojekt „5 für Südwestfalen“). Um die Informationstiefe dieses regionalen Waldmonitors auf Deutschland auszuweiten, wären neben der Skalierung der darin enthaltenen Informationsprodukte auch eine Ausweitung der IT-Kapazitäten notwendig, da eine Flurstück-spezifische Analyse auf nationaler Ebene hohe Ansprüche an performante Prozessierungsumgebungen hat.

### 5.3.3 ForestWatch

ForestWatch bietet derzeit präzise Informationen zur Waldvitalität und -phänologie, zur Baumartenverbreitung, zum Störungsbeginn sowie stehendem Totholz und ermöglicht eine Auswertung historischer Daten. Hier könnten in Zukunft biomassebasierte Modelle integriert

werden, die es ermöglichen, die Kohlenstoffspeicherung der Wälder mit höheren Genauigkeiten zu berechnen. Aktuell wird bereits die Waldvitalität und Baumartenverbreitung über hochauflösende Satellitendaten wie Sentinel-2 erfasst, was jedoch nicht direkt auf Biomasse oder Kohlenstoffspeicherung übertragbar ist. Die Hinzunahme von LiDAR-Daten oder Luftbildinformationen zur präzisen Erfassung von Baumhöhen und Baumvolumen könnte helfen, die biomassebezogenen Kohlenstoffvorräte auf regionaler und nationaler Ebene genauer abzuschätzen. Da diese Daten nicht regelmäßig und oft auch nicht flächendeckend vorhanden sind, kann das auf höchstauflösenden Daten trainierte Modell später auf Satellitendaten (speziell Sentinel-1 und Sentinel-2) übertragen werden. Ähnliche methodische Ansätze wurden innerhalb des Projektes UrbanGreenEye schon mit den Parametern Überschirmungsgrad und Grünvolumen erfolgreich umgesetzt. Zur effektiven Entwicklung eines Modells der Biomasse sind speziell die Trainingsdaten essentiell, welche detaillierte Informationen zu Baumart, BHD und Baumhöhe in einer gut verteilten Stichprobe bereitstellen sollten, obwohl natürlich auch über vorhandene Allometrien kalibriert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zum Trainieren der Modelle ist die Einbindung von forstwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten. Diese Daten würden es ermöglichen, den Einfluss der Waldbewirtschaftung auf die Kohlenstoffspeicherung und -emissionen präzise zu ermitteln. Beispielsweise könnte die Abholzung und Aufforstung von Flächen in Echtzeit erfasst und in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung bewertet werden. Eine solche Erweiterung würde ForestWatch zu einem dynamischen Tool für die Überwachung der Waldbewirtschaftung und ihrer Auswirkungen auf die Kohlenstoffquellen- und Senkenfunktion machen. Bereits im Forschungsvorhaben *FirSt 2.0* wurde versucht, Bewirtschaftungsdaten zur Analyse und Prognose zu verwenden. Das scheiterte jedoch oftmals an datenschutzrelevanten Vorbehalten bzw. rechtlichen Hindernissen. Flächendeckend ist eine Integration der Daten daher vermutlich nicht umzusetzen, einzelne Datensätze können jedoch genutzt werden, um Modelle zu trainieren und diese zu übertragen.

Ein weiterer Schritt für ein integriertes Waldmonitoring, ist die Berücksichtigung von Klimaszenarien und deren Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung in Wäldern. ForestWatch kann dahingehend erweitert werden, verschiedene Klimamodelle zu integrieren, die vorhersagen, wie sich die Kohlenstoffspeicherung in Wäldern unter zukünftigen Klimabedingungen verändert. Dies würde es ermöglichen, die Effekte in Bezug auf unterschiedliche Klimaszenarien zu simulieren und langfristige Prognosen über die Entwicklung der Kohlenstoffspeicherung zu erstellen. In Verbindung mit Bodeninformationen könnten so die potenziellen Kohlenstoffsenken und -quellen unter zukünftigen Klimabedingungen präziser modelliert werden.

Innerhalb des Projektes EO4Nature (<https://eo4nature.org/>) wird bis 2027 ein Portal entwickelt, um Indikatoren der Handlungsfelder des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz (ANK) zu monitoren. Im Sinne des Handlungsfeldes Waldökosysteme können hier Informationen zu Kohlenstoffbilanzierungen und Prognosen zur Waldentwicklung unter verschiedenen Klimaszenarien für eine Vielzahl von Nutzenden bereitgestellt werden.

## 5.4 Beispielanalyse zur Integration und Verschneidung unterschiedlicher Datenquellen anhand der Baumartenklassifikation

Im Kontext der Machbarkeitsstudie bzw. der Ableitung des Zustands von Waldökosystemen ist die fernerkundungsbasierte Klassifikation von Baumarten als Forstparameter eine wichtige Komponente. Zum einen ist die räumliche Baumartenverteilung Grundlage für die vorherrschende Waldgesellschaft und damit auch grundlegend im Kontext Biodiversität. Zum anderen leiten die genannten Monitoring-Produkte den Zustand von Waldökosystemen vornehmlich über (veränderte) Reflektionseigenschaften von Waldbeständen ab. Diese Reflektionseigenschaften unterscheiden sich artspezifisch aufgrund der unterschiedlichen Struktur, Morphologie sowie bio-chemischen Eigenschaften, die auch durch Phänologie zeitlich differenziert ausgeprägt sind.

Deswegen soll hier anhand der Baumartenklassifikation stellvertretend und exemplarisch i) die Integration unterschiedlicher Datensätze, ii) die Rolle speziell forstlicher Inventurdaten zur Kalibrierung, sowie iii) die Verwendung von Data-Science-Methoden im Kontext der Ableitung des Zustands von Waldökosystemen dargestellt werden.

### 5.4.1 Prozessbeschreibung

Der Prozess zur Ableitung von Vegetationsinformationen aus Fernerkundungsprodukten lässt sich in fünf grobe Schritte unterteilen:

1. Die Analyse der Zielvariable, die folgende Fragen beantworten soll:
  - a. Welche Einflüsse auf die Zielvariable sind bekannt?
  - b. In welchem Gebiet und mit welcher Auflösung soll die Zielvariable abgeleitet werden?
  - c. Welche Daten werden benötigt und stehen zur Verfügung? Welche dieser Daten sind mit den personellen, finanziellen und zeitlichen Mitteln vereinbar?
2. Die Datenaufbereitung, die aus den verfügbaren Daten einen analysebereiten Datensatz erzeugt.
3. Das Training bzw. die Kalibrierung und die Auswertung eines Modells, einer Methode oder Analyse, sowie die Angabe von Qualitätsmetriken zur Bewertung der Güte des verwendeten Ansatzes.
4. Die Anwendung des Modells bzw. die Vorhersage der Zielvariable, um finale Ergebnisse, wie z.B. flächendeckende Informationen zu erzeugen.
5. Die abschließende Ergebnisvisualisierung (Web-Anwendung, Statistiken, Karten etc.) und Dokumentation, um die Ergebnisse zum Anwender zu transferieren und reproduzierbar zu machen.

Ein schematischer Ablauf ist in Illustration 18 dargestellt.

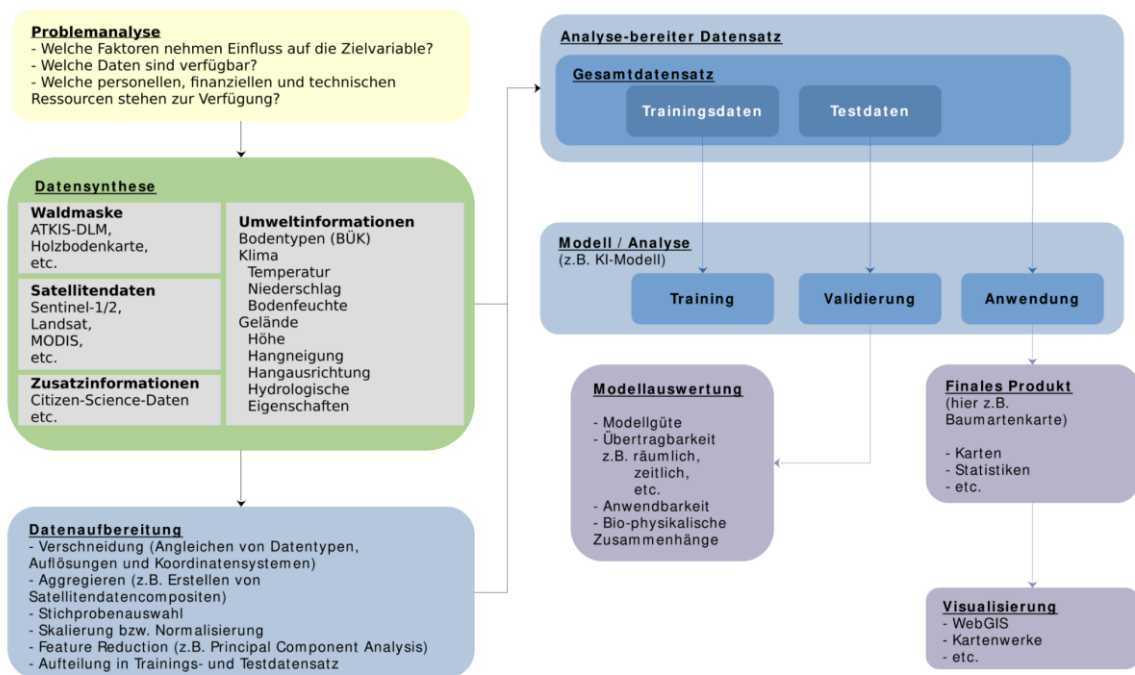


Illustration 17| Schematischer Ablauf einer Baumartenklassifizierung. Dieses Konzept aus Problemanalyse, Datenauswahl und -vorverarbeitung, Modellierung und Ergebnisauswertung sowie -visualisierung kann auf viele Fernerkundungsprobleme angewendet werden und unterscheidet sich meist nur in Detailfragen. Zentral ist die Erzeugung eines analysebereiten Datensatzes (hier die blaue Box), auf den Modelle angewendet werden, um Ergebnisse, wie etwa Karten, zu generieren.

#### 5.4.1.1 Datenauswahl

Zur fernerkundlichen Charakterisierung von Baumarten kommen vier Arten von Daten in Frage: i) fernerkundliche Messungen von Reflektionseigenschaften, da diese direkt von den Eigenschaften der Baumart bestimmt werden (u.a. durch Pigmentgehalte, Struktur und Wassergehalt, aber auch Phänologien durch Zeitreihenanalysen), ii) Umwelt- bzw. Standortbedingungen, die direkt oder indirekt das Vorkommen von Baumarten beeinflussen, iii) Daten, die das Zielgebiet der Analyse definieren, hier im Speziellen die Position von Wäldern in Deutschland, eine sogenannte Waldmaske, sowie iv) Daten über tatsächliche Baumartenvorkommen, wie etwa Forstinventuren, um die Methodik zu kalibrieren und die Ergebnisse zu validieren. Folgende Daten könnten somit Eingang in eine Baumartenklassifikation finden:

**Fernerkundliche Messungen:** Optische Satellitendaten eignen sich besonders für die Charakterisierung von Baumarten, da sie direkt von den Eigenschaften der Baumarten beeinflusst werden. Die frei verfügbaren Satellitenmissionen unterscheiden sich hierbei insbesondere durch ihre räumliche, spektrale und zeitliche Auflösung. Die europäische Mission Copernicus Sentinel-2 bietet seit 2015 entsprechende frei verfügbare Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Um Strukturinformationen des Waldes zu erfassen, könnten ebenfalls Daten von RADAR-Satelliten integriert werden. Aufgrund des zusätzlichen Datenbeschaffungsaufwands werden sie in diesem Beispiel nicht weiter betrachtet. LIDAR-Daten könnten in Zukunft ebenfalls eine wichtige Rolle spielen, um strukturelle Unterschiede zu erfassen, sind aber momentan nicht flächendeckend frei verfügbar.

**Umweltinformationen:** Umwelt- bzw. Standortbedingungen beeinflussen direkt oder indirekt das Vorkommen von Baumarten. Sie können daher wertvolle Rahmenbedingungen für die Ermittlung von Baumartenvorkommen liefern. So ist der Bodentyp von Relevanz, ein entsprechender Datensatz (Bodenübersichtskarte, BÜK 1000) kann von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe frei bezogen werden. Neben dem Bodentyp spielen die Höhe über dem Meeresspiegel, die Hangneigung und -ausrichtung sowie topographisch-hydrologische Eigenschaften wichtige Rollen für Baumartenvorkommen. Entsprechende Informationen können aus dem digitalen Oberflächenmodell (5 m räumliche Auflösung) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie gewonnen werden. Klimatische Informationen sind ebenfalls von hohem Wert, da die Umgebungstemperatur, Frosteinflüsse, Niederschläge und Bodenfeuchte ebenfalls Einfluss auf die Artverbreitung nehmen. Der Deutsche Wetterdienst gibt entsprechende historische Wetterdaten im sogenannten Climate Data Center (CDC) frei verfügbar heraus. Aus diesen können u.a. Monatsmittel der täglichen Lufttemperaturen und Niederschläge zwischen 1981 und 2023, sowie der pflanzenverfügbaren Bodenfeuchte zwischen 1991 und 2023 berechnet werden. Mit ihnen kann die klimatische Variabilität innerhalb Deutschlands auf einem Raster mit 1 km räumlicher Auflösung abgebildet werden.

**Definition des Zielgebiets:** Die oben erfassten Daten liegen flächendeckend für ganz Deutschland vor. Um Baumarten zu klassifizieren und auf nicht-bewaldeten Flächen keine Fehlerwerte zu erzeugen, muss ein Zielgebiet (hier: alle bestockten Waldflächen Deutschlands) definiert werden. Dafür eignen sich z.B. das digitale Landschaftsmodell des Amtlichen Topographisch-kartographischen Informationssystems (ATKIS) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Hier werden alle als Wald definierten Flächen Deutschlands, allerdings ohne Information zu (nicht-)Bestockung, ausgewiesen. Mittels Fernerkundungsmethoden können auch sogenannte Holzbodenkarten bzw. Karten der bestockten Waldfläche Deutschlands erstellt und genutzt werden, wie z.B. vom Thünen-Institut (Langner et. al, 2022).

**Trainings- und Validierungsdaten:** Ein zentraler und kritischer Aspekt von Baumartenklassifikationen ist das Modelltraining und die Validierung. Hierfür werden flächenscharfe Daten über Baumartenvorkommen benötigt. In Frage kommen dabei staatliche oder private Forstinventuren sowie wissenschaftliche Datensätze. Während letztere selten, aber meist frei verfügbar sind, werden erstere zwar meist erhoben, aber nur eingeschränkt öffentlich verfügbar gemacht. Die Forstinventuren der Länder sind nur teilweise und auf Anfrage verfügbar. Die Bundeswaldinventur steht nur nicht flächenscharf öffentlich zur Verfügung.

#### 5.4.1.2 Datenaufbereitung

Die akquirierten Daten liegen in unterschiedlichsten Formaten und Qualitäten vor und müssen im Folgenden aufbereitet werden. Ein schematischer Ablauf ist in Illustration 19 zu sehen. Zuerst werden die Daten im Hinblick auf Fehler und Inkonsistenzen überprüft und gegebenenfalls bereinigt. Danach erfolgt ein Verschneiden der Daten, um Koordinatensysteme und Auflösungen anzugleichen. So werden z.B. aus den optischen Satellitendaten, die eine zeitliche Auflösung von wenigen Tagen haben, aber zum Teil durch Wolkenbedeckung verunreinigt sind, monatliche Komposite erstellt. Dadurch entsteht ein konsistenter Datensatz mit wenigen Datenlücken. Andere Daten werden auf die Auflösung der Satellitendaten (dis-)aggregiert bzw. resampled. Vektordaten werden rasterisiert,

um dem Raster der Satellitendaten zu entsprechen. Letztlich werden die Daten mit der Holzbodenkarte maskiert, um Bereiche ohne Waldbedeckung auf der Fläche auszuschließen.

Für die Kalibrierung und Validierung des KI-Modells wird zudem eine gewichtete Stichprobentabelle erstellt, die gleich viele Datenpunkte für jede Baumart enthält. Fehlende Werte innerhalb dieser Tabelle werden entsprechend ersetzt (durch eine sogenannte *missing value imputation*), zudem werden die Prädiktoren skaliert bzw. normalisiert. Hier kann auch, je nach Anzahl der Prädiktoren, eine sogenannte *Feature Reduction* (wie etwa eine *Principal Component Analysis (PCA)*) in Betracht gezogen werden.

Alle notwendigen Vorverarbeitungsschritte müssen hinreichend dokumentiert und gespeichert werden, um sie für spätere Vorhersagen und die Reproduktion der Ergebnisse nutzen zu können.

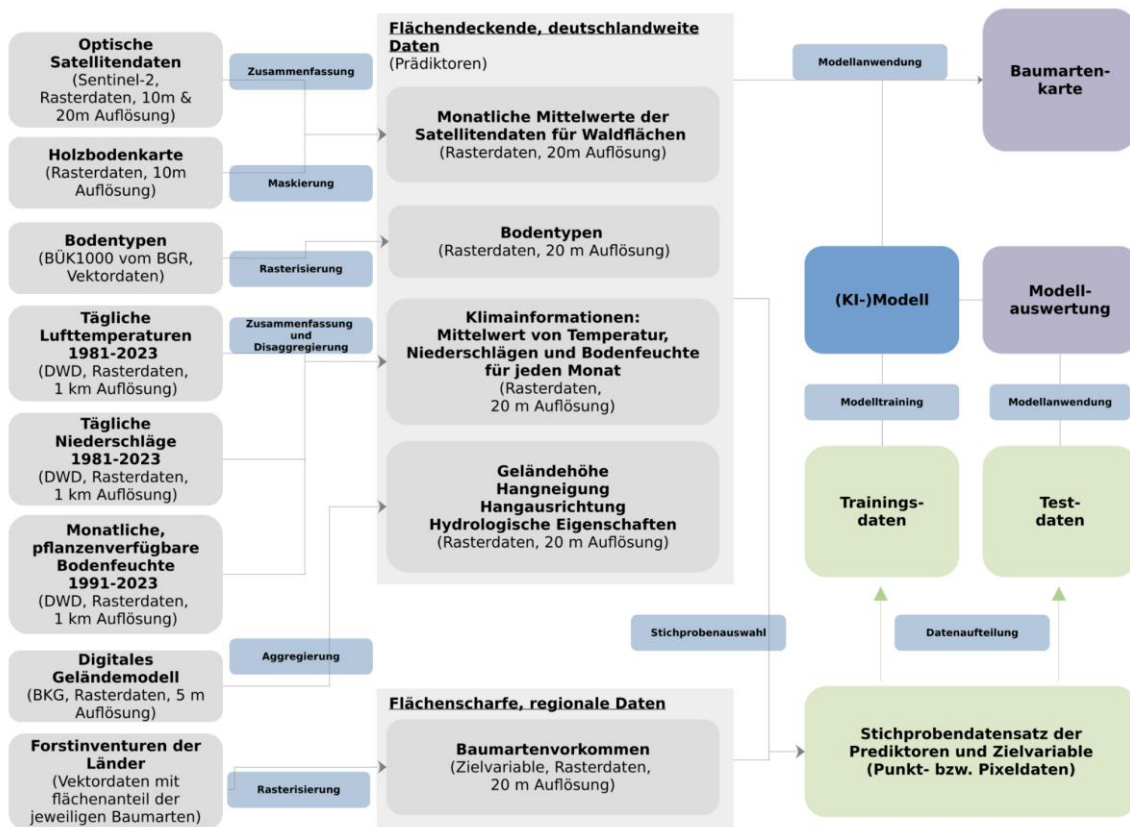


Illustration 18| Datenflussdiagramm einer Baumartenklassifikation: Die verwendeten Eingangsdaten müssen hinsichtlich ihrer Datentypen (Raster- und Vektordaten), Auflösung (räumlich und zeitlich) und Flächenabdeckung vereinheitlicht werden. Im zweiten Schritt werden die Daten in Prädiktoren sowie Zielvariablen geteilt. Stichproben dieser Datensätze dienen der Kalibrierung bzw. dem Training eines (KI-)Modells und der Qualitätsbewertung des entstehenden Modells. Abschließend kann das Modell auf flächendeckende Daten angewendet werden, um eine Baumartenkarte zu erstellen.

### 5.4.1.3 Methoden

Die Datensätze können nun verwendet werden, um (je nach Anwendungsfall) ein Modell bzw. eine Methode anzuwenden bzw. ein KI-Modell zu trainieren. Ein gängiges Verfahren für Baumartenklassifikationen stellt hierbei XGBoost (Welle et al. 2022) oder Random Forest dar

(Blickensdoerfer et. al, 2024). Das erstellte Modell wird dann zur Qualitätsbewertung auf den Test- bzw. Validierungsdatensatz angewendet, sowie zur Erstellung der finalen Karte auf den kompletten Datensatz des jeweiligen Zielgebiets.

#### 5.4.1.4 Ergebnisverwertung

Die Ergebnisverwertung besteht aus drei grundlegenden Teilen: i) die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Plausibilität sowie Vollständigkeit, ii) der Dokumentation sowie iii) der Visualisierung der Ergebnisse. Für die Ergebnisauswertung werden gängige Gütemaße berechnet, wie etwa Gesamtgenauigkeit, Nutzer- und Produzentengenauigkeit, sowie Konfusionsmatrizen erstellt und überprüft. Zudem können dabei Demonstrationsgebiete, wie etwa bestimmte Kartenausschnitte, auf Plausibilität überprüft werden. Die finale Karte muss zudem auf Konsistenz und Vollständigkeit überprüft werden. Die Ergebnisauswertung findet im Folgenden Eingang in die Dokumentation. Hierfür wird in der Regel ein Dokument erstellt, das sowohl die Methoden beschreibt, als auch einen Qualitätsbericht enthält. Eine ansprechende Visualisierung der Ergebnisse erleichtert dabei die Verwertung. Hier sind u.a. Illustrationen innerhalb der Dokumentation, aber auch interaktive Karten oder Web-Anwendungen denkbar.

### 5.4.2 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde dieses Beispiel exemplarisch in Rheinland-Pfalz (mittels Forstinventuren des Landes) umgesetzt. Dafür wurden aus den Forstinventuren des Landes Flächen mit über 80% Bedeckung einer der Baumartenklassen Buche, Eiche, Fichte, Douglasie, Kiefer, Lärche oder Tanne, sowie mit 80% Bedeckung von einer der Restklassen invasive Laubbäume, andere Laubbäume oder andere Nadelbäume gefiltert. Aus diesen wurden zufällig 2000 Sentinel-2 Pixel pro Baumartenklasse ausgewählt. Für diese Pixel wurden sowohl Sentinel-2 Zeitreihen (2016-2022), als auch Standortinformationen gebündelt. Aus den Satellitendaten wurden pro Jahr monatliche Komposite gebildet und als Prädiktoren genutzt, sodass für 2016-2022 sieben separate Datenpunkte entstanden sind. Der finale Datensatz wurde dann in einen Trainings- und einen Validierungsdatensatz aufgeteilt (50/50). Damit wurde ein RandomForest-Modell (Breimann 2001) trainiert und validiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Baumartenklassifikation und Einflussfaktoren auf diese veranschaulicht.

#### 5.4.2.1 Ergebnisse einer Baumartenklassifikation in Rheinland-Pfalz

Mittels der Baumartenklassenkarte (Illustration 20) können flächendeckend Baumarten bzw. -gattungen im Oberstand der jeweiligen Zielregion dargestellt werden. Forstinventuren geben diese Information jeweils nur stichpunktartig oder statistisch für Flächen an. Eine flächenscharfe und -deckende Darstellung der Daten ist somit meist nicht möglich.

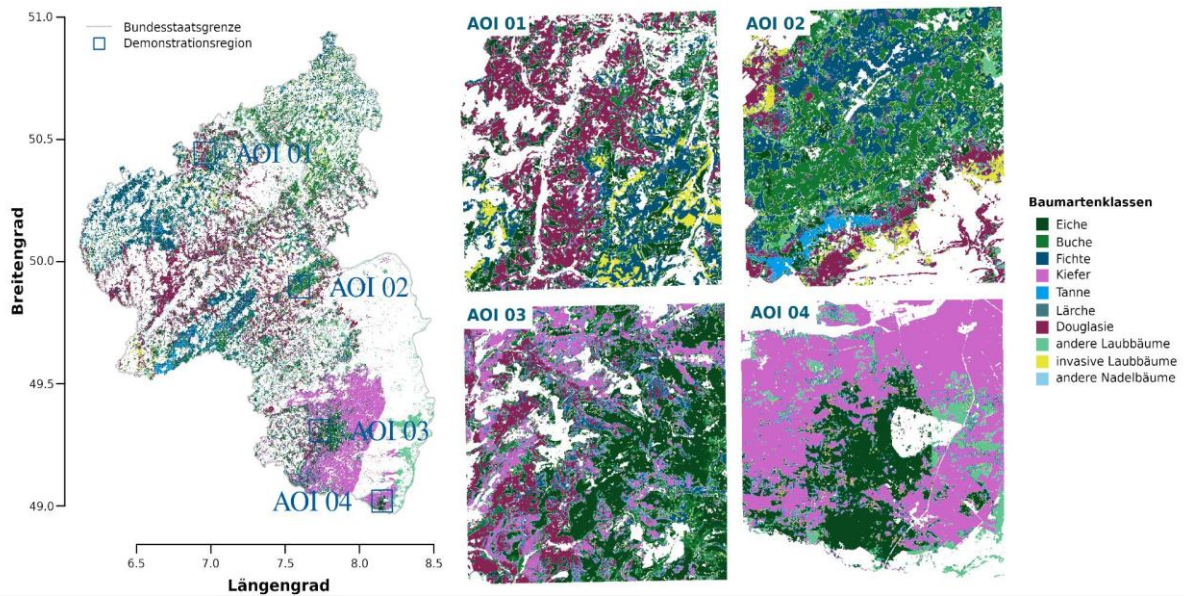


Illustration 19 | Karte einer beispielhaften Baumartenklassifikation mit zehn Klassen in Rheinland-Pfalz (links). Rechts sind Ausschnitte dieser Karte (AOI 1-4) zu sehen, die Demonstrationsregionen im Detail zeigen. Die verschiedenen Farben zeigen die verschiedenen Baumartenklassen. Ungefärbte Bereiche stellen Flächen ohne Baumbestockung dar.

Die Wahl der Eingangsdaten beeinflusst dabei maßgeblich die Ergebnisse (Illustration 21). Unter anderem können verschiedenste Kombinationen von Fernerkundungs- und Standortdaten verwendet werden. Die beste Kombination kann nur durch Validierungsdaten (sogenannte *Ground Truth-Daten*) ermittelt werden, die einen Bezug zur Realität herstellen. Deren Quantität und Qualität beeinflussen deshalb natürlich auch maßgeblich die Ergebnisse.

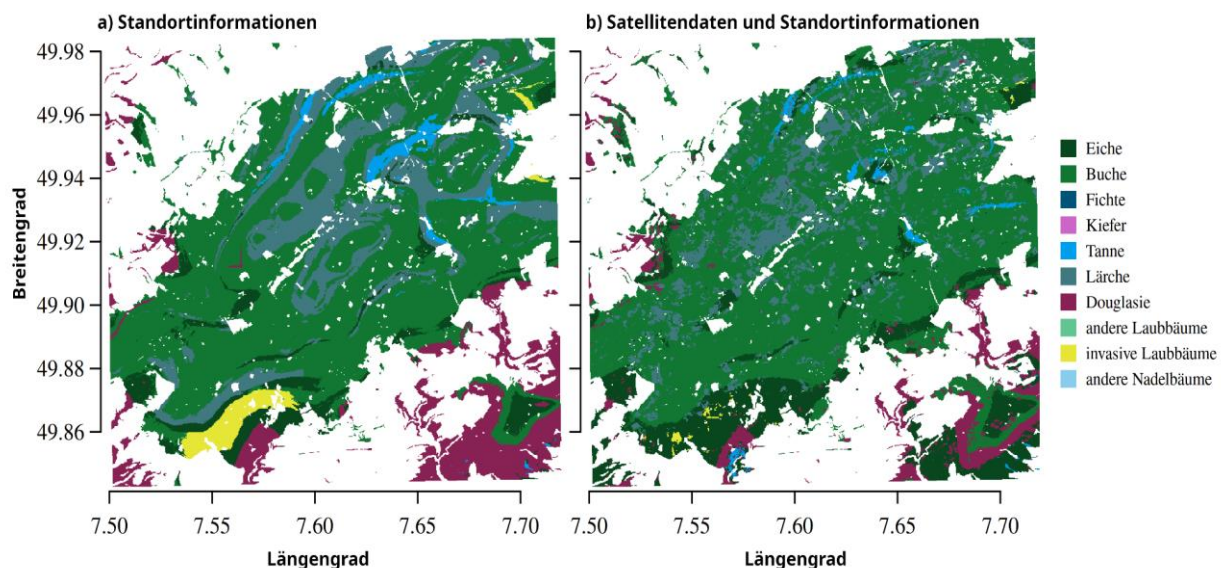


Illustration 20 | Karten zweier verschiedener Ansätze zur Baumartenklassifizierung: links sind die Ergebnisse eines Modells zu sehen, das ausschließlich mit Standortinformationen trainiert wurde, sowie rechts mit Standort- und Fernerkundungsdaten. Während das linke Modell somit die potenziell vorhandene Vegetation zeigt, liefern die Fernerkundungsdaten Informationen über das tatsächliche Vorhandensein entsprechender Baumarten.

Die Güte der Klassifikation wurde hier exemplarisch mittels Nutzer- und Produzentengenauigkeit sowie Gesamtgenauigkeit (Tabelle 16) angegeben. Hier wurde eine Gesamtgenauigkeit von etwa 96% erreicht. Vergleichsweise wurden die Klassen der Baumartenkarte von Preidl & Faude (2020), die anhand der Methodik von Preidl et. al (2020) erstellt wurde, sowie der Baumartenkarte aus Blickensdoerfer et. al (2024) auf die hier verwendeten Klassen übertragen und die Güte verglichen. Diese Karten erreichen im Vergleich zu den Forstinventurdaten aus Rheinland-Pfalz eine Genauigkeit von etwa 70% und 63%, wurden allerdings überregional trainiert, und nicht wie hier nur mit Daten aus Rheinland-Pfalz. Eine andere Baumartenklassifikation mit Daten aus Rheinland-Pfalz zeigt ebenfalls eine sehr hohe Genauigkeit (Klehr et. al, 2025). Deren Validierungsgenauigkeiten lassen sich allerdings nicht direkt mit den hier gezeigten Genauigkeiten vergleichen, da dort die Anteile der Baumarten in den Forstabteilungen statistisch mit den Klassifikationsergebnissen verglichen wurden. Nichtsdestotrotz lässt sich daraus schlussfolgern, dass sich der Datensatz der Forstinventuren in Rheinland-Pfalz ausgezeichnet für Fernerkundungsstudien eignet.

Tabelle 16 | Qualitätsbewertung der exemplarischen Baumartenklassifikation. Für jede der zehn Klassen ist Nutzer- sowie Produzentengenauigkeit angegeben. Die Gesamtgenauigkeit über alle Klassen ist 95.8%.

Baumartengruppe	Nutzergenauigkeit	Produzentengenauigkeit
Fichte	91.5	92.0
Douglasie	95.3	93.1
Kiefer	96.5	98.6
Lärche	96.4	97.9
Eiche	96.0	96.5
Buche	91.9	90.4
Tanne	96.8	98.6
Andere Laubbäume	98.5	95.0
Invasive Laubbäume	98.9	99.5
Andere Nadelbäume	98.7	98.7
<b>Gesamtgenauigkeit</b>	<b>95.8</b>	

#### 5.4.2.2 Einflüsse auf das Ergebnis

Die Ergebnisse werden sowohl von den Eingangsdaten als auch von der Methodik beeinflusst. Die Zielstellung bzw. der Anwendungsfall spielen hierbei auch eine Rolle. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussfaktoren aufgeschlüsselt.

## **Einflüsse der Eingangsdaten**

Im obigen Beispiel wird deutlich, dass die Eingangsdaten das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Dies ist auf i) die Eignung, ii) die Qualität, iii) die Quantität und iv) die Verfügbarkeit der Daten zurückzuführen.

Dateneignung bedeutet, dass Daten so erhoben sein müssen, dass sie mit dem Problem in Bezug gesetzt werden können. Forstliche Daten werden oft nicht im Hinblick auf Fernerkundungstauglichkeit erhoben. Während z.B. optische Satelliten nur die Baumkrone abbilden, wird eine forstliche Erhebung oft nur ganzheitlich durchgeführt. Zusätzliche Informationen, z.B. zum Anteil von Baumarten am Kronendach, sind hilfreich, um eine Validierung von Satellitenprodukten zu unterstützen.

Die Daten sollten jedoch auch Qualitätsstandards genügen, um verwendbar zu sein. Ergebnisse sollten nicht durch qualitativ minderwertige Daten verfälscht werden. Wenn dies unvermeidbar ist, sollten Probleme zumindest erkannt und dokumentiert werden.

Des Weiteren muss eine ausreichende Menge (Quantität) an Daten zur Verfügung stehen oder erhoben werden. Eine zu große Menge an Daten kann die Analyse allerdings auch erschweren. Ein Beispiel: Kiefern und Fichten sind die mit Abstand häufigsten Baumarten bzw. -gattungen in Deutschland, somit stehen für sie sehr viele Daten zur Verfügung. Für seltenere Baumarten bzw. -gattungen, wie z.B. Erlen oder Weiden gibt es deutlich weniger Vorkommensdaten. Dies erschwert das Kalibrieren und Validieren von Baumartenklassifikationsmodellen, da ein Ungleichgewicht zugunsten der häufigen Baumarten bzw. -gattungen entsteht.

Schließlich müssen Daten auch verfügbar sein, um verwendet werden zu können. Aufgrund von Datennutzungsvereinbarungen und Datenschutzbedenken werden bestimmte Daten erhoben, aber nicht verfügbar gemacht. Das hier gezeigte Beispiel der Baumartenklassifikation zeigt ein konkretes Beispiel: Die Bundeswaldinventur erhebt nützliche und umfangreiche Daten über deutsche Wälder. Diese werden aber nicht flächenscharf öffentlich zur Verfügung gestellt. Somit ist es zwar möglich, statistische Informationen über deutsche Wälder zu gewinnen, eine Baumartenklassifikation kann damit aber nicht von jedem Akteur durchgeführt werden.

## **Einflüsse der Ressourcen- und Methodenwahl**

Neben den Eingangsdaten nehmen auch die Ressourcen- und Methodenwahl einen direkten Einfluss auf die Ergebnisse. Je mehr Ressourcen zu einem Projekt allokiert werden, desto mehr Personal, bessere technische Ausstattung und Zeit stehen für die Bearbeitung zur Verfügung. Dies führt oft - aber nicht ausschließlich - zu elaborierteren Ergebnissen. Ebenso nimmt die Fachkompetenz des Personals Einfluss, denn nur kompetentes Personal kann die Anforderungen an das Projekt und die Einflussfaktoren erkennen und korrekt umsetzen. Insbesondere die bereits genannten, notwendigen Schritte der Datenauswahl und -vorverarbeitung müssen erkannt und korrekt durchgeführt werden.

Nicht notwendige Schritte sollten aus Ressourcengründen als solche erkannt werden. Letztendlich spart die Wahl der richtigen Methode bzw. des richtigen Modells Zeit und Kosten und führt zu besseren Ergebnissen.

### **Wichtigkeit der Dokumentation**

Die Dokumentation nimmt indirekt Einflüsse auf die Ergebnisse. Allen voran sorgt sie für Reproduzierbarkeit. Nur reproduzierbare Ergebnisse können auf andere Problemstellungen, Zielgebiete oder Zeiträume über die Projektlaufzeit hinaus weiter verwendet werden. Die Ergebnisse können auch nur weiterverwendet werden, wenn alle Beteiligten die Vorgehensweise verstehen. Außerdem sorgt eine gründliche Dokumentation für fachliche Anerkennung. Bei Zweifeln an der Methodik wird das Produkt zumeist verworfen. Eine gute Dokumentation hilft, Zweifel aus dem Weg zu räumen oder Probleme zu erkennen. Schließlich werden in der Praxis einfache, kosteneffiziente Vorgehensweisen bevorzugt. Notwendige Schritte müssen daher gut durch die Dokumentation begründet sein.

## **6 Konzeptionell-methodischer Rahmen für die weitere Bearbeitung**

### **6.1 Ziele von Arbeitspaket 4**

- Entwicklung und Vorstellung eines konzeptionellen methodischen Rahmens inklusiver Darlegung der notwendigen Methoden, Kenntnisse und Ressourcen zur Umsetzung eines Monitoringansatzes zur Waldgesundheit für die Waldflächen in Deutschland
- Beantwortung folgender Fragen aus der Leistungsbeschreibung:
  - Wie könnten perspektivisch die o.g. nationalen Monitoring-Programme und -berichte mit Hilfe dieses Ansatzes weiterentwickelt und ergänzt werden? Welchen Mehrwert hätte das konkret?
    - Welche besonderen Voraussetzungen technischen Aufwendungen wären dafür geeignet und nötig?
    - Welche rechtlichen oder politischen Aspekte sind dabei zu beachten (z.B. Datenschutz oder Vorrang für Nutzung von Copernicus-Daten?)
    - Gibt es Einschränkungen oder spezifische Hemmnisse bei der Umsetzung?
    - Wie und mit welchem Aufwand wären diese zu lösen?
  - Wie könnten die Daten einer möglichst breiten Akteurslandschaft (Behörden, Institute, wissenschaftliche Einrichtungen sowie der Öffentlichkeit) zugänglich gemacht werden?

## 6.2 Entwicklung eines konzeptionell-methodischen Rahmens

Auf Basis von Kapitel 5.2 und Illustration 16 wird in diesem Abschnitt ein konzeptionell-methodischer Rahmen für die Umsetzung der Ökosystemgesundheit von Wälder in Deutschland vorgestellt (Illustration 22). Der erste Schritt besteht darin, die Zielgröße zu definieren – also zu klären, wie sich Ökosystemgesundheit darstellen lässt und welche Forstparameter hierfür herangezogen werden können. Dazu hat Kapitel 4 Aufschluss gegeben. Die genaue Vorgehensweise zur Erfassung von forstbezogenen Zielgrößen ist daher sehr anwendungsspezifisch. Es müssen zuerst geeignete Eingangsdaten für die notwendigen Forstparameter gefunden werden. Dabei kommen verschiedene Fernerkundungssysteme, wie etwa optische Satellitendaten, Luftbilder und Standortfaktoren in Frage. Diese Daten und Parameter müssen nachfolgend entsprechend aufgearbeitet werden, sodass sie Eingang in geeignete Analysen und Modelle finden können, um die Zielgröße abzuleiten. Anschließend werden die erzeugten Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität bewertet, sowie das Vorgehen ausführlich dokumentiert. Zudem sollten die Ergebnisse für die jeweiligen Zielgruppen grafisch aufgearbeitet bzw. visualisiert werden, wie etwa über interaktive Karten oder Web-Anwendungen.

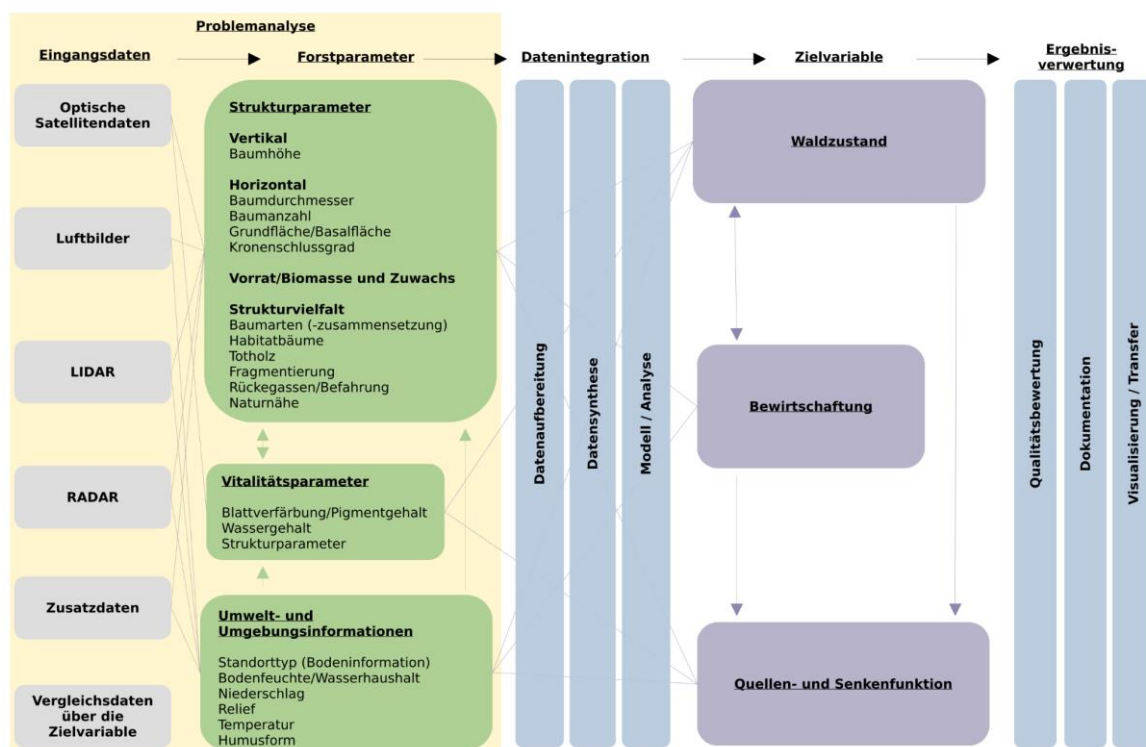


Illustration 21 | Methodischer konzeptioneller Rahmen für Waldanalysen

Ein Beispiel zur Definition von Ökosystemgesundheit kann aus Krüger et al. (2025) abgeleitet werden. Das Ziel der Studie war die Analyse, ob Wälder, die seit mindestens 35 Jahren nicht mehr bewirtschaftet werden, häufiger oder stärker von natürlichen Störungen betroffen sind als vergleichbare, bewirtschaftete Wälder. Ein Ergebnis der Studie war, dass Schutzgebiete besonders in Jahren mit Extremereignissen eine 40%ige Reduktion der Störung aufwiesen als vergleichbar bewirtschaftete Wälder. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass Schutzgebiete robuster, widerstandsfähiger und weniger anfälliger für klimabedingte Schäden sind. Bei genauerer

Betrachtung weisen die Schutzwälder Strukturen auf, die in der Waldökologie mit guter Waldgesundheit assoziiert werden. Diese Waldstrukturen sind exemplarisch in Illustration 23 dargestellt. Die in Illustration 24 dargestellten Strukturen lassen sich durch fernerkundungs basierte Forstparameter, wie in Kapitel 2 und Kapitel 3 dargelegt, ableiten.



Illustration 22 | Waldstrukturen in naturnahen Schutzwäldern abgeleitet aus Krüger et al. (2025)

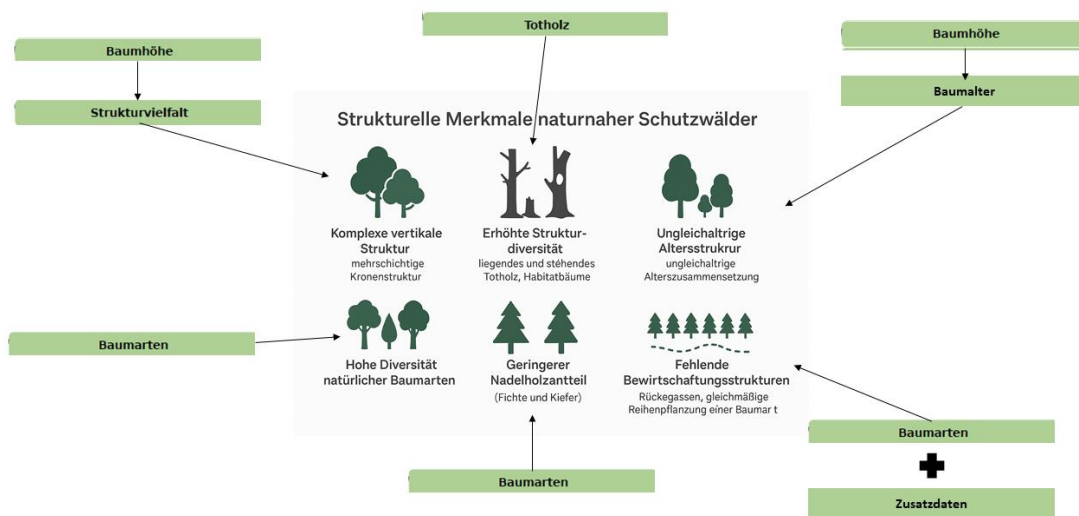


Illustration 23 | Waldstrukturen in naturnahen Schutzwäldern abgeleitet aus Krüger et al. (2025), die mit Forstparametern dargestellt werden können

### 6.3 Beantwortung der Fragen aus der Leistungsbeschreibung:

In Anlehnung an die Leistungsbeschreibung wurden folgende Fragen gestellt und beantwortet.

### **6.3.1 Wie könnten perspektivisch die o.g. nationalen Monitoring-Programme und -berichte mit Hilfe dieses Ansatzes weiterentwickelt und ergänzt werden? Welchen Mehrwert hätte das konkret?**

Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass bereits eine Vielzahl an Fernerkundungs-basierten Waldmonitoringsysteme und -verfahren existieren, die auf wissenschaftlicher Evidenz beruhen. Die bereits praktisch implementierten Verfahren und Online-Plattformen belegen, dass eine deutschlandweite Anwendung möglich ist. Durch zielgerichtete Weiterentwicklungen nationaler Wald-Informationsprodukte die bisher noch nicht, oder noch nicht in der notwendigen Wiederholrate vorhanden sind, könnten die bisherigen Entwicklungen und Monitoringsysteme vervollständigen. Bestehende nationale, auf Stichprobeninventur-basierende Monitoring Programme können somit zeitnah durch innovative Fernerkundungsverfahren und etablierte Monitoringlösungen ergänzt werden. Diese liefern flächendeckend und kontinuierlich Informationen - ein eindeutiger raum-zeitlicher Mehrwert. Dadurch können die durch Extremereignisse der letzten Jahre verursachten dynamischen Veränderungen im Ökosystem Wald adäquat abgebildet und analysiert werden. Dies eröffnet zusätzliche Möglichkeiten, kurzfristig und angepasst auf diese Veränderungen im Sinne eines angepassten Waldmanagements zu reagieren. Weiterhin ermöglicht dies eine verbesserte Regionalisierung des Waldzustandes, wodurch sich Mortalitätsraten bei Extremereignissen besser nachvollziehen lassen.

Die bisherigen Entwicklungen im Bereich des nationalen Monitorings von Wäldern sind meist von einzelnen wissenschaftlichen oder behördlichen Institutionen oder Unternehmen vorangetrieben worden. Um ein vollständiges und nachhaltiges Fernerkundungs-basiertes nationales Monitoring zu ermöglichen, ist jedoch eine Bündelung der vorhandenen Kompetenzen und Kapazitäten notwendig. Eine Kooperation zwischen Einrichtungen mit relevanten Kompetenzen (behördlich, privat und/oder wissenschaftlich) würde zu einem verbesserten Wissenstransfer führen und somit eine operationelle Implementierung der Verfahren erleichtern. Einzelne Institutionen sind in der Regel nicht in der Lage, sowohl fachlich als auch personell solche komplexen Verfahren umzusetzen. Eine deutschlandweite Umsetzung könnte als Vorbild für weitere europäische Länder dienen und auch einen Beitrag zu aktuellen EU-Initiativen leisten – etwa zum EU Forest Monitoring Law (FML) oder zur Wiederherstellungsverordnung –, insbesondere im Hinblick auf eine verbesserte Erfüllung von Berichtspflichten.

#### **6.3.1.1 Welche besonderen Voraussetzungen technischen Aufwendungen wären dafür geeignet und nötig?**

Als wohl wichtigste Voraussetzung gilt der Zugang zu Referenzdaten, um Fernerkundungsprodukte zu kalibrieren und zu validieren. Wie in dieser Machbarkeitsstudie dargelegt, sind die vorhandenen globalen Informationsprodukte für ein nationales Monitoring nicht oder nur sehr eingeschränkt verwendbar, da eine Kalibrierung mit nationalen Referenzdaten fehlt. In erster Linie würde hier der Zugang zu den Daten der Bundeswaldinventur zu einem enormen Mehrwert führen, da deren Geolokation bisher nicht zugänglich ist und dies eine Verwendung für Fernerkundungsmethoden verhindert.

Ein weiterer wichtiger Punkt wäre die Verbesserung der Datenzugänge für mehr automatisierte Prozesse. Das betrifft Datenzugänge der einzelnen Landesbehörden, insbesondere für Luftbild- und LiDAR-Datenprodukte.

Existierende Institutionen und Unternehmen besitzen die notwendigen Kompetenzen und können auch den für die Umsetzung erforderlichen Aufwand technisch leisten. Eine Zusammenarbeit bei der Umsetzung wäre effizient. Diese Umsetzung könnte zusätzlich wissenschaftlich begleitet und analysiert werden.

Eine Zusammenarbeit bei der Erhebung von Referenzdaten bzw. Entwicklung von Fernerkundungs-basierten Produkten wäre sinnvoll. Die Erhebung von forstlichen in-situ Daten auch unter dem Aspekt Nutzbarkeit für fernerkundliche Beobachtungen sowie verstärkte Kalibrierung von FE-Produkten an forstliche Parameter würde einen erheblichen Mehrwert bringen. Durch die Berücksichtigung der Bedarfe seitens der Fernerkundungsverfahren bei den Forstinventuren, könnten die Fernerkundungsmethoden wesentlich verbessert werden.

Eine erleichterte Zusammenarbeit zwischen Institutionen könnte durch Cloud-native Architekturen entstehen, die auch über nationale Kapazitäten wie CODE-DE implementiert werden können. Durch den Einsatz versionierter Workflows (z. B. mit Git) wird die Nachvollziehbarkeit und Wiederholbarkeit von Analyseprozessen sichergestellt. Gleichzeitig erleichtert dies die Zusammenarbeit an gemeinsamen Datensätzen.

Ein semantisches Datenmodell auf Basis FAIR-konformer Ontologien (wie INSPIRE, OGC) ermöglicht die nahtlose Verknüpfung und Interoperabilität von Forst-, Boden- und Klimadaten.

#### 6.3.1.2 Welche rechtlichen oder politischen Aspekte sind dabei zu beachten (z.B. Datenschutz oder Vorrang für Nutzung von Copernicus-Daten)?

Es sollte angestrebt werden, vorrangig kostenfreie Datenquellen zu nutzen. Wo erforderlich, können diese gezielt durch kommerzielle Daten ergänzt werden.

Da keine personenbezogenen Daten verarbeitet werden müssen, bestehen nur geringe datenschutzrechtliche Hürden.

#### 6.3.1.3 Gibt es Einschränkungen oder spezifische Hemmnisse bei der Umsetzung?

Ein zentraler Punkt bleibt der Zugang zu Inventurdaten. Neben dem eingeschränkten Zugang zur Bundeswaldinventur ist auch auf die Landesforstanstalten hinzuweisen, die zum Teil flächendeckend hochaufgelöste Waldinformationen besitzen, diese jedoch nicht öffentlich zugänglich machen. Gerade solche länderspezifischen Daten wären wertvoll, um Fernerkundungs-basierte Forstparameter präziser zu kalibrieren und zu validieren.

Die föderale Struktur in Deutschland erschwert den freien Zugang zu Rohdaten wie Luftbildern oder LiDAR-Daten, da Zuständigkeiten und Zugangsregelungen je nach Bundesland unterschiedlich sind. In den Bundesländern wird die Open-Data-Strategie der Bundesregierung, die Qualität und Quantität von Verwaltungsdaten zu erhöhen und sie für die öffentliche Nutzung verfügbar zu machen, bisher stark unterschiedlich umgesetzt, sodass teilweise Luftbilddaten nicht in den notwendigen Qualitäten und Formaten zur Verfügung stehen.

#### 6.3.1.4 Wie und mit welchem Aufwand wären diese zu lösen?

Ein entscheidender Faktor ist der politische Wille, bestehende Strukturen zu verändern – insbesondere im Hinblick auf die dringend notwendige Digitalisierung im Forstbereich.

Zudem ist die Bereitstellung ausreichender finanzieller Mittel erforderlich (vgl. Bewertungsmatrix), um den Aufbau und Betrieb moderner Monitoring- und Datensysteme nachhaltig zu sichern.

Ein weiterer zentraler Baustein ist die gezielte Erstellung sogenannter „labelled datasets“: Dabei werden am Boden erhobene forstliche Inventurdaten räumlich und zeitlich exakt mit entsprechenden Fernerkundungsdaten verknüpft. Diese Datensätze bilden die Grundlage für das Training und die Validierung moderner Analyseverfahren, etwa in der KI-gestützten Fernerkundung.

#### 6.3.2 Wie könnten die Daten einer möglichst breiten Akteurslandschaft (Behörden, Institute, wissenschaftliche Einrichtungen sowie der Öffentlichkeit) zugänglich gemacht werden?

Geförderte Kooperationsverträge zwischen Wissenschaft und Behörden können gezielt dazu beitragen, die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit relevanter Daten zu verbessern. Zudem könnte auch die Vergabe spezieller Nutzungsrechte ermöglicht werden, um auch eingeschränkt zugängliche Daten für Forschung und Monitoring nutzbar zu machen.

Eine verständliche Darstellung der Ergebnisse auf öffentlich zugänglichen Websites – in Anlehnung an bewährte Verfahren anderer Behörden, wie etwa des Deutschen Wetterdienstes (DWD) – würde die Akzeptanz und Transparenz fördern sowie die Nutzbarkeit durch weitere Akteure erleichtern.

## 7 Zusammenfassende Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Nutzung von Fernerkundungsdaten im Kontext waldbezogener Monitoring-Vorhaben

Das Ziel der Machbarkeitsstudie war es die Möglichkeiten von Fernerkundungsdaten und bestehenden Geodaten aufzuzeigen, um den Waldzustand bzw. die Ökosystemgesundheit der Wälder räumlich-explizit und in größerer zeitlicher Auflösung analysieren und bewerten zu können. Die Studie zeigt, dass ein modernes, integriertes Waldmonitoring auf Basis frei verfügbarer Fernerkundungsdaten und nationaler Referenzdatensätze technisch machbar ist. Es bietet die Chance, Veränderungen der Waldökosysteme schneller, präziser und regional differenzierter zu erkennen – und so besser auf die Herausforderungen des Klimawandels reagieren zu können. Voraussetzung dafür ist ein verbesserter Zugang zu Daten, die Stärkung kooperativer Strukturen und die konsequente Nutzung technologischer Innovationen. Auf Basis der hier erarbeiteten Bewertung der Möglichkeiten für ein Fernerkundungs-basiertes nationales Waldmonitoring, können folgende Empfehlungen und Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. In Deutschland wurden bereits einige **Waldmonitoringsysteme** und **Waldinformationsprodukte** auf Basis von Fernerkundungsdaten entwickelt, die belegen, dass Waldzustand, Vitalitätsveränderungen und Schadflächen wissenschaftlich belastbar erfasst werden können.

2. Die Methoden für die **Ableitung von oberirdischer Biomasse** sind wissenschaftlich erprobt und können in bestehende Systeme integriert werden. Die Befunde können auf nationaler Ebene angewandt werden, können aber auf kommunaler Ebene Ungenauigkeiten aufweisen.
3. Alle fernerkundungs-basierten Waldinformationen haben gewisse **Unsicherheiten**, die wissenschaftlich gut beschrieben und **quantifizierbar** sind, was bei einer Nutzung und Interpretation der Informationen gut in deren Bewertung einfließen kann.
4. Deutschland verfügt bereits über ein dichtes Netz an terrestrischen Inventuren (z. B. Bundeswaldinventur, Waldzustandserhebung) und weitere punktuelle Inventuren. Diese Daten sollten für Fernerkundungsanwendungen verfügbar sein. Die Erhebung der **Bodendaten sollten die Bedürfnisse der Fernerkundung beachten** und ggf. angepasst werden, damit die Fernerkundungsdaten besser kalibriert werden können.
5. Die **Kombination beider Ansätze** (boden- und fernerkundungsbasiert) **kann die Aussagekraft und Aktualität der Monitoringdaten deutlich verbessern.**
6. Flächendeckende und kontinuierlich aktualisierte Fernerkundungsdaten (Satelliten- und Luftbilddaten) bieten ein enormes Potenzial, diese terrestrischen Daten zu ergänzen und räumlich sowie zeitlich **detaillierte Informationen über Waldzustand, Waldstruktur und Biomasse** zu liefern und vor allem sich schnell verändernde Regionen einem engmaschigen Monitoring zu unterziehen. Fernerkundungsmethoden können gezielt zur Verdichtung der zeitlichen Information - ggf. mit regionalen Schwerpunkten - genutzt werden und liefern vor allem synoptische Ergebnisse über große Flächen.
7. Es existieren zahlreiche Satellitenmissionen und flugzeuggestützte Erfassungssysteme, die jeweils unterschiedliche Charakteristika von Wäldern beschreiben können. Für eine belastbare Ableitung zentraler Kennwerte wie Waldzustand, Biomasse oder der Quellen- und Senkenfunktion ist es erforderlich, **eine Vielzahl an Datenquellen zu nutzen, zu akquirieren und zu integrieren.** Diese Daten müssen in Bezug auf Format, räumliche Auflösung und zeitliche Dimension vereinheitlicht („synthetisiert“) werden. Mithilfe moderner Data-Science-Methoden (KI) können dann Beziehungen zwischen forstlichen Parametern und den physikalischen Signalen der Fernerkundungssensoren abgeleitet werden.
8. In Deutschland wurden in Summe Großteile davon an verschiedenen Institutionen umgesetzt. Allerdings erlaubt die Projektförderung **bisher nur die Umsetzung von Teilaspekten** (einzelne Forstparameter, verschiedene Datensätze, unterschiedliche Fragestellungen, Teilregionen für bestimmte Zeitschnitte) des im Konzept vollumfänglich dargestellten Workflows.
9. **Es fehlt eine Synthese** der in Kapitel 2 beschriebenen **Produkte auf nationaler Ebene.** Kurzfristig braucht es dafür eine einmalige Projektförderung, wo diese Institutionen die Produkte im Sinne des Konzepts zusammenführen. Langfristig bräuchte es eine institutionalisierte Förderung (z.B. Nationales Waldforschungszentrum oder Nationales Waldmonitoringzentrum) mit dem Auftrag zur Erstellung solcher Produkte, wo jedes Institut seine Expertisen einbringen kann.

10. Die Datenerhebung für den geplanten digitalen Zwilling ist ein wichtiger Schritt für eine einmalige genaue Erfassung von Waldparametern. Für eine fundierte Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion sind jedoch **regelmäßige Wiederholungsmessungen** erforderlich – was angesichts der hohen Kosten **des digitalen Zwillings derzeit noch nicht gesichert** ist. Daher sollten auch **alternative Ansätze** genutzt werden: Dazu zählen **Biomasseschätzungen auf Basis von Baumhöhenmodellen und Strukturparametern** (aus LiDAR- oder Luftbilddaten) sowie optischer Fernerkundung. In Kombination mit nationalen Allometrien können so regelmäßig aktualisierte und flächenrepräsentative Schätzungen der Biomasse durchgeführt werden.
11. Auf Basis der bestehenden Methoden und Systeme sollte ein **deutschlandweites, Fernerkundungs-basiertes und belastbares Monitoringsystem** aufgebaut werden, was eine regelmäßige Aktualisierung wichtiger Waldparameter mittels Kombination von Fernerkundungsdaten mit nationalen Referenzdaten (z. B. Bundeswaldinventur) ermöglicht.
12. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist ein **verbesserter Datenzugang zu nationalen Referenzdaten** als auch ein verbesserter Zugang zu Luftbilddaten der Landesvermessungsämter. Eine Öffnung dieser Referenzdatensätze kann die fernerkundliche Erfassung von Waldparametern wesentlich vorantreiben, wofür insbesondere KI-Methoden zur Ableitung weiterer forstlich relevanter Parameter genutzt werden könnten.
13. Für die Umsetzung sollten **bestehende Kompetenzen und Kapazitäten in Institutionen und Unternehmen** genutzt werden, die über langjährige Erfahrung in den Bereichen Fernerkundung, Monitoring und Waldzustandserfassung verfügen. Um eine effektive und effiziente Implementierung eines Monitoringsystems zu gewährleisten, sind Kooperationen zwischen Institutionen und Unternehmen notwendig, da nur so die vorhandenen Expertisen in allen notwendigen Bereichen (fachlich, IT, co-design etc.) gebündelt werden können.
14. Zur Realisierung eines solchen Monitoringsystems müssen **moderne IT-Infrastrukturen für die automatisierte Verarbeitung großer Datenmengen** (z. B. Digitaler Zwilling Deutschland) aufgebaut werden und finanzielle Mittel für personelle, IT- und teilweise Daten-Ressourcen zur Verfügung gestellt werden.

## 8 Literatur

**Anderegg, W. R.; Kane, J. M.; Anderegg, L. D.** (2013): Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. In: *Nature Climate Change* 3 (1), S. 30–36.

**Anderegg, W.R.L., Schwalm, C., Biondi, F., Camarero, J.J., Koch, G., Litvak, M. & Williams, A.P.** (2020). Pervasive drought legacy effects in forest ecosystems and their carbon cycle impacts. *Nature Plants*, 3(3), 194–203.

**Apan, A.; Held, A.; Phinn, S.; Markley, J.** (2004): Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. In: *International Journal of Remote Sensing* 25 (2), S. 489–498. DOI: 10.1080/01431160310001618031.

**Bauhus, J., Dieter, M., Meyer, P., Knoke, T., Endres, E., Farwig, N., Weber-Blaschke, G., Lang, F., Kleinschmit, B., & Hafner, A.** (2025). Einordnung wichtiger Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2022 in Bezug auf walddpolitische Handlungsfelder: Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*

**Berger, K., Förster, S., Förster, M., Vancutsem, C., Hostert, P., Schweitzer, C., Van De Kerchove, R., Nepomshina, O., Requena Suarez, D., Dowell, M., & Herold, M.** (in review). Evolving Earth observations for recent EU environmental policies. *Remote Sensing of Environment*

**Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B. & Hostert, P.** (2024). National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114069. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>

**BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft)** (2023). *Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023*. Berlin, Germany. [Online verfügbar](#)

**Bolte, A., Mansourian, S., Madsen, P., Derkyi, M., Kleine, M. & Stanturf, J.** (2023). Forest adaptation and restoration under global change. *Annals of Forest Science*, 80(1), 7.

**Bolte, A., Ammer, C., Blaschke, M., Bräsicke, N., Caspari, S., Degen, B., Elmer, M., Eusemann, P., Gärtner, S., Goßner, M.M., Katzenberger, J., Kätzel, R., Kleinschmit, J., Krüger, I., Meyer, P., Michler, B., Pertl, C., Printzen, C., Sanders, T., Schäfer, R., Uhl, E., Weiß, L., Wellbrock, N., Wirth, C., Züghardt, W., & Kroiher, F.** (2025). Konzept für ein nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald). Thünen Working Paper 267 (p. 68). Braunschweig: Thünen Institut. <https://doi.org/10.3220/253-2025-29>

**Bonan, G.B.** (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449.

**Breiman, L.** (2001). Random forests. *Machine Learning* 45, 5–32. <https://doi.org/10.10621023/A:1010933404324>

**Buras, A., Rammig, A. & Zang, C.S.** (2021). The European Forest Condition Monitor: Using Remotely Sensed Forest Greenness to Identify Hot Spots of Forest Decline. *Frontiers in Plant Science*, **12**, 689220. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689220>

**Buras, A. & Rammig, A.** (2023). Vom Punkt in die Fläche – Satellitengestütztes Waldzustandsmonitoring in Deutschland. In: 100 Jahre Berichte über Landwirtschaft. Jubiläumsausgabe. S. 108-120. <https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/486/713>

**Carreiras, J. M. B., Quegan, S., Le Toan, T., Tong Minh, D. H., Saatchi, S. S., Carvalhais, N., Reichstein, M., & Scipal, K.** (2017). Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions. *Remote Sensing of Environment*, **196**, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.003>

**Chávez, R.O., Rocco, R., Gutiérrez, Á.G., Dörner, M. & Estay, S.A.** (2019). A self-calibrated non-parametric time series analysis approach for assessing insect defoliation of broad-leaved deciduous *Nothofagus pumilio* forests. *Remote Sensing*, **11**(2), 204.

**Endres, U., & Förster, B.** (2014). Die Inventur in bayerischen Naturwaldreservaten. LWF aktuell, **100**, 58

**European Commission, Joint Research Centre** (2016). *European Atlas of Forest Tree Species*. Houston Durrant, T., De Rigo, D., Mauri, A., Caudullo, G., San-Miguel-Ayanz, J. (Eds.), Publications Office, Luxembourg.

**European Environment Agency (EEA)** (2016). *European Forest Ecosystems: State and Trends*. EEA Report No. 5/2016, Publications Office, Luxembourg.

**Fassnacht, F.E., White, J.C., Wulder, M.A. & Næsset, E.** (2023). Remote sensing in forestry: Current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, **97**(1), 11–37.

**Fassnacht, F.E., Mager, C., Waser, L.T., Kanjir, U., Schäfer, J., Buhvald, A.P., Shafeian, E., Schiefer, F., Stančič, L., Immitzer, M., Dalponte, M., Stereńczak, K., & Skudnik, M.** (2024). Forest practitioners' requirements for remote sensing-based canopy height, wood-volume, tree species, and disturbance products. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, **98**, 233-252

**Freudenberg, M., Schnell, S., & Magdon, P.** (2024). A Sentinel-2 Machine Learning Dataset for Tree Species Classification in Germany. *Earth System Science Data Discussions*, **2024**, 1-20. <https://doi.org/10.5194/essd-17-351-2025>

**Galvão, L.S., Formaggio, A.R., & Tisot, D.A.** (2005). Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, **94**, 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>

**Gnilke, A. & Sanders, T.G.** (2022). Distinguishing Abrupt and Gradual Forest Disturbances With MODIS-Based Phenological Anomaly Series. *Frontiers in Plant Science*, **13**, 863116. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863116>

**Hansen, M. C.; Potapov, P. V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S. A.; Tyukavina, A.; Townshend, J. R.** (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. In: *Science* 342 (6160), S. 850–853.

**Hardisky, M. A.; Klemas, V.; Smart, R. M.** (1983): The influence of soil salinity, growth, form and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterflora* canopies. In: *Photogrammetric engineering and remote sensing*, S. 77–83.

**Hermosilla, T.; Wulder, M. A.; White, J. C.; Coops, N. C.; Hobart, G. W.** (2015). Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics. In: *Remote sensing of environment* 170, S. 121–132.

**Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P; Gao, .; Ferreira, L.G** (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. In: *Remote sensing of environment* 83 (1), S. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

**Kacic, P., Thonfeld, F., Gessner, U. & Kuenzer, C.** (2023). Forest structure characterization in Germany – novel products and analysis based on GEDI, Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 15(8), 1969. <https://doi.org/10.3390/rs15081969>

**Kacic, P., Gessner, U., Holzwarth, S., Thonfeld, F., & Kuenzer, C.** (2024). Assessing experimental silvicultural treatments enhancing structural complexity in a central European forest – BEAST time-series analysis based on Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 10(4), 531–550. <https://doi.org/10.1002/rse2.386>

**Kacic, P., Gessner, U., Hakkenberg, C. R., Holzwarth, S., Müller, J., Pierick, K., Seidel, D., Thonfeld, F., Torresani, M., & Kuenzer, C.** (2025). Characterizing local forest structural complexity based on multi-platform and -sensor derived indicators. *Ecological Indicators*, 170, 113085. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113085>

**Kellner, J. R., Armston, J., & Duncanson, L.** (2023). Algorithm theoretical basis document for GEDI footprint aboveground biomass density. *Earth and Space Science*, 10, Article e2022EA002516. <https://doi.org/10.1029/2022EA002516>

**Kennedy, Robert E.; Yang, Zhiqiang; Cohen, Warren B.** (2010): Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. In: *Remote sensing of environment* 114 (12), S. 2897–2910.

**Klehr, D., Stoffels, J., Hill, A., Pham, V.-D., van der Linden, S. & Frantz, D.** (2025). Mapping tree species fractions in temperate mixed forests using Sentinel-2 time series and synthetically mixed training data. *Remote Sensing of Environment*, 323, 114740. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114740>

**Knoke, T.; Griess, V.; Hahn, A.; Röbiger, J.; Schneider, T. (2012):** Forstbetriebsplanung als Entscheidungshilfe. 408 S., Ulmer, Stuttgart. ISBN 978-3-8001-7611-3 \_\_\_\_

**Krüger, K., Senf, C., Hagge, J., Seidl, R. (2025):** Setting aside areas for conservation does not increase disturbances in temperate forests. *Journal of Applied Ecology* **62**, 1271–1281. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70036>.

**Kuang, W., Ho, H. W., Zhou, Y., Suandi, S. A., & Ismail, F. (2024).** A comprehensive review on tree detection methods using point cloud and aerial imagery from unmanned aerial vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227(Part 1), 109476. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109476>

**Lang, N., Jetz, W., Schindler, K. et al. (2023).** A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, **7**, 1778–1789. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6>

**Lange, M., Preidl, S., Reichmuth, A., Heurich, M. & Doktor, D. (2024).** A continuous tree species-specific reflectance anomaly index reveals declining forest condition between 2016 and 2022 in Germany. *Remote Sensing of Environment*, **312**, 114323.

**Lange, M. & Doktor, D. (2017).** *phenex: Auxiliary Functions for Phenological Data Analysis*. R package version 1.4-5. <https://CRAN.R-project.org/package=phenex> (Zugriff: 12. Feb. 2020)

**Langner, N., Oehmichen, K., Henning, L., Blickensdörfer, L. & Riedel, T. (2022).** *Stocked forest area map 2018*. <https://doi.org/10.3220/DATA20221205151218>

**Lechner, A. M.; Dubovyk, O.; Eler, A.; Schorcht, G.; Wegmann, M. (2020):** Remote sensing of forest health: A review of spectral traits, processes, and remote sensing characteristics. In: *Remote Sensing* **12** (10), S. 1597.

**Liu, S., Brandt, M., Nord-Larsen, T., Chave, J., Reiner, F., Lang, N., Tong, X., Ciais, P., Igel, C., Pascual, A., Guerra-Hernandez, J., Li, S., Mugabowindekwe, M., Saatchi, S., Yue, Y., Chen, Z., & Fensholt, R. (2023).** The overlooked contribution of trees outside forests to tree cover and woody biomass across Europe. *Science Advances*, **9**(37), eadh4097. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh4097>

**Loew, A., Peng, J., & Borsche, M. (2016).** High-resolution land surface fluxes from satellite and reanalysis data (HOLAPS v1. 0): evaluation and uncertainty assessment. *Geoscientific Model Development*, **9**, 2499-2532. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2499-2016>

**Mermoz, S., Prieto, J. D., Planells, M., Morin, D., Koleck, T., Mouret, F., Bouvet, A., Le Toan, T., Sheeren, D., Hamrouni, Y., Bélouard, T., Paillassa, É., Carme, M., Chartier, M., Martel, S., & Féret, J.-B. (2024).** Submonthly assessment of temperate forest clear-cuts in mainland France. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **17**, 13743–13764. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3429012>

**Michel, A., Haggemüller, K., Kirchner, T., Prescher, A.K., Schwärzel, K., & Wohlgemuth, L., editors (2024).** Forest Condition in Europe: The 2024 Assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). p. 96. Eberswalde: Thünen Institut. <https://doi.org/10.3220/ICPTR1732702585000>

**Mugabowindekwe, M., Brandt, M., Chave, J., Reiner, F., Skole, D.L.L., Kariryaa, A., Igel, C., Hiernaux, P., Ciais, P., Mertz, O., Tong, X., Li, S., Rwanyiziri, G., Dushimiyimana, T., Ndoli, A., Uwizeyimana, V., Lilleso, J.P.B., Gieseke, F., Tucker, C.J.J., Saatchi, S. & Fensholt, R. (2023).** Nation-

wide mapping of tree-level aboveground carbon stocks in Rwanda. *Nat. Clim. Chang.* 13, 91–97.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01544-w>

**Müller, F., Baessler, C., Frenzel, M., Klotz, S., & Schubert, H.** (2010). Long-Term Ecosystem Research Between Theory and Application – An Introduction. In F. Müller, C. Baessler, H. Schubert, & S. Klotz (Eds.), *Long-Term Ecological Research: Between Theory and Application* (pp. 3-7). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8782-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8782-9_1)

**Myneni, R. B.; Hall, F. G.; Sellers, P. J.; Marshak, A. L.** (1995). The interpretation of spectral vegetation index. In: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 33 (2), S. 481–486. DOI: 10.1109/36.377948.

**Nagel, R., Meyer, P., Blaschke, M., & Feldmann, E.** (2023). Strict forest protection: A meaningful contribution to Climate-Smart Forestry? An evaluation of temporal trends in the carbon balance of unmanaged forests in Germany. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1099558.  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1099558>

**Ottosen, T.-B., Petch, G., Hanson, M. & Skjøth, C.A.** (2020). Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101947. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101947>

**Ouaknine, A., Kattenborn, T., Laliberté, E., Rolnick, D.** (2025). OpenForest: a data catalog for machine learning in forest monitoring. *Environmental Data Science*, 4:e15. doi:10.1017/eds.2024.53

**Patacca, M. et al.** (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 29, 1359–1376. <https://doi.org/10.1111/gcb.16531>

**Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M.C., Kommareddy, A. et al.** (2020). Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>

**Preidl, S. & Faude, U.** (2020). Abschlussbericht: Baumartenklassifizierung und naturschutzfachliche Bewertung von Wäldern mit Fernerkundungsdaten - Entwicklung eines prototypischen Ansatzes. *BfN-Schriften 668/2023*, FKZ: 3517860800.

**Preidl, S., Lange, M. & Doktor, D.** (2020). Introducing APiC for regionalised land cover mapping on the national scale using Sentinel-2A imagery. *Remote Sensing of Environment*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111673>

**Reiche, J., Mullissa, A., Slagter, B., Gou, Y., Tsendbazar, N.-E., Odongo-Braun, C., Vollrath, A., Weisse, M. J., Stolle, F., & Pickens, A.** (2021). Forest disturbance alerts for the Congo Basin using Sentinel-1. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd0a8>

**Reiche, J., Balling, J., Pickens, A. H., Masolele, R. N., Berger, A., Weisse, M. J., Mannarino, D., Gou, Y., Slagter, B., & Donchyts, G.** (2024). Integrating satellite-based forest disturbance alerts improves detection timeliness and confidence. *Environmental Research Letters*, 19(5), 054011.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2d82>

**Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J. & Schuck, A.** (2003). Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, *9*(11), 1620–1633.

**Schellenberg, K., Jagdhuber, T., Zehner, M., Hese, S., Urban, M., Urbazaev, M., Hartmann, H., Schmullius, C., & Dubois, C.** (2023). Potential of Sentinel-1 SAR to Assess Damage in Drought-Affected Temperate Deciduous Broadleaf Forests. *Remote Sensing*, *15*(4), 1004.  
<https://doi.org/10.3390/rs15041004>

**Schiefer, F., Schmidlein, S., Frick, A., Frey, J., Klinke, R. et al.** (2023). UAV-based reference data for the prediction of fractional cover of standing deadwood from Sentinel time series. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *8*, 100034.  
<https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2023.100034>

**Schmitz, F.** (2019). Herausragendes aus der Kohlenstoffinventur 2017. *AFZ - Der Wald*, *14*, 34-36

**Schwitzgebel, F., & Riedel, T.** (2019). Die Kohlenstoffinventur 2017–Methode, Durchführung, Kosten. *AFZ - Der Wald*, *14*, 19-21

**Senf, C. & Seidl, R.** (2021a). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, *4*, 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>

**Senf, C. & Seidl, R.** (2021b). Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends. *Global Change Biology*, *27*(15), 3605–3619.

**Singh, L., Mutanga, O., Mafongoya, P., Peerbhay, K., & Crous, J.** (2022). Hyperspectral remote sensing for foliar nutrient detection in forestry: A near-infrared perspective. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *25*, 100676.

**Stoffels, J., Hill, J., Sachtleber, T., Mader, S., Buddenbaum, H. et al.** (2015). Satellite-Based Derivation of High-Resolution Forest Information Layers for Operational Forest Management. *Forests*, *6*, 1982–2013. <https://doi.org/10.3390/f6061982>

**Storch, T., Honold, H.-P., Chabrilat, S., Habermeyer, M., Tucker, P., Brell, M., Ohndorf, A., Wirth, K., Betz, M., & Kuchler, M.** (2023). The EnMAP imaging spectroscopy mission towards operations. *Remote Sensing of Environment*, *294*, 113632. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113632>

**Thiel, C., Mueller, M. M., Epple, L., Thau, C., Hese, S., Voltersen, M., & Henkel, A.** (2020). UAS Imagery-Based Mapping of Coarse Wood Debris in a Natural Deciduous Forest in Central Germany (Hainich National Park). *Remote Sensing*, *12*(20), 3293. <https://doi.org/10.3390/rs12203293>

**Thonfeld, F., Gessner, U., Holzwarth, S., Kriese, J., Da Ponte, E., Huth, J. & Kuenzer, C.** (2022). A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018–2020 Drought Years. *Remote Sensing*, *14*(3), 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>

**Tolan, J., Yang, H.I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H.V. et al.** (2024). Very high-resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. *Remote Sensing of Environment*, *300*, 113888.

**Tucker, C. J.; Elgin, J. H.; McMurtrey, J. E.; Fan, C. J.** (1979). Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. In: *Remote sensing of environment* 8 (3), S. 237–248. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90004- .

**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.

**Viana-Soto, A. & Senf, C.** (2024). The European Forest Disturbance Atlas: a forest disturbance monitoring system using the Landsat archive. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2024-361>, in review.

**Wagner, F. H., Roberts, S., Ritz, A. L., Carter, G., Dalagnol, R., Favrichon, S., Hirye, M. C. M., Brandt, M., Ciaï, P., & Saatchi, S.** (2024). Sub-meter tree height mapping of California using aerial images and LiDAR-informed U-Net model. *Remote Sensing of Environment*, **305**, 114099. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114099>

**Weiser, H., Schäfer, J., Winiwarter, L., Krašovec, N., Fassnacht, F.E. & Höfle, B.** (2022). Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests. *Earth System Science Data*, **14**, 2989–3012. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022>

**Wellbrock, N., Eickenscheidt, N., Hilbrig, L., Dühnelt, P., Holzhausen, M., Bauer, A., Dammann, I., Strich, S., Engels, F., & Wauer, A.** (2018). Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland. Thünen Working Paper 84 (p. 98). Braunschweig: Thünen Institut. <https://doi.org/10.3220/WP1513589598000>

**Wellbrock, N., Makowski, V., Bielefeldt, J., Dühnelt, P., Grüneberg, E., Bienert, O., Blum, U., Drescher-Larres, K., Eickenscheidt, N., Evers, J., Falk, W., Greve, M., Hartmann, P., Henry, J., Jacob, F., Martin, J., Milbert, G., Riek, W., Rückamp, D., Schilli, C., Schwerhoff, J., & Süß, R.** (2022). Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III). Thünen Working Paper 195 (p. 237). Eberswalde: Thünen Institut. <https://doi.org/10.3220/WP1655205829000>

**Welle, T., Aschenbrenner, L., Kuonath, K., Kirmaier, S. & Franke, J.** (2022). Mapping Dominant Tree Species of German Forests. *Remote Sensing*, **14**, 330. <https://doi.org/10.3390/rs14143330>

**Xu, C., Förster, M., Beckschäfer, P., Talkner, U., Klinck, C., & Kleinschmit, B.** (2025). Modeling European beech defoliation at a regional scale gradient in Germany from northern lowlands to central uplands using geo-ecological parameters, Sentinel-2 and National Forest Condition Survey data. *Forest Ecology and Management*, **576**, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122383>

**Zacharias, S., Vereecken, H., Bäck, J., & Mirtl, M.** (2023). eLTER RI—A new European Research Infrastructure addressing today’s environmental challenges—a new perspective for European hydrological research. EGU, Naples, Italy, 12–15 Jun 2023, GC8-Hydro-25, <https://doi.org/10.5194/egusphere-gc8-hydro-25>

**Zeug, G., Geltendorf, T., Immitzer, M. & Atzberger, C.** (2018). *Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Satellitenfernerkundung (Copernicus) für Zwecke der Ableitung ökologischer Belastungsgrenzen und der Verifizierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.* Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany.

