

Erdsicht - Einblicke in geographische
und geoinformationstechnische Arbeitsweisen

Kartographie
GIS
Fernerkundung



Martin Kappas, Katharina Rorig, Laura Stangier
und Daniel Wyss (Hrsg.)

Waldmonitoring in Deutschland



ibidem

Martin Kappas, Katharina Rorig, Laura Stangier und Daniel Wyss

Waldmonitoring in Deutschland

ERDSICHT - EINBLICKE IN GEOGRAPHISCHE UND GEOINFORMATIONSTECHNISCHE ARBEITSWEISEN

Schriftenreihe des Geographischen Instituts der Universität Göttingen,

Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung

Herausgegeben von Prof. Dr. Martin Kappas

ISSN 1614-4716

- 19 *Wahib Sahwan*
Geomorphologische Untersuchungen mittels GIS- und
Fernerkundungsverfahren unter Berücksichtigung hydrogeologischer
Fragestellungen
Fallbeispiele aus Nordwest Syrien
ISBN 978-3-8382-0094-1
- 20 *Julia Krimkowski*
Das Vordringen der Malaria nach Mitteleuropa im Zuge der
Klimaerwärmung
Fallbeispiel Deutschland
ISBN 978-3-8382-0312-6
- 21 *Julia Kubanek*
Comparison of GIS-based and High Resolution Satellite Imagery
Population Modeling
A Case Study for Istanbul
ISBN 978-3-8382-0306-5
- 22 *Christine von Buttlar, Marianne Karpenstein-Machan, Roland Bauböck*
Anbaukonzepte für Energiepflanzen in Zeiten des Klimawandels
Beitrag zum Klimafolgenmanagement in der Metropolregion
Hannover-Braunschweig-Göttingen-Wolfsburg
ISBN 978-3-8382-0525-0
- 23 *Daniel Karthe, Sergey Chalov, Nikolay Kasimov, Martin Kappas (eds.)*
Water and Environment in the Selenga-Baikal Basin: International
Research Cooperation for an Ecoregion of Global Relevance
ISBN 978-3-8382-0853-4
- 24 *Hoang Khanh Linh Nguyen*
Detecting and Modeling the Changes of Land Use
and Land Cover for Land Use Planning in Da Nang City, Vietnam
ISBN 978-3-8382-1136-7

Martin Kappas, Katharina Rorig, Laura Stangier
und Daniel Wyss

**WALDMONITORING IN
DEUTSCHLAND**

ibidem
Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Coverbild: Stehend abgestorbener Fichtenbestand, umgeben von (noch) gesundem Wald im Wiehengebirge bei Lübbecke (OWL). © Laura Stangier

ISSN: 1614-4716

ISBN-13: 978-3-8382-7729-5

© *ibidem*-Verlag, Stuttgart 2023

Alle Rechte vorbehalten

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und elektronische Speicherformen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in or introduced into a retrieval system, or transmitted, in any form, or by any means (electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise) without the prior written permission of the publisher. Any person who does any unauthorized act in relation to this publication may be liable to criminal prosecution and civil claims for damages.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	xi
----------------------------	----

Einführung.....	1
-----------------	---

Katharina Rorig

Fallstudie I

Durch Trockenstress verursachte Vitalitäts- veränderungen bei Bäumen.....	11
--	-----------

1 Einleitung.....	15
--------------------------	-----------

1.1 Problemstellung.....	16
--------------------------	----

1.2 Forschungsstand.....	18
--------------------------	----

1.3 Fragestellung und Zielsetzung der Studie I.....	19
---	----

1.4 Aufbau der Fallstudie I.....	20
----------------------------------	----

2 Theoretische Rahmung.....	22
------------------------------------	-----------

2.1 Waldstruktur Deutschlands.....	22
------------------------------------	----

2.1.1 Historische Entwicklung Deutschlands Wälder.....	23
--	----

2.1.2 Waldumbau.....	25
----------------------	----

2.2 Vitalität von Bäumen.....	27
-------------------------------	----

2.3 Trockenstress bei Bäumen.....	28
-----------------------------------	----

2.3.1 Trockenstressreaktionen.....	29
------------------------------------	----

2.3.2 Trockenstress nach Baumalter.....	32
---	----

2.4 Vitalitätsbeurteilung von Bäumen und Wäldern.....	33
---	----

2.4.1 Terrestrische Vitalitätsbeurteilung von Bäumen.....	34
---	----

2.4.2 Vitalitätsbeurteilung entsprechend dem Bestandesalter.....	35
---	----

2.4.3 Vitalitätsbeurteilung mittels Fernerkundung und GIS.....	36
---	----

2.4.4 Trockenstresserkennung mittels multispektraler Satellitenbilder.....	37
---	----

3	Das Untersuchungsgebiet	39
3.1	Naturräumliche Gliederung und geographische Lage	40
3.2	Klima.....	41
3.3	Geologie und Böden.....	42
3.4	Baumartenzusammensetzung	42
3.5	Betreuung der Waldflächen.....	43
3.6	Historischer Kontext „Industriewald Ruhrgebiet“	44
3.7	Waldzustand Nordrhein-Westfalen	46
4	Methodik	48
4.1	Datengrundlage	48
4.2	Verwendete Software	52
4.3	Methodisches Vorgehen.....	52
4.3.1	Vorbereitung der Daten.....	53
4.3.2	Vitalitätsbeurteilung.....	57
4.3.3	Ground Truthing & Gap Fraction Analyse.....	68
4.3.4	Statistische Auswertung.....	70
5	Ergebnisse.....	73
5.1	Vorstellung der Schadkarten	73
5.1.1	Waldzustandskarten 2018, 2019 und 2020	73
5.1.2	Vitalitätsveränderungskarten 2018-2019, 2019-2020 und 2018-2020.....	80
5.2	Ground Truthing & Gap Fraction Analyse	86
5.3	Statistische Auswertung	90
6	Diskussion – Fallstudie I	104
6.1	Interpretation der Ergebnisse	104
6.1.1	Ergebnisse der Schadkarten.....	104
6.1.2	Ergebnisse des <i>Ground Truthings</i> & der <i>Gap Fraction Analyse</i>	110
6.1.3	Ergebnisse der statistischen Auswertung.....	110
6.2	Methodenkritik	116

6.2.1	Die Schadkarten.....	116
6.2.2	Ground Thruthing & Gap Fraction Analyse.....	119
6.2.3	Statistische Auswertung.....	120
7	Fazit der Fallstudie I	122
8	Literaturverzeichnis Fallstudie I	127
9	Anhang.....	141

Laura Stangier

Fallstudie II

	Monitoring der Vitalität von Wäldern im Unteren Weser-Leine-Bergland auf Basis von Sentinel-2 Satellitenbildern unter besonderer Berücksichtigung von Buchenbeständen	161
--	--	------------

1	Einleitung.....	163
2	Theoretische Grundlagen	166
2.1	Beobachtete Klimaänderungen und Klimaszenarien	166
2.2	Die Ressource Wald im Klimawandel	168
2.2.1	Bäume im Trockenstress	170
2.2.2	Auswirkungen der Trockenperiode 2018-2020.....	172
2.2.3	Zustand der Wälder in Niedersachsen.....	174
2.3	Buchen (<i>Fagus sylvatica</i>).....	177
2.4	Anpassung an den Klimawandel: Waldumbau.....	180
2.5	Messbarkeit der Vitalität mit fernerkundlichen Methoden .	182
2.6	Sentinel-2	185
2.6.1	Anwendung von Sentinel-2 Daten im Waldbereich	188
2.6.2	Vitalitätsmonitoring auf Grundlage von Vegetationsindizes	189
3	Untersuchungsgebiet Unteres Weser-Leine- Bergland	193
3.1	Geographische Lage und naturräumliche Eigenschaften .	193
3.2	Beispielgebiete	197

4	Material und Methoden.....	199
4.1	Datengrundlage und Datenaufbereitung.....	200
4.1.1	Wetterdaten.....	200
4.1.2	Satellitenbilder.....	201
4.1.3	Weitere Geodaten.....	203
4.1.4	Standorts- und Bestandesdaten.....	204
4.1.5	Waldtypenklassifizierung.....	205
4.2	Auswahl der Vegetationsindizes.....	206
4.2.1	NDRE.....	206
4.2.2	DSWI.....	207
4.2.3	RENDVI.....	208
4.2.4	Korrelation der Vegetationsindizes.....	209
4.3	Erstellung der Schadkarten.....	212
4.3.1	Waldzustandskarten.....	214
4.3.2	Vitalitätsveränderungskarten.....	216
4.4	Ground Truthing.....	220
4.5	Statistische Datenauswertung.....	222
5	Ergebnisse.....	227
5.1	Wetterdaten.....	227
5.2	Waldzustandskarten.....	230
5.2.1	Vitalitätszustand des Waldes im Untersuchungsgebiet 2017-2021.....	231
5.2.2	Beispielgebiet 1 (Bad Salzdetfurth).....	237
5.2.3	Beispielgebiet 2 (Buchenbestände).....	239
5.3	Vitalitätsveränderungskarten.....	240
5.3.1	Gesamtes Untersuchungsgebiet.....	240
5.3.2	Beispielgebiet 1 (Bad Salzdetfurth).....	243
5.3.3	Beispielgebiet 2 (Buchenbestände).....	245
5.4	Ground Truthing.....	246
5.5	Statistische Datenanalyse.....	255

5.5.1	Gesamte Waldfläche der NLF.....	255
5.5.2	Buchenbestände	257
6	Diskussion – Fallstudie II.....	266
6.1	Ermittlung der Waldvitalität auf Basis von Sentinel-2 Satellitenbildern.....	266
6.2	Vitalität des Waldes im Unteren Weser-Leine-Bergland...	270
6.3	Standortfaktoren Buchenbestände.....	279
6.4	Implikationen für die Praxis	284
7	Fazit zur Fallstudie II.....	286
8	Literaturverzeichnis Fallstudie II.....	289
9	Anhang.....	302

Abkürzungsverzeichnis

ALH	Andere Laubbäume mit hoher Umtriebszeit
ALN	Andere Laubbäume mit niedriger Umtriebszeit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BK	Bodenkarte zur Forstlichen Standortkartierung
BOA	Bottom-of-atmosphere reflectance
CO ₂	Kohlendioxid
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOP	Digitales Orthophoto
DSWI	Disease water stress index
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESA	European Space Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FBK	Forstbetriebskarte
FM	Festmeter
FNK	Flächennutzungskartierung
FSK	Forstliche Standortkarte
GIS	Geoinformationssystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAI	Leaf Area Index
LIDAR	Light detection and ranging
MSI	Multi-Spectral Imager
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahinfrarot
NLF	Niedersächsische Landesforsten
NRW	Nordrhein-Westfalen

Abkürzungsverzeichnis

OSM	OpenStreetMap
pnV	Potenzielle natürliche Vegetation
RCP	Representative Concentration Pathways
RENDVI	Red edge Normalized Difference Vegetation Index
RVR	Regionalverband Ruhr
SWIR	Short Wave Infrared (kurzwelliges Infrarot)
SNAP	Sentinel Application Plattform
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TOA	Top-of-atmosphere reflectance
ü. NN.	Über Normalnull
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
URL	Uniform Resource Locator
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator (Koordinatensystem)
VI	Vegetationsindex
WMS	WebMapService
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

Einführung

Leitfragen der vorliegenden Fallstudien:

Wie geht es dem Wald in Deutschland nach den Trocken- und Hitzeperioden der Sommer 2018 bis 2020?

und

Wie können die Veränderungen im Wald kostengünstig und nachvollziehbar (Workflows) mit frei verfügbaren Daten beobachtet werden?

Rund 30% der Fläche Deutschlands (11,4 Millionen Hektar) sind mit Wald bedeckt. Die häufigsten Baumarten in Deutschland in den meistens gemischten Wäldern sind die Nadelbäume Fichte (25 Prozent) und Kiefer (23 Prozent). Es folgen die Laubbaumarten Buche (16 Prozent) und Eiche (19 Prozent) (Quelle: Wald in Deutschland – Wald in Zahlen; Kohlenstoffinventur 2017; Schwitzgebel und Riedel 2019).

Die extreme Trockenheit im Jahr 2018 bzw. die anhaltende Dürre in den Jahren 2018 - 2020 führte verbreitet zur Schädigung der Wälder. Insbesondere kam es bei der Fichte zu starkem Befall und Massenvermehrung von Borkenkäfern, wodurch die Absterbe Rate anstieg. Hiervon sind besonders Bäume mit einem Alter von über 60 Jahren betroffen. Insgesamt sind nach diesen Borkenkäfer- und Trockenschäden seit 2018 etwa 380.000 ha wieder zu bewalden.

Deshalb erwuchs in unserer Göttinger Arbeitsgruppe schon früh die Frage, ob wir mit Fernerkundungsmethoden diesen Prozess monitoren können, um begleitend, unterstützende Datensätze und räumliche Informationen über die Vitalität der Wälder zur Verfügung zu stellen. Insbesondere stand hier die Kosten- und Technikfrage im Vordergrund: *Gibt es kostenfreie, geeignete und frei zugängliche Datenquellen, die zum Monitoring des Waldzustands genutzt werden können, um geeignete Informationen über die Vitalität der Wälder als Planungsgrundlagen für den Forstbereich möglichst schnell zu liefern?*

Wie komplex darf die angewandte Methode sein, um auch für „Nicht-Fernkundungsexperten“ leicht nachvollziehbar zu sein?

Die Wahl fiel auf die Copernicus Daten (hier insbesondere die Daten der Sentinel-Satelliten), die kostenfrei und flächendeckend für Deutschland zur Verfügung stehen. Der Zugang sowie eine ausführliche Dokumentation findet sich auf dem „*Copernicus Open Access Hub*“ (<https://www.d-copernicus.de/daten/datenzugang/>). Eine bereits für ganz Deutschland durchgeführte Analyse zur Nutzung von Sentinel-Daten zur Waldanalyse findet sich bei Thonfeld et al. (2022).

Es stehen unterschiedliche Datenplattformen zur Verfügung wie zum Beispiel *CODE-DE* (Copernicus Data and Exploitation Platform – Deutschland). Dies ist der nationale Zugang zu den Daten des Copernicus Programms für Deutschland. Hier finden sich sowohl die aktuellen Daten aller operationellen Sentinel-Satelliten wie auch die Daten der sechs Copernicus-Dienste. Diese Daten können kostenlos heruntergeladen und genutzt werden. Es ist lediglich eine Registrierung auf *CODE-DE* erforderlich.

Weiterhin gibt es die *Copernicus – Data Information and Access Services (DIAS)*. Diese Dienste sind Datenplattformen mit Cloud-basierter Architektur. Diese Plattformen ermöglichen den Zugriff auf Copernicus-Daten und bieten Computerressourcen und Algorithmen, um die Daten verarbeiten zu können, ohne sie vorher herunterladen zu müssen. Diese Dienste sind für Anwender günstig, die keine eigene (Desktop bezogene) Möglichkeit der Datenverarbeitung vorhalten können. Fünf alternative DIAS Plattformen (Mundi Web Services, Sobloo, ONDA DIAS, Creodias, WekEO) ermöglichen die Erkundung, Visualisierung und den Download der Copernicus-Datensätze, sowie die Prozessierung in einer Cloud. Zudem stellen Sie weitere Informationsprodukte auf einem Marktplatz zur Verfügung. Die einzelnen Plattformen unterscheiden sich in ihrem ergänzenden Daten- und Softwareangebot, in der Portal-, Nutzungs- und Prozessierungs-Umgebung. Diese Datenplattformen sind aber nicht kostenlos zu nutzen.

Weiterhin gibt es die *ESA Thematic exploitation platforms (ESA TEPs)*, die auf bestimmte Themen wie zum Beispiel den Waldbereich fokussieren (Forestry TEP; [https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Sets/Thematic_Exploitation_Platforms/\(result_type\)/videos](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Sets/Thematic_Exploitation_Platforms/(result_type)/videos)).

Im vorliegenden Buch wurden die Daten für beide Fallstudien (Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen) über *CODE-DE* besorgt. Hinzu

kamen weitere, frei verfügbare Daten, wie zum Beispiel die digitalen Orthophotos des Regionalverbandes Ruhr (RVR), welche durch das 2017 etablierte Geonetzwerk Ruhr (<https://www.geonetzwerk.ruhr/>) zur Verfügung gestellt werden. Diese *Orthophotos* werden jährlich für eine *Frühjahrs-Befliegung* (unbelaubt) und eine *Sommer-Befliegung* (volle Belaubung) erstellt.

Bei den vorgestellten Fallstudien wurde darauf Wert gelegt, dass die Schadensermittlung bzw. die Vitalitätsbetrachtung nachvollziehbar ist sowohl im Bereich der einzelnen GIS- und Fernerkundungs- gestützten Analysen als auch im nachgeschalteten statistischen Bereich. Deshalb wurden Diagramme (Workflows) eingefügt, welche die wesentlichen Arbeitsschritte erläutern. Ein „Nacharbeiten“ bzw. eine Übertragung der Methoden auf andere Gebiete ist somit auch für „Nicht-Experten“ im Bereich GIS und Satellitenfernerkundung möglich.

Weiterhin werden in den einzelnen Fallstudien Grundlageninformationen zu den Themen „Vitalität“ und „Trockenstress“ sowie Basisinformationen zum Wald in Deutschland gegeben bzw. auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Der belaubte *Kronenzustand* der Waldbäume gilt als ein *wichtiger Indikator für ihre Vitalität*. Dieser kann sowohl terrestrisch als auch fernerkundungsbasiert ermittelt werden. Nach dem aktuellen Waldschadensbericht ist eine hohe Kronenverlichtung bei allen Arten zu verzeichnen. Obwohl der Anteil der „*deutlichen Kronenverlichtung*“ und der „*mittleren Kronenverlichtung*“ im Jahr 2021 leicht gesunken ist, weisen rund 25% aller Baumarten bereits eine mittlere Kronenverlichtung auf.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2021:

Seit den 1980er wird in Deutschland die Waldzustandserfassung durchgeführt. Seit Beginn dient der Kronenzustand als Indikator für die Vitalität der Waldbäume. In den letzten Jahren wurden die Untersuchungen zu einem umfassenden forstlichen Umweltmonitoring erweitert indem Kriterien des Bodenzustandes berücksichtigt wurden und die Stoffflüsse in Waldökosystemen betrachtet werden.

Die Waldzustandserfassung erfolgt dabei nach einer international einheitlichen Methode. Die bundesweite Erhebung wird jeweils im Juli und August auf einem systematischen Stichprobennetz (Level I) durchgeführt. Für landesspezifische Aussagen haben die meisten Bundesländer (z.B. NRW) das Stichprobennetz auf 4 km x 4 km verdichtet. An dauerhaft markierten Probebäumen wird durch speziell geschulte Fachleute der Kronenzustand beurteilt. Die wichtigsten Kriterien sind die Verlichtung der Baumkronen und die Vergilbung der noch vorhandenen Nadeln und Blätter. Weitere Indikatoren sind unter anderem Fruktifikation, Insekten- und Pilzbefall, Sturm- und Wetterschäden. Die Ergebnisse werden jährlich veröffentlicht. Die Daten sind bundesweit und im Rahmen des europäischen Waldmonitorings für die Öffentlichkeit zugänglich.

Seit 1984 bis etwa 2000 nahmen die Waldschäden bundesweit kontinuierlich zu und der Waldzustand befindet sich mit jährlichen Schwankungen auf einem hohen Schadensniveau. Die Belastungssituation der Waldböden wurde parallel mit einer bundesweiten Bodenzustandserhebung erfasst (BZE 2; BZE 3 ist in Vorbereitung). Die bundesweite *Bodenzustandserhebung im Wald* (BZE) ist ein zentraler Bestandteil des forstlichen Umweltmonitorings. Die BZE erfasst Zustand und Veränderungen von Waldböden auf einem bundesweiten Stichprobennetz. Die erste BZE wurde im Zeitraum zwischen 1987 und 1993 durchgeführt und zwischen 2006 und 2008 wiederholt.

Seit Beginn der Erhebungen im Jahr 1984 sind die Anteile der Schadstufen 2 bis 4 sowie die mittlere Kronenverlichtung bei den Laubbäumen, v. a. bei der Buche stark angestiegen. Der Kronenzustand der Kiefer und anderer Nadelbäume zeigen im Gegensatz zur Fichte keinen deutlichen Trend. Bei der Fichte ist ab 2020 eine deutliche Zunahme der Kronenverlichtung zu erkennen.

In der BZE 2021 wurden 9904 Probebäume auf 409 Probepunkten untersucht. Dabei wurden 38 Baumarten erfasst, wobei rund 80 % auf die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche (Stiel- und Trauben-Eiche werden gemeinsam ausgewertet) entfallen. Alle übrigen Baumarten werden für die statistische Auswertung zu den Gruppen „andere Nadelbäume“ und „andere Laubbäume“ zusammengefasst. Rund 72 % der aufgenommenen Bäume sind älter als 60 Jahre.

Fichte

Die Fichte zeigt einen Anstieg der Klasse „deutliche Kronenverlichtung“ von 44 % auf 46 %. Auf diese Warnstufe entfielen 32 % der untersuchten Fichten. Ohne Verlichtungen waren 22 % der Fichten (vgl. 2020: 21 %). Auch die mittlere Kronenverlichtung ist von 29 % auf 30 % leicht gestiegen. Die Fichte weist im Vergleich zu den anderen Baumarten die höchste Mortalitätsrate auf (vor allem aufgrund von Borkenkäferbefall).

Kiefer

Bei der Kiefer hat sich der Anteil der Klasse „deutliche Kronenverlichtung“ seit 2018 um 10 % deutlich erhöht. Auf diese Warnstufe entfielen 59 % der Kiefer (vgl. 2020: 54 %). Ohne Verlichtungen waren 16 % (vgl. 2020: 20 %). Die mittlere Kronenverlichtung der Kiefer blieb mit 23 % unverändert. Insgesamt bleibt die Schadentwicklung der Kiefer auf gleichem Niveau.

Buche

Bei der Buche ist der Anteil der Klasse „deutliche Kronenverlichtung“ von 55 % auf 45 % gesunken. Auf diese Warnstufe entfielen 39 % der Buchen (vgl. 2020: 34 %). Ohne Verlichtungen waren 16 % der Buchen (vgl. 2020: 11 %). Die mittlere Kronenverlichtung ist von 31 % auf 28 % wieder leicht gesunken.

Eiche

Die Eiche zeigt einen Anteil der Klasse „deutliche Kronenverlichtung“ von 41%. Ohne Verlichtungen waren 19 % der Eichen (vgl. 2020: 20 %). Die mittlere Kronenverlichtung ist allerdings von 25 % auf 27 % gestiegen. Die Eiche zeigt somit erste Anzeichen der Regeneration, bleibt jedoch weiterhin auf einem hohen Schadniveau.

Insgesamt hängt der Waldzustand von verschiedenen Faktoren ab, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig verstärken oder abschwächen können. Hierzu gehören insbesondere das Baumalter, die Baumart, die gegenwärtige und frühere Bewirtschaftung, Standortfaktoren (insbesondere Bodentyp, Hangneigung, Nährstoffversorgung),

das Auftreten von Schadorganismen oder der Eintrag von Luftschadstoffen.

Die Witterung spielt eine entscheidende Rolle für die Vitalität unserer Waldbäume. Seit 250 Jahren gab es Mitteleuropa keine dreijährige Sommer-Dürre vom Ausmaß der Jahre 2018, 2019 und 2020; ein wesentlicher Grund für die Durchführung unserer Fallstudien zum Waldmonitoring.

Die **erste Fallstudie** des vorliegenden Buchs beschäftigt sich deshalb mit durch *Trockenstress verursachten Vitalitätsveränderungen bei Bäumen anhand einer GIS-gestützten Vitalitätsanalyse von Waldflächen in Nordrhein-Westfalen (RVR-Waldflächen) unter Berücksichtigung der Altersstruktur.*

Die **zweite Fallstudie** *Monitoring der Vitalität von Wäldern im Unteren Weser-Leine-Bergland auf Basis von Sentinel-2 Satellitenbildern unter besonderer Berücksichtigung von Buchenbeständen* fokussiert insbesondere auf die Beobachtung von Buchenbeständen unter Trockenstress.

Beide Fallstudien enthalten weitere wesentliche Grundlageninformation zur Waldentwicklung sowie zu wichtigen Standortfaktoren.

Seit den 1960er Jahren werden Satelliten- und Luftbilder zur Beurteilung und Modellierung biophysikalischer Vegetationsparameter herangezogen. Heute zählen optische Multispektrale Satellitendaten, neben luftgestützten LIDAR-Daten, zu den in der Forstwirtschaft am häufigsten verwendeten Fernerkundungsdaten. Aktuelle Vitalitätsanalysen in der Fernerkundung werden in erster Linie über multispektrale Satellitenbilder und daraus abgeleiteten *Vegetationsindizes* durchgeführt. Diese spielen aufgrund ihrer Fähigkeit, Veränderungen der biophysikalischen oder chemischen Eigenschaften des Bodens und der Vegetation zu erfassen, in der Vitalitätsbeurteilung eine entscheidende Rolle.

Beide Fallstudien nutzen **kostenfrei verfügbare Satellitendaten** der Copernicus-Satelliten. Die Copernicus Sentinel-Satelliten erzielen eine Bodenauflösung von 10-20 m (je nach gewählten Spektralbereich). Dadurch bleiben diese Daten in ihrer Möglichkeit für eine Einzelbaumkartierung hinter sehr hoch auflösenden Satellitendaten (VHRS und HRS) zurück (z.B. WorldView (1-4) der Firma Digital

Globe, Planet Scope Daten oder neue 15 cm HD and 30 cm HD Produkte von GeoEye-1, QuickBird-2 und WorldView (1 – 4)).

Die Satellitendaten von WorldView (1-4), der Planet Scope Mission oder die Produkte von GeoEye-1 und QuickBird-2 ermöglichen Waldstudien unter Berücksichtigung von Einzelbaumattributen. Somit ist mit den „Very High Resolution Satellites“ (VHRS) eine satellitengestützte Waldinventur auf Einzelbaumbene möglich. Jedoch fehlen bis jetzt operationelle Methoden, um aus diesen hochauflösenden Daten halbwegs automatisiert Aussagen zur Vitalität von Einzelbäumen zu treffen.

Zudem sind diese Daten nicht kostenfrei erhältlich und somit auf einen kleinen Nutzerkreis eingeschränkt. Zwei neue Produkte, 15 cm HD und 30 cm HD, wurden auf dem Server der European Space Agency (ESA) den Kollektionen von GeoEye-1, QuickBird-2 und WorldView (1 – 4) hinzugefügt. Durch eine Vereinbarung mit European Space Imaging (EUSI) gewährt die ESA Forschern nach erfolgreicher Einreichung und Bewertung eines Projektvorschlags Zugang zu Daten aus diesen Missionen (siehe: <https://earth.esa.int/eogateway/news/15-cm-hd-and-30-cm-hd-products-added-to-eusi-esa-archive-collections>). Die ESA wird so viele hochwertige und innovative Projekte wie möglich innerhalb der verfügbaren Quotengrenze unterstützen, daher kann aber jedem Projekt nur eine begrenzte Datenmenge zugewiesen werden. Für Forschungszwecke ist dies sehr interessant, für die wiederkehrende praktische Arbeit in den Forstämtern Deutschlands mit festen Erhebungszeiten aber eher ungeeignet.

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Waldkartierung in Deutschland wurde im Mai 2022 vorgestellt: Die erste satellitengestützte Baumartenkarte Deutschlands, der „Waldmonitor“ der Naturwald Akademie und der Remote Sensing Solutions GmbH. Im Waldmonitor werden 7 Hauptbaumarten mit einer Genauigkeit von 77 % bis 94 % kartiert (siehe: <https://map3d.remote-sensing-solutions.de/waldmonitor-deutschland/>). Weiterhin kann der Biomassetrend der Jahre 2016 bis 2020 basierend auf Sentinel-2 Satellitenbilddaufnahmen visualisiert werden. Die Verteilung der dominanten Baumarten wird mit einer Auflösung von 10 m pro Pixel dargestellt. Die relativ grobe räumliche Auflösung gewährleistet somit keine Klassifikation der Baumart für den einzelnen Baum, sondern lediglich der dominanten Baumart in einem 10 m x 10 m Raster. Für die Analysen im Waldmonitor wurden ähnlich

zu unseren Studien Sentinel-2 Daten des Europäischen Copernicus Programms verwendet (<https://www.copernicus.eu/>). Eine neuer Input für das Waldmanagement wird in Zukunft auch durch die Bereitstellung von hyperspektralen Daten (Zugang ab Oktober 2022) des am 01.04.2022 gestarteten Satelliten *EnMAP* (Environmental Mapping and Analysis Program; <https://www.enmap.org/>) erwartet. EnMAP wird dazu beitragen, wichtige Ökosystemprozesse zu quantifizieren und zu modellieren, verschiedene Auswirkungen menschlicher Interventionen zu untersuchen und natürliche Ressourcen wie unseren Wald in Deutschland zu verwalten. Der breite Spektralbereich von EnMAP mit über 200 Spektralbändern im Bereich von 420 nm bis 1000 nm (VNIR) und von 900 nm bis 2450 nm (SWIR) mit hoher radiometrischer Auflösung ($< 1\text{nm}$) wird eine bessere Quantifizierung von Bauparametern erlauben. Mit einer Swath Breite von 30 km bei hoher räumlicher Auflösung von 30 m x 30 m wird zudem eine hohe zeitliche Ziel-Wiederholungsrate von 4 Tagen erreicht. Die neuartigen EnMAP Daten lassen sich zukünftig aufgrund ihrer räumlichen Auflösung hervorragend mit den Sentinel Daten in unserem Forschungsansatz verbinden.

Der Austausch von Daten rund um das Thema Wald soll sowohl in der Administration, als auch für das operative Geschehen draußen im Wald erleichtert werden. Gerade für ein funktionierendes Wald-Management sind aktuelle Basisdaten zum Waldzustand entscheidend. Die schnelle und serviceorientierte Bereitstellung solcher Basisdaten stellt einen wichtigen Schritt in eine zukunftsfähige Waldbewirtschaftung dar.

In unseren beiden Fallstudien wird gezeigt, wie basierend auf kostenfreien Daten (Copernicus Daten, Orthophotos, OpenStreetMap Daten, Klimadaten, Bodendaten, Topographie Daten, Forstbetriebskarten etc.) Informationen zur Vitalität der Wälder abgeleitet werden können. Methodisch werden hier nur frei zugängliche Daten und Software (z.B. SNAP) genutzt. Die methodischen Schritte bzw. die Datenquellen sind dokumentiert und in Flowcharts nachvollziehbar, so dass die Ableitung der Waldschadenskarten leicht nachvollziehbar und auf andere Wuchsgebiete in Deutschland übertragbar ist.

Weitere Projekte im Waldmonitoring der Arbeitsgruppe „GIS und Fernerkundung“ an der Universität Göttingen finden sich unter folgenden Links:

Projekt:

Fernerkundliches und mikrometeorologisches Monitoring von Schad- und Wiederbewaldungsflächen im Südharz

Link: <https://www.uni-goettingen.de/de/651809.html>

oder

Projekt:

KLIMNEM – Forschung für internationale nachhaltige Waldwirtschaft Nachhaltige Waldbewirtschaftung temperater Laubwälder (nordhemisphärische Buchen- und südhemisphärische Südbuchenwälder)

Link: <https://www.uni-goettingen.de/de/652894.html>

Literatur zur Einführung:

Schwitzgebel F, Riedel T (2019) Die Kohlenstoffinventur 2017 - Methode, Durchführung, Kosten. AFZ Wald 74(14):19-21

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

Fallstudie I

Durch Trockenstress verursachte Vitalitätsveränderungen bei Bäumen

**Eine GIS-gestützte Vitalitätsanalyse
der RVR-Waldflächen in NRW unter
Berücksichtigung der Altersstruktur**

Katharina Rorig

Unser Dank gilt dem Regionalverband Ruhr Grün für die Bereitstellung der Flächennutzungskartierung und der Forstbetriebskarte sowie der fachkundlichen Auskunft.

Kurzfassung

Wälder stellen komplexe terrestrische Ökosysteme dar, die unter anderem als Kohlenstoffspeicher, Temperatenausgleicher und Luftfilter fungieren, weshalb sie als eine unserer wichtigsten Ressourcen gelten. Ebendiese Ressource ist jedoch zusehends gefährdet. Neben dem globalen Klimawandel stellen insbesondere die in den letzten Jahren vermehrt auftretenden Extremwetterereignisse, wie Hitzewellen, Trockenzeiten und schwere Stürme die Wälder vor große Herausforderungen. Infolgedessen hat der Flächenanteil an gesunden Wäldern bereits stark abgenommen, weshalb es von größter Wichtigkeit ist, die Trockenstressreaktionen der Bäume genauestens zu beobachten und auf diese Weise Schäden zu minimieren.

Ein bedeutendes Instrument stellt in diesem Zusammenhang das Waldmonitoring dar, welches die Feldforschung durch das Überwinden räumlicher Einschränkungen sowie einer schnelleren und weitläufigeren Informationserfassung ergänzt. Da aktuell noch keine standardisierten Schadklassengrenzwerte zur Waldzustandsbeurteilung in der Fernerkundung existieren, fallen sowohl die Grenzwerte als auch die darauf beruhende Beurteilung stets unterschiedlich aus. Die vorliegende Fallstudie knüpft demnach an den akuten Forschungsbedarf bezüglich einer flächendeckenden und zuverlässigen Methode zur Vitalitätsbeurteilung von Wäldern an. Ziel der Fallstudie ist es, gebietsübergreifende Vitalitätsklassengrenzwerte für eine flächendeckende Waldzustandsbeurteilung zu entwickeln und damit eine Unterstützung für die forstliche Anwendung zu gewährleisten. Im Rahmen dessen wurden mit Hilfe von Sentinel-2-Satellitenbildern diverse Vegetationsindizes berechnet und zur Erstellung von Schadkarten herangezogen. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Schadkartentypen - eine *Waldzustandskarte* und eine *Vitalitätsveränderungskarte* - welche sowohl den aktuellen Vitalitätszustand der einzelnen Jahre als auch die zwischen zwei Jahren stattfindende Vitalitätsveränderung visualisieren. Der Untersuchungszeitraum beläuft sich entsprechend der starken Wärme und Trockenheit der vergangenen Jahre, auf den Zeitraum von *2018 bis 2020*. Zur Überprüfung und Optimierung der Ergebnisse wurde zudem ein *Ground Thruthing* sowie eine damit verbundene *Gap Fraction* Analyse durchgeführt.

Abschließend wurde im Rahmen einer statistischen Analyse der Einfluss des Bestandesalters sowie verschiedener anderer Einflussfaktoren auf die Vitalitätsveränderungen geprüft.

Das Ergebnis dessen sind repräsentative Schadklassengrenzwerte der Waldzustandskarten und Vitalitätsveränderungskarten, welche mit den Ergebnissen des *Ground Truthings* und der *Gap Fraction* Analyse übereinstimmen. Diese zeigen zunächst vor allem eine Erholung der Waldflächen nach 2018, während ein verhältnismäßig kleiner Anteil deutliche Vitalitätsverschlechterungen aufweist. Durch die statistische Analyse kann zudem ein Zusammenhang zwischen den stattgefundenen Vitalitätsveränderungen und diversen Einflussfaktoren, wie der Hangneigung, der Exposition, der Baumart und den Altersklassen festgestellt werden.

1 Einleitung

Wälder stellen eine der weltweit wichtigsten natürlichen Ressourcen dar, sowohl aus ökologischer als auch wirtschaftlicher und sozialer Sicht (vgl. ELLENBERG & LEUSCHNER 2010; KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET 1984). Sie dienen als Lebensgrundlage sowie als Rohstofflieferant und gelten insofern in vielerlei Hinsicht als wichtig für das menschliche Überleben. Wälder verkörpern, mit wenigen Ausnahmen, die potenzielle natürliche Vegetation Deutschlands und bedecken heute 32 % der Bundesrepublik, was einer Fläche von rund 11,4 Millionen Hektar entspricht (vgl. BMEL 2017, 231). Somit ist der Wald nach wie vor ein prägender Faktor der Kulturlandschaft und erfüllt außerdem verschiedene Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen (vgl. KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET 1984). Insbesondere unter Berücksichtigung des voranschreitenden Klimawandels sind die globalen Klimafunktionen der Waldökosysteme von größter Wichtigkeit (vgl. ROLOFF 2018). Wälder stellen komplexe terrestrische Ökosysteme dar, die unter anderem als Kohlenstoffspeicher, Temperaturregulierer und Luftfilter fungieren (vgl. FAO 2020). Das Ausmaß dieser Funktionen hängt jedoch unmittelbar von dem Zustand des Waldes ab - von seiner Vitalität.

Sowohl globale als auch regionale Veränderungen der hydrologischen Zyklen und Temperaturregime wirken sich auf die Gesundheit, Funktionsweise und das Wachstum der Wälder aus und damit auch auf die Kohlenstoffbindung. Insbesondere Extremwetterereignisse, wie Hitzewellen, extreme Trockenzeiten und schwere Stürme, stellen für die Vitalität der Bäume eine große Herausforderung dar. Die ungewöhnlich heißen und trockenen Sommer der Jahre 2018, 2019 und 2020 führten bei vielen Bäumen zu Trockenstress, welcher mit einer Vielzahl von Trockenstressreaktionen einhergeht (vgl. ANJUM et al. 2011). Die dadurch hervorgerufenen Reaktionen der Waldbäume machen die zentrale Bedeutung der Wasserversorgung von Bäumen im Klimawandel deutlich. Ein erhöhtes Auftreten von Dürren bringt ersthafte Auswirkungen auf die Vitalität der Wälder mit sich, von der regionalen bis zur globalen Ebene. Die Massenvermehrung von Schädlingen, wie dem Borkenkäfer, wird durch Vitalitätseinbuße

zusätzlich erhöht, wodurch die Waldgesundheit insgesamt wiederum einem höheren Risiko ausgesetzt ist.

Es ist anzunehmen, dass durch den voranschreitenden Klimawandel eine Veränderung der Wälder in ihrer Bestandsstruktur und Biodiversität stattfinden wird (vgl. HICKLER et al. 2014; CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2004). Welche Waldökosysteme und Lebensgemeinschaften dadurch besonders stark gefährdet sind und welche weniger, kann noch nicht mit Sicherheit gesagt werden. Umso wichtiger ist das Bemühen um den Erhalt der Wälder mitsamt ihrer Vielfalt. Da sich die Klimawandelfolgen für Wälder über den Waldumbau alleine nicht verhindern werden lassen, ist es, um die Vitalität der Bäume in Zukunft möglichst zu erhalten, von großer Wichtigkeit die Trockenstressanpassung und -Toleranz von Bäumen genauestens zu beobachten und auf diese Weise Schäden zu minimieren. Eine wichtige Aufgabe in diesem Zusammenhang stellt das *Waldmonitoring* dar, wodurch die Fernerkundung zunehmend an Bedeutung gewinnt. Sie ergänzt die Feldforschung durch das Überwinden der räumlichen Einschränkungen durch eine schnellere und weitläufigere Erfassung. Unter Betrachtung der zunehmenden Bedrohung gegenüber der Ressource Wald, steigt der Bedarf an quantitativen, als auch qualitativen und vor allem zeitnahen Informationen über den Vitalitätszustand der Wälder. Die Fernerkundung bietet im Zusammenhang mit Satellitenbildern eine wirksame und dennoch kostengünstige Methode Waldgebiete großflächig zu überwachen und zu messen.

1.1 Problemstellung

Der globale Klimawandel wirkt sich zusehends auf die Wälder unserer Erde aus. Die mittlere Jahrestemperatur steigt an, während die Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode zurückgehen (vgl. IPCC 2021). So konnte im Jahr 2020, entsprechend des langjährigen Mittels von 1850 bis 1900, ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von 1,2 °C gemessen werden (vgl. IPCC 2021, 5). Hinzukommt das vermehrte Auftreten von Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Starkregenereignissen und Dürren, deren Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit in Zukunft weiter zunehmen könnten (vgl. IPCC 2021). Diese extremen und schwankenden Witterungsbedingungen haben einen

direkten Einfluss auf den Gesundheitszustand der Wälder und stellen im Zusammenhang mit dem Klimawandel die gegenwärtig größte Bedrohung der deutschen Wälder dar (vgl. SCHLOSSMACHER 2019).

Der Anteil gesunder Wälder in Deutschland ist bereits stark gesunken, sodass lediglich 22 % der Waldflächen keine *Kronenverlichtung* aufweisen. Weitere 42 % zeigen leichte Schäden, wohingegen 36 % bereits als stark geschädigt gelten (vgl. BMEL 2020a, 60). Ursächlich für die Vitalitätseinbuße sind in erster Linie die sich wiederholenden Hitze- und Dürreperioden, welche den Befall durch Schädlinge begünstigen (vgl. IPCC 2021; SCHULDT et al. 2020; SMUL 2019). Temperaturbedingt kommt es zu einer erhöhten Verdunstungsrate bei zeitweise ausbleibenden Niederschlägen, wodurch das Auffüllen der Bodenwasserspeicher ausbleibt. Das im Boden gespeicherte Wasser ist jedoch besonders in Dürre- und Hitzeperioden von größter Wichtigkeit, da es temporär den einzigen Wasserzugang der Bäume darstellen kann (vgl. SKIADAREIS et al. 2021). Vereinzelt auftretende Wetterextreme gefährden die Stabilität der Wälder für Gewöhnlich nicht (vgl. BMEL 2020b). Die zunehmende Häufigkeit und Schwere von sowohl biotischen als auch abiotischen Störungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel hingegen, gehen mit diversen Veränderungen des Ökosystems einher, welche wiederum zu einer Verringerung der verschiedenen Funktionen und Dienstleistungen des Ökosystems Wald führen (vgl. UNESCO 2013).

Wälder fungieren als Kohlenstoffsенke und üben somit einen positiven, also hemmenden, Einfluss auf den Klimawandel aus. Sie nehmen CO₂ auf, tragen mittels Transpiration zur Verdunstungskühlung bei und sorgen durch ihre Kronen für Beschattung. Das kontinuierliche Erfüllen der Klimafunktionen steht jedoch in direktem Zusammenhang mit der Vitalität des Waldes. Je geringer die Vitalität eines Baumes, desto schlechter kann er seine Funktionen erfüllen, wodurch weniger CO₂ gebunden werden kann. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und fördert die globale Erwärmung, was den Stress der Bäume weiter verstärkt (vgl. SKIADAREIS et al. 2021). Nehmen die Klimawandelfolgen wie prognostiziert weiter zu, ist mit enormen gesundheitlichen Beeinträchtigungen, Wachstumseinbußen und Sterblichkeitsraten in den Wäldern zu rechnen (vgl. ZANG et al. 2014). Aus diesem Grund ist es von größter Wichtigkeit den Gesundheitszustand und die Widerstandsfähigkeit der Wälder

nach besten Kräften zu erhalten, sodass sie gegenüber den sich summierenden Stressfaktoren weitestgehend geschützt und weniger anfällig sind.

1.2 Forschungsstand

Seit den 1960er Jahren werden Satelliten- und Luftbilder zur Beurteilung und Modellierung biophysikalischer Vegetationsparameter herangezogen (vgl. JENSEN 2007). Heute zählen optische Multispektrale Satellitendaten, neben luftgestützten LIDAR-Daten, zu den in der Forstwirtschaft am häufigsten verwendeten Fernerkundungsdaten (vgl. ADJOGNON et al. 2019). Aktuelle Vitalitätsanalysen in der Fernerkundung werden in erster Linie über multispektrale Satellitenbilder und daraus abgeleiteten Vegetationsindizes durchgeführt. Diese spielen aufgrund ihrer Fähigkeit, Veränderungen der biophysikalischen oder chemischen Eigenschaften des Bodens und der Vegetation zu erfassen, in der Vitalitätsbeurteilung eine entscheidende Rolle.

Viele Studien zur Vitalitätsbestimmung mit Hilfe von Satellitenbildern basieren auf Landsat 8-Daten, wie die Untersuchung von KLINGE et al. aus dem Jahr 2018 zur Ermittlung von Klimafolgen auf die Vitalität borealer Wälder in der Mongolei und der von HAIS et al. im Jahr 2019 veröffentlichten Studie zur Ermittlung von Vitalitätsveränderungen durch Dürreauswirkungen. Durch die Einführung der höher auflösenden Sentinel-2-Satelliten im Jahr 2015 werden zunehmend Untersuchungen auf Grundlage der Sentinel-2-Bilder durchgeführt. So prüften NAVARRO et al., in ihrer 2019 veröffentlichten Studie, die Eignung von Sentinel-2-Bildern zur Untersuchung von Vitalitätsveränderungen anhand von Korkeichen in Portugal, mit positivem Ergebnis. Ähnliches untersuchten PULETTI et al. 2019 in Waldbeständen Mittelitaliens. Sie beurteilten die Fähigkeit multitemporaler Sentinel-2-Bilder zur Erkennung von Dürreauswirkungen auf die Waldgesundheit mit gleichem Ergebnis.

Weitere Forschungsarbeiten zur Vitalitätserfassung von Wäldern beziehen sich auf durch Schädlinge, wie dem Borkenkäfer, verursachte Kalamitäten. Das Hauptaugenmerk dieser Studien liegt primär auf der Früherkennung von befallenen Einzelbäumen oder Waldgebieten, wobei sich die Methodik oftmals auf die Erkennung von

Vitalitätsveränderungen beschränkt und somit ebenfalls für die vorliegende Arbeit von Relevanz ist. HAGHIGHIAN et al. (2020) stellten einen Vergleich von aus Sentinel-2-Bildern berechneten Index-Werten mit In-situ-Daten auf, wobei eine 99% Übereinstimmung festgestellt werden konnte. Eine weitere Studie von BARTA et al., veröffentlicht 2021, beschäftigte sich explizit mit der Früherkennung von Borkenkäfer befallenen Waldgebieten in der Tschechischen Republik, durch den Vergleich der Kronenreflexion vor und nach dem Befall. Die Grundlage der Untersuchung bildeten auch hier Sentinel-2-Daten in Kombination mit verschiedenen multispektral Indizes sowie eine Random-Forest-Klassifizierung. Die Ergebnisse zeigen die starke Bedeutung der SWIR-Bänder zur Erkennung von Vitalitätseinbußen.

Die Mehrzahl der Untersuchungen bezieht sich derzeit noch auf Wälder arider Gebiete. Aussagekräftige Studien bezüglich der Vitalitätsbeurteilung von Wäldern der gemäßigten Breiten, wie sie in Deutschland zu finden sind, fehlen derzeit noch. Nur wenige Ausnahmen, wie die von FERNANDEZ-CARRILLO et al. im Jahr 2020 veröffentlichte Studie zur frühzeitigen Erkennung von durch Borkenkäfer verursachten Vitalitätsverlusten anhand von Sentinel-2-Daten, oder die von MONTZKA et al. veröffentlichte Arbeit zur Beurteilung der sich akkumulierenden Baumkronenlücken infolge extremen Sommerdürren in der Eifel mit Hilfe von Vegetationsindizes, basieren auf ähnlichen klimatischen und geographischen Bedingungen. Aus diesem Grund besteht akuter Forschungsbedarf bezüglich einer flächendeckenden und zuverlässigen Methode zur Vitalitätsbeurteilung deutscher Wälder, woran in dieser Fallstudie angeknüpft werden soll.

1.3 Fragestellung und Zielsetzung der Studie I

Die vorliegende Fallstudie soll dazu beitragen die forstlichen Zwecke der Fernerkundung im aktuellen Problemfeld des Waldsterbens aufzuzeigen. Durch das Aufgreifen bereits bekannter Methoden sollen funktionale Lösungen für das Waldmanagement entwickelt und dadurch eine Unterstützung für die forstliche Anwendung gewährleistet werden. Anknüpfend an den aktuellen Forschungsbedarf an flächendeckenden Waldzustandsinformationen ist es das Ziel

gebietsübergreifende Vitalitätsklassengrenzwerte für eine *flächenendeckende Waldzustandsbeurteilung* zu entwickeln. Durch die Berücksichtigung einer thematisch eng verwandten Fallstudie II, und damit auch eines weiteren Untersuchungsgebiets, soll eine übertragbare Gültigkeit der Vitalitätsklassen gewährleistet werden. Dabei handelt es sich um die von Laura Stangier verfasste Fallstudie mit dem Titel „*Monitoring der Vitalität von Wäldern im Unteren Weserleinebergland auf Basis von Sentinel-2-Satellitenbildern unter besonderer Berücksichtigung von Buchenbeständen*“, welcher dieser Fallstudie I folgt.

Im Rahmen des sich ständig verschlechternden Vitalitätszustandes der deutschen Wälder soll zunächst eine Zeitreihe der Vitalitätsveränderungen und -zustände des Untersuchungszeitraums erstellt werden. Aufgrund der ungewöhnlichen Wärme und Trockenheit der vergangenen Jahre sowie der Aktualität des Themas beläuft sich der Untersuchungszeitraum auf die Jahre 2018 bis 2020. Mittels der Zeitreihen sollen die Vitalitätsveränderungen der vergangenen drei Jahre modelliert und überprüft werden. Die Modellierung beruht auf der Verrechnung von Vegetationsindizes basierend auf Sentinel-2-Daten. Als Untersuchungsgebiet fungieren dabei die *Waldflächen des Regionalverbands Ruhr Grün*. Im Rahmen eines *Ground Truthing* sollen die in der Arbeit gewonnene Ergebnisse überprüft und fotografisch dokumentiert werden, worauf eine *Gap Fraction*-Analyse folgt. Durch das Hinzuziehen diverser Einflussfaktoren, wie dem Bestandesalters, soll zudem im Rahmen einer statistischen Analyse überprüft werden, ob und inwiefern Zusammenhänge zwischen den Vitalitätsveränderungen und den jeweils prägenden Faktoren, wie den Baumaltersklassen, bestehen.

1.4 Aufbau der Fallstudie I

Die Fallstudie I gliedert sich in insgesamt 7 Kapitel. Kapitel 2 umfasst die Theoretischen Rahmung und dient zur Erörterung der waldbaulichen Situation Deutschlands sowie der Erläuterung relevanter forstökologischer Begrifflichkeiten, welche im weiteren Verlauf der Fallstudie von Relevanz sind.

Aufgrund der thematischen Kontextualisierung, werden im Folgenden zunächst die Begriffe *Trockenstress* und *Vitalität* erörtert. Da

die Vitalität von Bäumen traditionell im Feld erfasst wird, wird kurz auf die Unterschiede zwischen der terrestrischen und der fernerkundungsbasierten Vitalitätsbeurteilung eingegangen. In Kapitel 3 erfolgt die Vorstellung des Untersuchungsgebiet, wobei neben den forstlichen und naturräumlichen Gegebenheiten der historische Kontext der RVR-Waldflächen berücksichtigt wird. Kapitel 4 beschreibt die zur Klärung der Forschungsfragen angewandte Methodik. Dies umfasst eine Auflistung der verwendeten Software und Daten sowie das methodische Vorgehen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Kapitel 5 zu finden. Das darauffolgende Kapitel 6 dient zur Interpretation und Diskussion der gewonnenen Ergebnisse sowie zur kritischen Reflexion der angewandten Methodik. Kapitel 7 bildet den Abschluss der Fallstudie und fasst die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsprozesses zusammen und leitet zu Fallstudie II über.