

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: 978-3-8382-1729-1

© *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.

Printed in the EU

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xi
Einführung	1
<i>Katharina Rorig</i>	
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
CO2	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.