

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



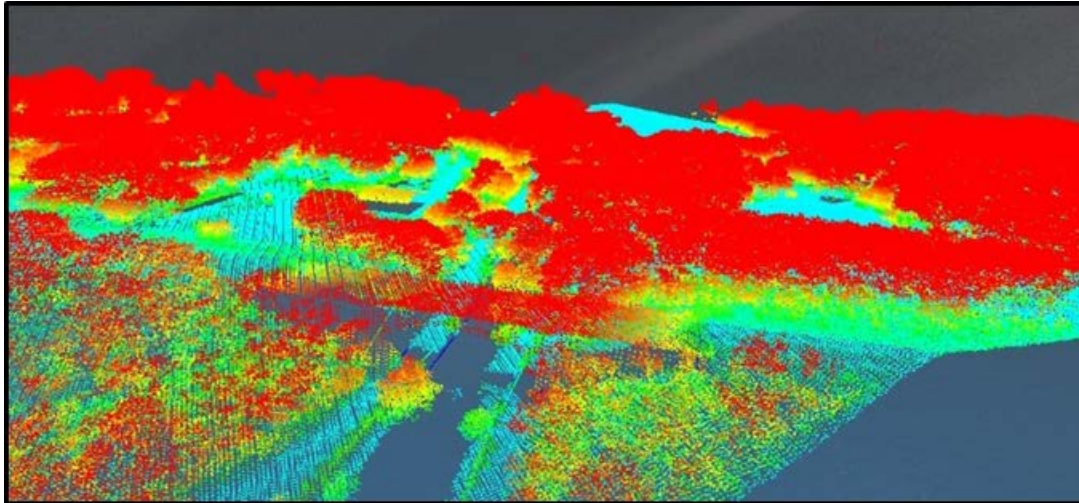
Eisenbahn-Bundesamt

Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 10 (2021)

Ableitung des Baumbestandes entlang des deutschen Schienennetzes

Zusammenfassung



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 10 (2021)
Projektnummer 2019-U-5-1217

Ableitung des Baumbestandes entlang des deutschen Schienennetzes

Zusammenfassung

von

Dr. Annett Frick, Benjamin Stöckigt, Kathrin Wagner
Luftbild Umwelt Planung GmbH - LUP, Potsdam

Im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Luftbild Umwelt Planung GmbH (LUP)
Große Weinmeisterstraße. 3a
14469 Potsdam

ABSCHLUSS DER STUDIE

Oktober 2020

REDAKTION

DZSF

Frederick Bott, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität
Dr. Sonja Szymczak, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität
Fabia Backendorf, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität

BILDNACHWEIS

Titelinnenseite: Punktwolkendarstellung einer Laserscanaufnahme; Quelle: LUP GmbH

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.210007.03](https://doi.org/10.48755/dzsf.210007.03)

Dresden, Mai 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Stand der Forschung und methodischer Überblick	8
3	Methoden	10
3.1	GIS-Tool	10
3.2	Datenbeschaffung	10
3.3	Datenaufbereitung	11
3.4	Baumerkennung.....	11
3.5	Baumcharakterisierung	12
4	Ergebnisse	15
4.1	Ergebnisvisualisierung.....	15
4.2	Validierung der Ergebnisse.....	16
4.2.1	Filterung von Stromleitungen	16
4.2.2	Baumartenklassifikation	17
4.2.3	Baumerkennung.....	17
5	Diskussion	19
6	Zusammenfassung	20
7	Abbildungsverzeichnis	21
8	Tabellenverzeichnis	21
9	Quellenverzeichnis	22

1 Einleitung

Baumbestände in Gleisnähe stellen in Verbindung mit Extremwetterlagen eine Gefahr für die Schieneninfrastruktur dar. Züge sind aufgrund ihrer hohen Windresistenz zwar in der Regel nicht direkt durch Stürme beeinträchtigt, jedoch stellen auf die Bahntrassen fallende Objekte eine große Gefahr dar. Umgestürzte Bäume können sowohl die Oberleitungen beschädigen als auch die Gleise blockieren und dadurch zu Zugausfällen und Verspätungen führen oder Züge und Personen direkt beschädigen. So investierte die Deutsche Bahn (DB) Netz AG über 100 Millionen € in die Umsetzung des Vegetationsmanagements „Aktionsplan Vegetation“ (BM 2018). Allein 2017/2018 sorgten innerhalb weniger Monate schwere Stürme für Zugausfälle oder Verspätungen und Gleisschäden in Millionenhöhe (WEIHGOLD 2018). Ein großer Anteil der Ausgaben im Rahmen des Vegetationsmanagements wird für die manuelle Inspektion der Vegetation entlang der Gleise benötigt. Denn eine digitale Kartierung von Vegetation entlang der deutschen Eisenbahntrassen gibt es bis heute nicht. Vielmehr müssen regelmäßige Vor-Ort Begehungen und Inspektionen der Vegetation durchgeführt werden. Diese sind jedoch zeit- und kostenaufwendig und die Vegetationshöhe wird lediglich geschätzt (DB NETZE 2019: 36).

Generell bildet ein Baum dann eine Gefahr gegenüber Sturmwurf, wenn seine Höhe den Abstand zur Infrastruktur beziehungsweise zum Infrastrukturelement überschreitet. Weitere Faktoren sind die lokale Topographie, Geologie, Bodenbeschaffenheit, Vorfeuchte des Untergrundes sowie die Baumart und der Gesundheitszustand des Baumes. Fernerkundungsmethoden stellen eine sinnvolle Alternative und vor allem Ergänzung dar, da sie eine schnelle und objektive Einzelbaumdetektion sowie die direkte Messung von Vegetationshöhen ermöglichen. Dies kann in einen verringerten Aufwand sowie damit verbundener Kostenreduktion resultieren. Dieses Forschungsvorhaben zielt mithilfe von automatisierten Analysen digitaler Fernerkundungsdaten darauf ab, ein aktuelles und flächendeckendes Monitoring der Gehölze an Bahnstrecken zu unterstützen. Dabei beschäftigt sich das Projekt mit dem Potential von frei verfügbaren Geodaten zur:

- Detektion und Abgrenzung von Einzelbäumen
- Ausweisung von potenziell gefährdeten Baumbeständen

Dafür werden die Berechnungen exemplarisch für die Bundesländer Thüringen und Nordrhein-Westfalen (NRW) vorgenommen. Die Berechnungen erfolgen in einer eigens für diese Anwendung entwickelten Prozesskette, die als GIS-Tool implementiert wird und auch die Übertragbarkeit auf weitere Flächen ermöglicht.

Zur Erarbeitung der Forschungsfragen und -ziele wird das Vorhaben in verschiedene Abschnitte, die wiederum im Aufbau des GIS-Tools wiederzufinden und automatisiert sind, untergliedert. Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Forschung und einem methodischen Überblick, stellt die Grundlage des Projektes die Datenakquise dar. Daraufhin folgt die Datenbeschaffung für die Bundesländer Thüringen und NRW in denen die Eingangsdaten bereits frei verfügbar heruntergeladen werden können, um eine exemplarische Berechnung zu gewährleisten. Anschließend werden die gesammelten Daten genutzt, um die flächendeckende Baumerkennung und -charakterisierung zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Analysen werden im Anschluss daran umfassend validiert und bewertet.

2 Stand der Forschung und methodischer Überblick

Die Einzelbaumerkennung entlang großer Untersuchungsgebiete ist kein gänzlich neues Forschungsfeld der Fernerkundung. So ist die individuelle Baumerkennung auf Basis fernerkundlicher erhobener Daten bereits seit den 1980er Jahren Gegenstand der Forschung (ZHEN et al. 2016: 2). Die häufigste, großflächige Anwendung findet sich im Bereich der Forstwirtschaft zur Erstellung von Baumkatastern und der Erhebung von Baumeigenschaften wie der Position, der Höhe oder der Baumart (HYYPÄ et al. 2009: 338). Die Anwendungsmöglichkeiten dürfen allerdings nicht nur auf geschlossene Wälder reduziert werden. Andere Anwendungsgebiete sind beispielsweise urbane Flächen zu Zwecken der Raumplanung (HÖFLE & HOLLAUS 2010: 281) oder das Messen des Grünvolumens (YAO & FAN 2013: 1). Was die unterschiedlichen Anwendungsfelder der Einzelbaumerkennung vereint, ist jedoch der Bedarf an hochauflösenden, möglichst frei zugänglichen Daten sowie die grundsätzlichen methodischen Ansätze um aus diesen Datensätzen die gewünschten Informationen zu generieren.

Im Zuge der europäischen INSPIRE Richtlinie wird eine einheitliche Geodateninfrastruktur angestrebt mit der ein internationaler und nationaler Austausch von Geodaten verfolgt wird. In diesem Zusammenhang ist das Open-Data-Gesetz als Bestandteil des Gesetzes zur Förderung der elektronischen Verwaltung (E-Government-Gesetz - E-GovG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 12.07.2017 (BGBl. I, S. 2206) zu nennen. Seitdem steigt nach und nach die Verfügbarkeit von offenen Geodaten der Bundesämter, was ein großes Potential für Wissenschaft und Unternehmen bedeutet. Neben Berlin bieten auch Thüringen und NRW bereits große Teile ihrer Daten in einer offenen Geodateninfrastruktur an. Die Herausforderung geht somit von der Verfügbarkeit der Geodaten hin zum Management der hohen Datenmengen.

Zur Bearbeitung von Raster-, Vektor- und Punktdaten in diesem Forschungsprojekt, wurde sich für die Prozessentwicklung mit Python entschieden. Diese Programmiersprache stellt, aufgrund der Funktionsweise und Verbreitung, eine der meist genutzten zur Bearbeitung von Geodaten dar (LAWHEAD 2019: 26-27). Dabei können graphische Oberflächen mithilfe der Bibliothek „Tkinter“ gestaltet werden. Mit der Bibliothek „pyinstaller“ können diese auch als eigenständige, plattformunabhängige Programme fungieren.

Eine der Hauptfunktionen des im Rahmen des Projektes entwickelten GIS-Tools stellt die Detektion von Einzelbäumen dar. Dabei basiert ein Großteil der gebräuchlichen Methoden auf den gleichen Grundlagen. So besteht die Annahme, dass sich die Baumkronenspitze bei dem Maximalwert des normalisierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM) befindet und dieser zur Kronengrenze hin kleiner wird. Meistgenutzter Vertreter von Algorithmen der Einzelbaumerkennung ist nach KE & QUACKENBUSH (2011) die Lokales-Maximum (LM)-Methodik, wohingegen die Watershed-Segmentation (WS) oftmals als Algorithmus der Baumkronenabgrenzung genutzt wird. Mit diesen Methoden lassen sich Genauigkeiten von 80–90 % bei homogenem Waldbestand erzielen (ZHEN et al., 2016). Die Genauigkeiten können schwanken je nach Variation der Baumart, Bestandsdichte, Alter, Größe oder Kronenüberlappung (LARSEN et al., 2011). Eine weitere Schwierigkeit bei der Baumerkennung durch Höhendaten stellt die Unterscheidung von Bäumen und Nicht-Vegetation dar. Ein Lösungsansatz ist oftmals das Hinzuziehen von Spektraldaten (CHU et al. 2019). Bei der Baumcharakterisierung von identifizierten Einzelbäumen stehen Wachstumsmodellierung und Gefährdungsabschätzung im Mittelpunkt. Bei Wachstumsmodellierungen stellt die Chapman-Richards-Wachstumsfunktion (Vgl. Formel 1, RICHARDS 1959) eine der verbreitetsten dreiparametrischen Funktionen dar (PRETZSCH, 2019). Funktionsparameter können dabei mithilfe von

Formel 1:

$$H(t) = a (1 - e^{-bt})^c$$

H(t): Baumhöhe

a, b, c: Funktionsparameter

t: Baumalter

Baumhöhen und -alter bei umfangreichen Inventurbeständen abgeleitet werden. Für Gefährdungsabschätzungen sind Multi-Kriterien Analysen (MCA) ein geeignetes Mittel mehrere Faktoren gegeneinander abzuwägen. Diese finden als Entscheidungshilfe vielfach in verschiedenen Bereichen, beispielsweise auch in der Ökonomie, Verwendung. Insbesondere durch die Anwendung in einem GIS können hier räumliche Unterscheidungen oder Standortentscheidungen getroffen werden (MALCZEWSKI, 1999; EASTMAN 1999, MALCZEWSKI, 2006). Durch Verwendung von Fuzzy Membership Funktionen können dabei Faktoren standardisiert werden. Der Ansatz Ordered Weighted Averaging (OWA) wird verwendet, um das Maß für Ausgleich (trade-off) und Risiko zwischen den Faktoren anzupassen (JIANG & EASTMAN 2000).

3 Methoden

3.1 GIS-Tool

Die hohe räumliche Auflösung von 1 m (Digitales Oberflächenmodell [DOM]/Digitales Geländemodell [DGM]) bis zu 0,2 m (Digitales Orthobild [DOP]) bedingt sehr große Datenmengen, was bei bundeslandweiter Betrachtung eine große Herausforderung darstellt. Für die Bundesländer NRW und Thüringen stehen insgesamt etwa 1 TB an Höhen- und Spektraldaten entlang des Bereichs der Schieneninfrastruktur zur Verfügung. Aufgrund der Datengröße wird innerhalb des Tools eine kachelweise Prozessierung implementiert. Somit kann eine unbegrenzte Anzahl von Daten innerhalb der Teilprozesse eingeladen werden. Anhand der Projektion der jeweiligen Kachel findet eine Zuweisung von übereinstimmenden sowie überlappenden DOM, DGM, und DOP statt, die ggf. in Teilprozessen berechnet werden. Das generierte GIS-Tool bietet darüber hinaus verschiedene Teilprozesse zur Datenaufbereitung, Baumerkennung und Baumcharakterisierung, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden. Die graphische Oberfläche des Tools bietet bei dem Großteil der Prozesse eine Vielzahl von Eingabeoptionen, um eine Anpassung für verschiedene räumliche Gegebenheiten oder Datenverfügbarkeit zu gewährleisten. Die Programmierung basiert dabei komplett auf Python in der Version 3.7, wobei die Bearbeitung von Rasterdaten auf der *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL) und die Bearbeitung von Vektordaten auf der *Simple Features Library* (OGR) basieren. Die graphische Oberfläche wird mit TKinter gestaltet. Eine beispielhafte Darstellung des GIS-Tools zur Filterung von Stromleitungen ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Die Integration der Tools in ArcMap erfolgt mit Hilfe des Addin Managers von ArcGIS. Mit Hilfe des Addin Managers können individuelle Toolbars erstellt und Funktionen zugewiesen werden (Abbildung 1).



Abbildung 1: Grafische Oberfläche zur Filterung von Oberleitungen

3.2 Datenbeschaffung

Für die Baumerkennung entlang des Gleisnetzes werden Höhen- und Spektraldaten heruntergeladen. Diese Daten setzen sich bundeslandweit über 1 x 1 km Kacheln zusammen (Abbildung 2). Teilweise werden diese, wie die DGM Daten in NRW, zu 2 x 2 km Kacheln zusammengefasst. Das einheitliche Bezugsgitter ist dabei Bestandteil der europäischen Initiative zum Aufbau einer einheitlichen Geodateninfrastruktur INSPIRE (BKG 2020). Diese Grundlage der einheitlichen Datenstruktur ermöglicht, dass die benötigten Daten entlang des Schienennetzes innerhalb des GIS-Tools für NRW und Thüringen automatisiert heruntergeladen werden können. Dabei werden aus dem Bezugsgitter

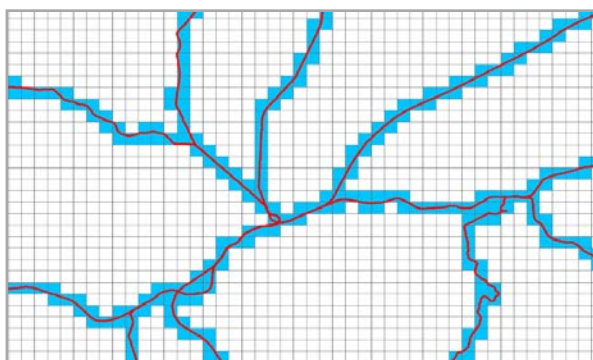


Abbildung 2: Bezugsgitter zum Datendownload. Rot: Streckennetz. Blau: Relevante Kacheln zur Baumerkennung (eigene Darstellung)

(Abbildung 2) Bestandteile der URL-Query zur automatisierten Downloadabfrage hergeleitet. Die Auswahl der Abfrage erfolgt auf Grundlage der vorhandenen Streckennummern des Gleisnetzes. Die graphische Oberfläche und Funktionsweise des Download-Tools wird mit C# umgesetzt.

3.3 Datenaufbereitung

Die heruntergeladenen Ausgangsdaten der Bundesländer NRW und Thüringen besitzen unterschiedliche Datenformate welche zur Weiterverarbeitung harmonisiert werden. Dafür wird das frei zugängliche Programm FUSION vom United States Department of Agriculture in der Version 3.80 verwendet (MCGAUGHEY, 2018). Zusätzlich stellt NRW kein direktes DGM zu Verfügung, weshalb diese für das genannte Bundesland aus den First-Return Signalen der ebenfalls heruntergeladenen LAZ-Daten hergeleitet werden (MCINERNEY & KEMPENEERS 2015). Nachdem der Harmonisierung der Höhendaten, wird im nächsten Schritt das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) hergeleitet (Abbildung 3), das zur Vermeidung von Übersegmentierung mit Hilfe eines Gauß Filters abschließend geglättet wird (MCGAUGHEY, 2018).

Im nächsten Bearbeitungsschritt werden innerhalb des hergeleiteten nDOM Stromleitungen gefiltert. Diese wirken sich erfahrungsgemäß negativ auf die Baumerkennungsgenauigkeit aus und sind spektral schwer differenzierbar (Abbildung 3). Bei Baumzuweisung können diese aufgrund der Höhe und Gleisnähe eine nicht vorhandene Gefährdung suggerieren. CHI et. al (2019) konnten mit dichtebasiertem Clustering (DBSCAN) Erfolge bei der Segmentierung von Stromleitungen erzielen. Daran angelehnt wird eine Methodik zur Filterung von Stromleitungen innerhalb dieses Projektes verwendet. Nach Festlegung des Betrachtungsgebietes durch Open Street Map (OSM) Daten oder Attributen des freizugänglichen Gleisnetzes werden hierbei mit Hilfe des DBSCAN Höhenwerte über 5 m mit einer hohen räumlichen Nähe als Klasse zusammengefasst. Für diese Punkte wird anschließend eine Median-Moving-Window-Glättung vorgenommen. Für übrigbleibende Punkte kann abschließend eine Filterung von Ausreißern vorgenommen werden.

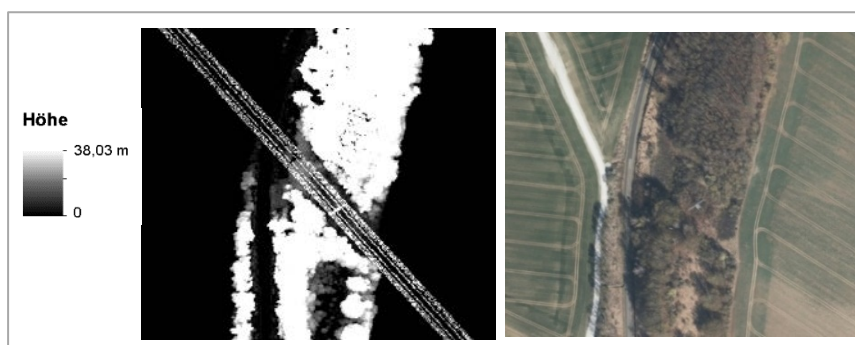


Abbildung 3: Stromleitungen dargestellt im nDOM (links) und DOP (rechts) (eigene Darstellung)

3.4 Baumerkennung

Bei dem hier implementierten Ansatz wird die Baumerkennung mithilfe der LM-Methodik durchgeführt. Dabei bewegt sich ein virtuelles Fenster mit variabler Ausdehnung über das nDOM und gibt alle lokalen Maximum-Werte aus (Abbildung 4). Zur Baumkronenabgrenzung wird daraufhin die WS-Methodik verwendet. Dabei wird das nDOM invertiert und virtuell mit Wasser gefüllt. Sobald sich diese virtuellen Wasserbe-

cken verbinden oder ein Höhengschwellwert erreicht ist, wird die Kronenabgrenzung vorgenommen (Abbildung 4). Das Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes ist eine Shape-Datei mit Baumkronenabgrenzungen. Da diese Methodik anhand von Höhenwerten Abgrenzungen vornimmt, ist von einer Übersegmentierung (bspw. Infrastruktur) auszugehen. Demzufolge werden weitere Anpassungen vorgenommen.

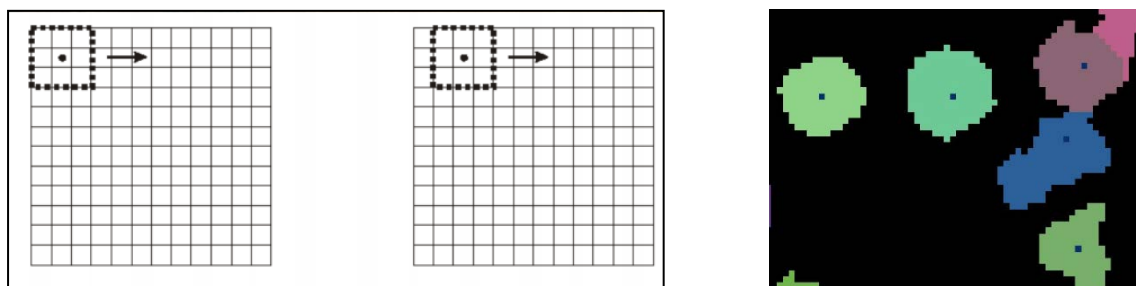


Abbildung 4: Methodik zur Baumerkennung. Links: Lokales-Maximum-Methodik. Rechts: Watershed-Segmentation (eigene Darstellung)

Ein Parameter zur besseren Differenzierung von Baumkronenabgrenzungen ist bspw. die Mindesthöhe der zu betrachtenden Rasterzellen des nDOM (KE & QUACKENBUSH, 2011). So können bereits bei 1 m Bodenartefakte und Ungenauigkeiten der Höhendaten aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Um möglicherweise regionale Anpassungen vorzunehmen ermöglicht das GIS-Tool jedoch auch eine Anpassung dieses Schwellwertes. Mit Hilfe der zuvor heruntergeladenen DOP werden Bäume zusätzlich anhand ihres spektralen Reflexionswertes differenziert. Je nach Befliegungszeitpunkt wird empfohlen, den Schwellwert anzupassen. Bei der Berechnung des gesamten Bundeslandes wird ein Schwellwert von -0.2 verwendet, um bei bspw. Laubbäumen einer Winterbefliegung oder Schattenbereichen von Häusern nicht auch Bäume auszuschließen. Zusätzlich zu diesem spektralen Schwellwert werden Ausschluss- und Betrachtungsgebiete zur besseren Unterscheidung von Vegetation innerhalb des Untersuchungsgebiets verwendet. Betrachtungsgebiet ist dabei das um 50 m gepufferte Gleisnetz, wohingegen Ausschlussgebiete beispielsweise Tunnel, OSM-Häuser oder das um wenige Meter gepufferte Gleisnetz darstellen können. Letzteres dient zum besseren Ausschluss der Oberleitungen von elektrifizierten Gleisen.

3.5 Baumcharakterisierung

Den identifizierten Einzelbäumen können in einem nächsten Arbeitsschritt wichtige Baum- und Standortigenschaften zugewiesen werden um eine potenzielle Gefährdungsanalyse zu ermöglichen. Die jeweiligen Informationen werden aus Rasterdateien des entsprechenden Attributes und geometrischen Berechnungen ermittelt. Wachstumsmodellierung und Gefährdungsanalyse ergeben sich abschließend aus den vorhandenen Attributen. Auf die zugewiesenen Attribute wird im Folgenden kurz eingegangen

Baumhöhe

Die Baumhöhe ergibt sich aus dem nDOM Wert des lokalen Maximums innerhalb einer identifizierten Baumkrone.

Distanz zum Gleisnetz

Mithilfe des DGM, DOM und Gleisnetz als Linien-Shapefile kann die Distanz, also der dreidimensionale Abstand zwischen dem Bodenpunkt des Höhenwertes eines Baumes zu dem nächstgelegenen Punkt des Gleises, ermittelt werden. Der Z-Wert des Baumes wird aus den Daten des DGM und der des Gleises aus dem DOM entnommen. Bei einer Anpassung des Z-Werts um +5,35 m kann die Distanz zu Oberleitungen von elektrifizierten Strecken berechnet werden.

Aufnahmedatum

Als wesentlicher Bestandteil der Wachstumsmodellierung wird das Aufnahmedatum des DOM benötigt um den Datensatz in einen zeitlichen Kontext zu setzen. Für die in diesem Projekt betrachtenden Bundesländer ist das Aufnahmedatum der Oberflächenmodelle zum einen durch die META-Dateien des Dateteildownloads (Thüringen), zum anderen durch den bereitgestellten WMS (NRW) abrufbar.

Wachstumsmodellierung

Für die Wachstumsmodellierung wurde die Chapman-Richards Wachstumsfunktion (RICHARDS 1959) ausgewählt, die unter den dreiparametrischen Funktionen auch in der Literatur am weitesten verbreitet ist (PRETZSCH 2019). Als Datengrundlage dient eine unechte Zeitreihe aus dem Datenspeicher Wald. Um das Modellrisiko für eine Unterschätzung der Baumhöhe zu reduzieren, werden die 98-Perzentile der Wachstumsfunktionen für die Höhenentwicklung verwendet.

Topex

Für die Berechnung des Topex werden innerhalb des DGM für jeden Ort die Steigungswinkel innerhalb der festgelegten Distanz in acht umgebende Himmelsrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) ermittelt. Diese werden abschließend summiert und beschreiben die Windanfälligkeit bezogen auf die Topographie der Umgebung (RUEL et al. 2002, MIKITA & KLIMÁNEK 2010).

Wind

Zur Prüfung der Windanfälligkeit des Standorts werden die öffentlich zugänglichen Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hinzugezogen. Diese geben Auskunft über die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 20 m Höhe bei einer räumlichen Auflösung von 200 m. Die Grundlage stellt dabei das Windfeldmodell basierend auf 218 Bodenstationen in Deutschland dar (DWD 2013).

Boden

Zur Berücksichtigung des Bodens werden in NRW öffentlich zugängliche Geodaten des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen verwendet (IT-NRW, 2020). Diese beinhalten unter anderem Informationen über die Bodenart des Standorts. Nach MEYER (1988) wird die Bodenart in drei Gefährdungskategorien für Baumsturz zusammengefasst.

Baumart

Informationen zur Laub-/Nadelunterscheidung konnten mit Hilfe einer auf Sentinel-2-Daten basierenden überwachten Klassifikation hergeleitet werden. Die Grundlage stellt dabei eine wissensbasierte Selektion der Referenzdaten mithilfe des *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dar. Aus freizugänglichen Daten des High-Resolution-Layer-Forest, den Corine-Land-Cover Daten und dem amtlichen Digitalen Basis-Landschaftsmodell konnten Trainings- sowie Validierungsflächen abgeleitet werden.

Baumvitalität

Für die Einschätzung der Baumvitalität wird eine Methodik basierend auf dem *Disease Water Stress Index* (DSWI) nach GALVÃO et al. 2005 verwendet. Diese stellt Vitalitätsverluste anhand von Änderungen der Blattpigmente und des Blattwassergehalts dar. Dieser Index wird zu phänologisch vergleichbaren Zeitpunkten berechnet und anschließend anhand eines *change vectors* in Veränderungsklassen eingeordnet.

Gefährdungsanalyse

Die Risikoanalyse wird in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Zunächst wird die grundlegende Exposition des Schienennetzes hinsichtlich der Baumhöhen in Bezug zur Distanz zum Gleisnetz in 4 Kategorien eingeteilt (Tabelle 1).

TABELLE 1: ÜBERSICHT VON WACHSTUMSFUNKTIONEN (PRETZSCH 2019)

Gefährdungs- klasse	Beschreibung der Klassengrenzen
1	Abstand > aktuelle/zukünftige Baumhöhe mit 2 m Unsicherheitsbereich
2	Abstand > aktuelle/zukünftige Baumhöhe ohne 2 m Unsicherheitsbereich
3	Abstand < aktuelle/zukünftige Baumhöhe und außerhalb der 6 m-Freihaltungszone
4	Abstand < aktuelle/zukünftige Baumhöhe und innerhalb 6 m Freihaltungszone

In einem zweiten Schritt wird eine Gefährdung aufgrund der erweiterten Exposition eines Standorts mittels geeigneter Faktoren bestimmt. Während die grundlegende Expositionsanalyse dabei nur die Baumhöhe in Relation mit dem Abstand zur Gleisinfrastruktur betrachtet, werden bei der erweiterten Expositionsanalyse die weiteren oben aufgeführten Eigenschaften und Parameter einbezogen. Dabei wird der Ansatz des Ordered Weighted Averaging (OWA) verwendet, wonach das Maß für Ausgleich (trade-off) und Risiko zwischen den Faktoren angepasst werden kann (JIANG & EASTMAN 2000). Die Wertebereiche der eingehenden Faktoren werden durch Fuzzifizierung auf den Wertebereich [0-1] standardisiert, wobei für jeden Faktor eine Fuzzy Membership Funktion gewählt wird. Anschließend gehen die Faktoren mit gleichen Gewichtungen ein. Durch die Festlegung von Ordnungs-Gewichtungen, werden polygonbasiert die Faktorenwerte sortiert und gewichtet kombiniert.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisvisualisierung

Die Einzelbaumerkennung erfolgt wie in den vorigen Kapiteln erläutert grundsätzlich auf Basis der hochauflösenden digitalen Gelände und Oberflächenmodelle. Die Ergebnisse auf Detailstufe des erläuterten Prozesses des GIS-Tools sind in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt. In der Abbildung sind die Gefährdungsklassen der grundlegenden Expositionsanalyse dargestellt. Jeder Einzelbaum wird somit entsprechend seiner individuellen Höhe und Position in Relation zu der Gleisinfrastruktur bewertet. Die Attribute und Klasseneinteilungen der erweiterten Expositionsanalyse liegen zudem in der Attributtabelle jedes detektierten Einzelbaums vor.

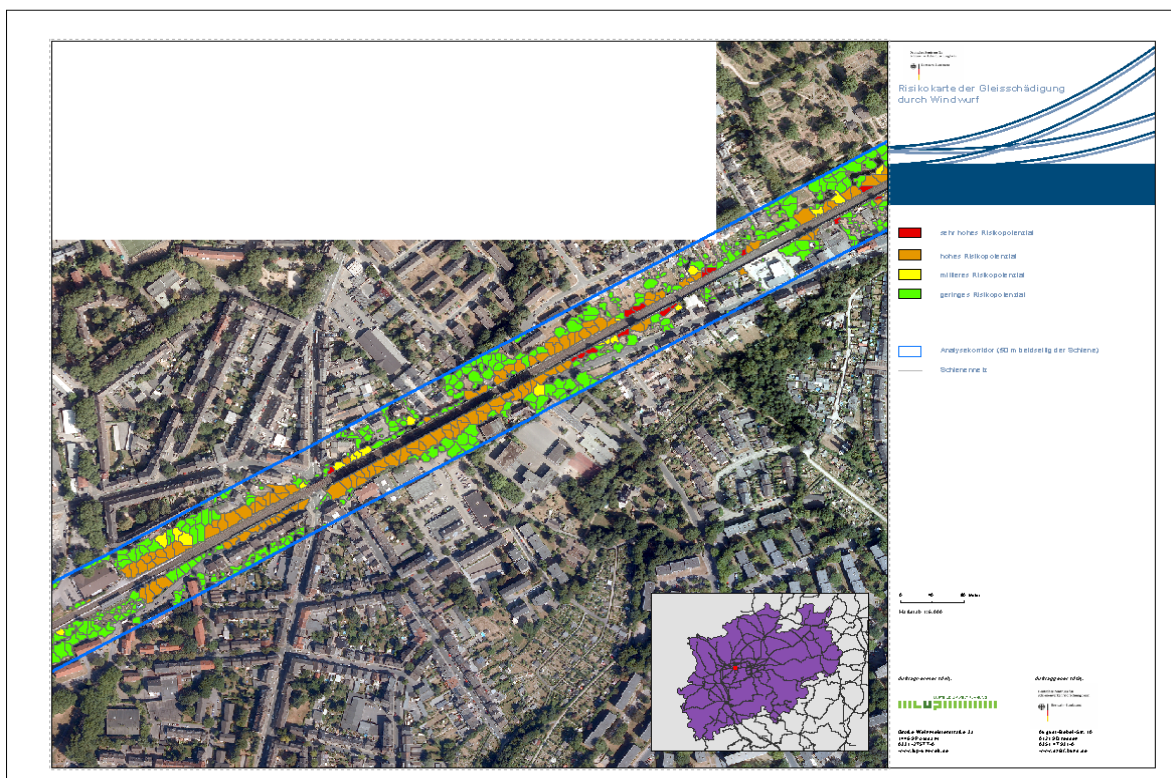


Abbildung 5: Betrachtungsabschnitt von Streckennummer 2160 in NRW (eigene Darstellung)

Um Anwendern und Interessierten auch einen großflächigeren Überblick zu ermöglichen, werden neben den Detailkarten auch bundeslandweite Gefahrenhinweiskarten erstellt. Abbildung 6 zeigt eine Übersichtskarte von Thüringen zur Gefährdungsbeurteilung. Bei dieser Darstellung ist das Streckennetz zur besseren Visualisierung um 750 m gepuffert und in Segmente untergliedert. Innerhalb der Segmente wird der Mittelwert grundlegenden Expositionswerte von Baumerkennungen gebildet. Für eine bessere Aussagekraft werden die daraus resultierenden Mittelwerte standardisiert auf einen Wertebereich zwischen 1 bis 4. Abbildung 6 zeigt dabei die exemplarische Darstellung der Übersichtskarte für Thüringen.

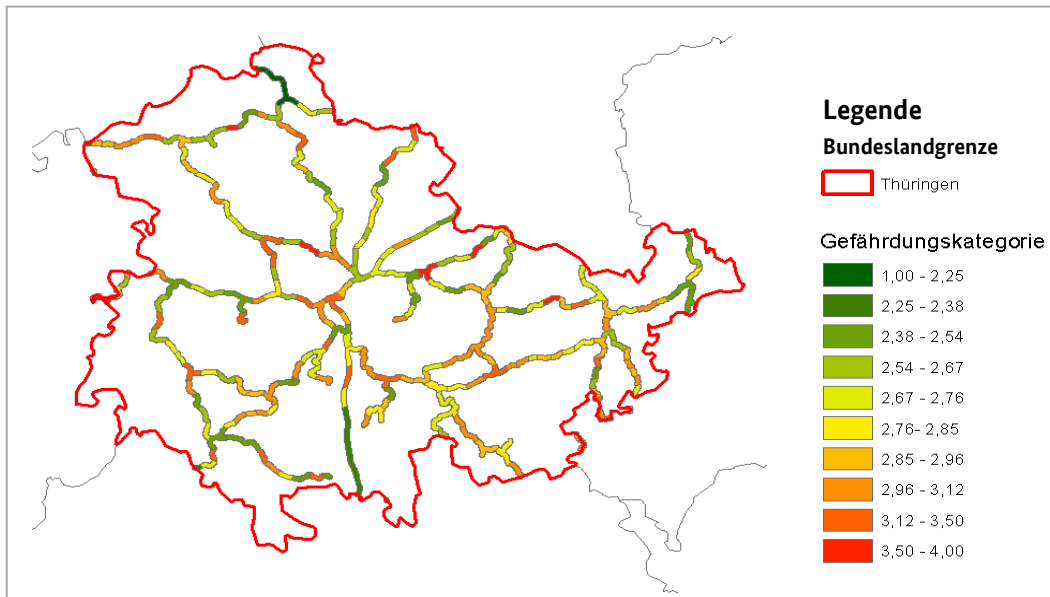


Abbildung 6: Übersichtskarte für die Gefährdung durch Windwurf bei Baumbeständen entlang des Streckennetzes in Thüringen (eigene Darstellung)

4.2 Validierung der Ergebnisse

4.2.1 Filterung von Stromleitungen

Abbildung 7 zeigt, dass überregionale Stromleitungen aufgrund der guten Erfassung im DOM erfolgreich entfernt werden konnten (Abbildung 3, b und c). Probleme entstanden hingegen bei den Oberleitungen von elektrifizierten Bahnstrecken.

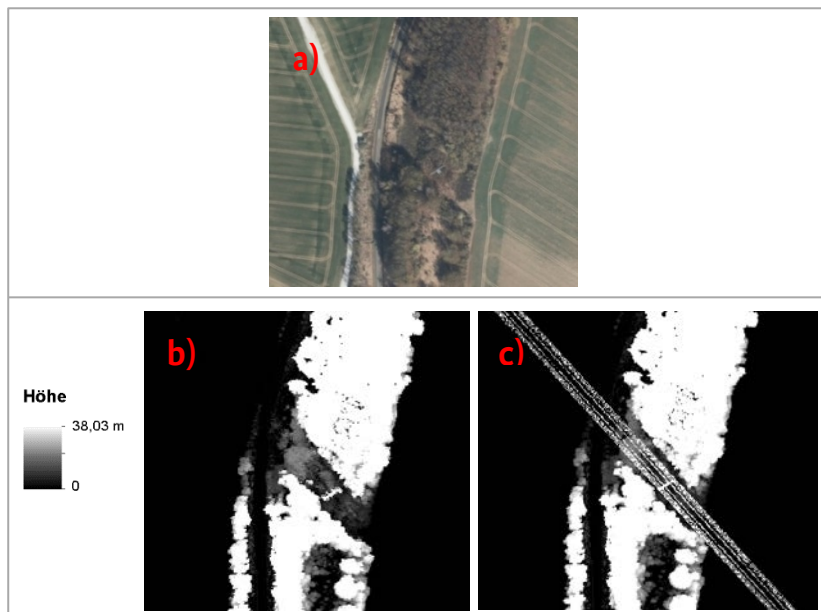


Abbildung 7: Filterung des Bewuchshöhenraster mit Hilfe des DBSCAN a) DOP, b) Ergebnis der Filterung, c) ungefiltertes nDOM (eigene Darstellung)

4.2.2 Baumartenklassifikation

Für die in Kapitel 3.5 beschriebene Baumartenklassifikation wurden die gewonnenen Rasterwerte der Referenzdaten in 70 % Trainings- und 30 % Validierungswerte aufgeteilt. Aus den Validierungsdaten wurde die in Tabelle 2 dargestellte Konfusion Matrix sowie der jeweilige Kappa Koeffizient berechnet.

TABELLE 2: VALIDIERUNG DER BAUMARTENKLASSIFIKATION

	Nordrhein-Westfalen		Thüringen			
Konfusion-Matrix (pix)		Laub	Nadel		Laub	Nadel
	Laub	4200	200	Laub	4345	185
	Nadel	345	3980	Nadel	345	3980
Kappa-Koeffizient	0.88		0.91			

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass bei Nadelbäumen mehr Falschzuweisungen erfolgen als bei Laubbäumen. Dennoch wird ein Großteil der Baumbestände korrekt klassifiziert. Dies wird gestützt durch den resultierenden Kappa Koeffizienten und die steigende Übereinstimmung der Klassifikation bei Annäherung des Kappa-Koeffizienten an 1 (COHEN 1960).

4.2.3 Baumerkennung

Für die Validierung der Baumerkennungen konnten über 1000 Bäume entlang des Streckennetzes durch Luftbildinterpretation von Falschfarnebildern abgegrenzt werden. Dabei konnten bis auf einzelne Ausnahmen alle Bäume erkannt werden (Tabelle 3).

TABELLE 3: VALIDIERUNG DER BAUMERKENNUNG

	Nordrhein-Westfalen	Thüringen
kartierte Bäume	716	494
erkannte Bäume	712	492

Die fehlerhaften Baumerfassungen setzen sich aus den in Abbildung 8 dargestellten Szenarien zusammen. Bei A) ist hinzuzufügen, dass das Aufnahmedatum des DOM der 16.03.2015 ist, wohingegen das DOP der Luftbildkartierung der 04.03.2019 ist. Der nicht erkannte Baum in Abbildung 8 B) kann auf das Ausschlussgebiet des Brückenshapefiles zurückgeführt werden. In Abbildung 8 C) sind fehlende Höhendaten am Grenzbereich zu Sachsen die Ursache für die ausbleibende Baumerfassung.

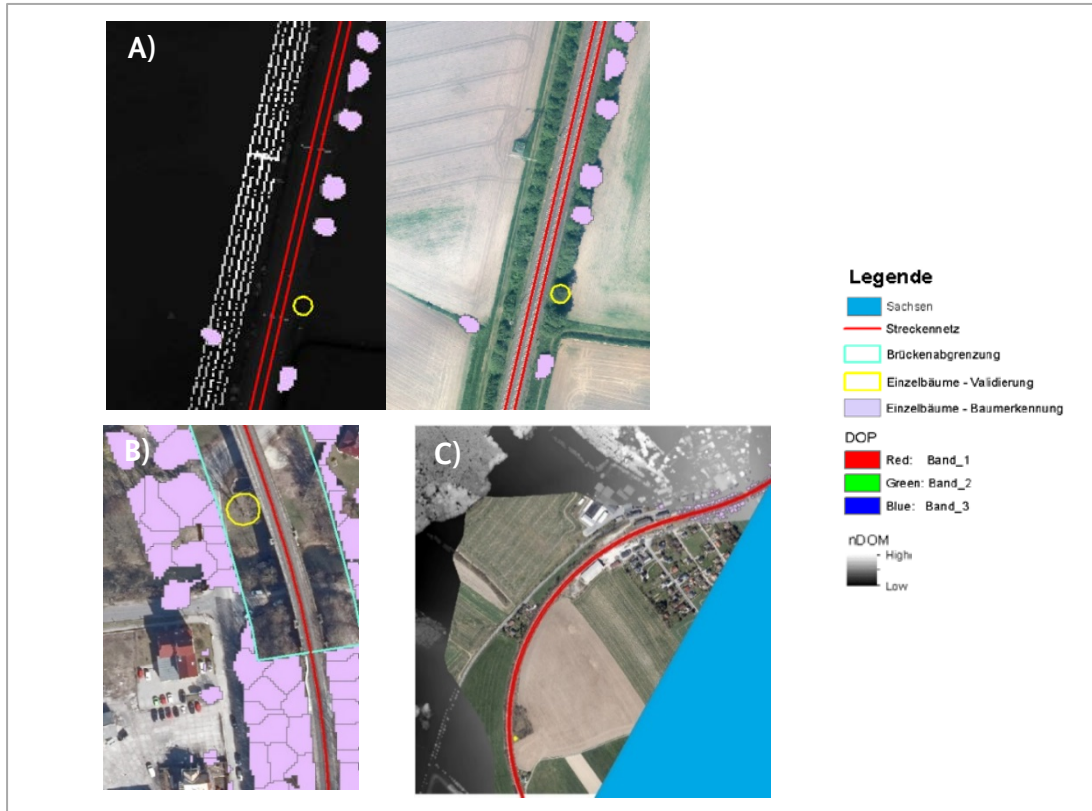


Abbildung 8: Ursachen fehlender Einzelbaumerkennungen (eigene Darstellung)

5 Diskussion

Das Ziel dieses Forschungsprojektes der Entwicklung einer Prozesskette, mit der der Baumbestand entlang des deutschen Schienennetzes abgeleitet werden kann, ist anhand der Bundesländer NRW und Thüringen erfolgreich umgesetzt worden. Die Datenbeschaffung wird dabei mit einem automatisierten Download durch Query-Abfragen realisiert. Inwieweit dieser Ansatz für weitere Bundesländer übernommen werden kann, kann aufgrund der in den einzelnen Bundesländern unterschiedlichen Datenbereitstellung innerhalb des Projektes nicht abschließend geklärt werden. Das Skript könnte jedoch leicht an verschiedene frei zugängliche URL-Downloadabfragen angepasst werden.

Neben der Datenbeschaffung lag der Fokus des Projektes auf einer automatisierten Prozesskette mit Implementierung eines GIS-Tools, um eine Wiederholbarkeit auf weitere Gebiete zu ermöglichen. Die gesamte Abdeckung der angewandten Methodik in Python und deren einfache Gestaltung von grafischen Oberflächen bestätigt dabei deren Funktionalität zur Bearbeitung von Geoinformationen. Die Einzelprozesse des GIS-Tools wurden zur Herleitung von Baumbeständen von NRW und Thüringen verknüpft. Mit einheitlichen Parametern konnte somit der bundeslandweite Baumbestand erfasst werden.

Diese Herangehensweise einer bundesweit einheitlichen Methodik der Baumerkennung führt jedoch auch zu einigen Einschränkungen und Ungenauigkeiten, die in weiteren Untersuchungen näher analysiert und gegebenenfalls durch regionale und räumlich angepasste Ansätze abgeschwächt werden könnten. So wurde zur Gesamtberechnung beider Bundesländer ein NDVI Schwellwert von -0.2 verwendet, um bspw. keine Laubbäume im nicht belaubten Zustand auszuschließen. Außerdem wurden geringe Puffer um Gleisnetz und OSM Häuser gewählt, damit kein Ausschluss nahegelegener Vegetation erfolgt. Dies führt teilweise zur Überbestimmung von Baumerfassungen bzw. Verwechslung mit Infrastruktur. Positiv ist jedoch das nachweislich geringe Vorkommen von fehlenden Baumerfassungen (Tabelle 3). Innerhalb der durchgeführten Validierung konnten diese nur in fehlerhaften Daten der Randgebiete, weit zurückreichenden Befliegungszeiten und zu großen Ausschlussgebiet vereinzelt nachgewiesen werden. Demnach erscheint eine individuelle Betrachtung von Streckenabschnitten mit Hilfe des GIS-Tools sinnvoll. Dabei können Anpassungen der Parameter auf Befliegungszeitraum, Gleislage und weitere Gegebenheiten vorgenommen werden.

Zu beachten ist dabei, dass die Referenzdaten aus meist dichten großflächigen Waldflächen einhergehen. In Gleisnähe kommen hingegen oftmals linienhafte Baumstrukturen vor, was zu Problemen bei 10 m aufgelösten Klassifikations- und Vitalitätsraster führen und sich somit auf die Gefährdungsanalyse auswirken kann.

6 Zusammenfassung

Baumbestände entlang des deutschen Streckennetzes stellen ein hohes Gefährdungspotenzial dar. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurden Bäume mithilfe frei verfügbarer Geodaten erfasst und deren Gefährdungspotenzial eingeschätzt. Dafür wurde eine Prozesskette entwickelt und durch Integration innerhalb eines GIS-Tools die Wiederholbarkeit der Methodik gewährleistet. Die Umsetzung der Methodik durch Python unterstreicht dessen Funktionsweise.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Gefährdungsanalyse stellt ein Ansatz zur Beurteilung des Gleisnetzes hinsichtlich Windwurf dar. Damit konnten Unterscheidungen der Baumbestände hinsichtlich ihrer räumlichen Lage zum Streckennetz und in Bezug auf ihr Gefährdungspotenzial getroffen werden. Mithilfe der generierten Übersichtskarten der Bundesländer NRW und Thüringen wurde zudem ein Werkzeug generiert, um die hohe Anzahl erkannter Bäume innerhalb eines Bundeslandes besser beurteilen zu können und besondere Gefahrenbereiche zu identifizieren. Somit bestätigen die Ergebnisse das Potential frei verfügbarer Geodaten. Die Validierungsergebnisse der identifizieren Einzelbäume und der Baumartklassifizierung belegen dies. Konkrete Validierung der durchgeführten Gefährdungsanalyse, Wachstumsmodellierung und Überbestimmung von Baumerfassungen konnten innerhalb dieses Projektes jedoch nicht hinreichend untersucht werden. Dies stellt Ansätze für aufbauende Forschungsfragen dar. So wird zukünftig eine partielle Betrachtung von Streckenabschnitten zur Herleitung von Baumbeständen und deren Gefährdungspotential empfohlen. Dabei könnten gefährdete Streckenabschnitte nachträglich durch die Anpassung individueller Parameter wie dem Befliegungszeitraum, der Gleislage oder weiterer Gegebenheiten neu berechnet werden.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafische Oberfläche zur Filterung von Oberleitungen.....	10
Abbildung 2: Bezugsgitter zum Datendownload.....	10
Abbildung 3: Stromleitungen dargestellt im nDOM (links) und DOP (rechts)	11
Abbildung 4: Methodik zur Baumerkennung. Links: Lokales-Maximum-Methodik. Rechts: Watershed-Segmentation.....	12
Abbildung 5: Betrachtungsabschnitt von Streckennummer 2160 in NRW.....	15
Abbildung 6: Übersichtskarte für die Gefährdung durch Windwurf bei Baumbeständen entlang des Streckennetzes in Thüringen.....	16
Abbildung 7: Filterung des Bewuchshöhenraster mit Hilfe des DBSCAN a) DOP, b) Ergebnis der Filterung, c) ungefiltertes nDOM	16
Abbildung 8: Ursachen fehlender Einzelbaumerkennungen	18

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Validierung der Baumartenklassifikation	17
Tabelle 2: Validierung der Baumerkennung	17

9 Quellenverzeichnis

Bahn Manager (2018): *DB erweitert Vegetationsmanagement „Aktionsplan Vegetation“*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bahn-manager.de/db-erweitert-vegetationsmanagement-%E2%80%9Eaktionsplan-vegetation%E2%80%9C/> [Zugriff am: 2020-09-02].

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2020): *Dokumentation Geographische Gitter für Deutschland GeoGitter*. [Online] Verfügbar unter: https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/geogitter.pdf [Zugriff am: 2020-07-05].

Chi, P., Lei, Y., Shan, S. S., Wei, Z., & Hao, D. (2019): *Research on Power Line Segmentation and Tree Barrier Analysis*. In: 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE) (pp. 1395-1399). IEEE.

Cohen, J. (1960): *A Coefficient of Agreement for Nominal Scales*. In: Educational and Psychological Measurement, **20**(1), pp. 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104.

Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019): NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. In: Science of the Total Environment, **650**, pp. 2051-2062.

DB Netz AG (2019): Richtlinie 882 „Landschaftspflege und Vegetationskontrolle“ Neuausgabe, Frankfurt.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2013): *Windkarten und Winddaten für Deutschland Bezugszeitraum 1981-2000*. [Online] Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/pdf/Windkarten_Info.pdf;jsessionid=BA36C7C0AF782029895E109F42F59AE3.live21072?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff am: 2020-07-22].

Eastman, J. R. (1999): *Multi-criteria evaluation and GIS*. In: P.A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguir and D.W. Rhind. Geographical Information Systems. New York: Longley, John Wiley and Sons, pp. 493-502.

Galvão, L.S., Formaggio, A.R., Tisot, D.A., (2005): *Discrimination of surface varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data*. In: Remote Sensing of Environment **94**, pp. 523-534.

Höfle, B., Hollaus, M., (2010): *Urban Vegetation Detection using high density full-waveform airborne LiDAR Data – Comination of object-based image and point cloud analysis*. ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, July 5-7, Wien, Österreich.

Hyypä, J., Hyypä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., (2009): *Forest Inventory Using Small-Footprint Airborne LiDAR*. In: Shan, J., Toth, C. K. (Hrsg.), Topographic Laser Ranging and Scanning. CRC Press, Boca Raton, pp. 335-371.

Jiang, H., Eastman, J. R. (2000): *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*. In: International Journal of Geographical Information Science, **14**(2), pp. 173-184.

Ke, Y., Quackenbush, L. J. (2011): *A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing*. In: International Journal of Remote Sensing, **32**(17), pp. 4725-4747. doi: 10.1080/01431161.2010.494184.

Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT-NRW) (2020): *Fachkategorie „Bodenkarten“*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/boden/BK/> [Zugriff am: 2020-04-15].

Larsen, M., Eriksson, M., Descombes, X., Perrin, G., Brandtberg, T., Gougeon, F. A. (2011): *Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions*. In: *International Journal of Remote Sensing*, **32**(20), pp. 5827-5852.

Lawhead, J. (2019): *Learning Geospatial Analysis with Python: Understand GIS fundamentals and perform remote sensing data analysis using Python 3.7*. Packt Publishing Ltd.

Malczewski, J. (1999): *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: J. Wiley & Sons.

Malczewski, J. (2006): *GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature*. In: *International Journal of Geographical Information Science*, **20** (7), pp. 703-726. doi: 10.1080/13658810600661508

McGaughey, R. J. (2014): *FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization*. United States Department of Agriculture - Forest Service, University of Washington, Seattle.

McInerney, D., Kempeneers, P. (2015): *3D Point Cloud Data Processing*. In: *Open Source Geospatial Tools*, pp. 263-282. Cham: Springer

Mayer, H. (1988): *Kartierung von potentiell sturmgefährdeten Waldstandorten in Bayern*. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **107**(1), S. 239-251.

Mikita, T., Klimánek, M. (2010): *Topographic exposure and its practical applications*. In: *Journal of Landscape Ecology*, **3**(1), S. 42-51.

Pretzsch, H. (2019): *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Berlin: Springer-Verlag

Richards, F.J. (1959): *A flexible growth function for empirical use*. In: *J Exp Bot* **10**(2), pp. 290-300.

Ruel, J. C., Mitchell, S. J., & Dornier, M. (2002): *A GIS based approach to map wind exposure for windthrow hazard rating*. In: *Northern Journal of Applied Forestry*, **19**(4), pp. 183-187.

Weihgold, M. (2018): *Die Bahn wird sturmsicherer: „Aktionsplan Vegetation“ entlang der Strecken startet*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1172668/c879ea8327e62a578aed1a5d2d02d8e4/Themendienst-Vegetationsmanagement-data.pdf> [Zugriff am: 2020-09-18].

Yager, R. (1988): *On Ordered Weighted Averaging aggregation operators in multi-criteria decision making*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **8**, pp. 183-190.

Zhen, Z., Quackenbush, L., & Zhang, L. (2016): *Trends in Automatic Individual Tree Crown Detection and Delineation—Evolution of LiDAR Data*. In: *Remote Sensing*, **8**(4), 333. doi: 10.3390/rs8040333.