

Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfern- straßennetzes in NRW

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 157

bast

Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfern- straßennetzes in NRW

von

Mandy Schipek

Michael Steffen

Beak Consultants GmbH

Freiberg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 157

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 01.0201

Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten (LiDAR-Daten) zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes von Nordrhein-Westfalen

Fachbetreuung

Anne-Farina Lohrengel
Lennart Meine

Referat

Anpassungen an den Klimawandel

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-607-8

Bergisch Gladbach, August 2021

Kurzfassung – Abstract

Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten (LiDAR-Daten) zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes von Nordrhein-Westfalen

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Methodik zur Identifizierung und Parametrisierung von Einzelbäumen entlang des Bundesfernstraßennetzes auf Basis frei verfügbarer Datengrundlagen sowie die Bereitstellung und technische Umsetzung der Prozesse in Form geeigneter Werkzeuge für das Geoinformationssystem Esri ArcGIS. Zur Erfüllung dieses Ziels wurde zunächst eine Literaturanalyse durchgeführt und darauf aufbauend die grundlegende Herangehensweise abgeleitet.

Auf Basis der vom Land Nordrhein-Westfalen bereitgestellten hochauflösenden LiDAR-Daten wurde anschließend ein Kronenhöhenmodell abgeleitet und dieses zur Ermittlung der potenziellen Baumkandidaten genutzt. Weiterhin konnte auf Grundlage der digitalen 4-Kanal-Orthofotos der Normalized Difference Vegetation Index berechnet und eine Unterscheidung vegetationsloser sowie -bedeckter Flächen durchgeführt werden, um so die Anzahl von Fehlklassifikationen zu reduzieren.

Zur Ermittlung einer geeigneten Methodik wurden verschiedene Modelle mit unterschiedlich aufbereiteten Ausgangsdaten berechnet, validiert und anschließend iterativ angepasst. Dabei konnte festgestellt werden, dass unter den vorherrschenden heterogenen Vegetationsbedingungen mit dem gewählten Ansatz kein allgemein gültiges Verfahren existiert, welches alle Rahmenbedingungen gleichermaßen abdeckt. Insgesamt besitzt die entwickelte Methodik bezüglich der Einzelbaumerkennung eine Wiedererkennungsrate von ca. 65 – 75 % bei Laub- und ca. 60 – 65 % bei Nadelhölzern. Da Strukturen, wie z. B. dichte Nadelwälder, jedoch erheblich unterschätzt werden, wurde ein weiterer, für diesen Typ besser angepasster Ansatz ausgewählt und die Ergebnisse kombiniert.

Nach Durchführung der Berechnungen erfolgte die Attributierung der Punkte hinsichtlich Lage, Höhe und Entfernung zum Straßenrand, die Ausweisung der für das Bundesfernstraßennetz relevanten Baumkandidaten sowie daran anknüpfend die Zu-

weisung der Summe aller potentiell gefährlichen Bäume an den jeweiligen Straßenabschnitt.

LiDAR-based site identification and inventory of trees along the national trunk road network of North Rhine-Westphalia

The aim of this research project was the development of a method on the basis of free accessible data that identifies and parameterises single trees as well as providing appropriate tools for the implementation of the developed processes and workflows to the geographic information system Esri ArcGIS. For the fulfilment of this research objective, a literature analysis was first carried out. Based on this, a primary procedure was inferred.

The identification of single trees was realized by the derivation of a canopy height model using the high-resolution LiDAR data provided by the federal state of North Rhine-Westphalia. In order to reduce any false classification results corresponding to non-vegetation areas, the Normalized Difference Vegetation Index was calculated and later on used to extract only those potential tree crowns which refer to vegetation-covered sites.

For the determination of a suitable method several models with differently processed raw data were calculated, validated and iteratively adjusted to gain the optimal settings for tree identification. Despite manifold adjustments it was concluded, that a universal approach that considers all of the prevailing vegetational conditions does not exist. Finally, the chosen method obtains a rate of recognition between 65 – 75% for single deciduous and 60 – 65% for single coniferous trees, but especially environments such as coniferous woodlands were distinctively underestimated. Thus, an additional approach was calculated to cover these settings and results from both configurations were combined to accomplish a better overall outcome.

The obtained tree candidates were then subsequently parametrized by location, height and distance attributes. At last, all relevant potential trees related to the road network were retrieved

and this information was joined to the respective road sections to enable a fast and effective way for analyzation and visualization of vulnerable parts of the trunk road network due to tumbling trees.

Summary

LiDAR-based site identification and inventory of trees along the national trunk road network of North Rhine-Westphalia

1 Motivation and aim

Due to climate change, extreme weather situations are more likely to occur in the future. Storm throws induced by strong winds pose a major threat to both transport infrastructure and road users. In the course of a climate impact analysis, an exposure analysis of trees along the national trunk road network will be carried out as a first step under the focus on “storm hazards”, which can be a potential risk for both human beings and transport infrastructure.

The aim of this research project is therefore to identify all single trees along the national trunk road network and to parametrize them with appropriate attributes such as location, height, road section, off-distance to road boundaries etc. The base data will be the digital elevation models available at country level of North Rhine-Westphalia. The methodology shall be developed and prepared in such a way that, once the project has been completed, the client is independently able to continue the work and add new areas and to keep the inventory up to date. The development and execution of the created tools are based on the ArcGIS desktop environment.

2 Literature analysis

In order to prepare the project and as a basis for the methodological development, an analysis of the current state of knowledge was carried out. The focus therefore was on the following subjects:

- extraction of objects from LiDAR data as well as digital orthophotos,
- creation and optimization of a canopy height model,
- usage the Normalized Difference Vegetation Index to distinguish vegetation-free and vegetation-covered areas as well as differentiate deciduous from coniferous species,

- possibilities for validating and evaluating the results.

In the vast majority of the examined publications on tree detection, so-called canopy height models are used and aspects regarding their creation, preparation as well as methods for obtaining the treetops are investigated. For models based on this “classic” method, detection rates of between 60 and 80% are expected for individual trees.

A major challenge based on this approach is, in particular, the minimisation of the errors of commission (pixel is not a tree but was recognized as one) and the errors of omission (unrecognised trees), which depends on the following factors:

- variation of tree crown size or crown circumference,
- irregularities of the treetops in the canopy height model,
- location and density/height of groves,
- dates of data acquisition.

In order to minimize the errors, various possibilities and approaches were discussed and evaluated in literature. Nevertheless, there is no uniform approach. The key message, however, is that there is no general methodology, but the method to be chosen always depends on the specific purpose. For example, some approaches are better suited to detecting dominant trees, while others are more accurate in the detection of small trees, vegetation below the first canopy layer or for groves.

In addition, there are alternative approaches such as object-oriented methods, segmentation of 3D point clouds with additional support from terrestrial measurements or even image-based pattern recognition techniques. Since there is a widespread availability of free satellite data, procedures for the differentiation of deciduous and coniferous trees or even tree species classification meanwhile exists as well. However, an application of these approaches for individual trees is not realistic due to the low resolution, but can currently be applied to larger contiguous areas or groves with large tree crowns, respectively.

3 Data acquisition and preparation

For the examination of the project, the following initial base data were available:

- the national trunk road network, © NEMO/BAST (2019),
- the high-resolution digital terrain and surface models as well as 4-channel orthophotos of the state of North Rhine-Westphalia (© state of North Rhine-Westphalia (2019))
- location of known trees from event cadastres and other different databases.

The data of the digital elevation and terrain models were first converted to raster data sets (0.5 m, 1 m and 2 m cell size, respectively) and then used for the creation of the canopy height model. The digital orthophotos were resampled to 1 m pixel due to their enormously high resolution from 10x10 cm cell size to 1 m pixel size and based on this, the Normalized Difference Vegetation Index was calculated. The comparison of metadata from the recording periods showed that the data for the digital elevation models were acquired from 2012 to 2018 between November to April. On the one hand, this is quite well for the creation of the terrain model, but on the other hand it has to be expected that the digital surface model will show up more irregularities in the treetops, since deciduous trees in these seasons have neither or only a poorly formed foliage. The digital orthophotos are from 2017 to 2019. When comparing with the digital elevation data, it became clear that only a small part of the data was actually acquired in the same period, as there are sometimes up to a few years difference between the datasets.

The data regarding the location of known trees are based on the alley cadastre, regional tree registers of various cities in the state of North Rhine-Westphalia, the Altbaumfinder database, the tree register and partially from the database of Straßen. NRW. Furthermore, vegetation photos and landscape elements from the landscape information collection NRW were available. The information levels provided are very heterogeneous and differ from data without information up to information on tree height, crown diameter, tree species as well as trunk count. A total of approximately 360,000 known individuals are available for validation, at which the majority were attributable to deciduous trees

(approximately 55% deciduous and only 2.5% conifers, rest unknown).

4 Concept

4.1 General approach

According to the results of the literature analysis, a variety of influencing factors exists that affect the quality of the models. These can be of natural, technical and methodological origin. An iterative approach was therefore used to develop the methodology for individual tree detection, in which models with different parameters and data processing methods were created. The basic approach is therefore based on the calculation of the canopy height model in different resolution versions, which was then subjected to noise filtering by applying different filter types and filter sizes (conceptual models). In addition, a version based on the surface parameter "minimum curvature" has been calculated for each of these models, based on the respective canopy height model.

After evaluation by involving the existing tree data bases, the most promising models were selected, further changes were subjected and the models then were analyzed again (fine-tuning). To optimize the results, this process has been repeated several times. Partly, the adjustments are based on fundamental changes, such as the settings in the generation of the surface model, multiple noise filtering procedures and in particular various approaches for the identification of the treetops. Specifically related to the detection methods, the focal-flow-algorithm, the localization of the local maximum and an approach for the automatic classification (iso cluster classification) that is based on the minimum curvature, were used. Furthermore, various object-oriented approaches were tested with the aim of reducing multiple classified tree candidates within a tree canopy, which can occur e.g. due to secondary peaks caused by irregularities in the canopy height model, especially regarding deciduous trees.

4.2 Validation

Due to the fact that the position of the mapped individuals from the tree candidates may be somewhat blurred, the existing point data were buffered with a radius of 3 m. The validation of the

model results for single tree recognition was essentially realized with this data set. Moreover, another validation record was created in which the buffer size was set up in dependency of the attributed value of the crown diameter. This should, theoretically, allow a more realistic coverage of the crown geometry and thus also allows a more accurate assessment of the model results. In total, the validation record for individual trees consists of approximately 225,000 individuals (49% attributed as deciduous trees and 2% as conifers).

In addition to assessing the single tree detection quality, model results were examined with respect to the number of individuals within a specified area. At this point, it is not important to identify single tree, but how many trees the respective model shows within the previously defined area. Particularly, this aspect becomes relevant for groves and forests, where the transitions of the treetops of neighboring individuals are gapless and less apparent or even for individual deciduous trees with large crown diameters – and thus potentially several secondary peaks. The total number of designated tree candidates and their spatial distribution are therefore of interest as well. Since no information for larger tree groups or forest areas is included in the existing tree databases, an area of approximately 250x250 m was digitized by hand and results carried out during the field mapping were used additionally.

5 Results

5.1 Conceptual models

An initial sensitivity analysis of the calculation results showed, that in principle, the models with a higher spatial resolution produce more tree candidates than the models with lower resolution. Similarly, using the minimum curvature surface parameter, those models generate even more points than the versions based on the canopy height model. Furthermore, it could be shown that the filter type has a decisive effect on the number of tree candidates.

In addition, the total number of points has been partially reduced by more than 50% by applying a minimum height, suggesting that many of these points are based on noise and that the models are still reacting too sensitive. Furthermore, the dependence on the canopy height model resolution

could be examined as well, since the highest reduction occurred in those models with the smallest cell size. The application of further smoothing with selected models showed that, depending on the filter type, the points can be reduced by up to 50% by a second smoothing run, but only about 10% with an additional third cycle.

In terms of qualitative assessment, high to very high recognition rates between 80% and 90% were observed for versions based on the canopy height model as well as for the minimum curvature models, with the alternative approach based on the surface parameter providing the higher values. Moreover, a resolution-dependence was shown as well, since the models with a lower resolution basically deliver fewer identification rates than those with higher resolution. Furthermore, it was shown that there is a correlation between these results and those of the sensitivity analysis, because models with higher detection rates also had a higher total number of points. As a result, individual treetops, especially deciduous trees with large crown diameters, are significantly overclassified due to existing secondary peaks, thus overestimating the number of trees present in reality many times. Although this effect could be mitigated by further smoothing of the models, the recognition rate was also reduced by a low double-digit percentage rate.

5.2 Fine-tuning

For the validation of the fine-tuning models, both the records of the tree candidates to determine the detection rate of individual trees as well as the digitized and site data sets for the comparison of the number of individuals in the respective areas were used. In particular, the attempt to adapt the models in such a way that all prevailing conditions are taken into account as equally as possible turned out to be an insurmountable barrier. The analysis of the calculation results showed unmistakable that individual trees and trees in dense associations, e.g. in larger tree groups or forests, cannot be identified by means of a single approach in comparable quality. This especially applies for individual deciduous trees with large crown diameters compared to dense forest areas with conifers and small crown diameters. In this case, the conifers are either systematically significantly underestimated or the number of deciduous trees is significantly overestimated. This is due to the fact that the models regarding the narrow-standing

conifers are probably smoothed too much – or conversely, they react too sensitively concerning secondary peaks in the treetops, which leads to an overestimation of the deciduous trees. The same applies to the assessment of the recognition rate: the higher the recognition rate of individual trees, the more points are generated, especially for deciduous trees.

In order to achieve an acceptable level without generating an unreasonably high amount of tree candidates, several object-based approaches were tested in addition to the model calculation itself in order to reduce the number of points within a single tree crown. Though, the reduction rate is more effective the more points are located within the respective tree crown. Finally, the methodology applied for the single tree detection was able to identify approximately 70% of deciduous and 60% of coniferous trees. At the same time, the number of tree candidates in the validation areas for deciduous trees is between 100% and 115%. With regard to dense coniferous forests, however, the number of tree candidates with this approach is partially reduced to less than 50%.

6 Application

6.1 Execution

The extraction of individual trees based on the selected methodology was carried out using the created ArcGIS tools for the entire study area. The final processing and calculation times for the application are strongly dependent on the extent of the target area and available computing capacities. Due to the enormous amount of data, periods between 20 and 30 days have to be supposed for an entire run.

In order to improve the overall result, a further approach was calculated in addition to the final model of the single tree detection method to be able to estimate the number of conifers in dense forests more realistically. In comparison with the field mapping recordings, the results of this additional approach show detection rates of approximately 100%, which means that this method suits very well for this specific environment. The combination of both approaches was then realized by calculating the point density and setting a lower threshold on this to obtain the areas in which the results of the

additional method have to be applied. The threshold was determined empirically and chosen in such a way that the boundaries of the known coniferous forests are mapped as well as possible. Since the deciduous trees generally have a relatively low density of tree candidates, it is also ensured that, with a few exceptions, particularly areas covered by coniferous trees benefit this methodology.

Finally, the generated tree candidates were filtered by applying a minimum crown height of 2 m and a minimum value of the Normalized Difference Vegetation Index of 0.1 to remove noise-induced points and those on areas without vegetation.

6.2 Parametrization

Using the created ArcGIS tools, the tree candidates were assigned by various parameters such as location, height of the crown model, Normalized Difference Vegetation Index and distance to the nearest road section. Using these attributes, the tree candidates, which are relevant for the road network in terms of storm hazards, can then be identified.

Furthermore, the road network was parameterized with the overall amount of relevant tree candidates as well as with the relevant candidates in distances between 0 – 30 m, 30 – 60 m and more than 60 m to the road boundary. Based on this data, the ArcGIS tool also generates two raster data sets with all, one with all created points, the other based on all relevant candidates, which can be used for further evaluations and especially for visualization.

6.3 Results

When comparing the number of tree candidates of both applied approaches, the forest-model obtained almost 4 times the number of tree candidates than the single-tree-model. The combination of both approaches increased the total number of tree candidates by about 250,000 individuals in the densely covered areas. After applying the thresholds for the canopy height model minimum of 2 m and an NDVI of at least 0.1, about 65% of the points in the single-tree-model and about 52% of the points in the forest-model remain. For the combined data set of both models, which consists of approximately 96% of single-tree-model points and approximately 4% forest-model tree candidates, about 66% remain in the data set after filtering. Finally, about 16% of

the tree candidates are classified as relevant by an overall of 6,098,887 tree candidates identified in the entire study area and were used for attribution of the national trunk road network.

7 Conclusions and recommendations

Based on the studied publications, there is a wealth of approaches and possibilities for the extraction and identification of individual trees. With regard to the requirement using cost-neutral and particularly available data as well as the high computational effort for the area of an entire federal state, the classical approach of using a canopy height model was chosen. However, especially due to the unfortunate dates of data acquisition regarding the digital surface model, it can be expected that none of the model calculations performed have achieved their optimum.

The methodological development has clearly shown that the performance of the tested models is subjected to very significant fluctuations, especially due to the vegetation characteristics and structures. Due to the fact that tree detection models are very sensitive, even to only minor changes and adjustments in the initial base data, it can be assumed that the application of this method in other federal states with probably a different base data quality may cause some deviations in the detection results.

The detection rate achieved with the single tree detection model is about 70% for deciduous and about 65% for coniferous trees. Alternative models with higher recognition rates regarding the position of individual trees exist, but are much more sensitive and thus overclassify especially large tree crowns of deciduous trees multiple times. To match this up, a second application was carried out and the results of both model calculations were subsequently combined.

Overall, it has to be concluded that the developed methodology works reliable on most individual trees. However, for a further improvement a combination incorporating free and cost-neutral satellite data as well as other different approaches such as pattern recognition based on machine learning algorithms should be considered.

Inhalt

Abkürzungen	13	5.2.2	Binning vs. Triangulation	33
1 Einleitung	14	5.2.3	Ausreißerbehandlung	34
2 Kenntnisstandanalyse	14	5.2.4	Auflösung	34
2.1 Allgemeines	14	5.3	Rauschfilterung	35
2.1.1 Methodik und Einflussfaktoren auf die Ergebnisse	14	5.4	Krümmungsparameter	38
2.1.2 Einschätzung in Bezug auf das vorliegende Projekt	17	5.5	Erkennung der Baumkronen	38
3 Datenrecherche und Datenbeschaffung	17	5.6	Objektbildung und Reduzierung von Mehrfachklassifikationen	40
3.1 Allgemeines	17	5.7	Extraktion vegetationsloser Oberflächen ..	41
3.2 Digitale Höhenmodelle und Luftbilder	17	5.8	Modellübersicht	43
3.2.1 Digitales Höhenmodell	17	5.8.1	Konzeptionelle Modelle	43
3.2.2 Digitales Oberflächenmodell	18	5.8.2	Modelle zur Feinabstimmung	45
3.2.3 Digitale Orthofotos	20	6 Ergebnisse und Validierung	46	
3.2.4 Vergleich der Aufnahmezeiträume	20	6.1	Allgemeine Hinweise	46
3.3 Vegetationsaufnahmen und -kataster	22	6.2	Testgebiete und Validierungsdatensätze ..	48
3.3.1 Alleenkataster	22	6.2.1	Datensätze zur Validierung von Einzelbäumen	48
3.3.2 Baumkataster	22	6.2.2	Datensätze zur Validierung von Baumgruppen und Wäldern	48
3.3.3 Vegetationsaufnahmen, Vegetationstypen und Landschaftselemente	24	6.2.3	Feldkartierung	50
3.4 Windwurfflächen und dokumentierte Sturmereignisse	25	6.3	Konzeptionelle Modelle: Sensitivität	52
3.5 Bundesfernstraßennetz	25	6.3.1	Erste Glättungsstufe, Testdatensatz A	52
3.6 Sonstiges	27	6.3.2	Erste Glättungsstufe, Testdatensatz B	53
4 Datenaufbereitung	27	6.3.3	Zweite und dritte Glättungsstufe, Testdatensatz B	54
4.1 Digitales Höhenmodell	27	6.4	Konzeptionelle Modelle: Identifikation von Einzelbäumen	55
4.2 Digitales Oberflächenmodell	28	6.4.1	Erste Glättungsstufe: Wiedererkennungsrate bekannter Individuen	55
4.3 Digitale Orthofotos	29	6.4.2	Erste Glättungsstufe: Mehrfachbelegung (prozentuale Anteile)	56
4.4 Bundesfernstraßennetz	31	6.4.3	Erste Glättungsstufe: Mehrfachbelegung (Klassen)	57
5 Entwicklung der Methodik	31	6.4.4	Erste Glättungsstufe: Einfache Belegung ..	59
5.1 Allgemeine Herangehensweise	31	6.4.5	Glättungsstufen 2 und 3	59
5.2 Erstellung des Kronenhöhenmodells	32	6.5	Modelle zur Feinabstimmung und Methodikauswahl	61
5.2.1 Punkt-Mittelwert vs. Punkt-Maximum	32			

6.5.1	Vorgehen.....	61
6.5.2	Objektorientierter Ansatz.....	61
6.5.3	Vergleich der Kronenhöhenmodelle (KHM _{BI} vs. KHM _{TRI}).....	63
6.5.4	Vergleich der Mindesthöhendifferenz für Ausreißer	65
6.5.5	Modellauswahl	66
6.5.6	Einschätzung der Modellergebnisse	67
6.6	Integration der Kartierungsergebnisse	68
6.7	Genauigkeit der Baumkronenhöhen	69
6.8	Unterscheidung von Baumtypen mittels NDVI	69
6.9	Unterscheidung von Baumarten mittels NDVI	71
7	Umsetzung als GIS-Tool für Esri ArcGIS Desktop 10.5.1	71
8	Durchführung und landesweite Anwendung	71
8.1	Anwendung	71
8.2	Attributierung.....	72
8.2.1	Attributierung der Baumkandidaten	72
8.2.2	Attributierung des Straßennetzes	73
8.3	Ergebnisse	74
9	Diskussion und Ausblick.....	75
	Literatur.....	77
	Bilder	80
	Tabellen.....	83

Abkürzungen

3M	Puffer von 3 m Radius um bekannte Bäume aus Baumkatastern	SEG	Segmentierung
AVG	Mittelwert	TA	Terrain Attribut „Minimale Krümmung“
CIR	Nahinfrarot-Kanal	TIN	Trianguliertes irreguläres Netz
DGM	Digitales Geländemodell		
DOM	Digitales Oberflächenmodell		
DOP	Digitale Orthofotos		
EC	Error of Commission (positive Fehlklassifikationen)		
BGW	Baumgruppe/Wald		
EO	Error of Omission (negative Fehlklassifikationen)		
EB	Einzelbaum		
FF	Focal Flow Algorithmus		
FS	Fishnet/Kachelung		
IC	Iso Cluster Unsupervised Classification		
KHM	Canopy Height Model/Kronenhöhenmodell		
KR	Kronenradius		
KR10M	Puffer vom bekannten Bäumen mit Kronenradius (maximal 10 m)		
LANUV	Landesamte für Naturschutz, Umwelt und Verbraucherschutz NRW		
LGPL	Lesser General Public License		
LINFOS	Landschaftsinformationssammlung NRW		
LM3/LM5	Local Maxima 3x3, 5x5		
LNU	Landesgemeinschaft Naturschutz und Umwelt NRW		
MAX	Maximum		
MDB GK01	Händisch digitalisierte Bäume, Laub- und Nadelholz		
MDB GK02	Händisch digitalisierte Bäume, Nadelholz		
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index		
NRW	Nordrhein-Westfalen		
RGB	Rot-Grün-Blau		

1 Einleitung

Bedingt durch den Klimawandel ist in Zukunft häufiger mit Extremwittersituationen zu rechnen. Insbesondere durch Starkwindereignisse induzierte Sturmwürfe stellen dabei sowohl für Verkehrsinfrastrukturelemente als auch für Verkehrsteilnehmer eine große Gefahr dar. Im Zuge einer Klimawirkungsanalyse soll in einem ersten Schritt unter dem Schwerpunkt Sturmgefahren eine Expositionsanalyse von Bäumen entlang des Bundesfernstraßennetzes durchgeführt werden, welche bei Sturmergebnissen ein potenzielles Risiko für den Menschen als auch für die Verkehrsinfrastruktur darstellen können. Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist es deshalb, alle Bäume entlang des Bundesfernstraßennetzes Nordrhein-Westfalens zu erfassen und mit entsprechenden Parametern (Lage, Höhe, Straßenabschnitt, Entfernung zur Straße etc.) zu attributieren.

Als Datengrundlage sollen die auf Länderebene verfügbaren digitalen Geländemodelle verwendet werden. Die Methodik ist dabei so zu entwickeln und aufzubereiten, dass der Auftraggeber nach Abschluss des Projektes selbstständig in der Lage ist, die Arbeiten fortzuführen und neue Gebiete hinzuzufügen sowie bereits vorhandene Bereiche zu aktualisieren. Die hierfür bereitzustellenden Werkzeuge sollen in einer ArcGIS-Desktop-Umgebung lauffähig sein.

2 Kenntnisstandanalyse

2.1 Allgemeines

Zur Vorbereitung des Projektes und als Basis der Methodikentwicklung wurde eine Analyse zum aktuellen Kenntnisstand (Literaturrecherche) durchgeführt. Der Fokus wurde dabei besonders auf die Punkte

- Extraktion von Objekten aus LiDAR-Daten sowie digitalen Orthofotos,
- Erstellung und Optimierung eines Kronenhöhenmodells,
- Verwendung des Normalized Difference Vegetation Index zur Unterscheidung vegetationsloser und vegetationsbedeckter Flächen sowie der Differenzierung von Baumtypen als auch auf
- Möglichkeiten zur Validierung und Beurteilung der Ergebnisse

gelegt. Die hierbei erhaltenen Kenntnisse fließen direkt in die Entwicklung der Methodik ein. Das Hauptkriterium zur Auswahl der vorgestellten Studien ist im Wesentlichen die Ähnlichkeit bzw. Vergleichbarkeit der Datengrundlagen in den Publikationen zum vorliegenden Projekt.

2.1.1 Methodik und Einflussfaktoren auf die Ergebnisse

Für die Extraktion forstwirtschaftlicher Informationen, besonders des Baumbestandes und der Baumhöhe, werden vornehmlich Baumkronenhöhenmodelle (sog. Canopy Height Models (KHM), bzw. normalisierte Oberflächenmodelle (nDOM)) verwendet [BORTOLOTT & WHYNNNE, 2005; FORZIERI et al., 2009]. Diese stellen die absolute Kronenhöhe über der (vegetationslosen) Geländeoberfläche dar. Die Generierung der Kronenhöhenmodelle erfolgt nach dem grundlegenden Prinzip der Differenzbildung von digitalem Oberflächenmodell (DOM) und digitalem Höhenmodell (DGM), wobei für die Bildung des DOM stets der erste Impuls genutzt wird [HYYPPÄ et al., 2008; VAN LEEUWEN et al., 2010]. Die Ermittlung von Baumlage und Baumhöhe wird i. d. R. durch die Suche eines lokalen Maximums in einer vorgegebenen Nachbarschaft realisiert [VEGA & DURRIEU, 2011]. Hierbei werden die LiDAR-Daten entweder im Vorfeld in einen Rasterdatensatz konvertiert [HEURICH et al., 2004; HYYPPÄ et al., 2008; KAARTINEN et al., 2012; KRAUSE et al., 2019] oder direkt zur Erstellung des KHM genutzt [LI et al., 2012; KHOSRAVIPOUR et al., 2014].

Bereits in HEURICH et al. [2004] wird die allgemeine Vorgehensweise der Baumdetektion mittels LiDAR-Daten im deutschen Raum am Beispiel des Bayerischen Waldes beschrieben, wobei zur Generierung der Oberflächenmodelle jeweils eine Befliegung im Winter (DGM) und eine im Sommer (DOM) stattgefunden hat. Die verwendete Auflösung in dieser Studie liegt mit einer Punktdichte von 5 bis 10 Punkten pro m² bei 0,5 m. Insgesamt konnten bei der Einzelbaumdetektion ca. 70 % des Mischwaldes, 73 % des Nadelholzes und 77 % des Totholzes in der Oberschicht identifiziert werden. Die Validierung erfolgte hierbei anhand im Vorfeld kartierter und vermessener Bäume im Bearbeitungsgebiet. Die Erkennungsrate von Bäumen in der Zwischen- und Unterschicht wird als Durchschnittswert der drei genannten Kategorien mit rund 21 % bzw. 8 % angegeben. Bei dem Vergleich der Laser- und terrestrischen Höhenmessungen konnten eine mittlere

Abweichung der Lasermessungen von -0,5 m gegenüber den terrestrischen Messungen festgestellt werden. Insgesamt schwankt die größenabhängige Abweichung der Höhenmessungen zwischen -0,3 m für Bäume mit geringer Größe bis ca. -1,8 m für höhere Individuen. Die mittels LiDAR-Daten ermittelten Baumhöhen werden demzufolge etwas unterschätzt.

Weitere Studien in Nord- und Zentraleuropa erreichen mit den jeweilig angewandten Verfahren ebenfalls Erkennungsraten von teils mehr als 70 % [HYYPÄ et al., 2001; PERSSON et al., 2002; SOLBERG et al., 2006]. Jedoch existieren auch Studien auf deutschem Raum, in denen nur zwischen 50 - 60 % der Bäume korrekt erkannt wurden [KOCH et al., 2006; HEINZEL et al., 2011]. Hierbei fällt die Rate einer erfolgreichen Klassifikation bei Laubbäumen gegenüber Nadelbäumen aufgrund der komplexeren Kronenstrukturen etwas geringer aus [BRANDTBERG et al., 2003; KOCH et al., 2006].

Die Herausforderung bei der Erkennung der Baumkronen mithilfe des Kronenhöhenmodells stellt vor allem die Minimierung der Errors of Commission (EC, falsch erkannte Bäume) und Errors of Omission (EO, nicht erkannte Bäume) dar [POULIOT et al., 2005; HOSOI et al., 2012], welche prinzipiell auf die folgenden Eigenschaften zurückzuführen sind:

- Variation der Kronengröße bzw. des Kronenumfangs [Pitkänen et al., 2004]
- Irregularitäten der Baumkronen im KHM [Solberg et al., 2006]
- Lage und Dichte/Stand der Bäume im Verbund, v. a. relevant für First/Last-Impulse-Messungen [Reitberger, 2010; Vauhkonen et al., 2012]
- Überfliegungsdaten, ggf. relevant zwecks Belaubungszustands der Bäume.

Um die Fehler bei der Baumerkennung so gering wie möglich zu halten, wurden verschiedene Möglichkeiten und Ansätze in der Literatur diskutiert und evaluiert. So postulierten bereits WULDER et al. [2000] einen variablen Filter zur Ermittlung der lokalen Maxima, welcher jedoch bei falsch gewählter Größe auch zur Erhöhung des EC bzw. EO führen kann. Um den EC und EO hinsichtlich der Unregelmäßigkeiten (sog. Pits) zu minimieren, wird in verschiedenen Studien ein Pre-Processing des Kronenhöhenmodells vorgenommen [BORTOLOTTI & WYNNE, 2005; SOLBERG et al., 2006; KAARTINEN & HYYPPÄ, 2008; ZIMBLE et al., 2013; HUN-

TER et al., 2013; KHOSRAVIPOUR et al., 2014 und weitere]. Bezüglich der Behandlung von Pits in den LiDAR-Daten oder dem daraus resultierenden digitalen Oberflächenmodell existiert jedoch keine vereinheitlichte Vorgehensweise [KHOSRAVIPOUR et al., 2014]. So wird in einer Vielzahl von Studien für die Verringerung der Pits eine Glättung des KHM vorgeschlagen, welche mit unterschiedlichen Filtern (z. B. Mittelwert, Median, Gauß-Filter) realisiert werden kann [PERSSON et al., 2002; BRANDTBERG et al., 2003; YU et al., 2011; HOSOI et al., 2013; IIZUKA et al., 2017; MOHAN et al., 2017 und weitere].

Hauptsächlich werden Glättungsfilter vor allem zur Reduzierung von zufällig verteiltem und Impuls-Rauschen angewandt [CHAN et al., 2005]. Da diese Art von Filterung jedoch alle Pixel im Grid auf Basis ihrer nächsten Nachbarn beeinflusst, ist sie nur bedingt für Kronenhöhenmodelle aus hochauflösenden LiDAR-Datensätzen geeignet [ZHAO et al., 2013]. Darüber hinaus führen Glättungsfilter generell zu einer Unterschätzung der Kronenhöhe und des Kronenumfangs [HYYPÄ et al., 2000], weshalb es grundsätzlich gilt, zu starke Filter zu vermeiden. Relevant wird dieser Effekt vor allem bei der Ermittlung forstwirtschaftlicher Kennwerte wie z. B. Biomasse und Kohlenstoffanteil [KHOSRAVIPOUR et al., 2014].

Ein weiterer, vereinfachter Ansatz ist, anstatt aller Punkte aus der LiDAR-Punktwolke jeweils nur den höchsten ersten Impuls innerhalb einer Rasterzelle zu nutzen [LECKIE et al., 2003; POPESCU & WYNNE, 2004; TIEDE et al., 2005] oder eine höhere Zellgröße zu wählen, um die Höhenvariation innerhalb der Baumkronen zu minimieren [CHEN et al., 2006]. Die Wahl von größeren Pixeln (z. B. > 0,5 m Kantenlänge) kann jedoch zu ungenaueren Ergebnissen bezüglich Erkennungsraten und Kronenform führen [KHOSRAVIPOUR et al., 2014].

Bei Betrachtung der Ergebnisse der unterschiedlichen Studien kann jedoch häufig nicht abgeleitet werden, ob deren Qualität durch die Methodik selbst oder schlicht durch die vorhandenen Vegetationsbedingungen begründet ist. Diesen Punkt greifen KAARTINEN & HYYPPÄ [2008] sowie KAARTINEN et al. [2012] auf und vergleichen die Leistung mehrerer verschiedener Ansätze mithilfe unterschiedlicher Partner anhand von zwei Datensätzen aus Nordeuropa, wobei in den jeweiligen Gebieten differenzierte Bedingungen bezüglich Homogenität, Baumtypen und Baumarten, Wachstumsständen

und Abweichungen des Terrains vorherrschen. Die angewandten Methoden reichen dabei von der Verwendung der Software Trimble eCognition® für die direkte Segmentierung des KHM über die bereits bekannte Methodik zur Findung der lokalen Maxima bis hin zur Segmentierung von Luftbildern für die Ermittlung der Baumkronenlage, wobei die Verwendung von Luftbildern i. d. R. nur zur Abgrenzung von Flächen mit Vegetation von vegetationslosen Bereichen dient. Zum Erhalt der Kroneneigenschaften, wie z. B. Kronenumfang oder Kronendurchmesser kam beispielsweise der Watershed-Algorithmus zum Einsatz.

Unterschiede zwischen den Methoden auf Grundlage der Laser-Scanning-Daten mit einer Dichte zwischen 2 bis 8 Punkten pro m² existieren vor allem bei der Erstellung und Aufbereitung des KHM hinsichtlich der Glättungsverfahren, Filterarten- und Filtergrößen. Nach KAARTINEN et al. [2012] spielt die Anzahl der Punkte pro m² jedoch in dieser Größenordnung rein für die Extraktion von Lage und Höhe der Bäume eher eine untergeordnete Rolle. Die verwendeten Zellgrößen der aus den Punkten generierten Raster liegen bei den getesteten Methoden zwischen 0,25 m und 1 m, zudem wird häufig eine minimale Vegetationshöhe zwischen 0,5 m und 2 m festgelegt. Bezüglich der Ermittlung der lokalen Maxima wurden sowohl Fenstergrößen mit statischer Zellanzahl (z. B. 3x3 oder 5x5 Zellen) sowie Verfahren, bei denen die Größe z. B. auf Basis der potenziellen Baumhöhe angepasst wurde, getestet. Weitere Ansätze bezüglich der Verwendung verschiedener Fenstergrößen für die Baumstammextraktion wurden z. B. in PERSSON et al. [2002], POPESCU et al. [2002] oder PITKÄNEN et al. [2004] aufgegriffen. Darüber hinaus wurden in KAARTINEN et al. [2012] gegenüber KAARTINEN & HYYPPÄ [2008] zusätzlich weitere Ansätze mit speziell modifiziertem Kernel, dem Laplace of Gaussian-Operator, dynamischer Ermittlung der Filtergröße auf Basis der potenziellen Kronenhöhe sowie der Berechnung und Verwendung der minimalen Krümmung des Kronenhöhenmodells zur Ermittlung der lokalen Maxima in den Methodenvergleich integriert.

Die Kernaussage der Autoren ist dabei, dass keine pauschal beste Methodik existiert, sondern das auszuwählende Verfahren stets vom Zweck abhängt. So eignen sich einige Ansätze besser für die Detektion von dominanten, herausragenden Bäumen, andere sind wiederum exakter bei der Erkennung von kleinen Bäumen oder Vegetation unter-

halb der obersten Baumschicht. Verglichen mit der händischen Auswertung können im Allgemeinen bereits mit relativ simplen automatischen/halbautomatischen Verfahren bessere oder gleichwertige Ergebnisse erzielt werden [KAARTINEN et al., 2012].

Darüber hinaus existieren verschiedene Studien mit grundsätzlich ähnlichen Herangehensweisen (Bildung und Optimierung des Kronenhöhenmodells, Validierung, Segmentierung) wie z. B. REITBERGER et al. [2010], LEITERER et al. [2012], LIU et al. [2013], BAUMANN [2015], SRINIVASAN et al. [2015], BURT et al. [2019] oder TIAN et al. [2019] und viele weitere, die jedoch mit teils erheblich höheren Punktdichten arbeiten (mehr als 10 Punkte pro m² bis hin zu 100 Punkten pro m²) oder Full-Waveform-Systeme nutzen und aufgrund dessen auch andere Ansätze, wie z. B. die direkte Bearbeitung von hochauflösenden 3D-Punktwolken oder daraus abgeleiteten Voxelmodellen [BAUMANN, 2015] behandeln können.

Seit der flächendeckenden Verfügbarkeit von hochauflösenden Satellitendaten existieren zudem Möglichkeiten zur Differenzierung von Laub- und Nadelbäumen sowie zur Klassifizierung von Baumarten. Bereits in IMMITZER [2012] sowie IMMITZER et al. [2015] wird auf Grundlage von (kommerziellen) multispektralen World View-2-Satellitendaten mit Pixelgrößen zwischen 0,5 m (panchromatisch) und 2 m versucht, bis zu 10 Baumarten auf dem Niveau für Einzelbäume als auch für Baumkollektive in Bayern mittels Random-Forest-Klassifikationsmodellen zu unterscheiden. Zusätzlich wird die Vitalität von Fichten in Bezug auf Borkenkäferbefall untersucht. Die Erfolgsquoten der Random-Forest-Klassifikationen liegen dabei im Vergleich mit den Felddaten i. d. R. bei deutlich über 70 % und steigen mit Hinzunahme weiterer Kanäle auf teils über 90 % an, wobei die Modelle der Baumkollektive bessere Ergebnisse hervorbringen als die Differenzierung der Baumarten bei Einzelbäumen.

Eine der neuesten deutschsprachigen Studien zu diesem Thema von ZEUG et al. [2019] beschäftigt sich mit der Unterscheidung von Baumarten auf Grundlage der frei verfügbaren multispektralen Sentinel-2-Daten mit einer Auflösung von max. 10 m in 5 über Deutschland verteilten Testgebieten. Hierbei wurde ein multi-temporaler Ansatz verfolgt, bei dem für das gleiche Gebiet mehrere, zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Szenen genutzt wurden. Zusätzlich berechneten die Auto-

ren der Studie auf Grundlage der Sentinel-2-Kanäle verschiedene Vegetationsindizes und integrierten diese als weitere Variable in die Random-Forest-Klassifikationsmodelle. Abhängig vom Testgebiet wurde versucht, zwischen 8 und 16 Baumarten zu klassifizieren. Die hierbei erzielten Ergebnisse liegen im Schnitt zwischen 80 % und 90 % und sinken nur für wenige Baumarten auf unter 70 % ab. Weiterhin wird aufgrund des hohen Datenvolumens sowie des Berechnungsumfangs eine Cloud-basierte Bearbeitung angeregt.

2.1.2 Einschätzung in Bezug auf das vorliegende Projekt

Die Resultate der Studien auf Basis der klassischen Herangehensweise mit Generierung und Aufbereitung eines Kronenhöhenmodells aus Punktwolken mit max. 10 Punkten pro m² weisen i. d. R. eine relativ große Ähnlichkeit mit den für das vorliegende Projekt zur Verfügung stehenden Daten auf. Aus diesem Grund sind mit Erkennungsraten zwischen 60 – 80 % prinzipiell vergleichbare Ergebnisse zu erwarten. Eine mögliche Spannweite ist damit zu erklären, dass aufgrund der verschiedenen Vegetationsstrukturen, Baumtypen, Baumarten, Baumhöhen und Kronendurchmessern sowie dem allgemeinen Aufbau der Vegetation mit entsprechenden Schwankungen zu rechnen ist, da die genannten Parameter maßgeblich mitverantwortlich für die Qualität der Modellergebnisse sind [VAUHKONEN et al., 2012].

Im Gegensatz hierzu scheinen die aufgezählten alternativen Ansätze mit höherer Punktdichte für die vorhandene Datengrundlage weder praktikabel zu sein, noch ist davon auszugehen, dass die benötigten Daten unbeachtet der Anschaffungskosten in absehbarer Zeit landes- oder bundesweit flächendeckend zur Verfügung stehen werden. Weiterhin würde dies ggf. einen erheblichen Mehraufwand hinsichtlich Speicherung und Verarbeitungsgeschwindigkeiten und -zeiten bedeuten.

Eine Unterscheidung bestimmter Baumarten oder Baumtypen erscheint entsprechend den vorhandenen Studien mithilfe von Machine-Learning-Algorithmen, wie z. B. der Random-Forest-Klassifikation, grundsätzlich möglich. Eine Anwendung für Einzelbäume ist jedoch aufgrund der Auflösung von max. 10 m Pixelgröße mit den frei verfügbaren Sentinel-2-Daten nicht realistisch, sondern kann derzeit nur über größere zusammenhängende Flächen bzw. Baumgruppen einer Baumart/eines Baumtyps

Anwendung finden. Die landesweite Klassifikation mittels Machine Learning auf Basis der 4-Kanal-Orthofotos (RGBI) ist angesichts der Datengrundlage in den aufgeführten Beispielen jedoch als nicht zielführend einzustufen.

3 Datenrecherche und Datenbeschaffung

3.1 Allgemeines

Die Recherche und Beschaffung der für die Projektdurchführung notwendigen Daten erfolgte hinsichtlich der Themen:

- Digitale Rasterdaten (DGM, DOM, DOP)
- Alleen- und Baumkataster sowie Vegetationsaufnahmen
- Windwurfflächen und weitere dokumentierte Sturmereignisse
- Bauwerke und Naturdenkmäler
- Sonstige Landschaftselemente

Die Daten für das DGM, DOM und DOP sind frei zugänglich und können vom OpenGeodata-Portal Nord-rhein-Westfalens bezogen werden (<https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/>). Es gelten die genannten Lizenzbedingungen „Datenlizenz Deutschland - Namensnennung – Version 2.0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0)“. Die Daten werden nach Gemeinden paketiert angeboten. Insgesamt sind je Thema 396 Elemente (.zip-Format) vorhanden. Der Download der Daten erfolgte im Zeitraum zwischen dem 27.07.2019 und dem 03.08.2019.

3.2 Digitale Höhenmodelle und Luftbilder

3.2.1 Digitales Höhenmodell

Das digitale Höhenmodell wird in zwei Varianten angeboten:

1. Regelmäßige Punkte, Gitterweite 1 m (DGM1)
2. Unregelmäßige Punktwolke mit mittlerem Punktabstand 1 m (DGM1I)

Da die LiDAR-Daten des DGM1 mit Gitterweite von 1 m für die Verwendung bereits weitestgehend aufbereitet sind, wurde aus praktischen Gründen das

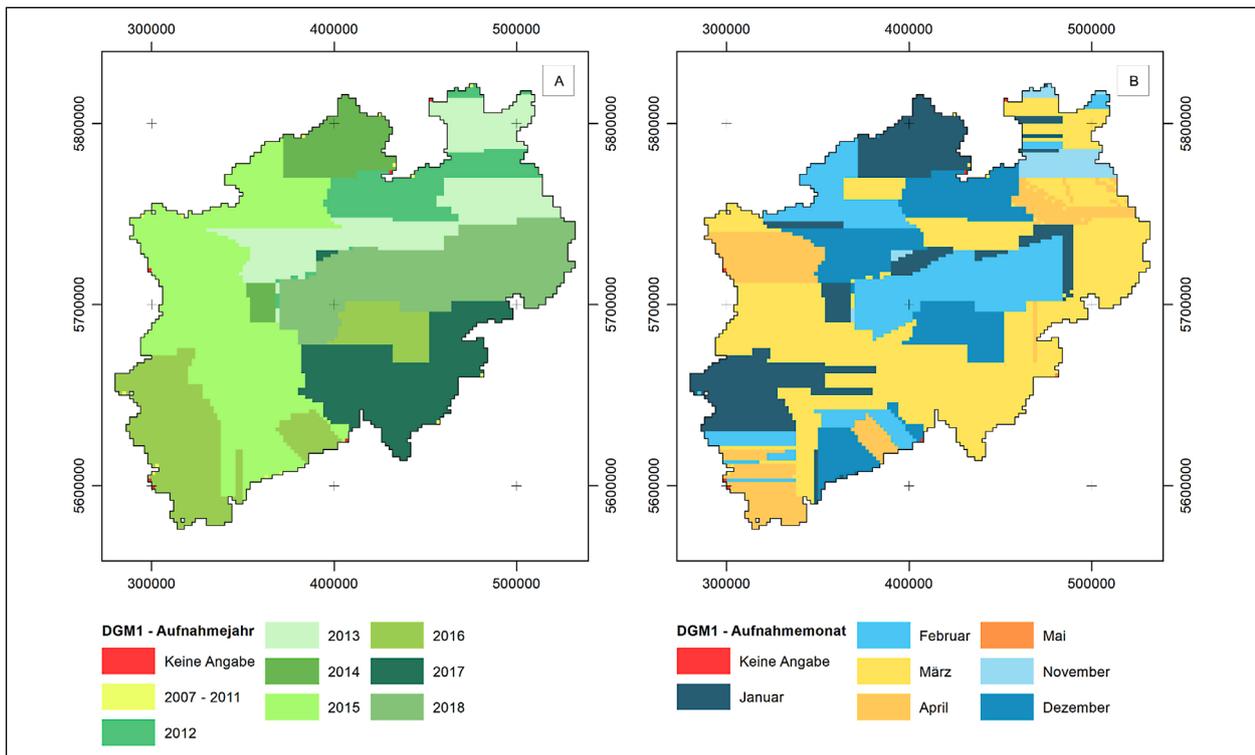


Bild 3-1: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegungsdaten des DGM1. A: Jahre, B: Monate.

DGM1 dem DGM11 vorgezogen. Das DGM1 benötigt für den Download ca. 250 GB freien Speicherplatz. Stand der Daten laut Metadateneintrag ist der 18.07.2019. Das DGM1 wird in Kacheln mit jeweils 2 km Kantenlänge angeboten. Insgesamt existieren nach dem Entpacken 9.318 Einzeldateien (ohne Duplikate) als Reintext im .xyz-Format (ca. 1 TB) im Koordinatensystem ETRS/UTM32N – 8 Stellen und Höhenbezug DE_DHHN2016_NH. Die Höhengenaugigkeit beträgt laut Angaben 0,2 m. Auf Grund von Überschneidungen an Kachel- bzw. Gemeindegrenzen kommt eine Vielzahl von Dateien mehrfach vor. In diesen Fällen wurde die jeweils aktuellste Dateiversion beibehalten bzw. ältere Dateien überschrieben.

Hinsichtlich der Verteilung der Aufnahmedaten des digitalen Höhenmodells wird ersichtlich (Bild 3-1), dass ca. 45 % der Kacheln aus dem Zeitraum 2016 – 2018 stammen, ca. 27 % aus dem Jahr 2015 und in etwa ebenso viele Kacheln von Überfliegungen der Jahre 2012 – 2014. Nur ca. 0,2 % der Daten wurden vor 2012 aufgenommen, für 0,1 % sind keine Metadateninformationen verfügbar (keine Angabe). Daten aus dem Jahr 2019 existieren in den Datensätzen nicht. Bezüglich der Aufnahmezeitpunkte wurden ca. 50 % im Zeitraum März bis April und die weiteren 50 % zwischen November und Februar aufgenommen. Auf den Monat Mai entfallen lediglich 0,01 % der Daten.

Bild 3-2 stellt die Verteilung der Aufnahmezeitpunkte für das DGM1 in Bezug zur überflogenen Fläche dar.

3.2.2 Digitales Oberflächenmodell

Das digitale Oberflächenmodell ist in Kacheln mit jeweils 1 km Kantenlänge organisiert und wird ausschließlich als unregelmäßige Punktwolke bei mittlerem Punktabstand von 1 m (DOM11) angeboten. Insgesamt existieren nach dem Entpacken 35.860 Einzeldateien (ohne Duplikate) als Reintext im .xyz-Format (ca. 7,55 TB) mit dem Koordinatensystem ETRS/UTM32N – 6 Stellen und Höhenbezug DE_DHHN2016_NH. Die Höhengenaugigkeit beträgt ebenfalls 0,2 m.

Die zeitliche und räumliche Verteilung der Daten des digitalen Oberflächenmodells (Bild 3-3) stimmt bis auf einige wenige abweichende Kacheln nahezu mit denen des digitalen Höhenmodells überein. Die ältesten Daten des DOM11 mit ca. 7 % der Fläche sind aus dem Jahr 2012, etwa 45 % entfallen auf den Zeitraum zwischen 2016 und 2018 und rund 0,2 % sind ohne Angabe der Metadaten. Hinsichtlich des monatlichen Ersterfassungsdatums ergibt sich zeitlich wie räumlich die gleiche Verteilung, mit der Ausnahme, dass die wenigen Flächen vor 2012 und diejenigen im Mai entfallen.

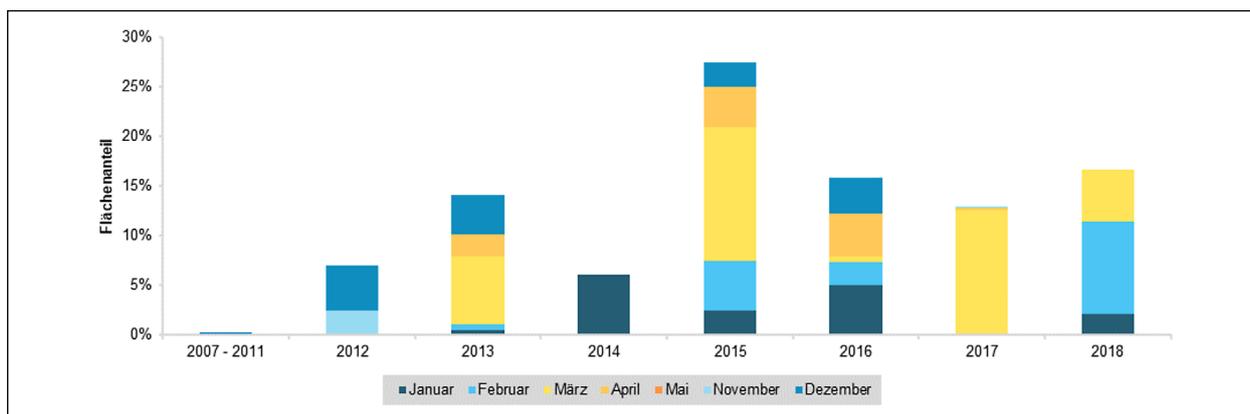


Bild 3-2: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DGM1.

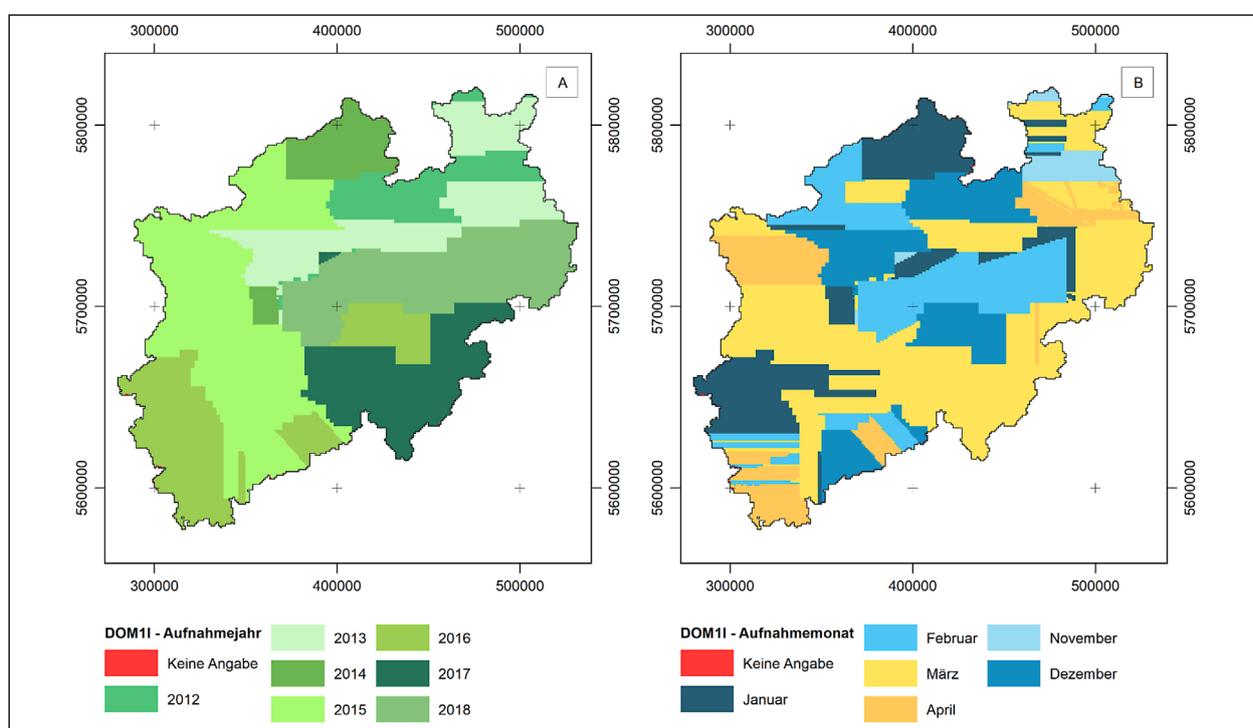


Bild 3-3: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegungsdaten des DOM11. A: Jahre, B: Monate.

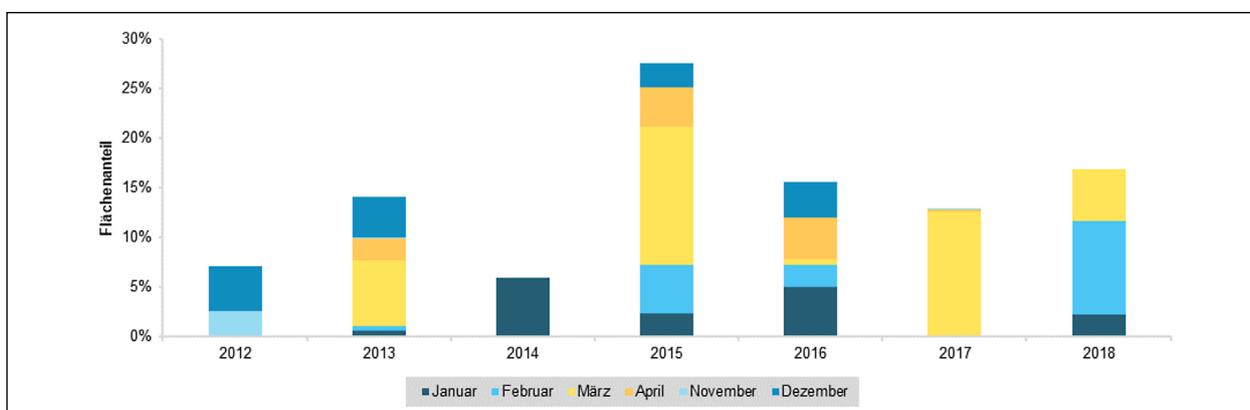


Bild 3-4: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DOM11.

Bild 3-4 stellt die Verteilung der Aufnahmezeitpunkte für das DOM11 in Bezug zur überflogenen Fläche nochmals als Summendiagramm dar.

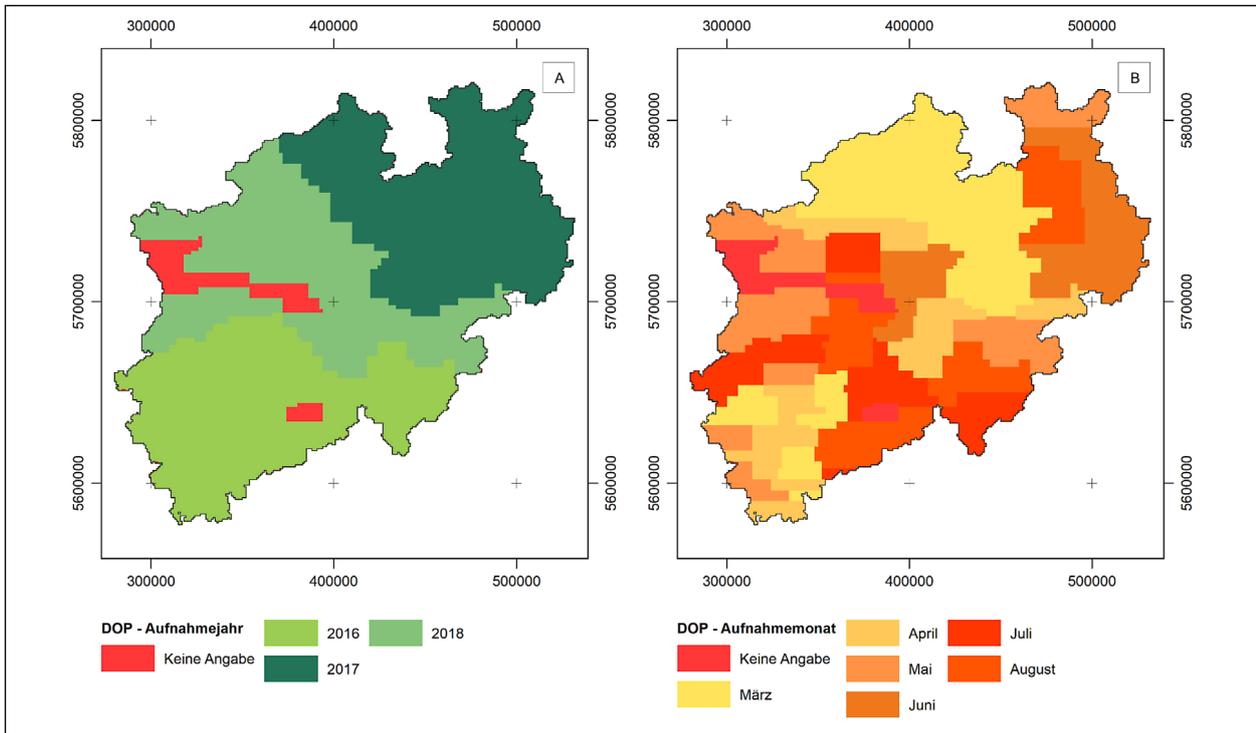


Bild 3-5: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegungsdaten des DOP. A: Jahre, B: Monate.

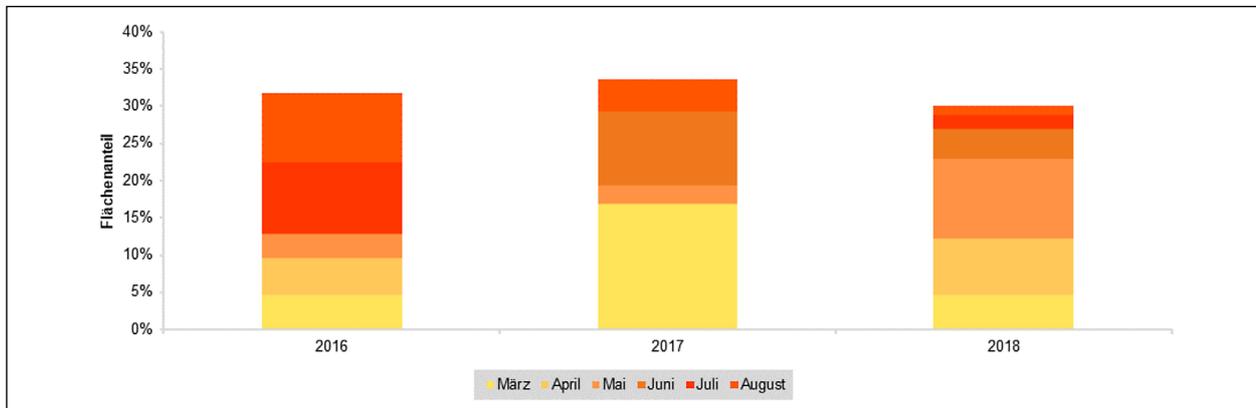


Bild 3-6: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DOP.

3.2.3 Digitale Orthofotos

Die digitalen Orthofotos mit Nahinfrarotkanal (RGBI) sind als 4-Kanalbild im .jp2-Format verfügbar. Die Daten benötigen für den Download ca. 1,51 TB freien Speicherplatz. Stand laut Metadateneintrag ist der 04.07.2019. Die Kacheln werden analog dem DOM11 in Flächen mit jeweils 1 km Kantenlänge organisiert. Insgesamt existieren nach dem Entpacken 35.860 Einzeldateien (ohne Duplikate) mit dann ca. 1,16 TB und dem Koordinatensystem ETRS/UTM32N – 6 Stellen.

Die räumliche und zeitliche Verteilung der Daten wird in Bild 3-5 abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Daten aus dem Zeitraum zwischen 2016 bis 2018 stammen und nur die Monate März bis August

für die Durchführung genutzt wurden. Abgesehen vom Monat März (ca. 26 %) sind die Aufnahmezeiträume der Monate April bis August prozentual mit 11 % bis 15 % etwa gleich verteilt. Für ca. 4 % der Kacheln sind keine Metadateninformationen verfügbar (keine Angabe).

Bild 3-6 stellt die Verteilung der Aufnahmezeitpunkte für das DOP in Bezug zur überflogenen Fläche nochmals als Summendiagramm dar (Flächen ohne Metadatenangabe wurden nicht berücksichtigt).

3.2.4 Vergleich der Aufnahmezeiträume

Bei der Überlagerung der Aufnahmezeiten des digitalen Oberflächenmodells und der digitalen Orthofotos (Bild 3-7) wird deutlich, dass nur ein geringer

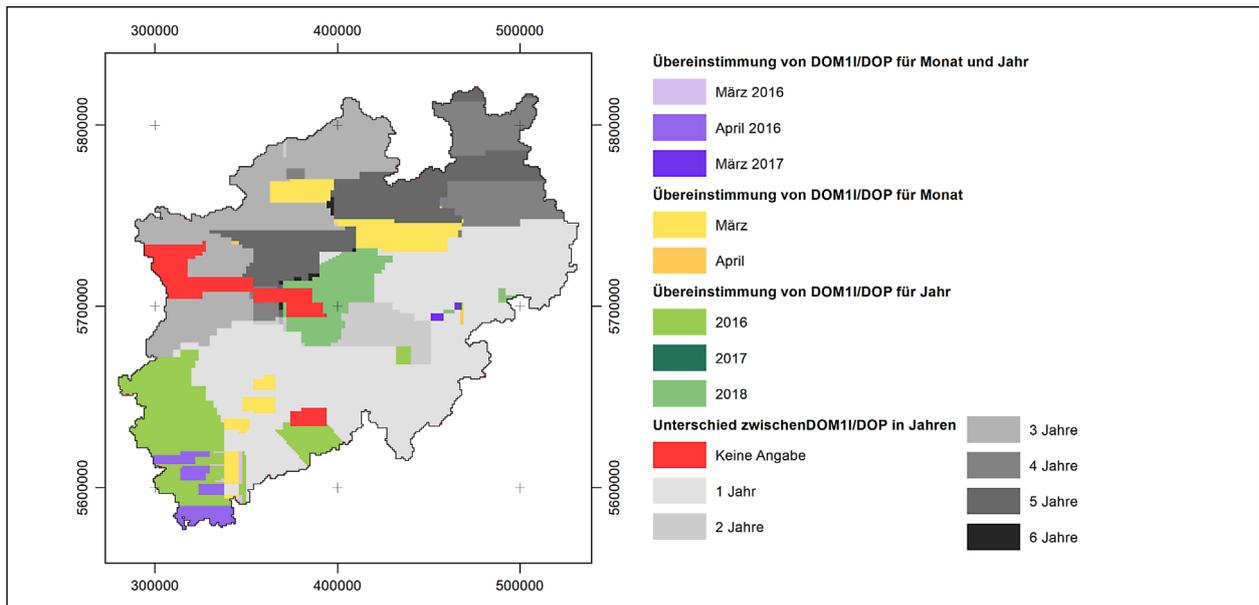


Bild 3-7: Übereinstimmung der Aufnahmedaten für DOM11 und DOP.

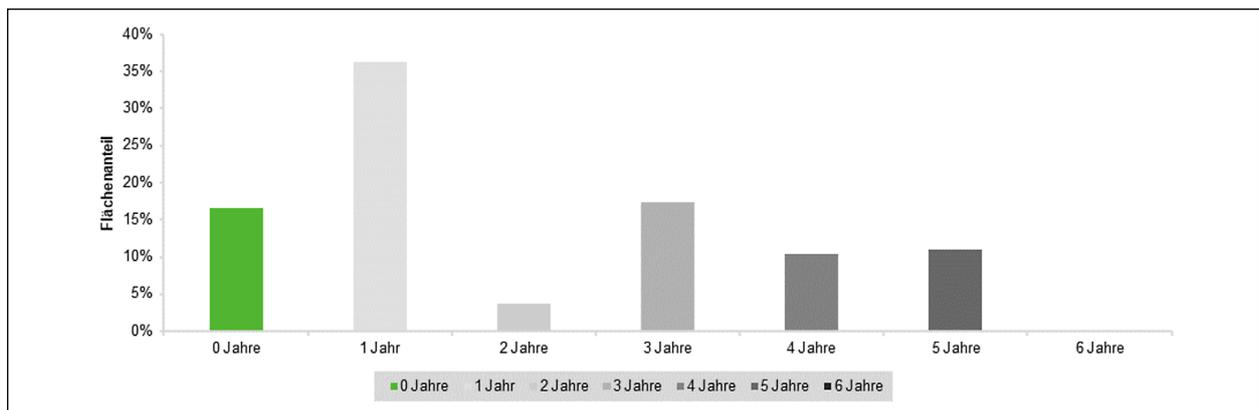


Bild 3-8: Flächenanteile der Unterschiede in Jahren zwischen DOM11 und DOP.

Teil beider Datensätze tatsächlich im gleichen Zeitraum aufgenommen wurde. Da die Aufnahmezeiten des DGM1 und DOM11 weitestgehend übereinstimmen, gilt gleiches auch für den Vergleich DGM1/DOP.

Bezogen auf die Übereinstimmung von DOM11/DGM1 und DOP für die Kombination aus Monaten und Jahren sind insgesamt 2 % der Fläche Nordrhein-Westfalens im gleichen Zeitraum überflogen wurden. Mit weiteren ca. 5 % weisen die Metadaten der Kacheln den gleichen Überfliegungsmonat auf, mit etwa 17 % stimmt das Aufnahmejahr überein, wobei hier ca. 12 % auf das Jahr 2016, weniger als 1 % auf 2017 und rund 5 % auf 2018 entfallen. Auf Grund des Zeitraums für die Generierung der Orthofotos spielt der Monat allerdings eher eine untergeordnete Rolle, da die Überfliegungen hauptsächlich in den Sommermonaten stattfanden und somit die meisten Laubbäume bereits einen Großteil ihres

Blattwerks ausgebildet haben sollten. Bezüglich der Unterschiede in den Aufnahmejahren ist die Situation jedoch etwas differenzierter zu bewerten (Bild 3-8). Hier kann es entscheidend sein, ob kein Jahr oder mehrere Jahre zwischen den Aufnahmen liegen, da zum einen natürliche Ereignisse, wie z. B. größere Sturmereignisse oder auch Eingriffe durch den Menschen zu Unterschieden im potenziellen Baumbestand auf Basis der jeweiligen Datengrundlage führen können. Somit ist nicht auszuschließen, dass im Luftbild klar erkennbare Bäume, die erst vor wenigen Jahren angepflanzt wurden, im digitalen Oberflächenmodell aufgrund ihrer geringen Größe noch nicht detektiert werden können. Auf der anderen Seite können unter Umständen Bäume, welche in den verfügbaren Katastern enthalten und im Oberflächenmodell erkennbar sind, in den aktuellsten Orthofotos aufgrund von zwischenzeitlichen Sturmereignissen oder anthropogenen Eingriffen nicht mehr vorhanden sein. Dies würde sich vor al-

lem auf die Validierungsergebnisse der Modelle auswirken (Kapitel 6), welche durch die genannten Effekte verringert würden. Eine Abschätzung der Größenordnung hierfür ist jedoch nicht möglich.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass durch die praktisch deckungsgleichen Zeiträume für Höhen- und Oberflächenmodell gewisse Qualitätseinbußen in den Erkennungsergebnissen zu erwarten sind, da das DOM11 auf Daten aus den Überfliegungsmonaten November – April basiert und in dieser Zeit die Laubbäume entweder kein (Wintermonate) bzw. noch kein vollständiges (Frühling) Blattwerk besitzen, was wiederum Auswirkungen auf die sogenannten „Pits“ im Oberflächenmodell besitzt und vermehrt zum Auftreten von Nebenmaxima innerhalb einer Baumkrone führen kann. Für das digitale Höhenmodell hingegen sind besonders die Aufnahmen in den Wintermonaten bestens geeignet, da hier kein störendes Blattwerk die Erdoberfläche verdeckt.

3.3 Vegetationsaufnahmen und -kataster

3.3.1 Alleenkataster

Das Bundesland Nordrhein-Westfalen stellt ein landesweites Kataster der gesetzlich geschützten Al-

leen als Shape-Datei zur Verfügung (Zugriffsdatum: 01.07.2019, letzte Änderung: 23.11.2016, Link unter https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/naturschutz/infos), in welcher alle Alleen ab 100 m Länge erfasst sind. Der Datenbestand beträgt zurzeit ca. 5.520 Alleen, im Datensatz selbst sind 6.140 Einträge hinterlegt. 1.052 der 6.140 Features befinden sich in einer Entfernung von weniger als 100 m zum Bundesfernstraßennetz.

Weiterhin enthält der Datensatz Attribute zur Objektkennung und -bezeichnung, den Alleentyp, Baumarten, Pflanzzeitraum, Lage und Länge, Straßenbezeichnung, die zuständige Gemeinde etc. Da die Alleen jedoch nur als Liniengeometrie vorliegen und somit die einzelnen Bäume nicht direkt ableitbar sind, kann der Datensatz nicht für die Validierung der Berechnungsergebnisse dienen, sondern lediglich zur Orientierung und dem Auffinden von Bereichen mit Einzelbäumen genutzt werden.

3.3.2 Baumkataster

Die Recherche nach vorhandenen Baumkatastern erfolgte weitestgehend online (Ergebnisübersicht in Bild 3-10). Im Fokus standen dabei vor allem landesweit für Nordrhein-Westfalen verfügbare Datensätze als auch bundesweite Datenbanken. Unter

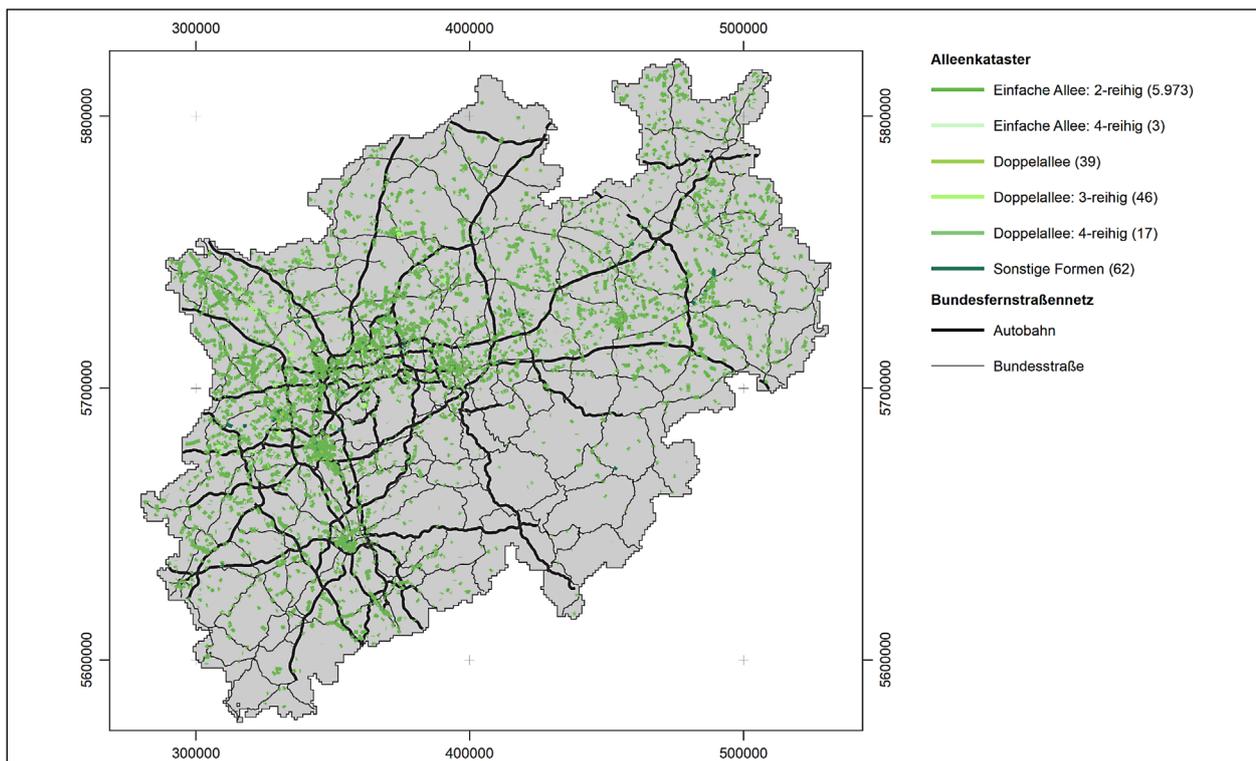


Bild 3-9: Alleenkataster für Nordrhein-Westfalen.

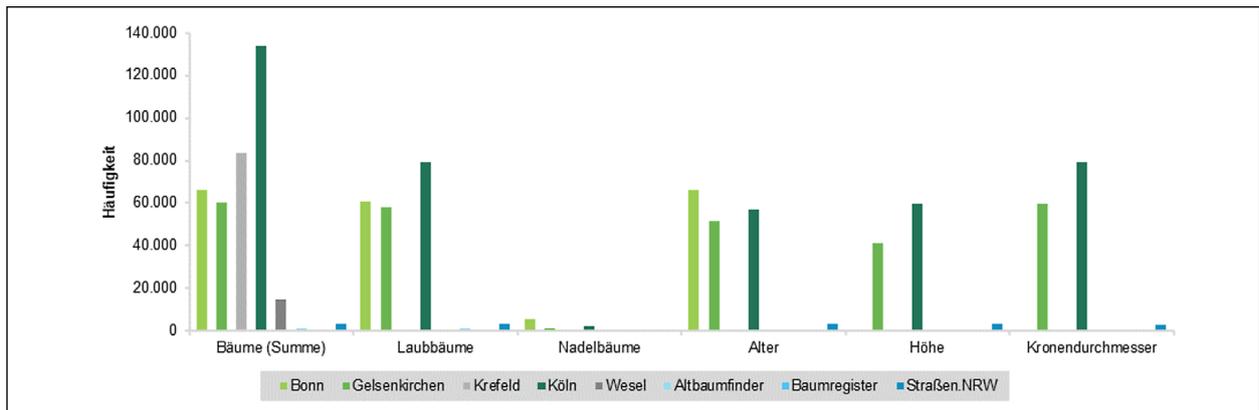


Bild 3-10: Häufigkeit der Bäume und zugehöriger Attribute aus den Baumkatastern.

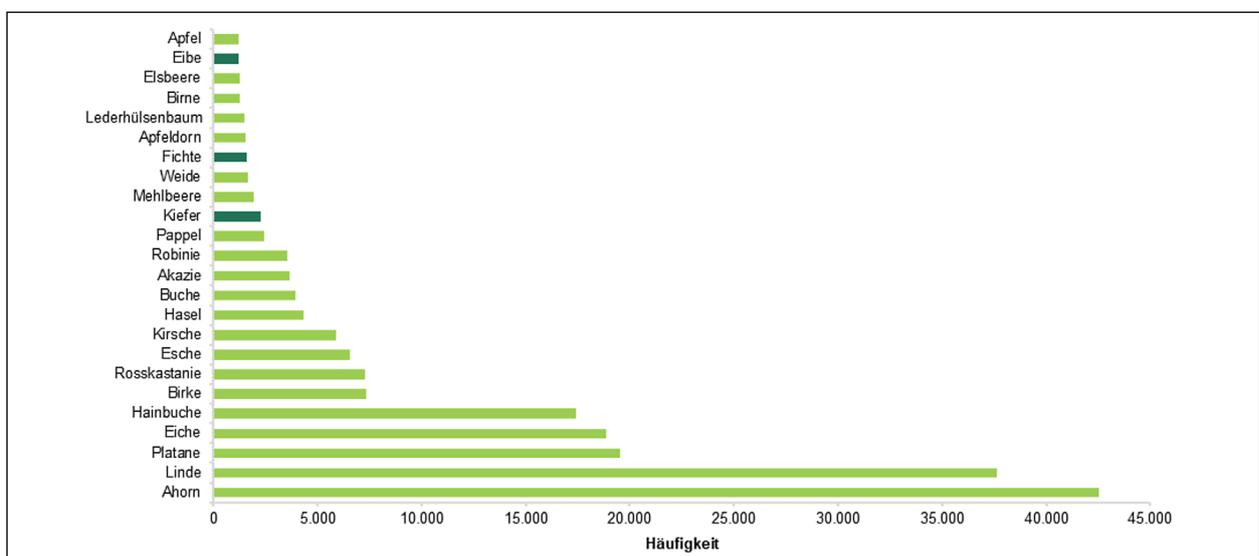


Bild 3-11: Anzahl der Individuen nach Baumart bei mehr als 1.000 Einzelbäumen.

<https://open.nrw/> stehen Baumkataster für die Städte Bonn, Gelsenkirchen, Köln, Krefeld und Wesel zum Download in unterschiedlichen Dateiformaten (.csv, .shp, .kml, .json) zur Verfügung. Der Zugriff erfolgte am 13.08.2019. Die Datensätze der Städte und Kommunen enthalten vorrangig Bäume im öffentlichen Raum mit Bezug zu Straßen, Parks oder Spielplätzen. Bäume in privaten Gärten oder den städtischen Wäldern sind in diesen i. d. R. nicht berücksichtigt.

Weiterhin existiert für Nordrhein-Westfalen unter <http://altbaumfinder-nrw.de/homeabnrw> eine Datenbank, welche in einem Projekt aus einer Kooperation des Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) und der Landesgemeinschaft Naturschutz und Umwelt NRW (LNU) entstanden ist: der Altbaumfinder. Die Datenbank enthält Informationen zu markanten Bäumen, Alt- und Uraltbäumen in Landschaft und Wald, welche ökologisch bedeutsam, aber auch für die Forschung, die Umweltbildung und als kulturelle

Zeugnisse sehr wertvoll sind. Da die Daten lediglich als einzeln abfragbare Einträge auf der Webseite zur Verfügung standen, erfolgte beim LANUV die Abfrage der Daten in Form einer Shape-Datei. Diese wurde mit Datum vom 22.08.2019 zur Verfügung gestellt.

Die Angaben zu den Baumtypen Laub-/Nadelbaum in Bild 3-10 wurde aus den vorhandenen Einträgen zur Baumart bzw. Baumgattung abgeleitet (Bild 3-11). Andere Informationen bzw. Attribute, wie z. B. Angaben zur Lage, der nächsten Straße, dem Alter, Pflanzdatum oder Stammumfang und Stammdurchmesser sind zum Teil vorhanden, jedoch für die vorhandene Zielstellung nicht relevant.

Darüber hinaus wurde auf <https://www.baumkunde.de/> ein bundesweiter Katalog heimischer Baumarten recherchiert, welcher projektrelevante Informationen wie Baumart, Alter sowie Baumhöhe liefert. Auch hier erfolgte die Abfrage der Daten beim Webseiten-Betreiber. Das Baumkunde-Baumregister

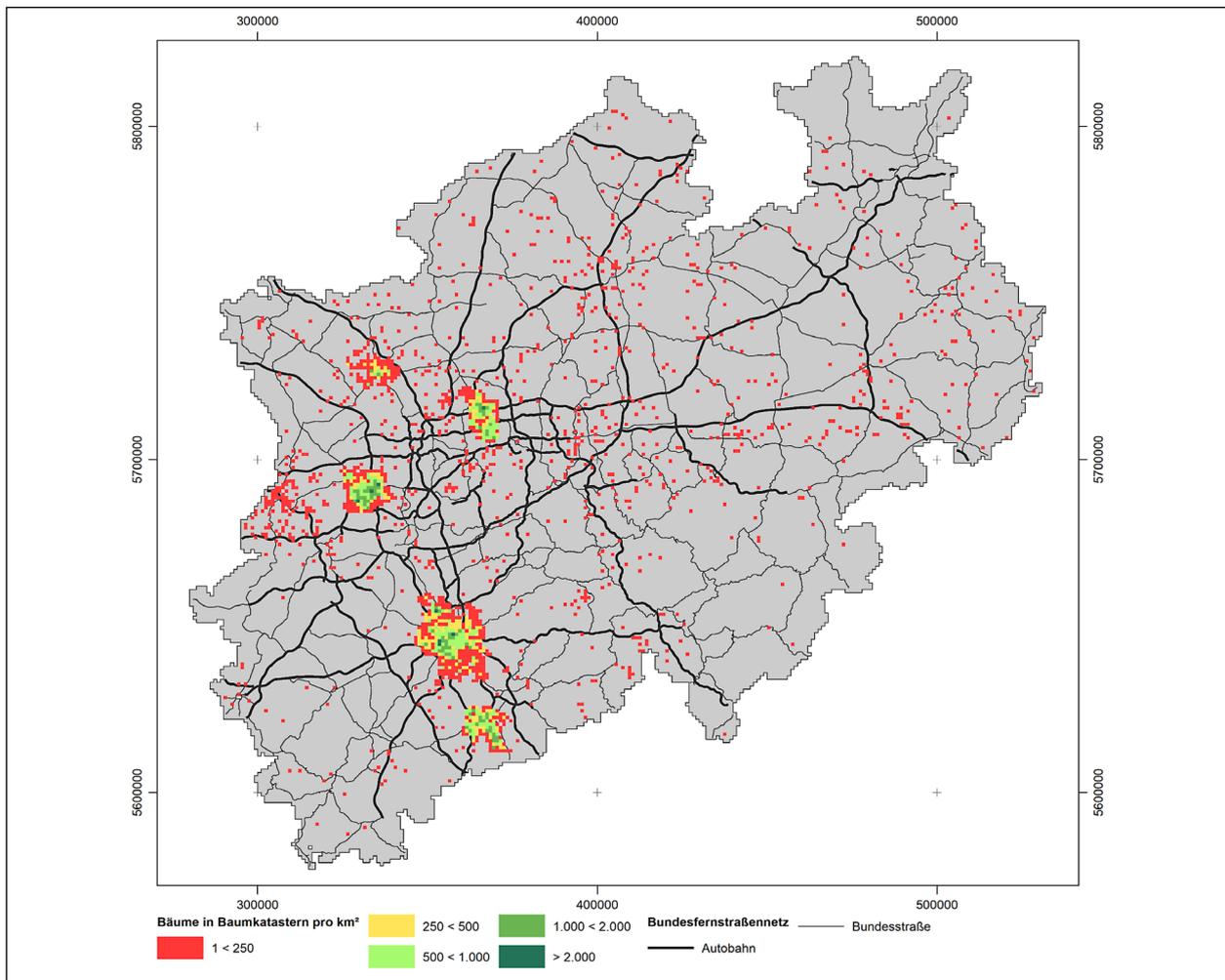


Bild 3-12: Bäume aus Baumkatastern pro km² in Nordrhein-Westfalen.

wurde am 19.08.2019 als Datei im.csv-Format erhalten.

Zusätzlich wurden am 17.10.2019 durch Strassen.NRW weitere ca. 3.200 Einzelbäume entlang des Straßennetzes in den Stadtgebieten Gelsenkirchen, Köln und Bonn bereitgestellt. Zur Übersicht der räumlichen Verteilung der Baumkatasterdaten stellt Bild 3-12 zusammenfassend die Lage aller bekannten Bäume aus den Katastern pro km² dar. Basierend auf dieser Verteilung wurden auch die Testdaten zur Methodikentwicklung und Validierung mittels der digitalen Daten/bekanntem Bäume ausgewählt. Ebenfalls ist erkennbar, dass praktisch keine Daten aus Waldgebieten existieren, sondern kartierte Bäume lediglich in den Stadtbereichen von Köln, Bonn, Gelsenkirchen, Krefeld und Weser vorhanden sind. Bezüglich Einzelbäume können die Ungenauigkeiten der kartierten Standorte in den verfügbaren Datensätzen mitunter mehrere Meter betragen.

3.3.3 Vegetationsaufnahmen, Vegetationstypen und Landschaftselemente

Auf dem Portal https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/naturschutz/infos/ wurden folgende Datenebenen der Landschaftsinformationssammlung NRW (LINFOS) recherchiert (Bild 3-13):

- Vegetationsaufnahmen zum Arteninventar der Pflanzen als Shapefiles in Punkt-, Linien- und Flächengeometrien
- Vegetationstypen in Nordrhein-Westfalen als Shapefiles, ebenfalls in Punkt-, Linien- und Flächengeometrien
- Landschaftselemente in Nordrhein-Westfalen

Wesentliche Inhalte der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) NRW sind das Biotopkataster, Biotoptypen, Flora-Fauna-Habitat-Gebiete, Gebiete für den Schutz der Natur, Gesetzlich geschützte Biotope nach § 62 LG/ § 30 BNatSchG NRW, Land-

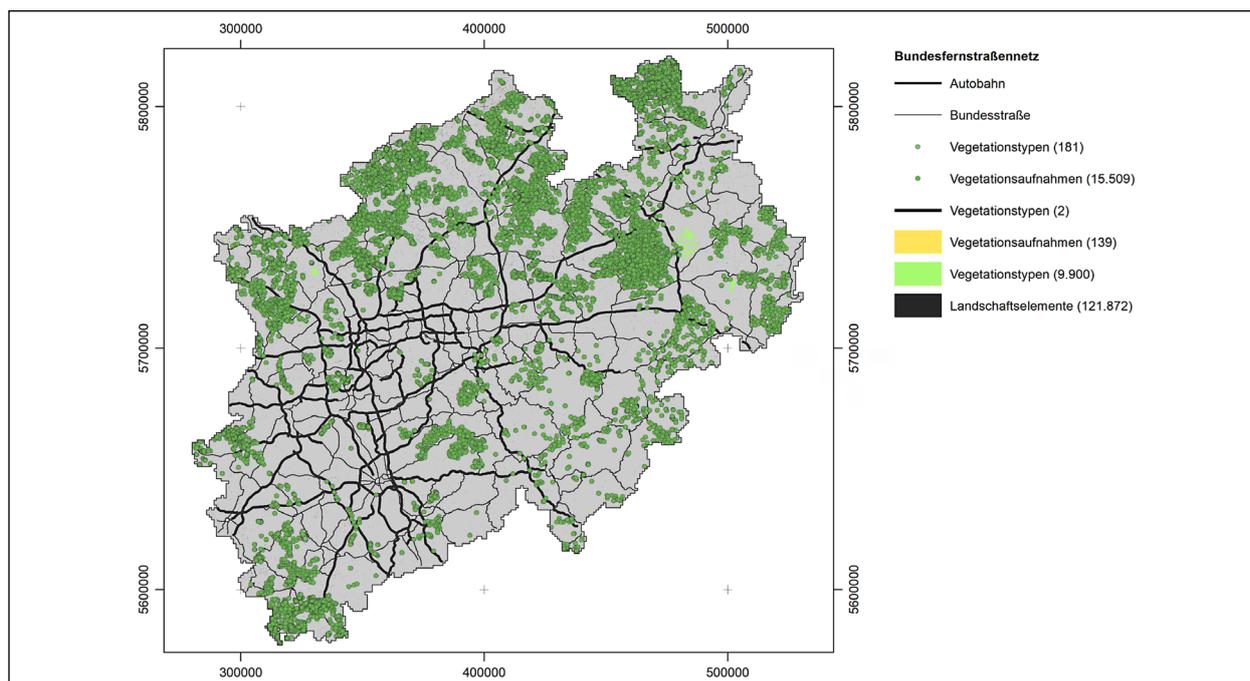


Bild 3-13: Räumliche Verteilung von Vegetationstypen, -aufnahmen und Landschaftselementen.

schaftsräume, Landschaftsschutzgebiete, Nationalparks, Naturparks, Naturräumliche Haupteinheiten, Naturschutzgebiete, RAMSAR, Sonstige Schutzgebiete, Vegetationsaufnahmen, Vegetationstypen, Verbundflächen, Vogelschutzgebiete und Wildnisgebiete.

Die Datenebenen sind grundsätzlich als Zusatzinformationen zu sehen. Die Datenebene Vegetationsaufnahmen kann Hinweise auf vorhandene Vegetationstypen und deren Artenspektrum, Bestandshöhen, etc. liefern. Die Datenebene Landschaftselemente in NRW gibt Hinweise auf vorhandene Baumreihen, aber auch Einzelbäume oder Gehölzformationen. Direkt verwertbare Informationen zu Einzelbäumen wie in den Baumkatastern (Kapitel 3.3.2) sind jedoch vorhanden.

3.4 Windwurfflächen und dokumentierte Sturmereignisse

Zusätzlich zu den Vegetationsaufnahmen erfolgte mit Blick auf den Faktor Klima die Recherche nach dokumentierten Sturmereignissen in Nordrhein-Westfalen. Hierfür konnten vom Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen unter <https://www.wald-und-holz.nrw.de/waldinfo/windwurfschadflaechen-kyrill> und <https://www.wald-und-holz.nrw.de/waldinfo/windwurfschadflaechen-friederike/> entsprechende Datensätze der Schadflächen von Orkantief Kyrill (Januar 2007) und Orkan-

tief Friederike (Januar 2018) bezogen werden. Die Schadflächenkartierung erfolgte dabei fernerkundungsgestützt anhand von digitalen Luftbildern und Orthofotos. Der Download erfolgte am 13.08.2019 von https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wald_forst/wald/. Bild 3-14 zeigt die räumliche Verteilung beider Datenebenen.

Darüber hinaus können Schadereignisse bzw. sturmbedingte Straßensperrungen in Form von Pressemitteilungen (z. B. <https://www.ksta.de/region/rhein-berg-oberberg/zahlreiche-stromausfaelle-und-gesperrte-strassen--eberhard--wirft-hunderte-baeume-um-32202798>; https://www.wz.de/nrw/wuppertal/sturm-in-wuppertal-umgestuerzter-baum-sorgt-fuer-sperrung_aid-35531529) gefunden werden, jedoch ausschließlich ohne konkreten Ortsbezug bzw. Koordinaten.

3.5 Bundesfernstraßennetz

Das zu verwendende Straßennetz (NEMOBFStr) wurde am 30.07.2019 von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im .json-Format zur Verfügung gestellt. Das Bundesfernstraßennetz ist die Basis des Bearbeitungsgebietes, welches durch die geschätzte Fahrbahnbreite plus eines beidseitigen Puffers von 100 m festgelegt wurde.

Das NEMO-Netz (Bild 3-15) bildet den jeweils aktuellen Stand des Autobahn-, Bundes- und Landes-

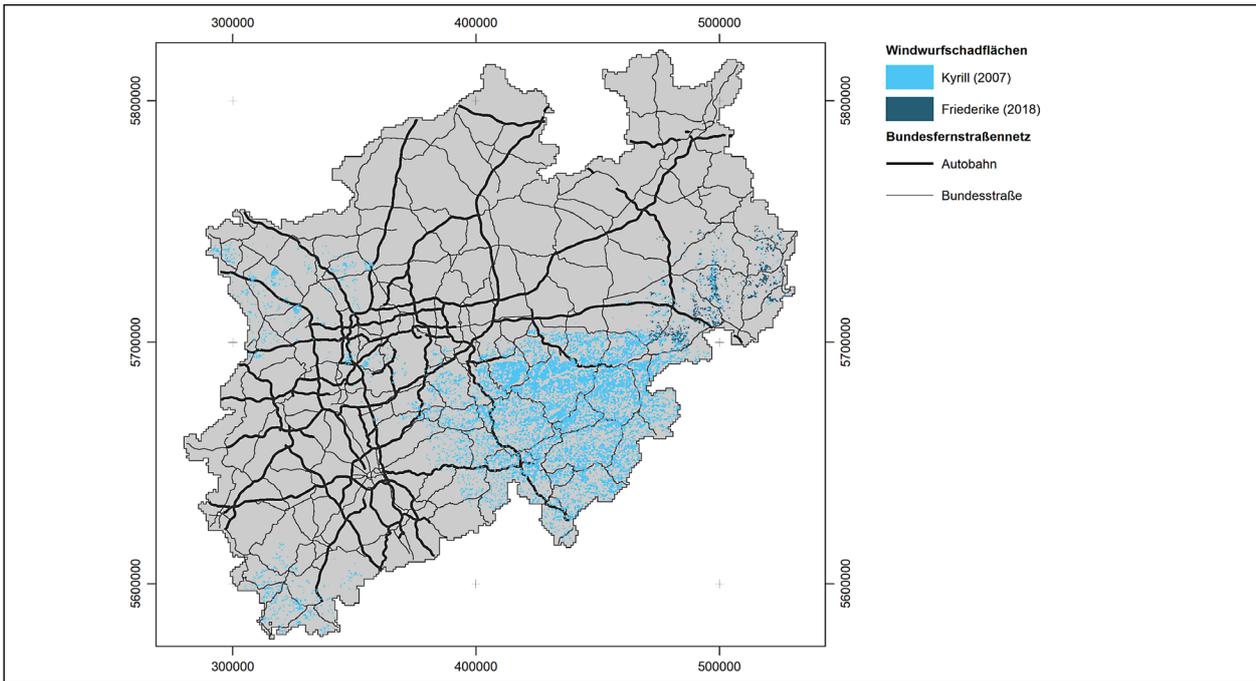


Bild 3-14: Windwurfschadflächen von Orkantief Kyrill (2007) und Orkantief Friederike (2018).

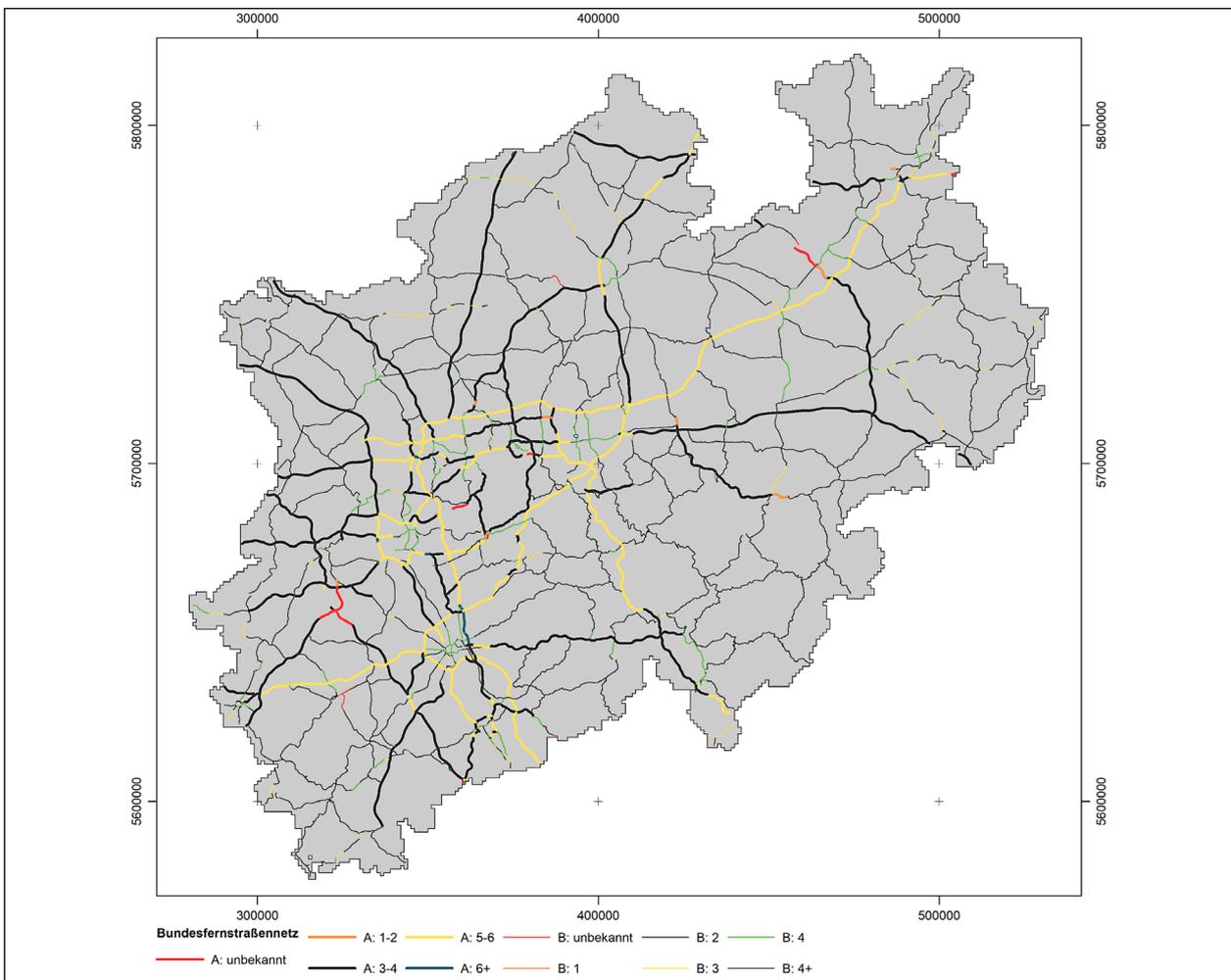


Bild 3-15: Bundesfernstraßennetz (NEMO) kategorisiert nach Straßenklassen und Fahrstreifenanzahl.

straßennetzes ab und enthält darüber hinaus die wichtigsten Kreis- und Gemeindestraßen sowie in unterschiedlicher Tiefe das Umlandnetz. Es beinhaltet zusätzlich alle gemäß dem aktuellen Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen festgelegten Neu- und Ausbauvorhaben. Es sind eine Vielzahl von streckenbezogenen Attributen hinterlegt, anhand derer beispielsweise der jeweilige Querschnittszustand eines Streckenabschnittes detailliert abgelesen werden kann. Insgesamt entfallen etwa 6.800 km des NEMO-Gesamtnetzes auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen.

Die Straßenklassen Autobahn (A, ca. 33 %) und Bundesstraße (B, ca. 66 %) sind nicht direkt zugewiesen, können jedoch aus den vorhandenen Einträgen abgeleitet werden.

3.6 Sonstiges

Da das übergebene Bundesfernstraßennetz keine Informationen zum Fernstraßentyp, der Straßenabschnittskennung etc. enthält, wurden weitere Daten vom Landesbetrieb Straßenbau NRW aus https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/transport_verkehr/strassennetz/ bezogen, welche im späteren Projektverlauf Anwendung, u. a. in der Zuweisung der Attribute, finden können. Der Datensatz wurde mit den Sektoren bzw. Geometrien des NEMO-Netzes über eine vorhandene ID-Kennung in beiden Datensätzen verknüpft, sodass insbesondere mit-

hilfe der Angaben zur Fahrstreifenanzahl eine Abschätzung der gesamten Fahrbahnbreite eines Abschnitts für Autobahnen sowie Bundesfernstraßen erfolgen kann.

4 Datenaufbereitung

4.1 Digitales Höhenmodell

Die Punktdaten des digitalen Höhenmodells mit regelmäßigem Punktabstand von 1 m liegen nach dem Entpacken zunächst in Reintext vor (.xyz-Format), welche ArcGIS ohne die Verwendung der Erweiterung des 3D-Analyst nicht direkt verarbeiten kann. Um dies zu umgehen, wird das OpenSource-Tool txt2las der Firma rapidlasso GmbH (<http://rapidlasso.com>) genutzt, welches vollständig ArcGIS 10.5.1 kompatibel ist und unter der GNU Lesser General Public License (LGPL) steht.

Hiermit werden die Textdateien zunächst in das binäre .las-Format überführt und anschließend mithilfe von ArcGIS-Funktionen zu einem Gesamtraster mit 1 m bzw. 2 m Zellgröße exportiert (Bild 4-1). Für den Export wird das .tif-Format genutzt, welches sowohl Möglichkeiten zur Komprimierung als auch längere Dateinamen unterstützt. Grundsätzlich ist auch ein Export in eine File-Geodatabase möglich, jedoch hat sich das .tif-Format für die Bearbeitung von Rasterdaten in einer klassischen Datenstruktur gegenüber der Geodatenbank-Variante bewährt.

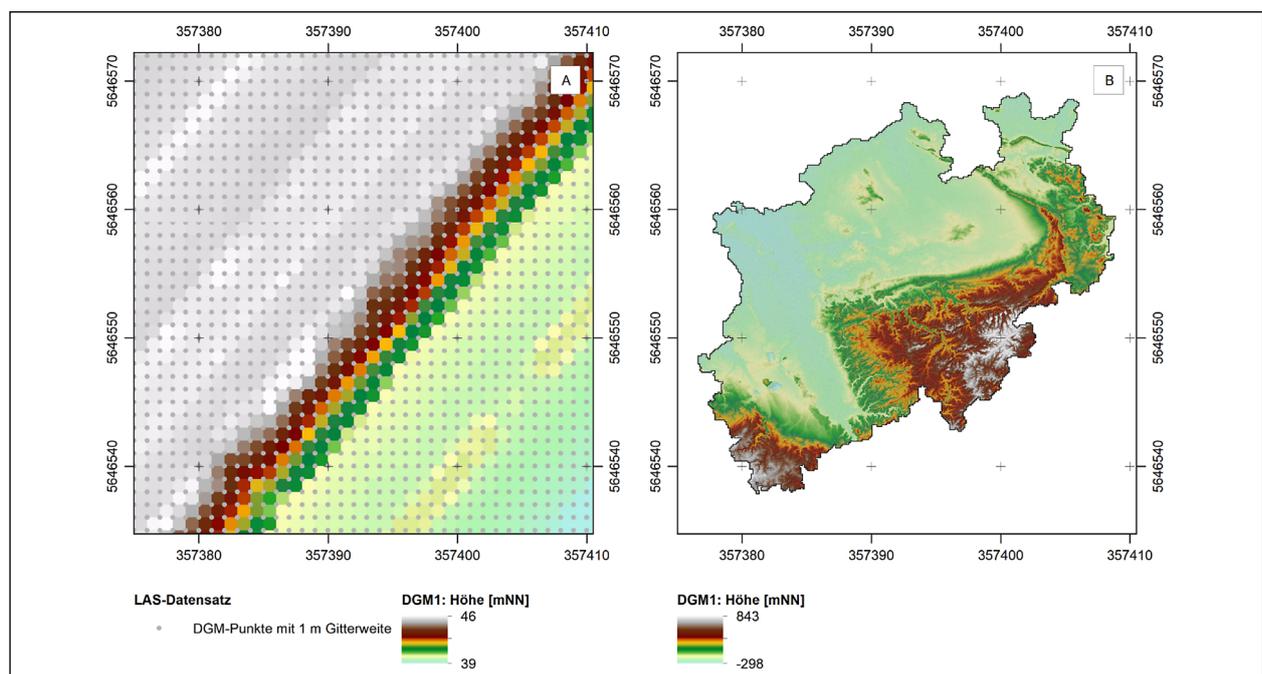


Bild 4-1: DGM1. A: Punktdaten mit 1 m Gitterweite. B: Generiertes DGM1 für Nordrhein-Westfalen aus Punktdaten von A.

Das LZW-komprimierte Raster benötigt bei 1 m Zellgröße nach dem Export ca. 78 GB Speicherplatz (ca. 60 GB für das Raster, ca. 18 GB für die Pyramiden).

4.2 Digitales Oberflächenmodell

Die Punktdaten des digitalen Oberflächenmodells mit unregelmäßigem Raster bei 1 m mittlerem Punktabstand liegen nach dem Entpacken ebenfalls als Reintext im .xyz-Format vor. Für die Bildung des Rasters von 1 m Zellgröße wird analog dem DGM1 zunächst das Tool txt2las zur Umwandlung in das .las-Format genutzt. Zur Generierung des DOM11-Rasters werden anschließend die vorhandenen .las Dateien zu einem .lasd-Dataset zusammengefügt und entsprechend in einen Rasterdatensatz mit 1 m Zellgröße exportiert (Bild 4-2). Hierbei gilt zu beachten, dass die Rohdaten des DOM11 aus verschiedenen Datensätzen bestehen:

- FP-Dateien: Punkte des First Pulse
- AW-Dateien: Aufgefüllte Punkte für Wasserflächen

Für die Erstellung des DOM11-Rasters sind beide o.g. Datensätze zu verwenden. Dennoch sind auch bei Einbeziehung der AW-Punktdaten nicht alle Wasserflächen flächendeckend mit Punktdaten belegt, sodass bei einfachem Export zum Raster an diesen Bereichen ggf. Leerstellen entstehen können.

Um dies zu vermeiden, können die Lücken bereits bei der Generierung des Rasters mithilfe einer linearen Interpolation bzw. Triangulation aufgefüllt werden, um ein vollständiges DOM11 zu erhalten.

Für das DOM11 wurden zur Vorbereitung für die Methodikentwicklung zwei Varianten erstellt:

- Zuweisung des Höhenwertes durch Berechnung des Mittelwertes aller Punkte in einer Zelle (DOM_{MW})
- Zuweisung des Höhenwertes durch Nutzung des ersten Impulses (höchster Punkt) einer Zelle (DOM_{MAX})

Die erzeugten Raster mit 1 m Pixelgröße benötigen inklusive der Pyramiden zur flüssigen Anzeige von Rasterdaten in ArcGIS (ca. 20 GB bis 30 GB) zwischen ca. 100 GB und 150 GB Speicherplatz.

Entsprechend den Ergebnissen der Literaturrecherche wurden für die Entwicklung der Methodik zu Testzwecken ebenfalls ein höher aufgelöstes DOM mit 0,5 m Pixelgröße sowie ein geringer aufgelöstes DOM mit 2 m Zellgröße generiert.

Nach Erstellung des digitalen Oberflächenmodells wurde dieses zunächst stichprobenartig auf grobe Unstimmigkeiten geprüft. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das DOM11 lokal erhebliche Fehler enthält (Bild 4-3A), welche sich durch unplausible Höhenwerte äußern. Die Quelle hierfür lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht ermitteln. Eine

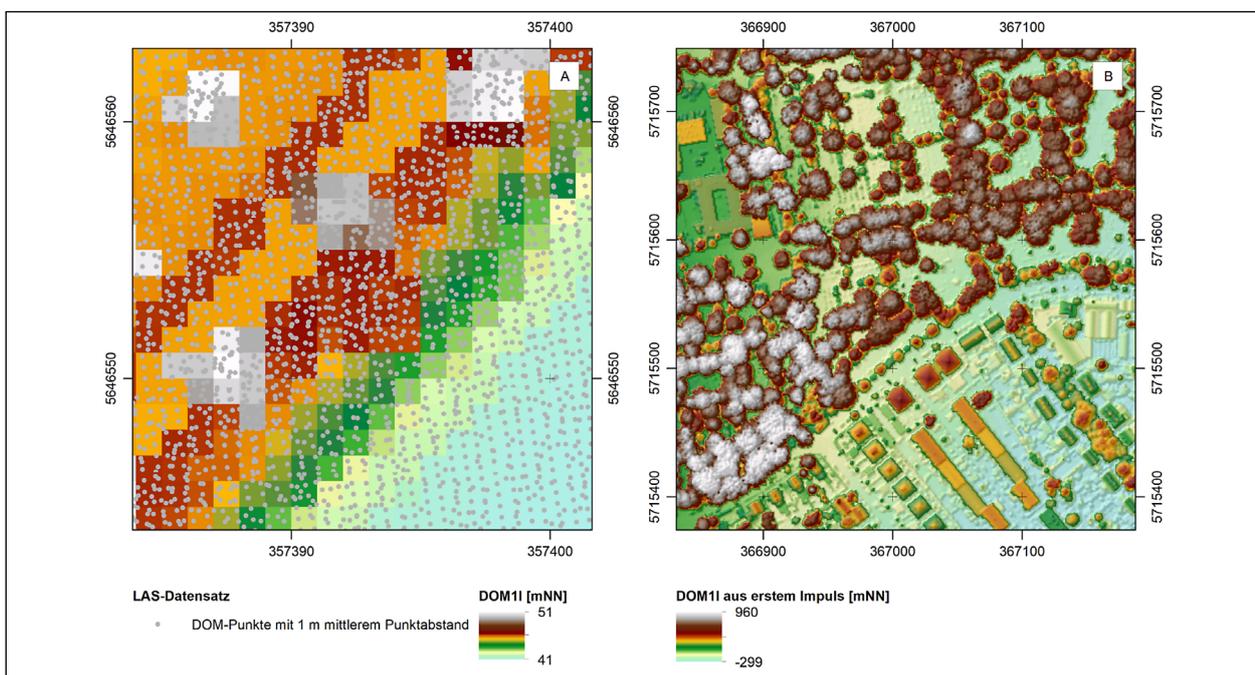


Bild 4-2: DOM11. A: Punktdaten mit 1 m mittlerem Punktabstand. B: DOM11 basierend auf dem ersten Impuls (DOM_{MAX}).

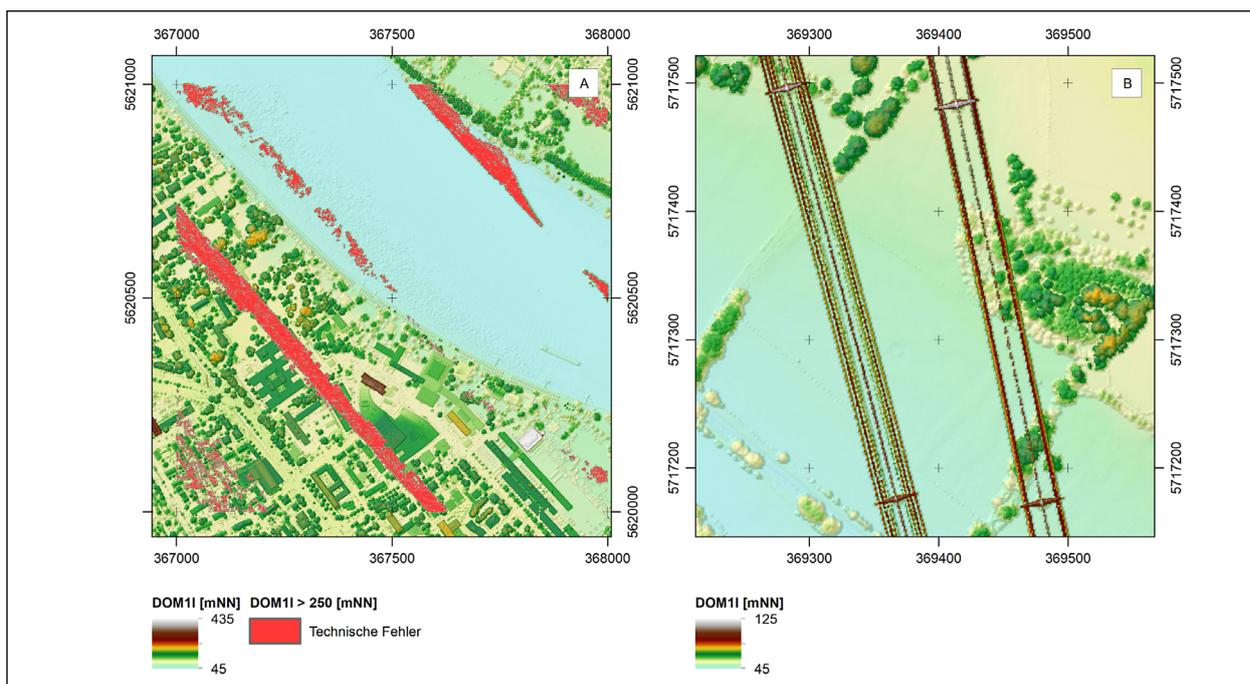


Bild 4-3: Mögliche Fehlerquellen im DOM. A: Fehler im DOM11. B: Hochspannungsleitungen im DOM11.

ggf. vorhandene Bewölkung zum Zeitpunkt der Überfliegungen kann jedoch als Grund auf Basis der Geometrien dieser Abweichungen praktisch ausgeschlossen werden. Wie erwartet, bildet das DOM darüber hinaus auch alle infrastrukturellen Elemente ab, zu denen z. B. auch Hochspannungsleitungen gehören (Bild 4-3B). Diese pausen sich dementsprechend auch im Kronenhöhenmodell durch (Kapitel 5.2), sind jedoch nicht als Fehler anzusehen. Im Gegensatz zu den aus potenziell technischen Fehlern entstehenden Baumkandidaten können die hierauf beruhenden Fehlklassifikationen in Abhängigkeit der ausgewählten Methodik zumindest erheblich reduziert werden.

4.3 Digitale Orthofotos

Die digitalen Orthofotos liegen in einer Auflösung bis 0,1 m vor und wurden entsprechend der Zellgröße der anderen Rasterdatensätze auf die vorgesehene Pixelgröße zur Bearbeitung von 1 m vergrößert, was gleichzeitig mit einer erheblichen Reduktion des Speicherbedarfes einhergeht (ca. 140 GB für das DOP1 gegenüber 1 TB für 0,1 m Pixelgröße) und hinsichtlich der Unterscheidung zwischen relevanten vegetationsbedeckten und unbedeckten Flächen als ausreichend angesehen werden kann (Bild 4-4). Anschließend wurden die Kacheln zu einem gesamten Rasterdatensatz mosaikiert.

Zur Unterscheidung der Bereiche mit und ohne Vegetation wird auf Grundlage des 4-Kanal-DOP der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) nach TUCKER [1979] berechnet (Formel 1). Durch setzen eines Grenzwertes kann anschließend zwischen potenziell vegetationsbedeckten und unbedeckten Bereichen differenziert werden. Schwachstellen hierbei können jedoch z. B. grün reflektierende künstliche Oberflächen sein, welche unter Verwendung des NDVI ggf. falsch als potenzielle vegetationsbedeckte Bereiche ausgewiesen werden.

$$NDVI = \frac{NIR - ROT}{NIR + ROT} \quad \text{Formel 1}$$

Der Wertebereich des NDVI befindet sich bei $[-1;1]$. Für die Berechnung mittels ArcGIS stellt Esri eine abgewandelte Funktion zur Ermittlung des NDVI bereit (Formel 2), welche im Ergebnis den Wertebereich $[0;200]$ abdeckt. Vorteil dieser Funktion ist die Ausgabe eines Ganzzahl-Rasters (im Vergleich zum Fließkomma-Datentyp der originalen Formel), sodass der Speicherbedarf erheblich reduziert wird.

$$NDVI_{ArcGIS} = \left(\left(\frac{NIR - ROT}{NIR + ROT} \right) + 1 \right) \times 100 \quad \text{Formel 2}$$

Weiterhin rundet die veränderte Formel das Ergebnis praktisch auf 2 Nachkommastellen, welche für den vorgesehenen Einsatz absolut ausreichend sind.

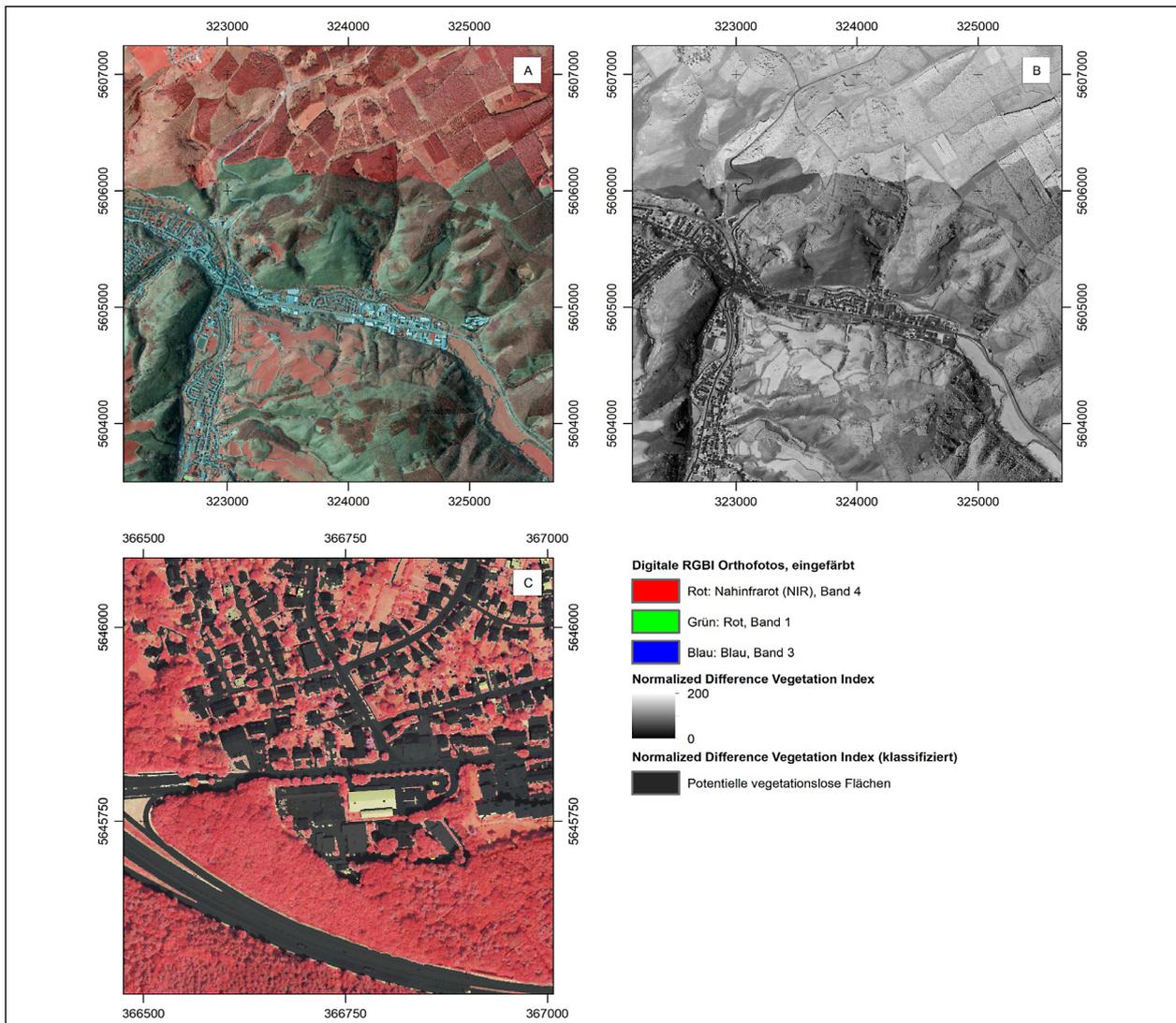


Bild 4-4: DOP. A: Falschfarben-DOP mit Vegetation in Rottönen. B: Abgeleiteter NDVI. C: Potenzielle vegetationslose Flächen.

In Bild 4-4 wird darüber hinaus sichtbar, dass die Qualität des DOP ggf. schwanken kann. So ist im oberen Drittel von Bild 4-4A ein erheblicher Kontrastunterschied zum unteren Bildteil erkennbar, welcher sich auch auf die Berechnung des NDVI (Bild 4-4B) auswirkt. Die schwach rot eingefärbten Bereiche sollten erheblich stärker und gesättigter erscheinen, da es sich bei diesen Flächen ebenfalls wie im oberen Bildbereich um teils anschließende Waldgebiete handelt. Aufgrund dieser Unterschiede ist nicht auszuschließen, dass final ggf. einige potenzielle Baumkandidaten wegen zu geringer NDVI-Werte herausgefiltert werden (siehe Bild 4-4B mit geringeren NDVI-Werten im unteren Bildbereich).

Autobahnen	Regelquerschnitt [m]
1-2 Fahrstreifen	RQ 25
3-4 Fahrstreifen	RQ 31
5-6 Fahrstreifen	RQ 36
6+ Fahrstreifen	RQ 43,5 + 3,5 m je zusätzlichem Fahrstreifen
Fahrstreifenanzahl unbekannt	RQ 31
Bundesstraßen	Regelquerschnitt [m]
1 Fahrstreifen	RQ 9
2 Fahrstreifen	RQ 11
3 Fahrstreifen	RQ 15,5
4 Fahrstreifen	RQ 21
4+ Fahrstreifen	RQ 21 + 3,5 m je zusätzlichem Fahrstreifen
Fahrstreifenanzahl unbekannt	RQ 11

Tab. 4-1: Abgeleitete Regelquerschnitte für Autobahnen und Bundesstraßen unter Berücksichtigung der RAA und RAL.

4.4 Bundesfernstraßennetz

Da aus dem Datensatz zum Bundesfernstraßennetz nur Linieninformationen vorliegen, muss für eine Expositionsanalyse auch die Verkehrsfläche berücksichtigt werden. Dies geschieht unter Einbeziehung zusätzlicher Daten des Landesbetriebes Straßenbau NRW, mit denen das vorliegende NEMO-Netz um die Fahrstreifenanzahl erweitert und darauf aufbauend die Schätzung der Verkehrsfläche ermöglicht wird. Als Grundlage dienen die sog. Regelquerschnitte aus den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) [FGSV, 2008] sowie die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) [FGSV, 2012]. Die Schätzung der Verkehrsfläche erfolgte differenziert für Autobahnen und Bundesstraßen.

5 Entwicklung der Methodik

5.1 Allgemeine Herangehensweise

Entsprechend den Ergebnissen der Kenntnisstandanalyse (Kapitel 2) existiert eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf das finale Ergebnis. Diese Einflüsse können sowohl natürlichen (Vegetationsstruktur), technischen (Qualität der LiDAR-Daten, Überfliegszeiträume i. w. S.) und methodischen (Auflösung, Glättung etc.) Ursprungs sein. Für die Entwicklung einer Methodik zur Einzelbaumerkennung wurde daher ein iterativer Ansatz gewählt, bei dem

Modelle mit unterschiedlichen Parametern und Aufbereitungsmethoden erstellt und anschließend mit den vorhandenen digitalen Datensätzen sowie später mit Ergebnissen der Feldvalidierung ausgewertet wurden (Bild 5-1).

Die grundlegende Herangehensweise basiert dabei zunächst auf der Berechnung des Kronenhöhenmodells (KHM) in verschiedenen Auflösungsversionen. Diese werden entsprechend den Erkenntnissen der Literaturrecherche sowie den technologischen Möglichkeiten, z. B. durch das Entfernen von Ausreißern und der Anwendung von Rausch- und Glättungsfiltren, weiter aufbereitet. Anschließend erfolgt die Erkennung der Pixel, welche in der Theorie den höchsten Punkt der Baumkronen darstellen.

Das Kronenhöhenmodell berechnet sich dabei im Allgemeinen aus der Differenz des digitalen Oberflächenmodells sowie des digitalen Höhenmodells:

$$KHM = DOM - DGM$$

Formel 3

Da vor allem aufgrund der unterschiedlichen Punktlage in den Ausgangsdatsätzen des DGM und DOM auch negative Werte auftreten können, werden diese zusätzlich auf den Wert null korrigiert.

Nach Auswertung der ersten Ergebnisse erfolgten in der Feinabstimmung zusätzliche Bearbeitungs-

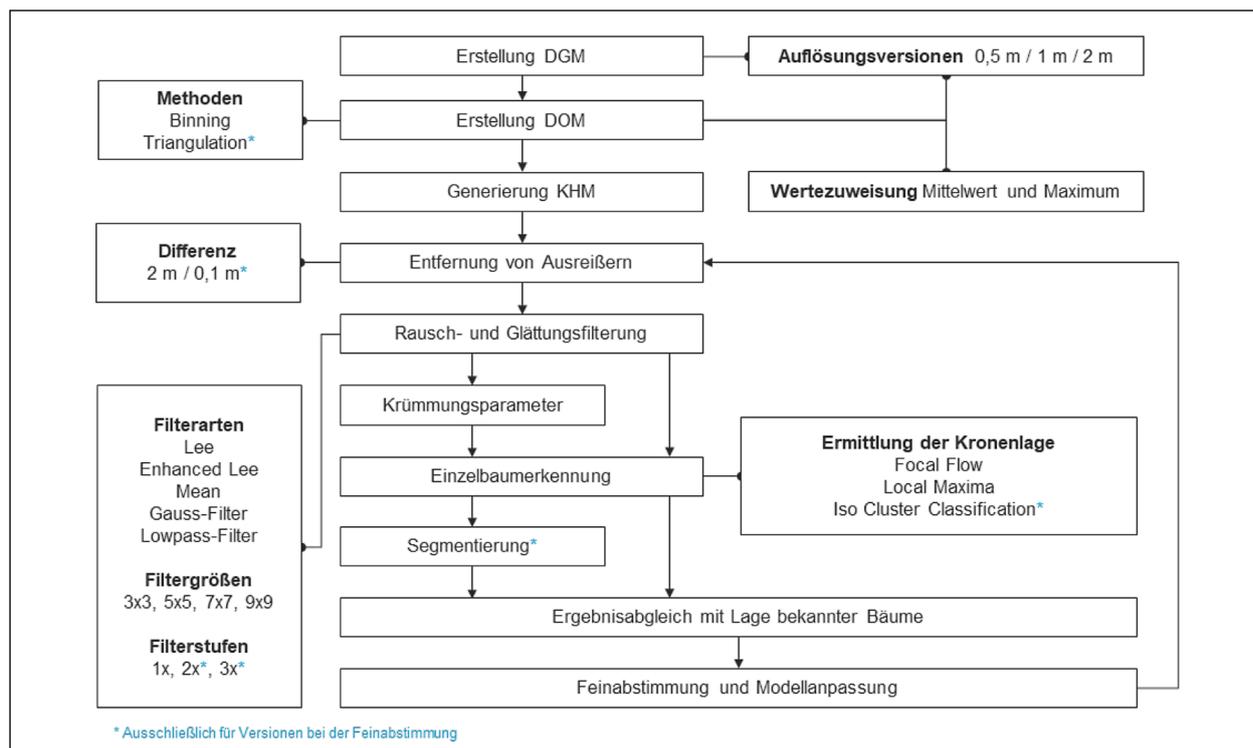


Bild 5-1: Grundlegende Herangehensweise zur Ermittlung einer geeigneten Methodik für die Einzelbaumerkennung.

schritte (z. B. weitere Glättung), um das Ergebnis, besonders in Bezug auf die Sensitivität und somit auf die Errors of Commission (EC, fehlerhaft als Bäume ausgewiesene Punkte), zu verbessern. Hierfür wurden Modelle ausgewählt, die bereits bei einmaliger Glättung möglichst gute Erkennungsraten für Einzelbäume erbrachten. Zusätzlich wurden weitere Variationen getestet, um eine hohe Bandbreite an Ansätzen abzudecken und den Einfluss von Segmentierungsverfahren als auch Unterschieden bezüglich der Methoden zur Ermittlung der Kronenlage zu untersuchen.

Unabhängig von der Ermittlung der optimalen Methodik für die Einzelbaumerkennung sollen auch die Unterschiede herausgestellt werden, welche ggf. durch die verschiedenen Berechnungsvarianten des digitalen Oberflächenmodells entstehen. Ziel ist es dabei, nicht nur einen gut funktionierenden Ansatz zu wählen, sondern eine Methodik zu ermitteln, welche unter Beachtung der unterschiedlichen Aufbereitungsmöglichkeiten auch konstante bzw. vergleichbare Ergebnisse erzielt.

Für die Bearbeitung erfolgte im ersten Schritt der Vergleich mit Auflösungen von 0,5 m und 1 m Zellgröße (Kapitel 6.2, Testdatensatz A). Nach deren Auswertung wurde anschließend der Datensatz erweitert (Testdatensatz B) und die Modelle mit 1 m und 2 m Pixelgröße erneut berechnet und ausgewertet.

5.2 Erstellung des Kronenhöhenmodells

5.2.1 Punkt-Mittelwert vs. Punkt-Maximum

Aufgrund dessen, dass die Überfliegungen zum Erhalt der Daten für die Generierung des digitalen Oberflächenmodells in den Frühlings- und Wintermonaten stattgefunden haben, ist zu erwarten, dass es vermehrt zur Bildung sogenannter „Pits“ im Oberflächenmodell kommt. Diese stellen Unebenheiten bzw. Löcher im natürlichen Verlauf der Höhenwerte entlang der Baumkrone dar und können ggf. zu Fehlklassifikationen bei der Erkennung der Baumkandidaten führen.

Mit dem Ziel, diese Unebenheiten von Beginn an zu verringern, wurden bei der Erstellung des digitalen Oberflächenmodells aus der Punktwolke zwei unterschiedliche Versionen generiert:

- Digitales Oberflächenmodell mit dem durchschnittlichen Höhenwert (DOM_{MW})
- Digitales Oberflächenmodell mit dem maximalen Höhenwert (DOM_{MAX})

Bereits in der visuellen Betrachtung der aus dem Geländemodell und den beiden Oberflächenmodellen abgeleiteten Kronenhöhenmodelle lassen sich deutliche Unterschiede erkennen (Bild 5-2). Hierbei scheint das Kronenhöhenmodell auf Basis der DOM-Maximalwerte (erster Impuls), welches sich in

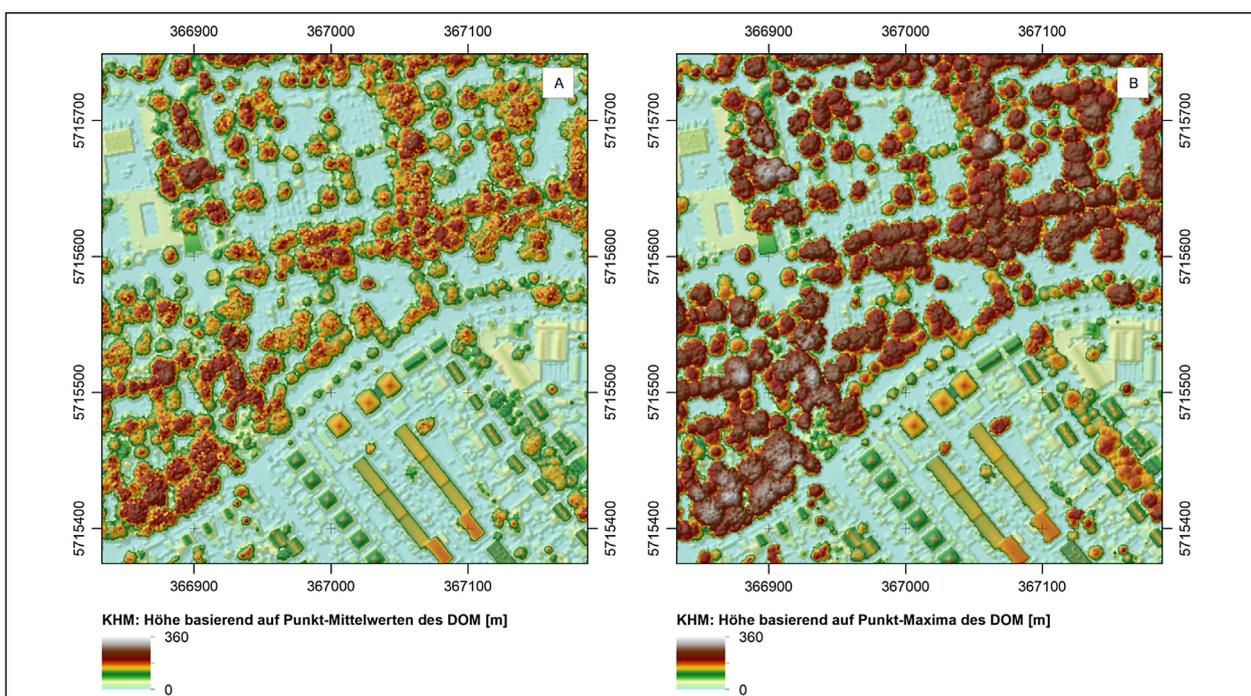


Bild 5-2: Kronenhöhenmodelle, 1 m Pixel. A: Generiert aus Punkt-Mittelwerten. B: Generiert aus Punkt-Maxima (erster Impuls).

der Literaturanalyse auch als Standard bei der Umwandlung von Punkt- in Rasterdatensätze herausgestellt hat, die Baumkronengeometrie besser abzubilden, als die Mittelwert-Version. Dies wird sowohl an den Rändern als auch bei der internen Struktur der Baumkronen deutlich. Insgesamt erscheinen die Baumkronen im KHM auf Basis des DOM_{MAX} gegenüber denen des KHM auf Grundlage des DOM_{MW} erheblich homogener und weniger gestört.

5.2.2 Binning vs. Triangulation

Ein weiterer Punkt bei der Erstellung der digitalen Oberflächenmodelle ist die generelle Art der Wertezuweisung bei der Umwandlung der Punkt- zu Rasterdaten sowie der Behandlung von Pixeln, für die keine Punktwerte zur Verfügung stehen.

Aufbauend auf den Möglichkeiten von Esri ArcGIS 10.5.1 existieren die folgenden Möglichkeiten:

- Binning (DOM_{BI})
- Triangulation (DOM_{TR})

Der Binning-Ansatz basiert dabei auf der direkten Wertezuweisung aller Punktwerte innerhalb einer Zelle, sodass entweder der Mittelwert oder das Maximum der innerhalb der Zelle befindlichen Punkte den Pixelwert bilden. Für Pixel, in denen keine Punkte vorhanden sind, wurden die Werte mithilfe

einer linearen Interpolation (Triangulation) ermittelt. Diese Methode wurde sowohl für das DOM_{MW} als auch das DOM_{MAX} angewandt.

Bei der Triangulation erhalten die Zellen ihre Werte durch Bildung eines triangulierten irregulären Netzes (TIN), wobei zusätzlich die Möglichkeit zur Optimierung der Berechnungszeiten besteht, indem die zu nutzenden Punktdaten mithilfe eines speziellen Algorithmus (sog. Window Size technique) ausgedünnt werden können. Die Leerräume, welche nicht durch Punkte belegt sind, werden analog der Binning-Methodik mithilfe einer linearen Interpolation ausgefüllt. Das DOM_{TR} wurde zu Vergleichszwecken ausschließlich für die Punkt-Maxima berechnet.

Bei dem optischen Vergleich der Ergebnisse beider Methoden (Bild 5-3) erscheint das Kronenhöhenmodell auf Basis des mittels Triangulation generierten Oberflächenmodells stärker geglättet. Zudem verlaufen die Ränder der Baumkronen etwas ruhiger und es existieren weniger Unebenheiten in den Baumkronen. Aus diesen Gründen ist zu erwarten, dass die DOM_{TR} -Version gegenüber dem DOM_{BI} insgesamt etwas weniger Punkte bzw. potenzielle Baumkronen ausweisen wird.

Weiterhin ist zu bemerken, dass für die Erstellung eines landesweiten DOM_{TR} aufgrund einiger technischer Fehler, vorrangig wegen ggf. zu hoher benö-

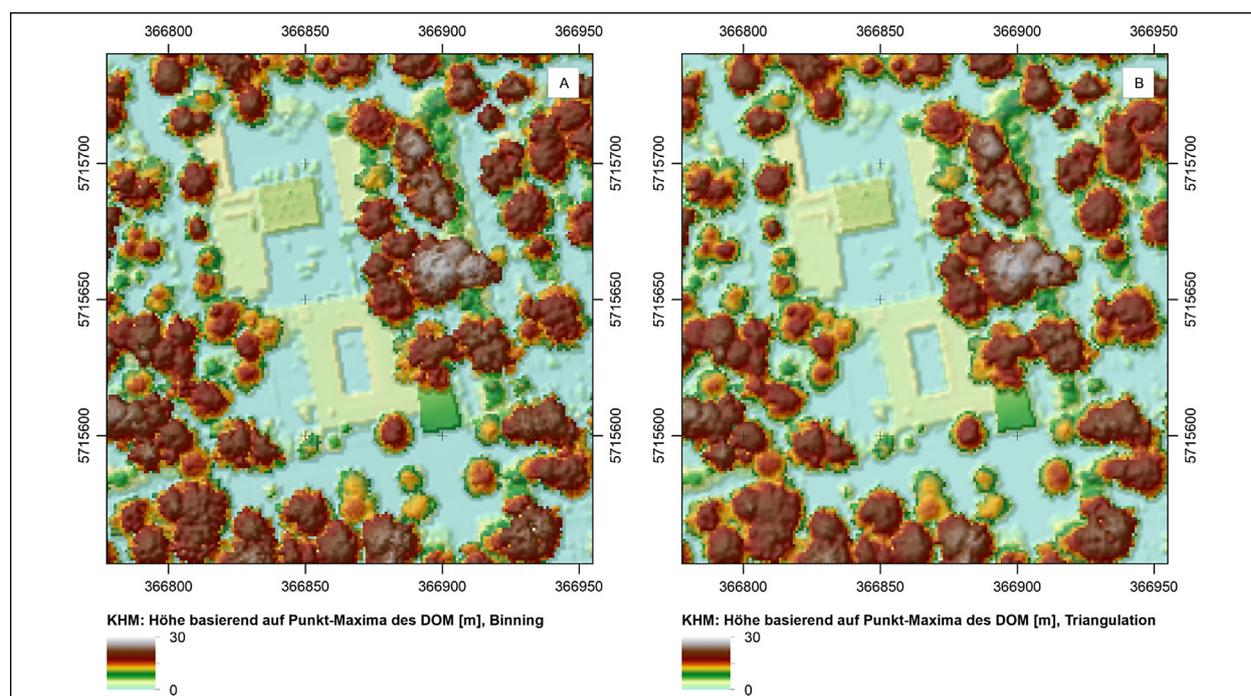


Bild 5-3: Kronenhöhenmodelle, 1 m Pixel. A: Binning-Ansatz. B: Triangulation.

tiger Ressourcen, mehrere Versuche notwendig waren, um ein entsprechendes DOM_{TR} zu erstellen. Eine Garantie zur fehlerfreien Anwendbarkeit im Sinne der zu entwickelnden ArcGIS-Toolbox ist daher infrage zu stellen. Der Binning-Ansatz konnte hingegen in mehreren landesweiten Testläufen fehlerfrei durchgeführt werden.

5.2.3 Ausreißerbehandlung

Zur weiteren Minimierung der Unebenheiten und besonders zur Vermeidung falscher lokaler Maxima bzw. Nebenmaxima im Kronenhöhenmodell wurde eine Ausreißerkorrektur (Bild 5-4) vorgenommen. Hierbei wurden alle Pixel auf den Medianwert der direkt angrenzenden Zellen gesetzt, wenn alle der folgend aufgeführten Bedingungen innerhalb einer 3x3 großen Nachbarschaft (9 Zellen) zutreffen:

- Pixelwert ist größer als der Höhenwert von 6 oder mehr direkt benachbarten Pixeln

- Höhendifferenz zu diesen Pixeln beträgt mindestens 2 m

Diese Korrektur wurde auf alle generierten Kronenhöhenmodelle angewandt.

Weiterhin wurde zu Testzwecken für die auf den Punkt-Maxima und der Binning-Methodik generierten Versionen eine Alternative berechnet, bei der die minimale Höhendifferenz von 2 m auf 0,1 m reduziert wurde. Ziel war zum einen die Untersuchung des Einflusses der Korrektur auf das Modellergebnis sowie zum anderen eine Reduzierung der Fehlklassifikationen (Errors of Commission).

5.2.4 Auflösung

Als weitere Einflussgröße auf das Modellergebnis wird die verwendete Auflösung gezählt. Um deren Wirkung auf die Erkennung potenzieller Baumkandidaten zu ermitteln, wurden insgesamt drei ver-

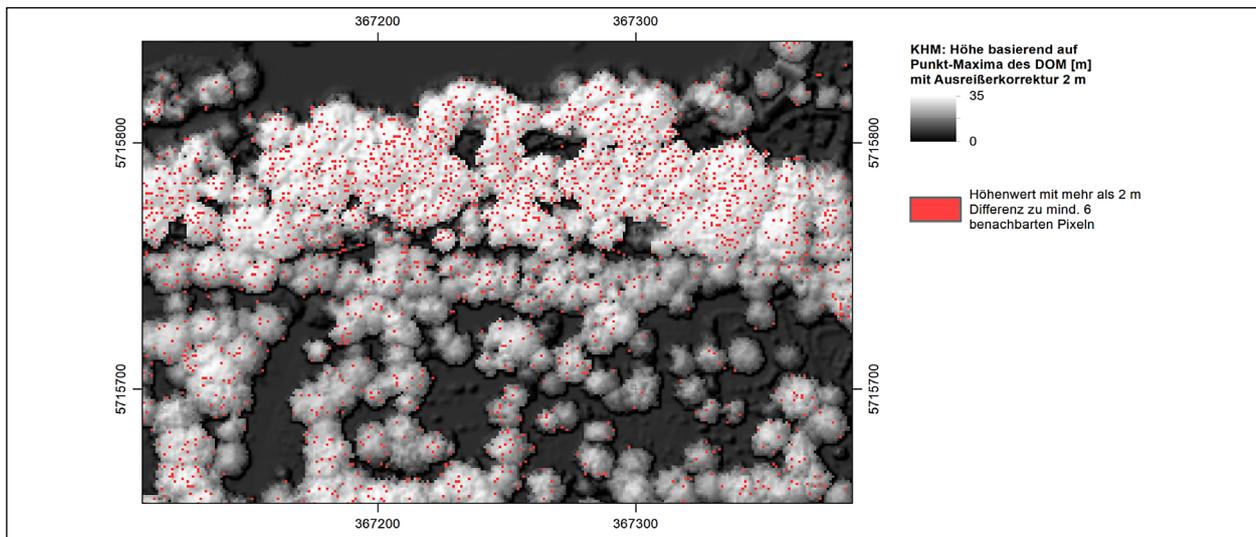


Bild 5-4: Kronenhöhenmodell und Pixel mit Höhendifferenzen größer als 2 m zu mindestens 6 anliegenden Zellen.

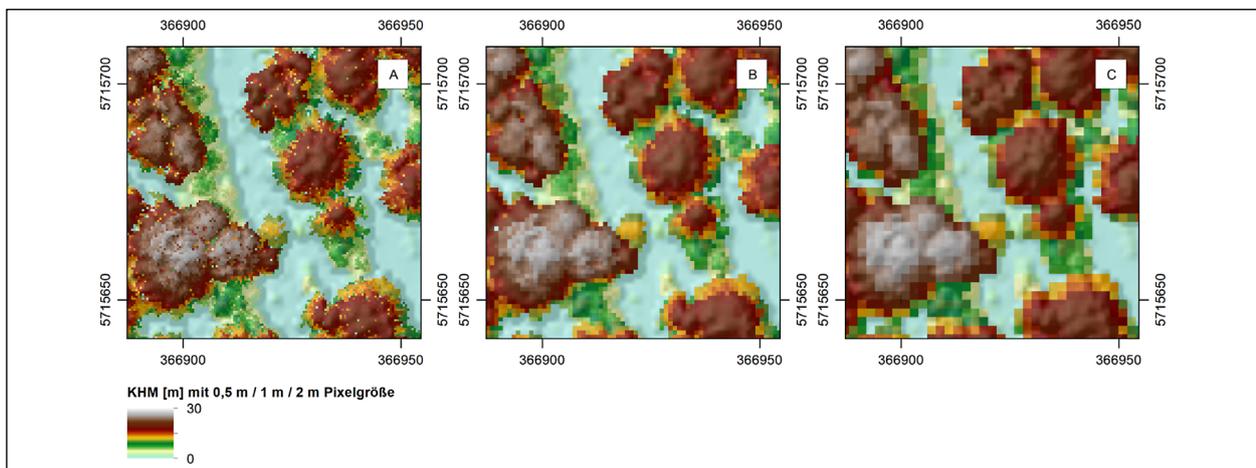


Bild 5-5: Kronenhöhenmodelle. A: 0,5 m Pixelgröße B: 1 m Pixelgröße, C: 2 m Pixelgröße.

schiedene Versionen mit 0,5 m, 1 m und 2 m Pixelgröße getestet (Bild 5-5).

Bei visueller Analyse der Datensätze mit verschiedenen Zellgrößen wird bereits deutlich, dass das Raster mit der höchsten Auflösung von 0,5 m erheblich mehr Unebenheiten, Pits oder Ausreißer aufweist als die beiden Datensätze mit größeren Pixeln. Dementsprechend sind für Modelle basierend auf diesem Datensatz auch eine höhere Anzahl an Nebenmaxima und somit potenzielle Baumkandidaten zu erwarten.

Grundsätzlich sind die Ausgangsdaten des digitalen Oberflächenmodells für Auflösungen ab 1 m ausgewiesen, sodass der Fokus auch auf dieser Pixelgröße liegt. Die Alternative mit 2 m Zellgröße erscheint angesichts der sehr glatten Höhenverläufe bereits an dieser Stelle ggf. etwas zu stark geglättet, weshalb hier die geringste Anzahl an Baumkandidaten zu erwarten ist. Weiterhin könnte diese Auflösungsversion besonders für Baumkandidaten mit geringen Kronendurchmessern, z. B. bei jungen Laub- oder generell Nadelbäumen, zu starken Unterschätzungen führen. Die Reduzierung der Auflösung von 0,5 m zu 1 m bzw. von 1 m zu 2 m besitzt bereits den Faktor 4 und von 0,5 m zu 2 m den Faktor 16.

5.3 Rauschfilterung

Für Reduzierung der durch Rauschen induzierten Maxima, welche ggf. zu Fehlklassifikationen führen können, wurden verschiedene Glättungsfilter mit unterschiedlichen Filtergrößen appliziert. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick der verwendeten Filter und Filtergrößen zur Rauschfilterung des Kronenhöhenmodells.

Die Auswahl erfolgte zum einen auf Grundlage der Literaturanalyse, zum anderen wurde die technische Umsetz- und Durchführbarkeit in ArcGIS inklusive Entwicklung der Toolbox berücksichtigt. Insgesamt wurden 8 verschiedene Filter für die Kronenhöhenmodelle mit 0,5 m, 1 m und 2 m getestet. Unter Beachtung der Filtergrößen 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 und in Kombination mit den unterschiedlichen Auflösungen stehen somit 54 einfach geglättete Kronenhöhenmodelle (initiale Glättungsstufe) zuzüglich 3 Versionen ohne Filter für die Entwicklung der Methodik zur Verfügung. Die Modelle der Feinabstimmung und weiterer Glättungsstufen sind dabei nicht inbegriffen. Bild 5-6 zeigt die Größenverhältnisse der Nachbarschaften in Bezug zum zentralen Pixel, dessen Wert unter Einbeziehung der umliegenden Pixel und der jeweiligen Filterart berechnet wird. Die Größe der in die Glättung einbezogenen Fläche reicht dabei von 2,25 m² für eine 3x3 Zellen umfassende Nachbarschaft mit 0,5 m Pixelgröße bis hin zu 324 m² für ein 9x9 großes Fenster mit 2 m Pixelgröße. Die Anzahl der zu erwartenden Baumkandidaten sollte bei gleicher Filterart mit zunehmender Größe der Nachbarschaft dementsprechend abnehmen.

Bild 5-7 stellt beispielhaft die Ergebnisse der angewandten Filter inklusive des Kronenhöhenmodells ohne Rauschfilter dar. Die Zuordnung der Kacheln ist Tabelle 5-1 zu entnehmen.

Im Vergleich zum unbehandelten Kronenhöhenmodell weisen alle gefilterten Raster bereits visuell erhebliche Unterschiede auf. Besonders deutlich sind die Änderungen von der kleinsten 3x3- zur größten verwendeten 9x9-Nachbarschaft, mit Ausnahme des Gauß-Filters (E3-E9), welcher hier nur einen geringen Effekt zeigen. Die Differenzen zwischen

Filterart	Kürzel	Nachbarschaft	Quelle	Bezeichnung in Bild 5-7	Auflösung		
					R05	R1	R2
Kein Filter	KHM	-	-	A	x	x	x
Lee	LEE	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	LEE [1980]	B3, B5, B7, B9	-	x	x
Lee (modifiziert)	LEEM	3x3, 5x5	LEE [1980]	C3, C5	-	x	x
Enhanced Lee	ELEE	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	LOPES et al. [1990]	D3, D5, D7, D9	x	x	x
Gauß	GF	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	DAVIES [1990]	E3, E5, E7, E9	x	x	x
Mittelwert	MEAN	3x3, 5x5	ESRI [2017]	F3, F5	x	x	x
Tiefpass	LPG	3x3	ESRI [2017]	G3	x	x	x
Tiefpass	UDKA	3x3	KAARTINEN et al. [2012]	H3	x	x	x
Tiefpass	UDLP	3x3, 5x5	ESRI [2017]	I3, I5	x	x	x

Tab. 5-1: Übersicht der verwendeten Filtertypen und Filtergrößen. Zellgrößen: R05: 0,5 m. R1: 1 m. R2: 2 m.

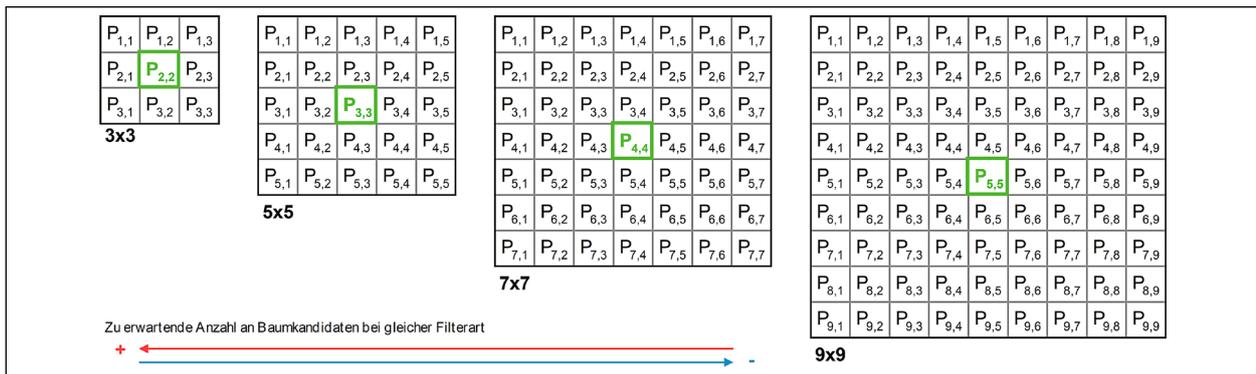


Bild 5-6: Darstellung der verwendeten Filtergrößen.

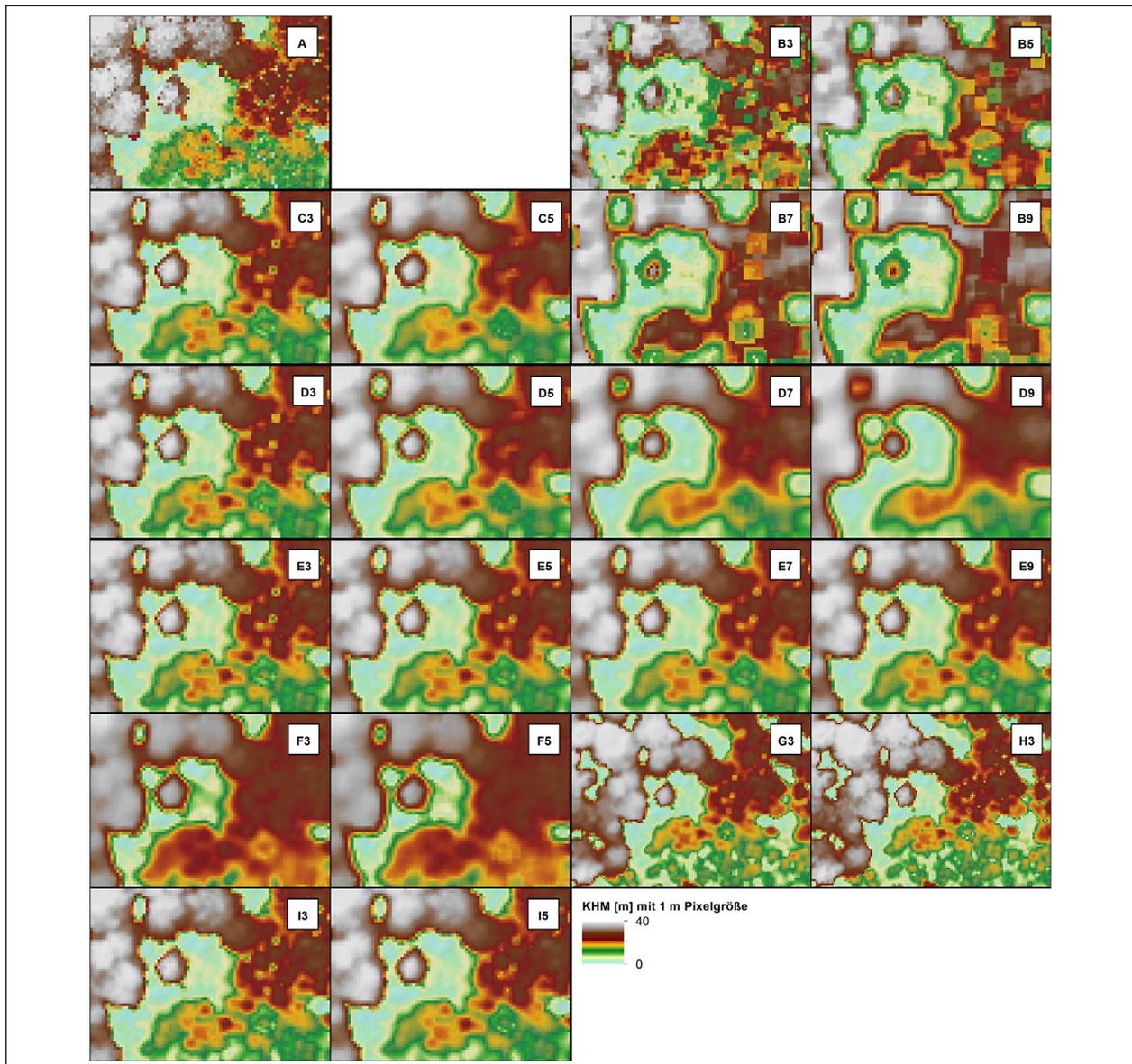


Bild 5-7: Kronenhöhenmodelle, geglättet mit verschiedenen Filtern und Filtergrößen.

den kleineren 3x3- und 5x5-Nachbarschaften sind visuell ebenfalls nicht sehr stark ausgeprägt.

Im Anschluss an die Auswertung der Ergebnisse wurden ausgewählte Modelle in einem weiteren

Durchlauf erneut einer Glättung unterzogen (zweite Glättungsstufe). Die Kombination verschiedener Filter und Filtergrößen hat dabei das Ziel, möglichst viele durch Rauschen verursachte Fehlklassifikationen direkt zu eliminieren und insbesondere in

Baumkronen mit großem Umfang die Nebenmaxima zu reduzieren. Bei der Auswahl der Modelle wurde auf folgende Kriterien geachtet:

- Hohe Erkennungsrate der Modelle beim Abgleich mit bekannten Bäumen
- Generelle Sensitivität: Baumkandidatenanzahl als Indiz für Effektivität des Rauschfilters

Hauptkriterien für die Wahl der Filter in der zweiten Glättungsstufe waren zum einen die allgemeine Performance des Filters sowie die Anzahl der Punkte je wiedererkannten Baum bzw. die Gesamtanzahl der ausgewiesenen Baumkandidaten. Die Modelle und Filter beschränken sich bis auf wenige Ausnahmen auf die Versionen mit 1 m Pixelgröße. Um zu untersuchen, wieviel Einfluss verschiedene Glättungsstufen und Filter auf die Einzelbaumer-

kennung besitzen, wurde zusätzlich eine dritte Filterstufe getestet.

Bild 5-8 verdeutlicht am Beispiel des Kronenhöhenmodells mit den Filtern UDKA 3x3 (einfache, initiale Filterung, Bild 5-8A) und der Dreifachkombination aus UDKA 3x3, LEE 3x3 sowie GF 5x5 (Bild 5-8B) die deutlich erkennbaren Unterschiede der mehrfachen Anwendung von Rauschfiltern. Zusätzlich wird dieser Eindruck durch die jeweils in den unteren Bildhälften abgebildeten und aus den Modellen erhaltenen Baumkandidaten gestützt, deren Anzahl mit zunehmender Filterstufe sichtbar abnimmt. Sowohl der genutzte Tiefpass- als auch der verwendete Gauß-Filter verzerren die realen Höhen des Ausgangsdatensatzes, sodass für die Höhenangabe zur Orientierung das ungefilterte Kronenhöhenmodell dient.

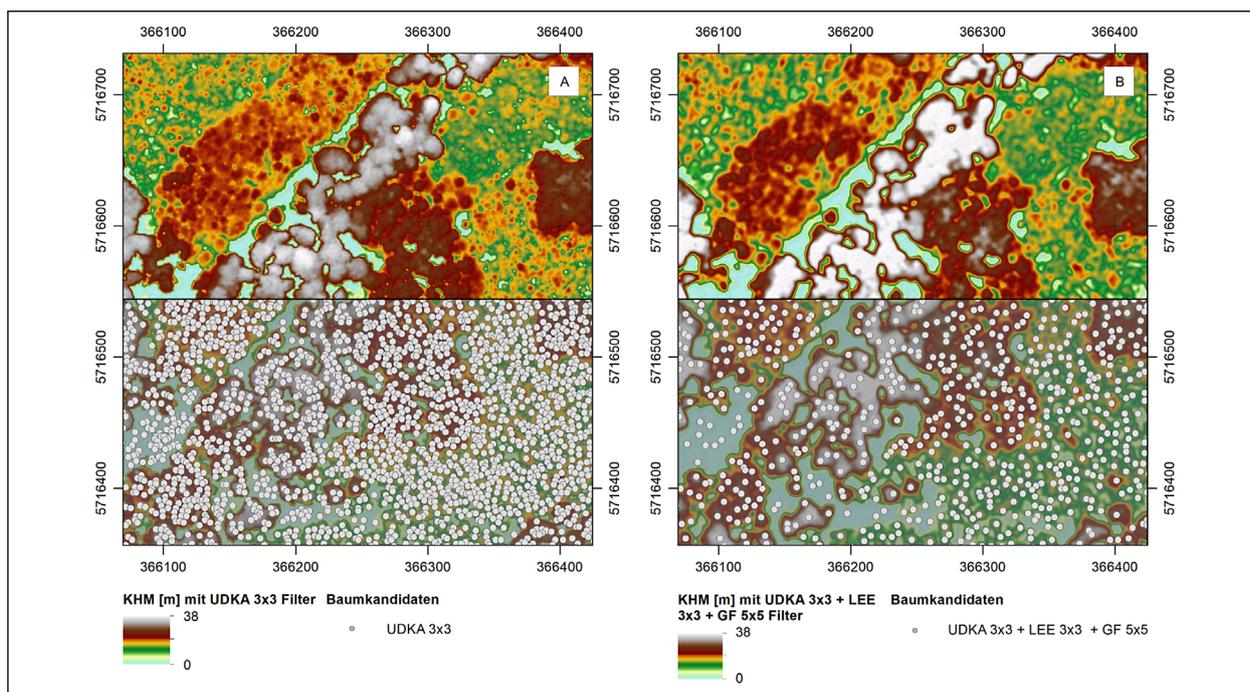


Bild 5-8: KHM-Filterstufen. A: Initiale Stufe. B: Dreifachfilterung. Höhendarstellung auf Basis des ungefilterten KHM.

Filterart	Filter Stufe 1	Nachbarschaft	Filter Stufe 2			Filter Stufe 3		
			LEE 3x3	GF 3x3	GF 5x5	LEE 3x3	GF 3x3	GF 5x5
Lee	LEE	3x3	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²
Lee (modifiziert)	LEEM	3x3	-	x	x	-	-	-
Lee (modifiziert)	LEEM	5x5	-	x	-	-	-	-
Gauß	GF	3x3	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²
Gauß	GF	5x5	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²
Tiefpass	UDKA	3x3	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²
Tiefpass	UDLP	3x3	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²
Tiefpass	UDLP	5x5	x	x ¹	x ²	-	x ¹	x ²

Tab. 5-2: Modelle der Filterstufen 2 und 3. Markierungen x¹/x² entsprechen der Kombination für Stufe 3.

Tabelle 5-2 stellt die Modelle der weiteren Glättungsstufen gegenüber. Für die einfache Kombination zweier Filter steht jeweils ein Kreuz (x). Zur Kombination von drei Filtern entsprechen x^1 bzw. x^2 dem gleichen Modell, wie z. B.: Stufe 1 mit LEE 3x3, Stufe 2 mit LEE 3x3 + GF 3x3 (x) und Stufe 3 mit LEE 3x3 + GF 3x3 (x^1) + GF 3x3 (x^1) oder LEE 3x3 + GF 5x5 (x^2) + GF 5x5 (x^2).

5.4 Krümmungsparameter

Neben den verschiedenen Glättungsversionen wurde auf Grundlage jedes Kronenhöhenmodells der initialen Filterstufe mit der Auflösung von 1 m (R1) und 2 m (R2) die minimale Krümmung nach SHARY et al. [2002] berechnet. Die minimale Krümmung ist auf den Wertebereich [-1,1] beschränkt und kann als Alternative zum Kronenhöhenmodell für den Erhalt der Baumkandidaten dienen. Der Grundgedanke dieses Ansatzes ist, dass sich der maximale Wert jeweils am Top der Baumkrone befindet und die kleinsten Werte praktisch die einzelnen Individuen voneinander abgrenzen. Die sich hieraus ergebenden Flächen bzw. Zellen einer einzelnen Struktur sind dabei jedoch etwas größer als der Umfang der Baumkronen, welcher im Kronenhöhenmodell abgebildet wird (Vergleich Bild 5-9A und Bild 5-9B).

Die Auswahl des Parameters erfolgte durch die Berechnung und die visuelle Einschätzung verschiedener Oberflächenableitungen, vornehmlich Krüm-

mungsparameter, aus der Publikation von SHARY [2002]. Zudem fand der gewählte Parameter in diesem Bezug bereits in KAARTINEN et al. [2012] Erwähnung.

5.5 Erkennung der Baumkronen

Zur Lokalisierung der Baumkandidaten auf Basis eines Kronenhöhenmodells wird klassischer Weise (siehe Kapitel 2) ein Verfahren zur Findung des lokalen Maximums in einer definierten Nachbarschaft verwendet. In ArcGIS kann dies mithilfe der Focal Statistic-Werkzeuge realisiert werden, wobei für die Methodikentwicklung eine 3x3 sowie eine 5x5 Zellen umfassende Nachbarschaft gewählt wurde. Bei diesem Ansatz wird geprüft, ob der Wert des Pixels im Zentrum des Fensters im Vergleich zu den anderen in der Nachbarschaft befindlichen Zellen der höchste Wert ist – oder nicht. Entspricht der Wert dem Maximum, wird das Pixel als Baumkandidat ausgewiesen. Befinden sich innerhalb der Nachbarschaft zwei oder mehr Zellen mit dem Maximalwert, werden alle Maxima-Zellen ausgewiesen.

Weiterhin wurde ein alternativer Ansatz zur Lokalisierung der Baumkronenmaxima getestet, welcher darauf beruht, den Fluss aller Pixel in Relation zur zentralen Zelle zu untersuchen. Der Fluss wird definiert als jedes Pixel, welches innerhalb der direkten 3x3-Nachbarschaft eine höhere Position besitzt als die untersuchte (zentrale) Zelle. Die Anwendung

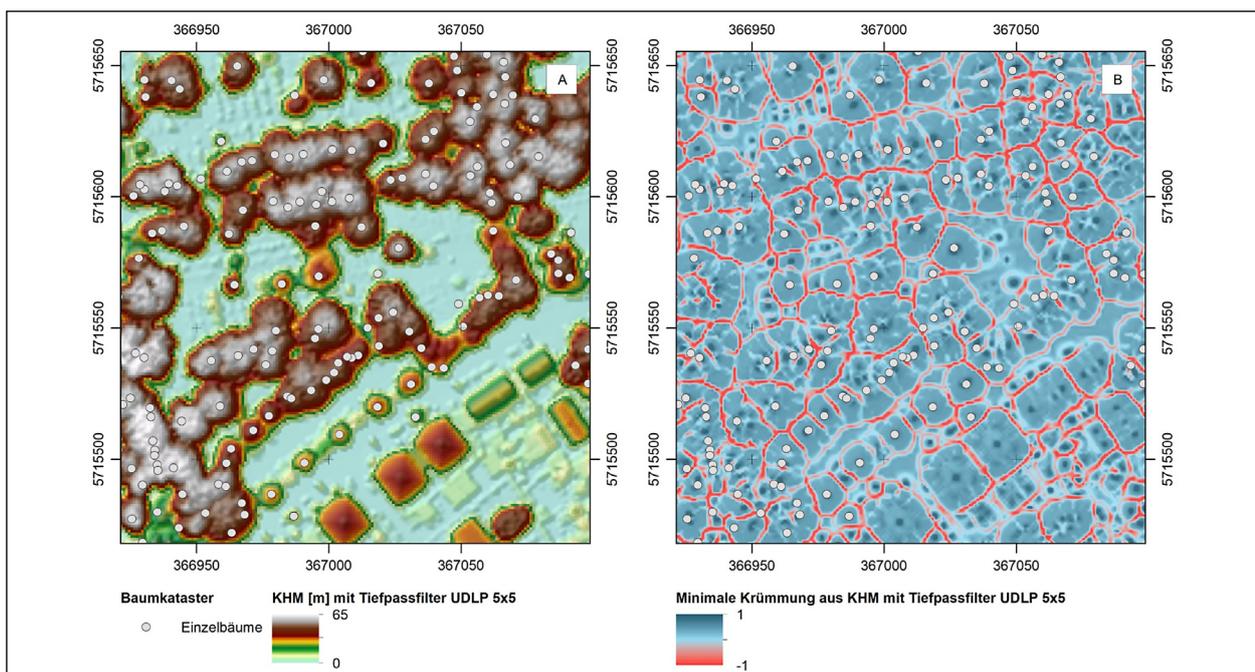


Bild 5-9: KHM und Krümmungsparameter. A: Kronenhöhenmodell. B: Minimale Krümmung auf Basis von A.

dieses Algorithmus kann mithilfe des ArcGIS-Werkzeuges Focal Flow durchgeführt werden, welches jedoch nur Nachbarschaften mit 9 Zellen (3x3) unterstützt. Ein Baumkandidat wird nur dann ausgewiesen, wenn alle umgebenden Pixel eine höhere Lage besitzen als das Zentrumspixel. Um dies zu realisieren, wird das Kronenhöhenmodell im Vorfeld invertiert, sodass die höchste Position der Baumkrone zur niedrigsten umgewandelt wird und ein Fluss stattfinden kann. Die Berechnung des Flusses mehrerer benachbarter Zellen wird innerhalb ArcGIS durch eine lageabhängige binäre Kodierung verwirklicht, bei der jede umliegende Zelle abhängig von ihrer relativen Position zum Zentrum einen spezifischen Wert erhält, wenn ein Fluss stattfindet. Nach dem Vergleich aller 8 angrenzenden Zellen mit der zu untersuchenden Zelle wird abschließend die Summe gebildet und dem zentralen Pixel als Wert zugewiesen. Beträgt dieser Wert 255, gilt die Zelle als Baumkandidat.

Beide Ansätze sind sowohl mit dem Kronenhöhenmodell als auch mit dem abgeleiteten Krümmungsparameter durchführbar. Ein ausgewiesener Baumkandidat ist stets identisch mit der Lage eines Pixels.

Zusätzlich zu den beiden Herangehensweisen für die Ermittlung der lokalen Maxima wurde ein Klassifikationsverfahren getestet, welches ausschließlich auf dem vom Kronenhöhenmodell abgeleiteten Krümmungsparameter beruht und in ArcGIS mithilfe des ISO-Cluster-Classifier-Werkzeugs durchgeführt werden kann. Unter der Annahme, dass die Baumkronen am Top geringer gewölbt sind als in den anderen Bereichen der Baumkrone, können hiermit nach Angabe verschiedener Parameter (z. B. Anzahl der gewünschten Klassen oder minimale Dis-

tanz zwischen den Clustern) automatisch Klassen gebildet werden, die anschließend als Baumkronenmaximum, gesamte Kronenfläche oder Grenze zwischen einzelnen Individuen interpretiert werden können. Die Baumkandidaten werden hierbei jedoch im Ergebnis nicht durch ein einzelnes Pixel, sondern durch kleine Flächen einer bestimmten Klasse repräsentiert.

Bild 5-10 stellt die Funktionsweisen der drei Ansätze nochmals grafisch gegenüber.

Die Auswirkungen einer möglichen Nachbearbeitung identifizierter potenzieller Bäume zeigt sich bei Betrachtung der Ergebnisse in Bezug auf mögliche Fehlerquellen, wie z. B. Hochspannungsleitungen, welche im digitalen Geländemodell und somit auch im Kronenhöhenmodell stark ausgeprägt abgebildet werden (Bild 5-11). An dieser Stelle wird deutlich, dass die Verfahren auf Basis der Suche nach den lokalen Maxima gegenüber der Klassifizierungsmethode erheblich anfälliger für ungewünschte Fehlklassifikationen sind. Jedes Pixel, welches als Baumkandidat identifiziert wurde, muss in der Nachbearbeitung durch die Filterung mit dem Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) oder einer Mindestbaumhöhe dementsprechend auch gleichbehandelt werden. Zudem funktioniert eine Korrektur mittels NDVI nur effektiv für vegetationslose Flächen. Da Hochspannungs- oder Stromleitungen jedoch auch über bewachsene Flächen wie Wiesen, Wald oder Felder verlaufen, kann dieser Ansatz lediglich eine Hilfe, aber keine alleinige Lösung zur Eliminierung dieser Fehlansweisungen sein.

Die mittels Klassifikationsmethodik erhaltenen Flächen können demgegenüber zusammengefasst und mithilfe einer Mindestflächengröße zusätzlich

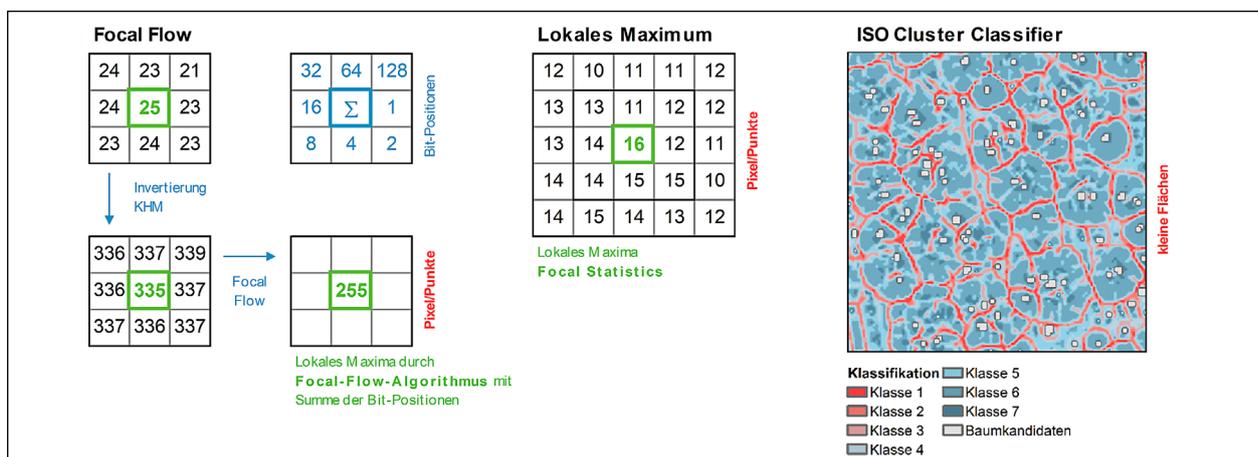


Bild 5-10: Ansätze zur Ermittlung der Lage potenzieller Baumkronen von Einzelbäumen

gefiltert werden, bevor die Umwandlung auf Basis der Ermittlung des Flächenschwerpunktes in einen einzelnen Baumkandidaten erfolgt. Da die Seile der Hochspannungsleitungen bei der ISO-Cluster-Klassifikation in der Regel nur als sehr kleine Flächen ausgegeben werden, kann auf diese Weise ein Großteil der hierauf beruhenden Fehlklassifikationen herausgerechnet werden. Diese Möglichkeit erscheint weitaus eleganter als die nachträgliche Bearbeitung der Ergebnisse mit zusätzlichen Vektordaten, da auch hier eine möglichst große Übereinstimmung zwischen Raster- und Vektordaten vorhanden sowie die jeweilige Breite der Strukturen bekannt sein muss, um die falschen Baumkandidaten zu filtern. Dieselbe Sensitivität konnte auch bei kleineren Strukturen, wie z. B. Hecken oder Buschreihen, beobachtet werden. Diese treten in den finalen Ergebnissen der Modelle mit ISO-Cluster-Classifizier-Algorithmus an den gleichen Stellen nicht bzw. weitaus geringfügiger auf.

Der Klassifizierungsansatz wurde erst im Verlauf der Feinabstimmung hinzugezogen und ist daher kein Bestandteil der konzeptionellen Modelle.

5.6 Objektbildung und Reduzierung von Mehrfachklassifikationen

Die Nutzung von Objekten bzw. Segmenten dient als unabhängiger und im Prinzip finaler Schritt zur Reduzierung von Fehlklassifikationen, die auf Nebenmaxima innerhalb der Baumkronen beruhen und welche die Anzahl der Baumkandidaten ggf.

beträchtlich erhöhen können. Für die Verringerung der durch Nebenmaxima hervorgerufenen Baumkandidatenanzahl können entweder Flächen mit vordefinierter, fester Größe genutzt (starres Gitter bzw. pseudo-Objekte) oder formabhängige (dynamische), mithilfe der minimalen Krümmung abgeleitete Segmente, verwendet werden. Durch die Einbeziehung von Objekten wird dabei nicht direkt die Empfindlichkeit des Modells verringert, sondern die mehrfach innerhalb der Fläche eines Objektes auftretenden Punkte werden so reduziert, dass nur der Punkt mit dem höchsten Wert aus dem Kronenhöhenmodell erhalten bleibt. Bild 5-12 stellt die drei unterschiedlichen Ansätze gegenüber. Für die Darstellung wurden zusätzlich die vorhandenen Baumkataster genutzt: Objekte, in denen sich ein kartierter Baum befindet, sind farblich hervorgehoben. Bezüglich der dynamischen Ansätze ist zu beobachten, dass das Verfahren mittels Segment Mean Shift häufig kleinere und im Bezug zur Baumkronengeometrie teils auch unplausible Flächen generiert.

Die von der Baumkronengeometrie unabhängigen Objekte werden dabei mithilfe eines Gitternetzes erstellt, wobei für die Methodikentwicklung Größen von 5x5 m, 7x7 m, 9x9 m getestet wurden. Für die Bildung der dynamischen Objekte wurden zwei in ArcGIS realisierbare Ansätze untersucht (Bild 5-12 C, D):

- Segmentierung mittels Segment-Mean-Shift-Funktion
- Nutzung des ISO-Cluster-Classifizier-Algorithmus

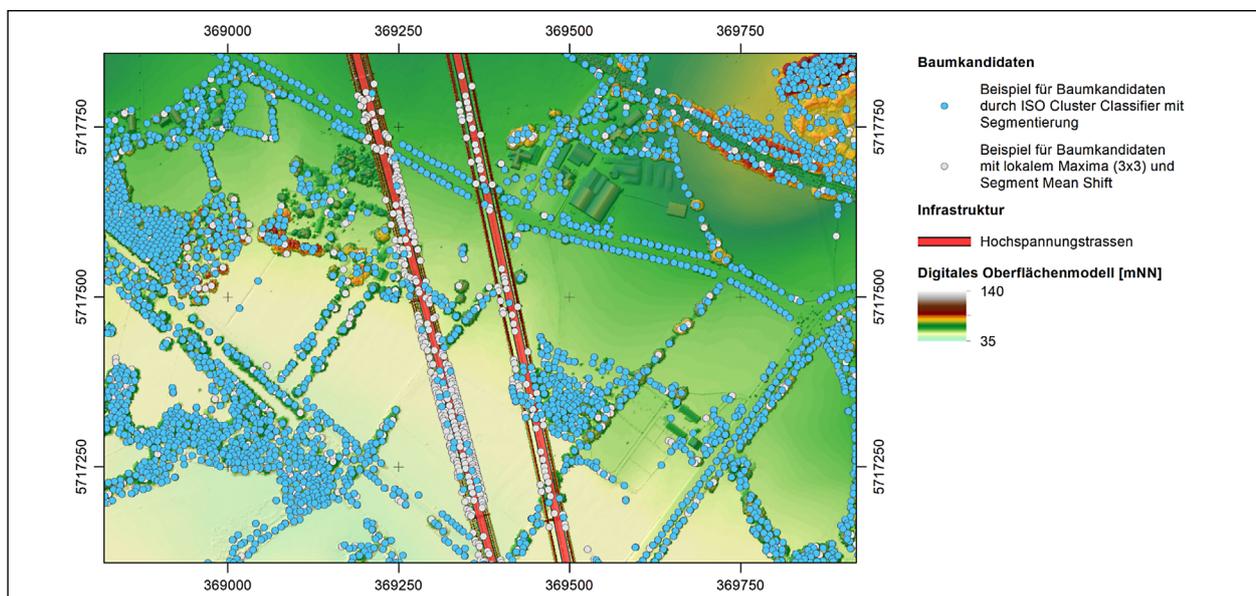


Bild 5-11: Beispiel der Ansätze mit Bezug zu möglichen Fehlerquellen, wie z. B. Hochspannungsleitungen.

Beide Varianten basieren auf der minimalen Krümmung, wobei zunächst ein Tiefpassfilter auf das Kronenhöhenmodell angewandt und erst danach der Krümmungsparameter berechnet wurde. Anschließend wurde der erhaltene Datensatz nochmals mit einem Gauß-Filter geglättet. Das Ergebnis beider Ansätze sind entsprechende Flächen, welche die Baumkronengeometrie möglichst präzise abbilden sollen. Trotz der beiden Glättungsstufen ist diesbezüglich mit Unschärfen zu rechnen, insbesondere bei Baumgruppen oder Waldstücken mit engstehenden Individuen und ineinander überge-

henden Baumkronen. Für freistehende Einzelbäume scheinen die Methoden besser geeignet.

Bild 5-13 zeigt exemplarisch die Ergebnisse vor und nach der Reduzierung der Baumkandidaten.

5.7 Extraktion vegetationsloser Oberflächen

Unter den mithilfe der verschiedenen Modelle erhaltenen Baumkandidaten befindet sich eine Vielzahl

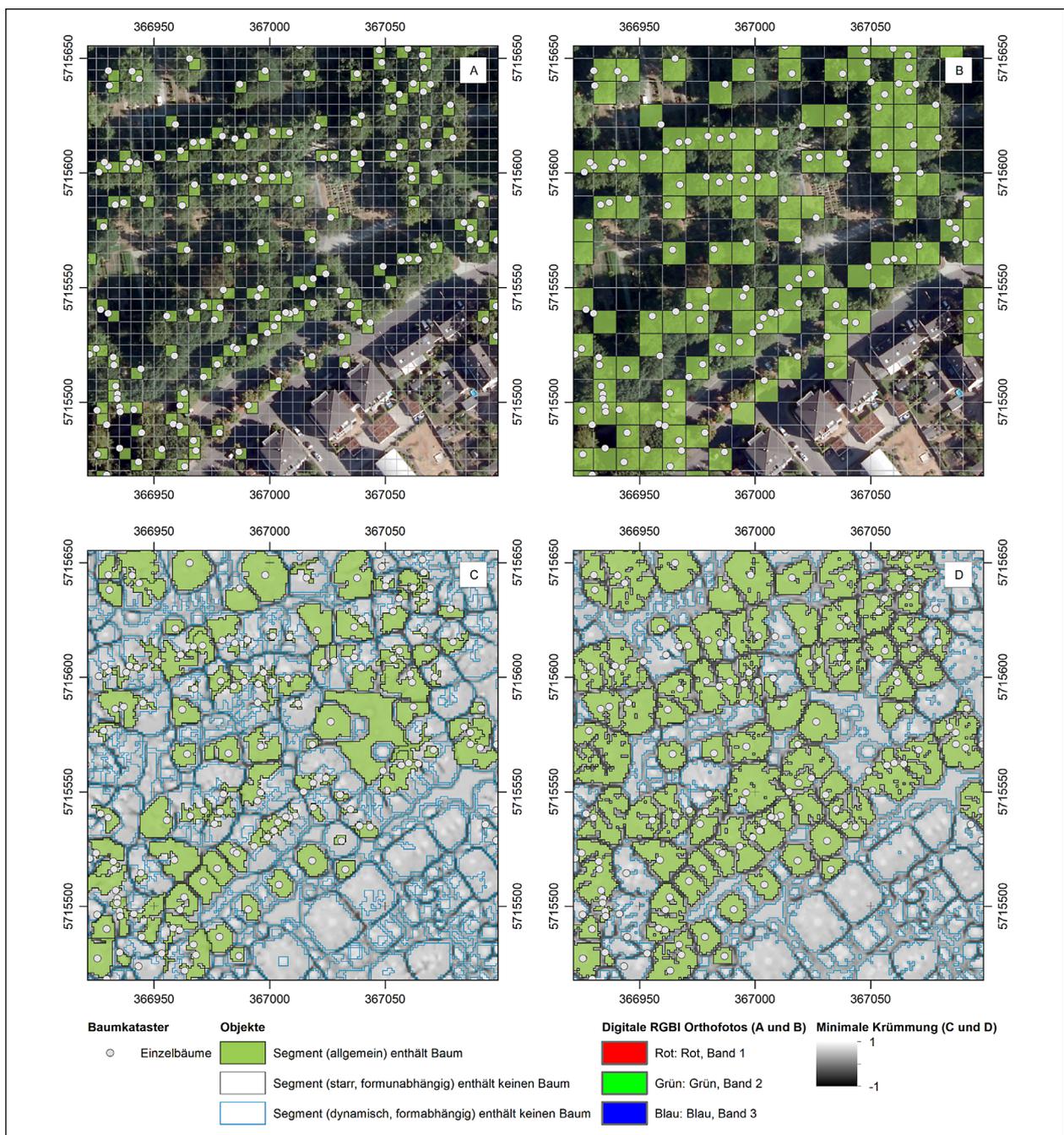


Bild 5-12: Objektbildung. A, B: 5x5 m und 9x9 m Zellen. C, D: Dynamisch: Segment Mean Shift und ISO Cluster Classifier.

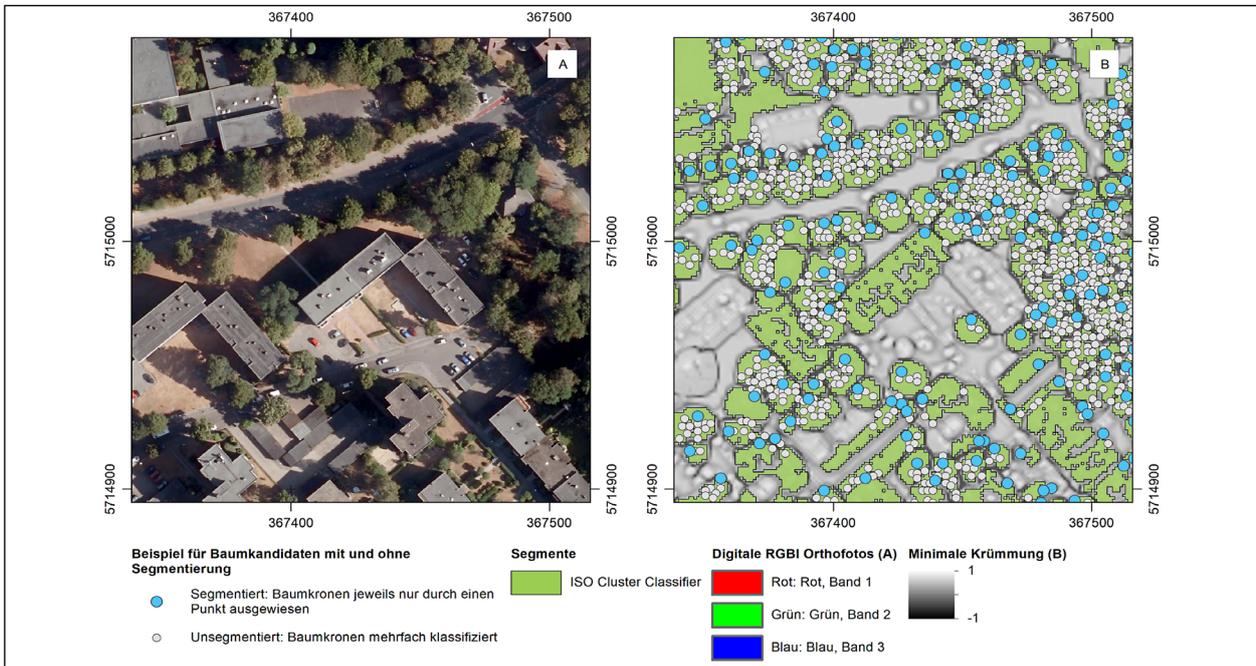


Bild 5-13: Auswirkungen der Segmentierung auf die Mehrfachklassifikationen und Anzahl Baumkandidaten.

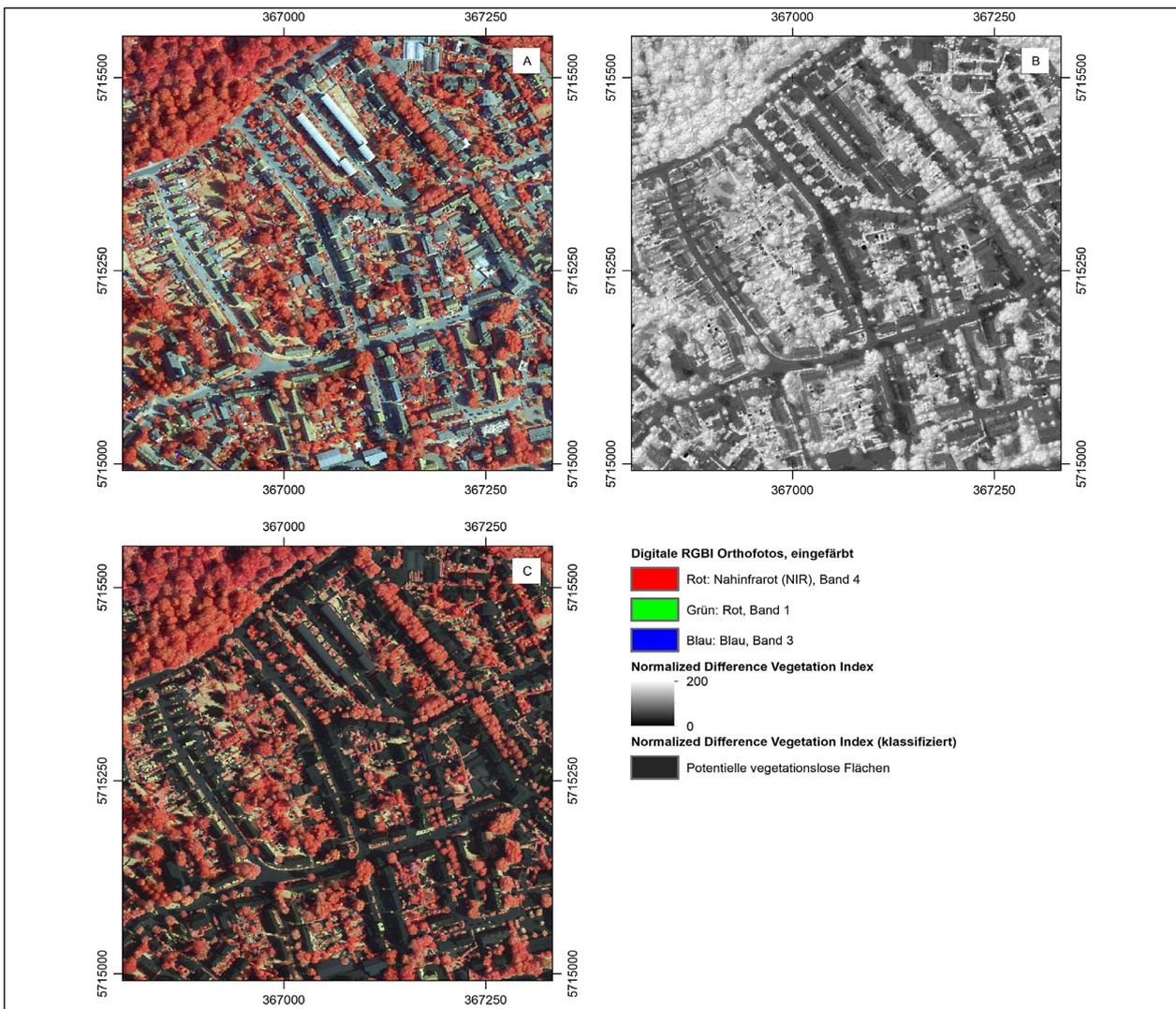


Bild 5-14: Vegetationslose Oberflächen. A: Falschfarben-DOP. B: NDVI. C: Überlagerung von A mit NDVI (klassifiziert).

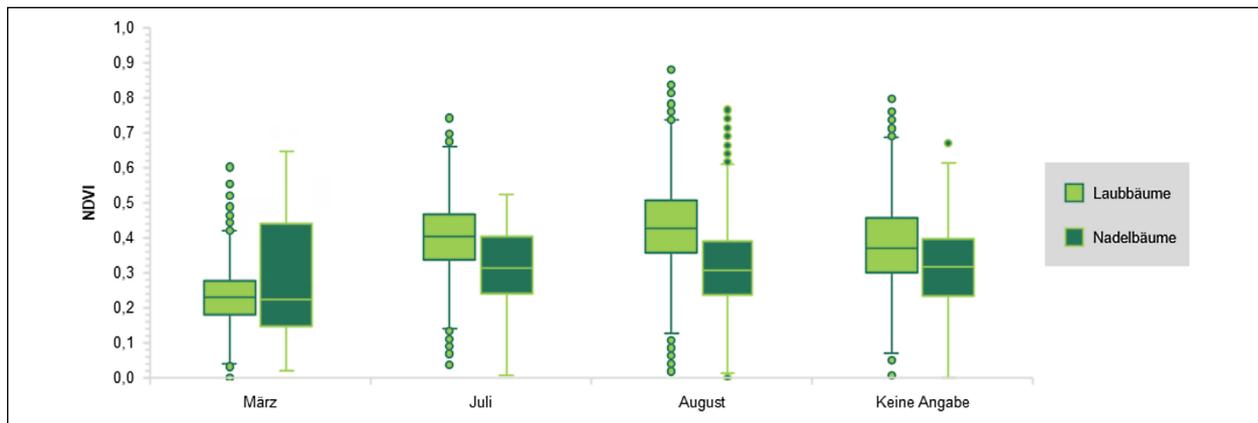


Bild 5-15: NDVI für 36.588 Laub- und 6.582 Nadelbäume nach Aufnahmemonaten der digitalen Orthofotos.

von Punkten, die auf vegetationslosen Flächen lokalisiert sind (z. B. Bauwerke oder Fahrzeuge). Zur Minimierung der Anzahl dieser Punkte wird der bereits in Kapitel 4.3 eingeführte Normalized Difference Vegetation Index auf Basis der RGBI-Orthofotos genutzt (Bild 5-14). Hierbei können durch das Setzen eines festgelegten Grenzwertes die Punkte auf Flächen, die kein oder nur wenig Grün enthalten, herausgefiltert werden. Die allgemeine Interpretation hierfür ist, dass diese Bereiche aufgrund des fehlenden Grüns keine Vegetation aufweisen. Deshalb sind für diese Herangehensweise zwangsläufig Daten aus den Monaten, in denen die Bäume ein möglichst vollständiges Blattwerk entwickelt haben, notwendig.

Grundsätzlich gilt hierbei zu beachten, dass der Wert nicht zu hoch sein sollte, da ansonsten zu wenig Punkte gefiltert werden. Ist der Wert zu niedrig, werden zu viele Baumkandidaten aus dem Datensatz entfernt. Zudem ist davon auszugehen, dass eine nicht quantifizierbare Anzahl von Baumkandidaten trotz falscher Lage in den Daten verbleibt, da auch grüne künstliche Oberflächen existieren. Bild 5-14 verdeutlicht nochmals die Funktionsweise dieses Ansatzes.

Die Ermittlung des entsprechenden Grenzwertes zur Trennung potenziell vegetationsloser von bewachsenen Flächen beruht dabei vornehmlich auf der Analyse der verfügbaren Bäume in den Baumkatastern (Bild 5-15) sowie Ergebnissen der gesichteten Literatur. Bei Ansicht der Daten ist zu erkennen, dass die Nadelbäume gegenüber den Laubbäumen insgesamt einen etwas niedrigeren Wert besitzen, Ausnahme ist der Monat März mit einer sehr hohen Spannweite des NDVI. Für die restlichen Monate ist der Index in Bezug auf die Nadelhölzer relativ konstant. In Hinblick auf die Laubbäu-

me sind die recht niedrigen Werte damit zu erklären, dass das Blattwerk zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht oder nicht vollständig ausgebildet war, worauf auch einige der Ausreißer zurückgeführt werden können. Die unteren Ausreißer in den Sommermonaten können darüber hinaus z. B. auch als Folge auftretender Trockenperioden interpretiert werden (z. B. August 2018). Auf Grund dieser Erkenntnisse ist für den NDVI zur Unterscheidung vegetationsloser Flächen und Bereichen mit Vegetation ein Grenzwert zwischen 0,1 und 0,2 zu empfehlen.

5.8 Modellübersicht

5.8.1 Konzeptionelle Modelle

Die konzeptionellen Modelle sind praktisch die Vorstufe der Methodikentwicklung, in welcher zunächst nach dem Trial-and-Error-Prinzip möglichst viele Modellkombinationen berechnet und ausgewertet werden. Im Anschluss daran erfolgt dann der Teil zur Feinabstimmung und Anpassung ausgewählter Ansätze. Für die Berechnung wurden die Kronenhöhenmodelle (KHM_{MW} und KHM_{MAX}) sowie die daraus abgeleitete minimale Krümmung (MIK_{MW} sowie MIK_{MAX}) in den Auflösungen 0,5 m (R05), 1 m (R1) und 2 m (R2) mit den unterschiedlichen Filtern, Filtergrößen, Filterstufen und Methoden zur Ermittlung der lokalen Maxima kombiniert. Die Objektbildung und der Klassifikationsansatz mittels ISO Cluster Classifier zur Erkennung der Baumkronen sind noch nicht Bestandteil dieses Schrittes. Der Vergleich zwischen R05 und R1 wurde mit der Fläche aus Testdatensatz A, der zwischen R1 und R2 mit der Fläche aus Testdatensatz B durchgeführt (siehe Kapitel 6.2). Tabelle 5-3 listet die Modellkombinationen für die erste Glättungsstufe auf. Somit

Filterart	Kürzel	Nachbarschaften	Auflösung und Erkennungsmethodik											
			R05 (A)			R1 (A)			R1 (B)			R2 (B)		
			FF	LM3	LM5	FF	LM3	LM5	FF	LM3	LM5	FF	LM3	LM5
Kein Filter	KHM	-	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Lee	LEE	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Enhanced Lee	ELEE	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gauß	GF	3x3, 5x5, 7x7, 9x9	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mean	MEAN	3x3, 5x5	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tiefpass	LPG	3x3	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tiefpass	UDKA	3x3	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tiefpass	UDLP	3x3, 5x5	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anzahl mit Berücksichtigung der MW/MAX-Versionen			KHM (120) + MIK (30)						KHM (228) + MIK (228)					

Tab. 5-3: Konzeptionelle Modelle der ersten Glättungsstufe. Berechnung jeweils für KHM_{MW}/KHM_{MAX} - und MIK_{MW}/MIK_{MAX} -Versionen. FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). Grau hinterlegte Zellen ohne MIK-Versionen.

Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 1	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 2	KHM						MIK					
		FF		LM3		LM5		FF		LM3		LM5	
		MW	MAX										
LEE 3x3	LEE 3x3	-	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x
GF 3x3	LEE 3x3	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-
GF 5x5	LEE 3x3	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-
UDKA 3x3	LEE 3x3	x	-	x	-	x	-	-	x	-	x	-	x
UDLP 3x3	LEE 3x3	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x
UDLP 5x5	LEE 3x3	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x
LEE 3x3	GF 3x3	-	-	-	x	-	x	-	-	x	x	x	x
GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
GF 5x5	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
UDKA 3x3	GF 3x3	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 5x5	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
LEE 3x3	GF 5x5	-	-	-	x	-	x	-	-	x	x	x	x
GF 3x3	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
UDKA 3x3	GF 5x5	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 3x3	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
Anzahl		14						53					

Tab. 5-4: Modelle der zweiten Glättungsstufe. Gefüllte Zellen mit 2 m-Version (R2). FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.

wurden 150 Modelle für Testgebiet A und 456 Modelle für Gebiet B berechnet.

Nachfolgend wurden aus dem bestehenden Pool einige vielversprechende Modelle ausgewählt und einer weiteren Glättung (zweite Stufe) unterzogen. Die Berechnungen wurden ausschließlich mit der

Fläche von Testgebiet B und 1 m Zellgröße (R1) durchgeführt, womit sich insgesamt 67 weitere Modelle für Glättungsstufe 2 ergeben (Tabelle 5-4).

Um zu untersuchen, wieviel Einfluss verschiedene Glättungsstufen und Filter auf die Einzelbaumerkennung besitzen, wurden darüber hinaus 36 zu-

Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 1	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 2	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 3	KHM						MIK					
			FF		LM3		LM5		FF		LM3		LM5	
			MW	MAX										
LEE 3x3	GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	x	-	x	-	-	x	x	x	x
GF 3x3	GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
GF 5x5	GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
UDKA 3x3	GF 3x3	GF 3x3	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 3x3	GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 5x5	GF 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
LEE 3x3	GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	x	-	x	-	-	x	x	x	x
GF 3x3	GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
GF 5x5	GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-
UDKA 3x3	GF 5x5	GF 5x5	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 3x3	GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
UDLP 5x5	GF 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
Anzahl			8						28					

Tab. 5-5: Modelle der dritten Glättungsstufe, ausschließlich für Testdatensatz B. FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.

Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 1	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 2	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 3	KHM						MIK					
			FF		LM3		LM5		FF		LM3		LM5	
			MW	MAX										
LEE 3x3	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
LEE 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
LEE 3x3	GF 5x5	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
LEE 3x3	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
LEE 3x3	LEE 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
UDLP 5x5	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
UDLP 5x5	LEE 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
UDLP 5x5	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
UDLP 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x

Tab. 5-6: Erste Auswahl der Modelle zur Feinabstimmung. Gefüllte Zellen mit 2 m-Version (R2). FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.

sätzliche Modelle der Stufe 2 einem weiteren Durchlauf unterzogen (Glättungsstufe 3, Tabelle 5-5).

5.8.2 Modelle zur Feinabstimmung

Zur weiteren Bearbeitung wurden entsprechend den Kriterien

- Erkennungsrate der Modelle beim Abgleich mit bekannten Bäumen,
- Anzahl an Individuen, die nur durch einen einzelnen Punkt im Modell repräsentiert werden,
- Anzahl erkannter Bäume mit mehrfachen Punkten pro Baumkrone,

- Abdeckung des Spektrums der Ergebnisse sowie der
- Sensitivität

vorhandene Kombinationen der konzeptionellen Modelle ausgewählt und mit weiteren Validierungsdatsätzen ausgewertet. Insbesondere wurden die 11 Modelle (Tabelle 5-6) zusätzlich zur Einzelbaumerkennung auch in Hinblick auf die Baumanzahl innerhalb einer definierten Fläche untersucht. Für jede Modellkombination wurde eine Segmentierung durch Form-unabhängige Gitternetze (5x5 m, 7x7 m und 9x9 m große Zellen) sowie der Segment-Mean-Shift-Funktion (abhängig von der Baumkronenform) vorgenommen. Alle Modelle (mit Segmentierung 55 Kombinationen) wurden auf Basis

Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 1	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 2	Kürzel und Nachbarschaft Filter Stufe 3	KHM				MIK					
			LM3		LM5		LM3		LM5		IC	
			B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
LEE 3x3	-	-	x ¹	x	x ^{1,3}	x ¹	-1	-	-	-	-	-
LEE 3x3	LEE 3x3	-	-	-	-	-	x ¹	-	-	-	-	-
LEE 3x3	GF 3x3	-	x ^{1,3}	x ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
LEE 3x3	GF 5x5	-	x ¹	x ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
LEEM 3x3	-	-	x ^{1,3}	x ¹	x	x	-	-	-	-	-	-
LEEM 3x3	GF 3x3	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
LEEM 3x3	GF 5x5	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
LEE 5x5	GF 3x3	-	x ¹	x ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
LEEM 5x5	GF 3x3	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
GF 5x5	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-
UDKA 3x3	-	-	x ³	x	-	-	-	-	-	-	-	-
UDKA 3x3	GF 3x3	-	x ^{1,2,3}	x ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
UDLP 5x5	-	-	-	-	-	-	x ¹	x	x ^{1,3}	x ¹	x ¹	x ¹
UDLP 5x5	GF 3x3	-	-	-	-	-	-	-	x ¹	x ¹	x ^{1,2,3}	x ¹
UDLP 5x5	GF 5x5	-	-	-	-	-	-	-	x ¹	x ¹	x ^{1,3}	x ¹
UDLP 5x5	LEE 3x3	GF 3x3	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-

Tab. 5-7: Erweiterte und finale Auswahl von Kombinationen zur Feinabstimmung. Gefüllte Zellen mit 2-m-Version (R2). B: DOM (Binning), T: DOM (Triangulation), LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5), IC: ISO Cluster Classifier. x¹: Segmentierung (Segment Mean Shift), x²: Segmentierung (ISO Cluster Classifier), x³: KHM mit Grenzwert von 0,1 m in Ausreißerkorrektur.

des DOM_{BI} berechnet, der Richtwert für die untere Grenze der Erkennungsrate zur Modellauswahl beträgt ca. 70 %.

Da die Ergebnisse der Modelle eine weitere Anpassung bzw. den Test alternativer Optionen erforderten, wurde ein erweiterter Modell-Pool (Tabelle 5-7) erstellt und ausgewertet (42 ohne bzw. 64 mit Einbeziehung der Segmentierung). Um den Einfluss der Parameter bei der Generierung des digitalen Oberflächenmodells bzw. des Kronenhöhenmodells zu untersuchen, wurden einige dieser Modelle mit dem DOM_{BI} sowie dem DOM_{TR} berechnet. Für das Kronenhöhenmodell kam in ausgewählten Modellen das KHM mit reduzierter (0,1 m) Höhendifferenz in der Ausreißerkorrektur zum Einsatz. Bezüglich der Segmentierung wurde neben dem Segment-Mean-Shift-Ansatz ebenfalls der ISO-Cluster-Classifizier-Algorithmus getestet.

6 Ergebnisse und Validierung

6.1 Allgemeine Hinweise

Auf Grund dessen, dass die Lage der kartierten Individuen aus den Baumkatastern mit Unschärfen

belegt sein können, wurden die vorhandenen Punktdaten der Baumkataster mit einem Radius von 3 m gepuffert (3M-Version) und dieser neue Datensatz anschließend zur Validierung der Modellergebnisse der Einzelbaumerkennung verwendet. Darüber hinaus wurde für Bäume mit einem Kronenradius von maximal 10 m ein weiterer Validierungsdatensatz erstellt, bei welchem die Puffergröße entsprechend dem attribuierten Wert des Kronendurchmessers abhängt (KR10M-Version). Die obere Grenze von 10 m wurde gewählt, um mögliche Ausreißer und unplausible Angaben in den Daten weitestgehend auszuschließen. Da bei dem KR10M-Datensatz neben der ggf. vorhandenen Ungenauigkeit des Standortes zusätzlich mit einem Schätzfehler hinsichtlich der Kronengröße zu rechnen ist, lag der Fokus bei der Validierung jedoch hauptsächlich auf der 3M-Version. Ausgehend von einem geringen Fehler sollten die in Bild 6-1 beispielhaft dargestellten Kronenumringe des KR10M-Datensatzes zumindest theoretisch eine realistischere Abdeckung der Kronengeometrie und somit auch der Einschätzung der Modellergebnisse ermöglichen. Zusätzlich wurde auf Basis der bekannten Individuen aus den Baumkatastern eine Abfrage mit den jeweils überlagernden Segmenten bzw. Kacheln aus den Gitternetzen durchgeführt (OB-Version), welche in Teilen

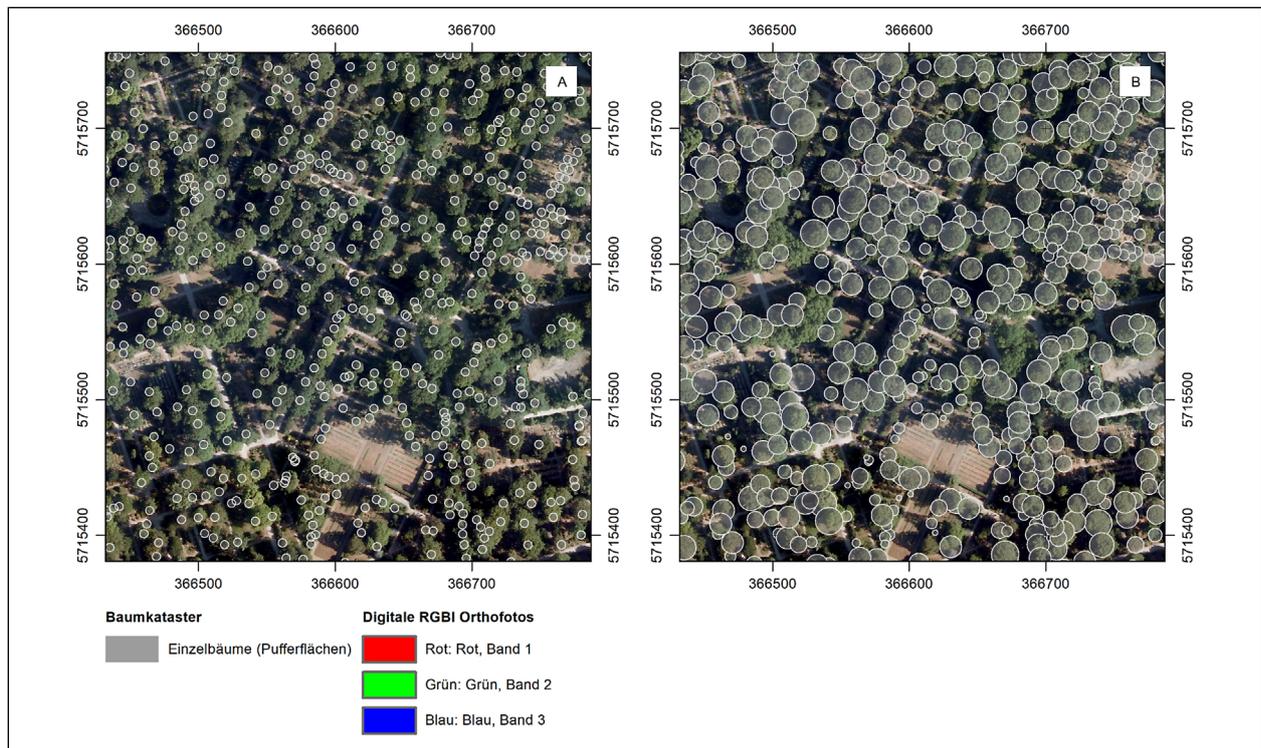


Bild 6-1: A: Beispiel für 3M-Puffer. B: Beispiel für KR10M-Puffer.

der Auswertung im Abschnitt zur Feinabstimmung die 3M-Version ersetzt.

Der Ansatz mithilfe von Segmentierung und Objektbildung (Erläuterung in Kapitel 5.6) wurde ausschließlich für die Modelle der Feinabstimmung verfolgt. Die konzeptionellen Modelle beinhalten keine zusätzliche Punktreduzierung auf Grundlage von berechneten Segmenten bzw. Objekten.

Zusätzlich zur Beurteilung der Einzelbaumerkennung wurden die Modellergebnisse hinsichtlich der Anzahl von Bäumen innerhalb einer ausgewählten Fläche untersucht. Hierbei kommt es nicht darauf an, dass möglichst jeder bereits bekannte Baum korrekt erkannt wird, sondern wie viele Bäume das jeweilige Modell innerhalb der zuvor definierten Fläche ausweist. Dieser Aspekt wird insbesondere für Baumgruppen und Wälder, bei denen die Übergänge der Baumkronen benachbarter Individuen lückenlos und in der Regel im Kronenhöhenmodell schwächer ausgeprägt sind, als auch für einzelne Laubbäume mit großen Kronendurchmessern – und somit potenziell mehreren Nebenmaxima, relevant. Von Interesse sind daher vor allem die Gesamtanzahl ausgewiesener Baumkandidaten sowie deren räumliche Verteilung. Da sich die kartierten, in den Baumkatastern befindlichen Bäume praktisch nicht in größeren Baumgruppen oder Waldflä-

chen befinden, wurden deshalb für diese Auswertung weitere Validierungsdatensätze erstellt:

- Digitalisierung eines 250x250 m großen Waldstückes auf Basis von Orthofotos (DB-Fläche) und Differenzierung von Laub- und Nadelbäumen
- Auswahl eines nahezu vollständig kartierten Gebietes auf Grundlage des Baumkatasters, vorrangig mit Baumgruppen (BK-Fläche), Baumtypen undifferenziert
- Flächen der Feldkartierung (FV-Flächen) mit Waldcharakter, Baumtypen differenziert

Diese Datensätze sollen vor allem dazu dienen, die Anzahl und Dichte der Baumkandidaten in den verschiedenen Modellen besser einzuschätzen sowie die Resultate der mehrstufigen Glättungsdurchläufe, vor allem hinsichtlich der Fehl- und Mehrfachklassifikationen von Baumkronen, besser miteinander vergleichen zu können. Bild 6-2 stellt die Vorgehensweise nochmals zusammenfassend dar.

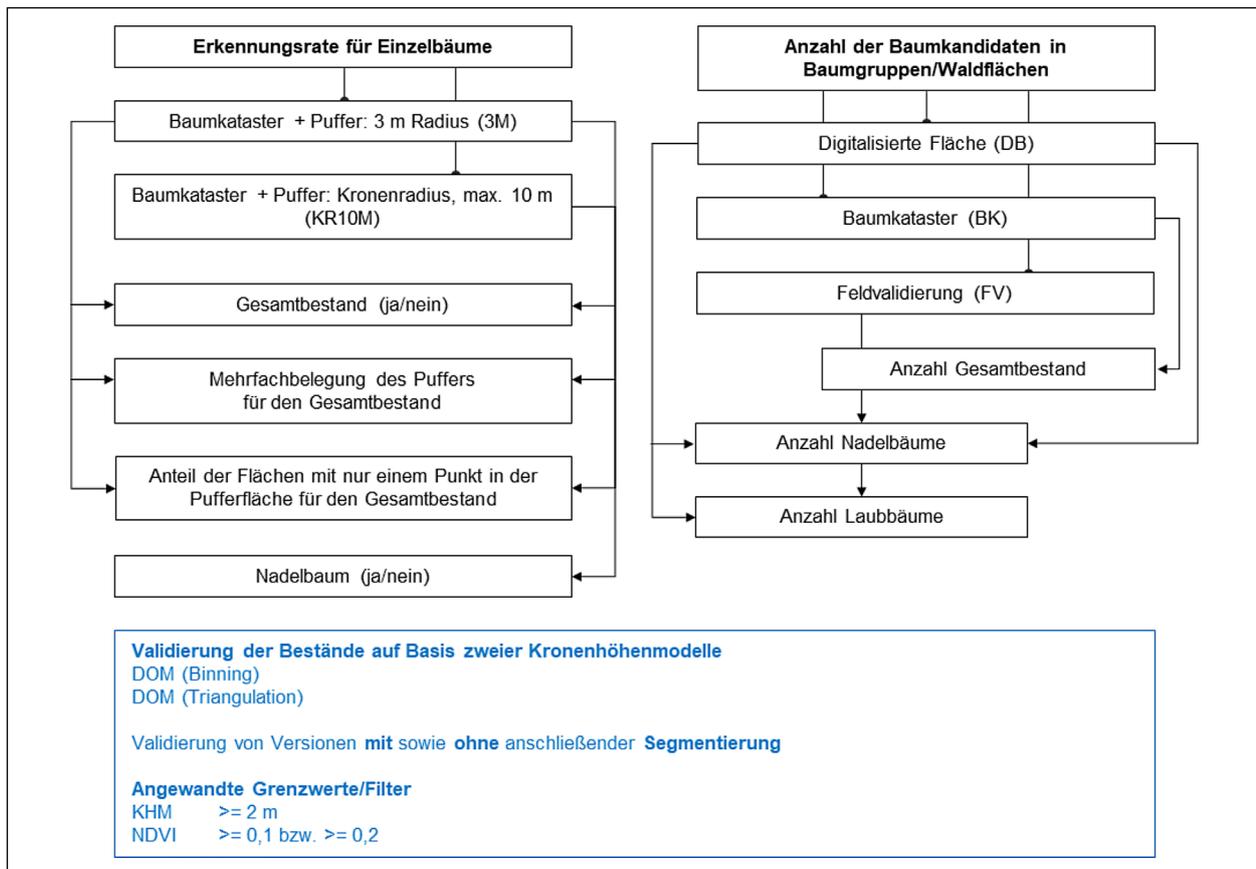


Bild 6-2: Zusammenfassung der Validierungsoptionen für Einzelbäume und Baumgruppen bzw. Waldstücke

6.2 Testgebiete und Validierungsdatensätze

6.2.1 Datensätze zur Validierung von Einzelbäumen

Die Auswahl der Testgebiete für die Entwicklung der Methodik stützt sich weitestgehend auf die Kenntnislage in den vorhandenen Baumkatastern. Angesichts des Vorhabens mit verschiedenen Auflösungsversionen zu arbeiten und deren Einfluss auf die Methoden zu evaluieren, wurden mit Rücksicht auf die zu erwartenden Datenvolumina und Rechenzeiten zwei Testgebiete, jeweils für Vergleiche der Auflösungsversionen mit 0,5 m und 1 m (R05/R1) sowie 1 m und 2 m (R1/R2), angelegt.

Die Testgebiete (Bild 6-3) unterscheiden sich in der Zahl bekannter Bäume sowie ihrer Flächengröße:

- Testdatensatz A: 140.575 Bäume bei 324 km²
- Testdatensatz B: 225.309 Bäume bei 396 km²

Weiterhin wurde bei der Wahl der Testgebiete berücksichtigt, dass die notwendige Variabilität für die Validierung und Einschätzung der Modellergebnisse abgedeckt wird (Baumtypen, Anzahl Bäume,

verschiedene Höhen und Kronendurchmesser sowie Alter, Vorhandensein von Einzelbäumen und Baumgruppen).

Für die Datensätze der Baumkataster Bonn und Gelsenkirchen sind die Testgebiete A und B praktisch unverändert, der Bereich Köln wurde sowohl in der Fläche als auch hinsichtlich der Baumanzahl im Testdatensatz B erweitert. Technische Einschränkungen führten hier zunächst zu einer Ausdünnung der Validierungsdaten, welche jedoch für Datensatz B behoben werden konnten. Zudem wurden weitere Quellen integriert. Hinsichtlich der Verteilung des Laub- und Nadelbaumbestandes in den Datensätzen ergeben sich je nach Parameter verschiedene Ansichten. In Bezug auf die Baumanzahl ist, wie bereits in Tabelle 6-1 ersichtlich, nur ein sehr geringer Nadelbaumanteil vorhanden.

6.2.2 Datensätze zur Validierung von Baumgruppen und Wäldern

Für die händisch kartierte Fläche auf Basis der digitalen Orthofotos (DB, Bild 6-4) steht ein Datensatz von ca. 3.000 Baumkandidaten zur Validierung. Dieser besteht zum Großteil aus Laubbäumen und

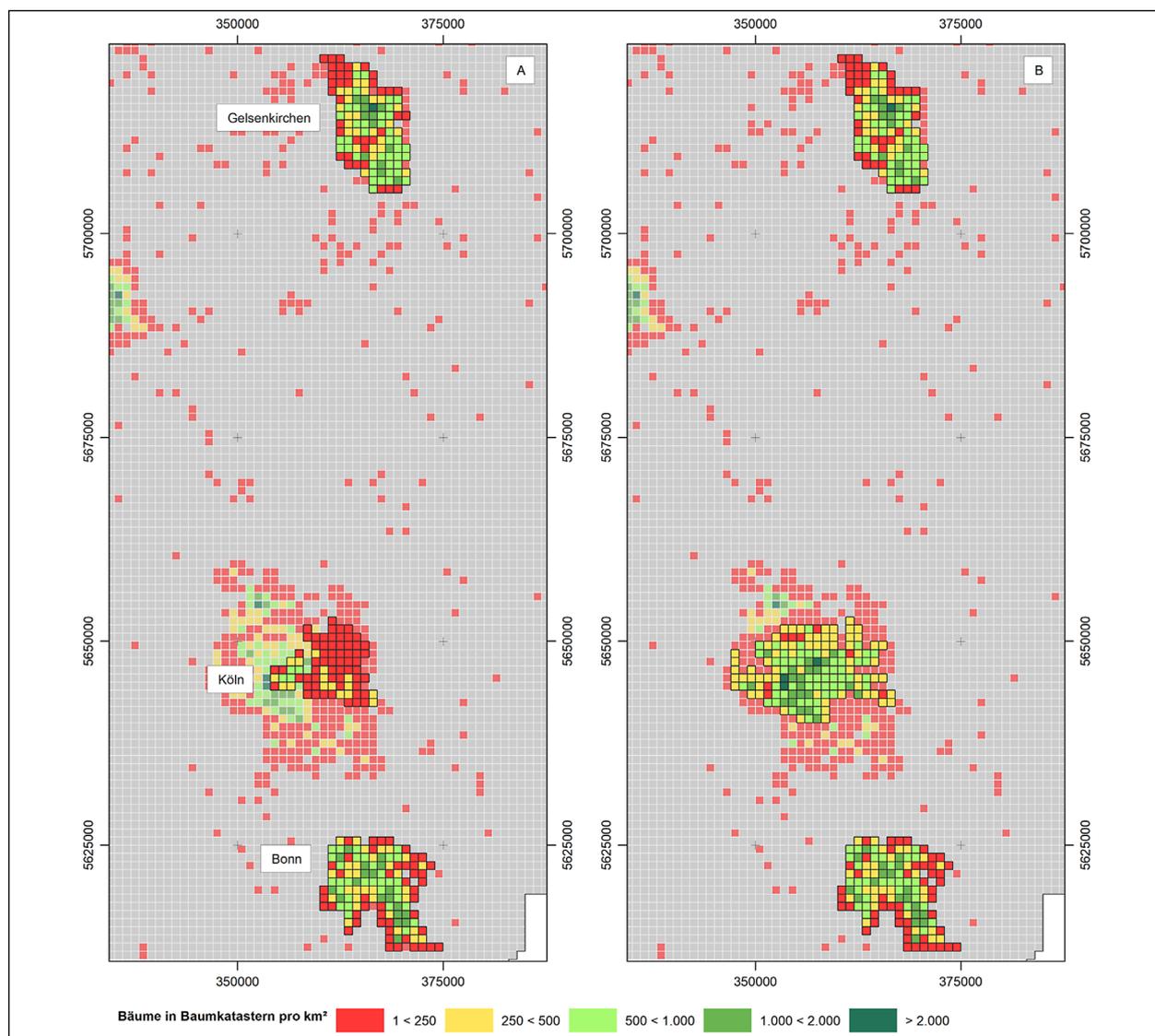


Bild 6-3: A: Testdatensatz A.; B: Testdatensatz B.

Quelle	Bäume (gesamt)	Laubbäume	Nadelbäume	Alter	Höhe	Kronendurchmesser
Testdatensatz A: Auflösung 0,5 m und 1 m Pixelgröße (R05 und R1)						
Bonn	66.338	60.613	5.495	66.093	-	-
Gelsenkirchen	59.806	57.598	1.044	51.393	41.043	59.652
Köln	14.431	9.714	76	9.096	9.605	9.590
Summe*	140.575 (39 %)	127.925 (35 %)	6.615 (2 %)	126.582 (35 %)	50.648 (14 %)	69.242 (19 %)
Testdatensatz B: Auflösung 1 m und 2 m Pixelgröße (R1 und R2)						
Bonn	66.338	60.613	5.495	66.093	-	-
Gelsenkirchen	59.780	57.574	1.042	51.359	41.024	59.642
Köln	99.191	59.227	1.749	44.314	59.395	59.355
Altbaumfinder	34	23	10	30	25	-
Baumregister	11	7	3	-	-	-
Straßen.NRW	3.209	3.176	29	3.209	3.209	2.973
Summe*	225.309 (62 %)	177.414 (49 %)	8.286 (2 %)	161.766 (45 %)	100.419 (28 %)	118.997 (33 %)**

Tab. 6-1: Testgebiete und enthaltene Informationen. * prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtanzahl der bekannten Bäume aller Kataster (363.477). ** 115.010 (32 %) mit mindestens 20 m Kronendurchmesser.

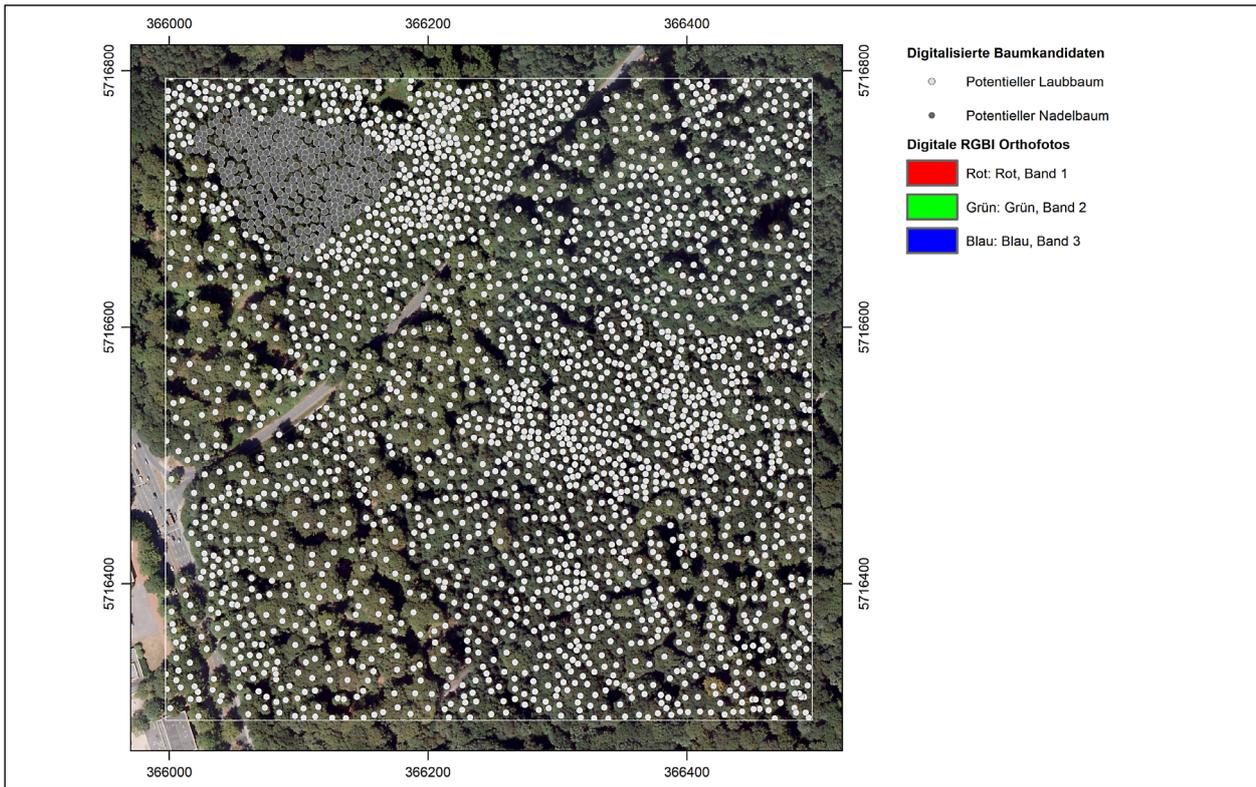


Bild 6-4: Digitalisierte Baumkandidaten (DB-Datensatz) mit 3.033 Individuen, ca. 400 davon Nadelbäume.



Bild 6-5: Lage des Baumgruppen-Bereiches aus dem Baumkataster (BK-Fläche).

besitzt einen kleinen, umschlossenen Bereich mit ca. 400 eng aneinander stehenden Nadelhölzern. Auf Grund des teils sehr engen Bewuchses lässt sich die Baumanzahl jedoch nicht eindeutig quantifizieren, weshalb davon auszugehen ist, dass die Anzahl sowohl der Laub- als auch besonders der Nadelbäume gegebenenfalls unterschätzt wird.

Mit Blick auf das Vorhaben zur Auswertung des Baumbestandes in der Fläche wurde weiterhin auf Grundlage des bestehenden Baumkataster-Daten-

setzes ein nahezu vollständig kartierter Bereich, hauptsächlich bestehend aus Baumgruppen, ausgewählt (2.442 Individuen, größtenteils Laubbäume). Zusätzlich wurden nach Durchsicht der Luftbilder 73 weitere Bäume innerhalb dieser Fläche digitalisiert (+ 3 %).

6.2.3 Feldkartierung

Für die Feldvalidierung wurden 5 Flächen im Großraum Bonn ausgewählt (FV-Flächen). Um den Ver-

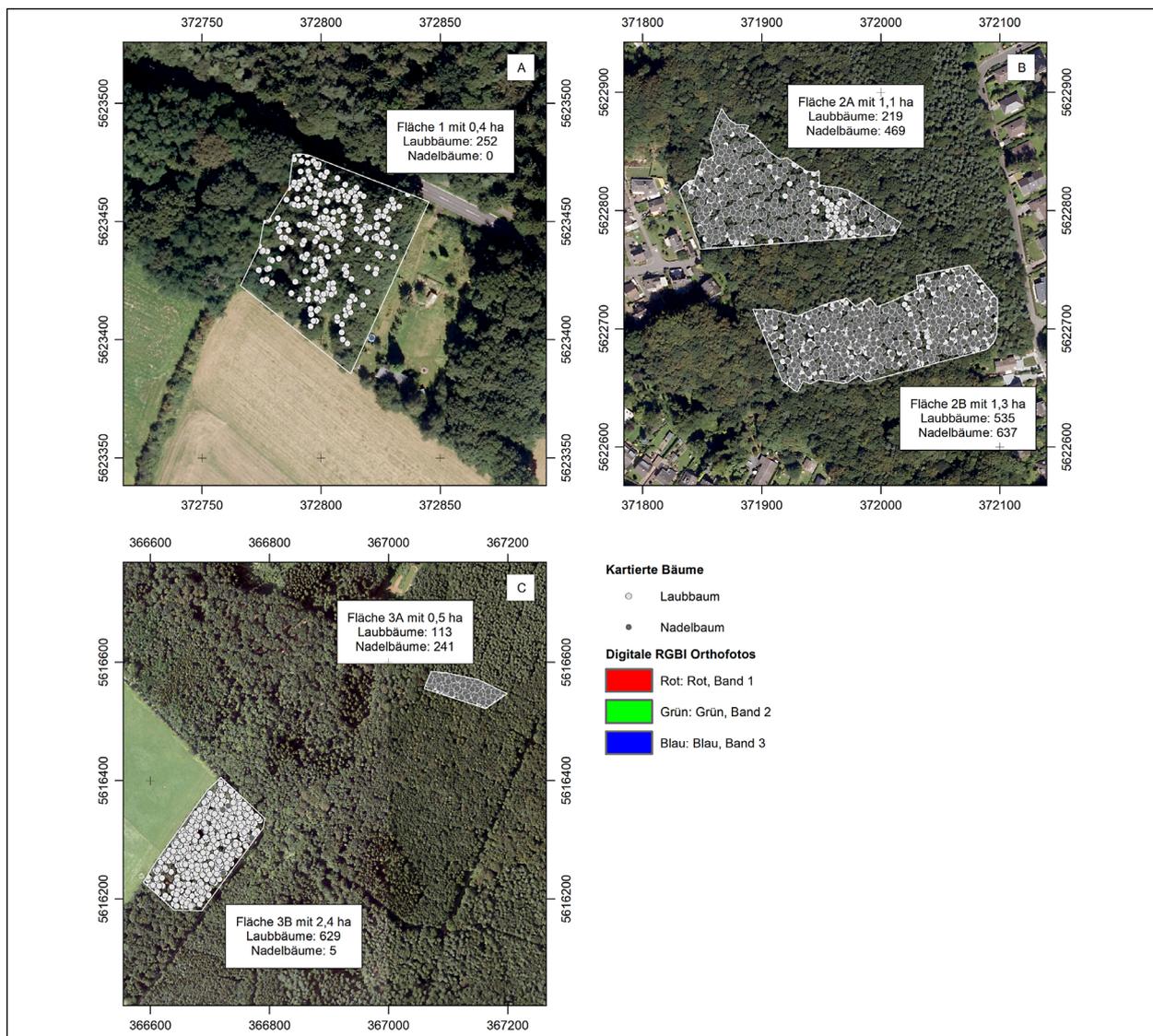


Bild 6-6: Lage der Validierungsflächen. A: Fläche 1. B: Flächen 2A und 2B. C: Flächen 3A und 3B.

gleich mit den bisherigen Modellberechnungen zu ermöglichen, wurde deshalb ausschließlich nach Flächen gesucht, welche sich in den vorhandenen Testgebieten befinden (Ausnahme: Fläche 3B). Insgesamt wurden 1.748 Laub- und 1.352 Nadelbäume in einem Gebiet von ca. 5,7 ha kartiert, welche zusätzlich zu den bereits bestehenden DB- und BK-Datensätzen für die flächenbezogene Einschätzung der Modelle zur Verfügung stehen. Eine detaillierte Baumartenbestimmung wurde nicht durchgeführt.

Aufgrund der hohen Anzahl vorhandener Bäume in den Baumkatastern wurde von einer Einzelbaumkartierung im Sinne separat stehender Bäume (keine Berührung der Baumkronen benachbarter Bäume), z. B. in Alleen, abgesehen.

Bild 6-6A zeigt die Fläche 1 mit 252 eng beieinanderstehenden jungen Laubbäumen, die größten-

teils Kronendurchmesser kleiner 10 m aufweisen. Der Bestand ist gemischt (hauptsächlich Buchen und Eichen). Die Besonderheit der Flächen 2A und 2B (Bild 6-6B) ist der Laubbaumbestand, welcher mit relativ jungen Bäumen (Stammdurchmesser ca. 7 – 10 cm) jedoch nicht die oberste Schicht erreicht und deshalb aus der Bewertung ausgeklammert wird, da nicht davon auszugehen ist, dass das Kronhöhenmodell die verdeckten Vegetationsschichten abbildet. Die obere Schicht wird von Nadelbäumen dominiert, nur in kleineren Bereichen existieren größere, validierungsrelevante Laubbäume. Der Nadelbaumbestand setzt sich dabei hauptsächlich aus Kiefern zusammen, der Laubbaumbestand aus Eichen und Buchen. Zusätzlich der kleinen Bereiche, welche nur durch Laubbäume repräsentiert werden, besteht der Validierungsdatensatz von Fläche 2A aus ca. 530 und von Fläche 2B aus ca. 650 Bäumen. Die Fläche 3A (Bild 6-6C) wird aufgrund

der geringen Höhe der Laubbäume analog den Flächen 2A und 2B behandelt. Die im Vergleich zu Fläche 1 deutlich älteren Laubbäume in Gebiet 3B weisen einen größeren Kronendurchmesser (i. d. R. > 10 m) auf. Die Bestandszusammensetzung entspricht derer in den Flächen 2A und 2B. Für die Fläche 3A sind insgesamt ca. 240 Bäume und für Fläche 3B ca. 630 Bäume relevant.

6.3 Konzeptionelle Modelle: Sensitivität

6.3.1 Erste Glättungsstufe, Testdatensatz A

Der Vergleich der ersten Ergebnisse mit Testdatensatz A für die KHM_{R05} - sowie KHM_{R1} -Versionen zeigt, dass die höher aufgelösten Berechnungsversionen eine erheblich größere Punktzahl hervorbringen als die geringer aufgelösten R1-Versionen (Bild 6-7). Weiterhin wird deutlich, dass der Filtertyp teils entscheidend auf die Anzahl der Baumkandidaten ein-

wirkt, die MIK_{R1} -Modelle ebenfalls signifikant höhere Punktmengen als die KHM_{R1} -Modelle produzieren und diese zum Teil auch das Niveau von KHM_{R05} -Modellen erreichen. Die Werte in Bild 6-7 stellen die Ergebnisse ohne Berücksichtigung einer Mindesthöhe oder eines NDVI-Grenzwertes dar.

Bereits hier wird absehbar, dass die Methodik trotz Anwendung verschiedener Rauschfilter nicht ohne KHM -Mindesthöhe auskommen wird, insbesondere um Rauschen oder Objekte in geringen Höhen auszuschließen. Schon bei Anwendung einer KHM -Mindesthöhe von 1 m zeigt sich eine erhebliche Senkung der Gesamtanzahl von Baumkandidaten, welche auf die Reduzierung der durch Rauschen induzierten Punkte zurückgeführt werden kann. Bild 6-8 zeigt den Anteil der verbleibenden Baumkandidaten unter Einsatz einer KHM -Mindesthöhe im Vergleich zum unbeschnittenen Datensatz (für Modelle ohne R05-Marker wurde keine Abfrage des Kronenhöhenmodells durchgeführt). Interessant ist hierbei vor allem, dass die Punktzahl in den

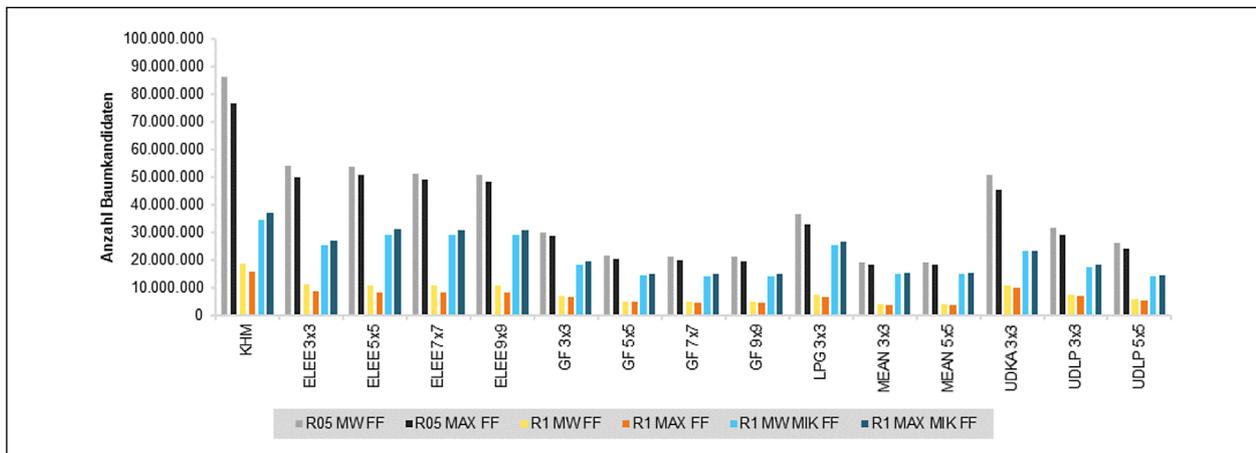


Bild 6-7: Gesamtpunktzahl von Modellberechnungen (Focal-Flow-Modelle) für Testdatensatz A. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.

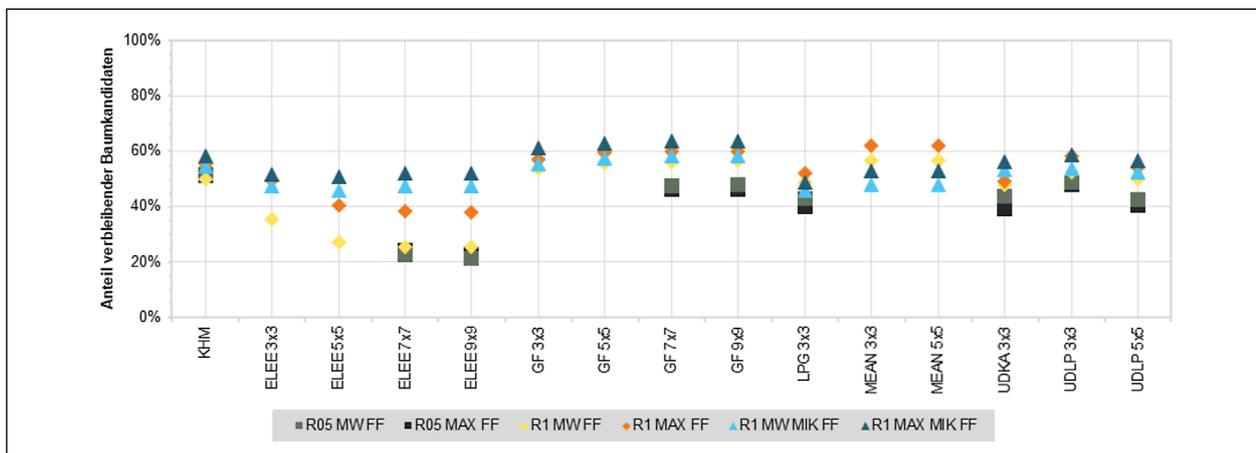


Bild 6-8: Prozentualer Anteil verbleibender Baumkandidaten der Focal-Flow-Modelle bei Anwendung eines Grenzwertes (KHM -Mindesthöhe: 1 m) für Testdatensatz A. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.

KHM_{R05}-Modellen am stärksten verringert wird, was ebenfalls darauf hindeutet, dass bei der Verwendung der Rasterdaten mit 0,5 m Pixelgröße (R05) erheblich mehr Punkte durch Rauschen entstehen als bei Modellen mit 1 m Zellgröße (R1).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist für die R05-Modelle mit weitaus mehr Punkten pro Baumkrone zu rechnen, als in den anderen Versionen (Mehrfachklassifikation einer Baumkrone durch Nebenmaxima und Rauschen). Da zusätzlich das Handling der R05-Varianten mit Blick auf Berechnungszeiten, Größe, erzeugte Punktdatensätze etc. weitaus unpraktischer ist, wird von einer Verwendung der R05-Versionen im weiteren Verlauf der Umsetzung abgesehen. Insgesamt ist keine signifikant bessere Performance gegenüber den R1-Modellen zu erwarten.

6.3.2 Erste Glättungsstufe, Testdatensatz B

Analog den Ergebnissen mit Testdatensatz A wird in Bild 6-9 sichtbar, dass die Modelle mit höherer Auf-

lösung (R1) auch insgesamt deutlich mehr Punkte und somit potenzielle Baumstandorte hervorbringen als die geringer aufgelösten (R2). Ebenso bringen die Modelle, bei denen die minimale Krümmung (MIK) verwendet wurde, erheblich mehr Baumkandidaten hervor als die Versionen auf Basis des Kronenhöhenmodells (KHM). Dies gilt für beide Auflösungsvarianten, besonders jedoch für die R1-Modelle.

Entsprechend dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die R2-Modelle, insbesondere die KHM-Versionen, eine geringere Erkennungsrate als die R1-Modelle aufweisen werden, jedoch ggf. auch eine geringere Punktzahl bzw. Fehlerquote hinsichtlich mehrfach klassifizierter Baumkronen zu erwarten ist.

Bezüglich der verbleibenden Anzahl von Punkten bei Anwendung eines unteren KHM-Grenzwertes kann erneut gezeigt werden, dass bei den Modellen mit höherer Auflösung ebenfalls am stärksten redu-

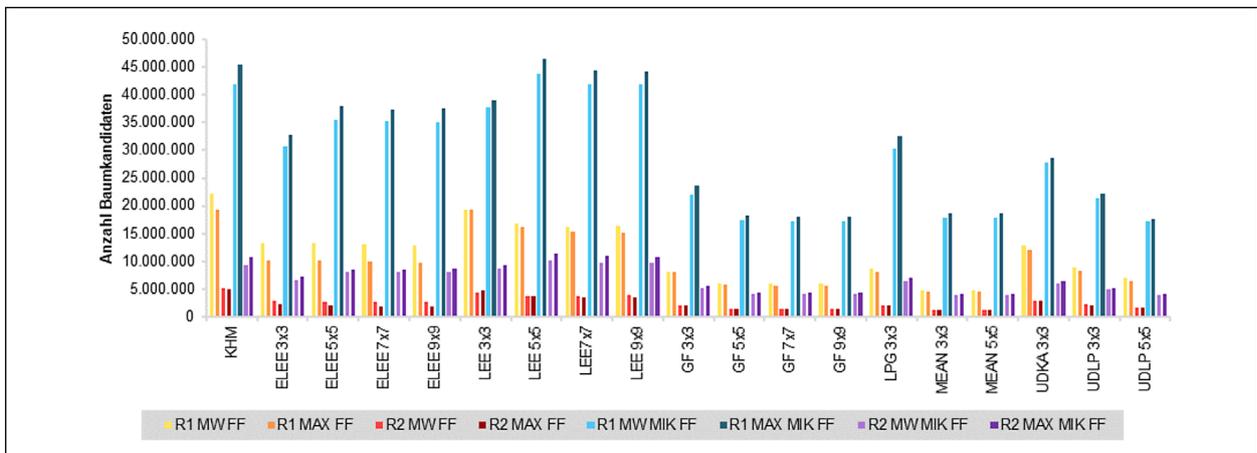


Bild 6-9: Gesamtpunktzahl von Modellberechnungen (Focal-Flow-Modelle) für Testdatensatz B. MW: KHM_{MW}, MAX: KHM_{MAX}, MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.

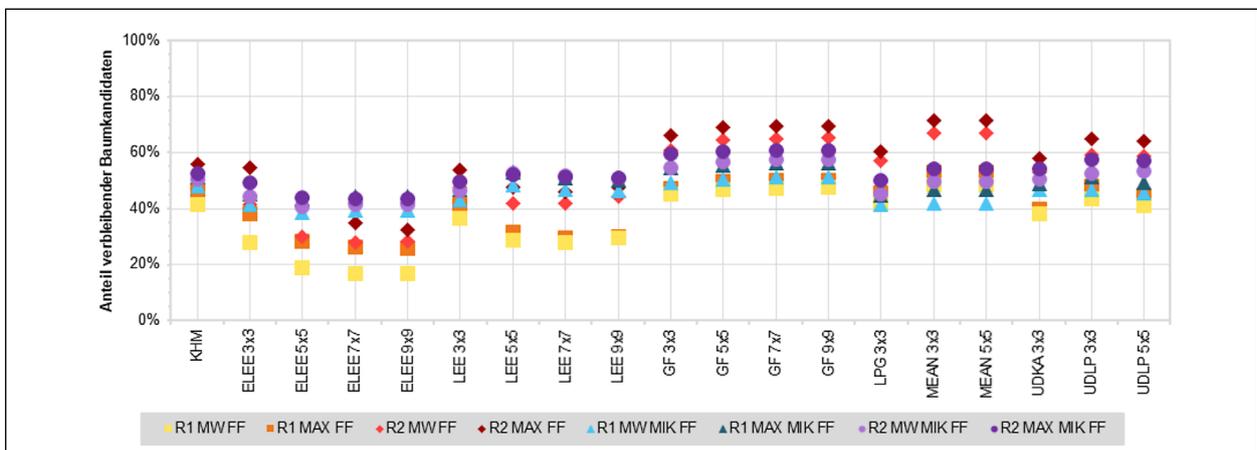


Bild 6-10: Prozentualer Anteil verbleibender Baumkandidaten der Focal-Flow-Modelle bei Anwendung eines Grenzwertes (KHM-Mindesthöhe: 2 m) für Testdatensatz B. MW: KHM_{MW}, MAX: KHM_{MAX}, MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.

ziert wird. Der für Bild 6-7 genutzte Wert von 2 m (Testdatensatz B) verringert die Punktzahl im Vergleich zum Grenzwert von 1 m (Testdatensatz A) insgesamt nochmals um 9 – 10 % (KHM-Modelle) bzw. 7 – 8 % (MIK-Modelle). Darüber hinaus zeigt sich bei diesem Vergleich, dass bereits bei einer Mindesthöhe von einem Meter im Durchschnitt ca. 50 % der ausgewiesenen Punkte entfernt werden. Inwieweit hierbei Punkte zwischen 1 m und 2 m ausschließlich durch Rauschen induziert sind, ist nicht nachvollziehbar, jedoch eröffnet der etwas höhere Wert auch die Möglichkeit, kleinere Objekte nicht natürlichen Ursprungs (ggf. auch Fahrzeuge, kleine Mauern o. ä.) aus den Ergebnissen zu entfernen.

6.3.3 Zweite und dritte Glättungsstufe, Testdatensatz B

Die zweite Anwendung der Rauschfilter auf bereits bestehende und geglättete KHM-Modelle wurde mit den Filtern LEE 3x3, GF 3x3 sowie GF 5x5 durchgeführt. Zum einen, da der Lee-Filter (LEE) im Gesamteindruck aller Modelle im Vergleich gute Ergebnisse hervorbringt, und zum anderen, da die Gauß-Filter (GF) vergleichsweise stark glätten und

somit weniger Fehl- bzw. Mehrfachklassifikationen zu erwarten sind. Bild 6-11 stellt die ausgewählten Modelle für die Erkennungsmethoden LM3 und LM5 gegenüber. Hierbei stehen der zweite Filter sowie die zur Erkennung genutzte Methode LM3/LM5 in der horizontalen-Achse, die Modelle aus Stufe 1 sind farblich in der Legende gekennzeichnet.

In der Abbildung wird deutlich, dass sich die zweite Glättung für die 5x5-Nachbarschaften zur Bestimmung der lokalen Maxima weniger stark auswirkt als für die 3x3-Nachbarschaft, da noch ca. 70 % bis 90 % der Punkte aus der ersten Glättungsstufe ausgewiesen werden. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch bei der (nicht dargestellten) R2-Version beobachten. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Gauß-Filter in beiden Filtergrößen erheblich stärker glättet als der Lee-Filter. Zudem sind die KHM-Modelle um bis zu 20 % stärker von der Glättung betroffen als die MIK-Modelle.

Um zu prüfen, ob die Punktzahl auch nach zwei teils starken Glättungsdurchläufen noch weiter reduziert werden kann und welchen Einfluss dies auf die Erkennungs- und Mehrfachklassifikationsraten hat, wurde für die dritte Glättungsstufe den mit LEE

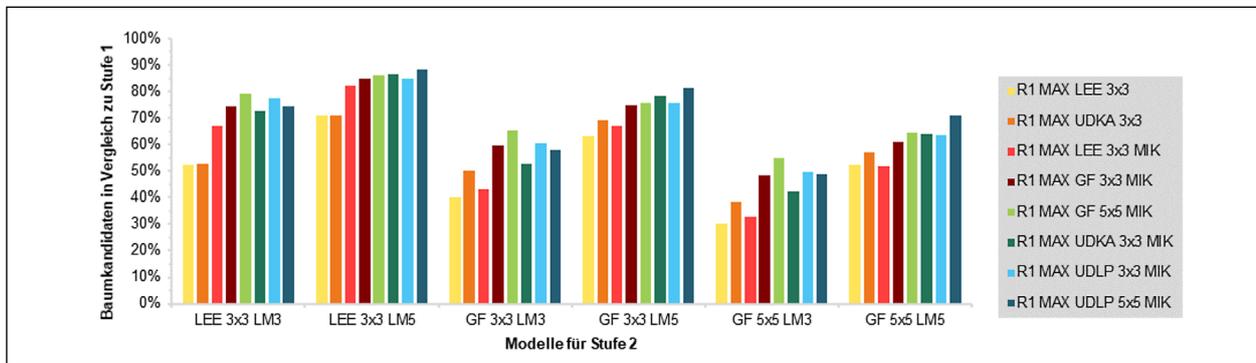


Bild 6-11: Anteil der Baumkandidaten ausgewählter R1-Modelle von Glättungsstufe 2 mit Modellen aus Stufe 1. MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. LM: Lokales Maximum mit 3x3 bzw. 5x5 Fenster.

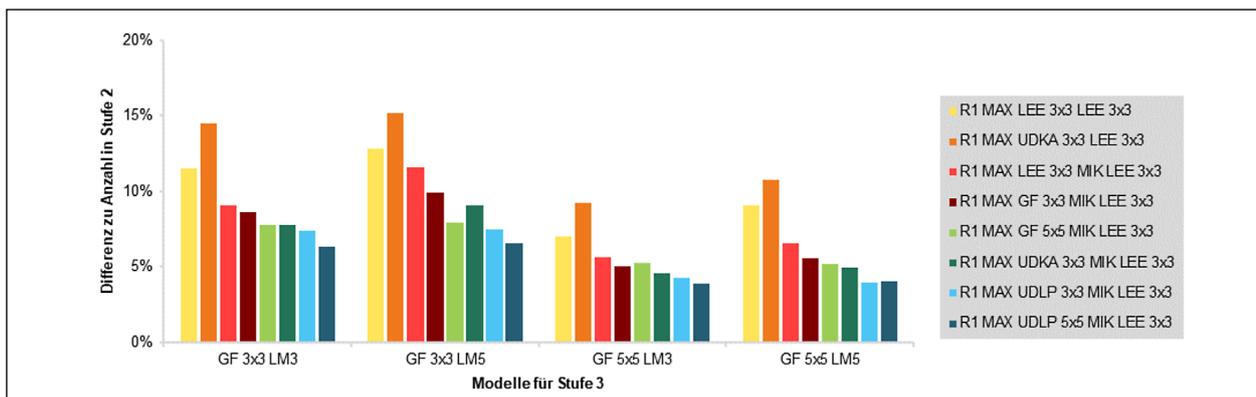


Bild 6-12: Differenz der R1-Modelle aus Glättungsstufe 3 zu Glättungsstufe 2. MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. LM: Lokales Maximum mit 3x3 bzw. 5x5 Fenster.

3x3 in Stufe 2 gefilterten Modellen nochmals ein GF 3x3- bzw. GF 5x5-Filter aufgesetzt. Bild 6-12 stellt die Differenz des Ergebnisses zu Stufe 2 dar. Die stärkste Reduzierung findet sich erneut in den KHM-Modellen, bei denen nochmals zwischen 10 % und 15 % der Punkte eliminiert werden konnten. Die geringste Reduzierung (4 - 6 %) weist der Filter UDLP 5x5 auf.

6.4 Konzeptionelle Modelle: Identifikation von Einzelbäumen

6.4.1 Erste Glättungsstufe: Wiedererkennungsrate bekannter Individuen

Zur Ermittlung des Anteils der korrekt erkannten Bäume wurden die mit 3 m Radius gepufferten bekannten Individuen der Baumkataster (3M-Datensatz) mit den Modellergebnissen abgeglichen und der entsprechende Prozentsatz berechnet. Ein Baum gilt dabei als erkannt, wenn sich ein generierter Punkt aus dem Modellergebnis innerhalb des 3M-Pufferbereiches befindet. Dies gilt analog auch

für den KR10M-Validierungsdatensatz. Bild 6-13 zeigt das Ergebnis der Berechnungen auf Grundlage des Kronenhöhenmodells. Bereits beim Vergleich der R1- und R2-Varianten wird deutlich, dass die KHM_{R2} -Modelle mit Blick auf die Wiedererkennung bekannter Bäume deutlich schlechter abschneiden und die 70 % Marke praktisch nicht überschreiten, während mit den KHM_{R1} -Versionen teils bis zu 90 % der Bäume auf Basis des 3M-Datensatzes identifiziert werden können.

Darüber hinaus zeichnet sich für beide Auflösungsvarianten ein Abfall der Erkennungsrate mit zunehmender Filtergröße ab. Besonders deutlich wird dies beim Enhanced Lee-Filter (ELEE) sichtbar, etwas geringer ausgeprägt aber auch bei den anderen Filtern. Dieser Effekt ist analog für die unterschiedlichen Erkennungsmasken (LM3, LM5) zu beobachten, wobei der Focal-Flow-Ansatz äquivalente Ergebnisse erzielt wie die Erkennung mittels LM3. Bezüglich der Variation KHM_{MW} und KHM_{MAX} erreichen die KHM_{MW} -Modelle im Durchschnitt etwas höhere Erkennungsraten, wobei dies in den

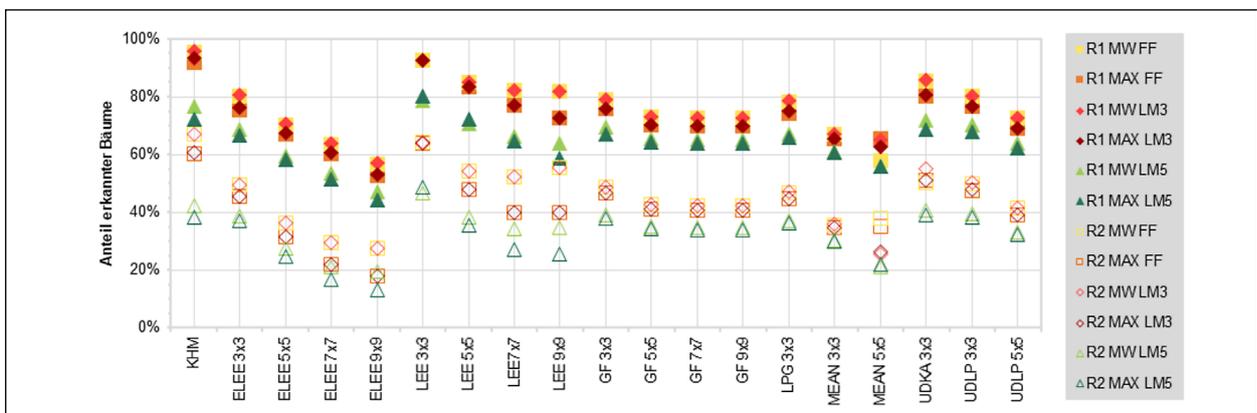


Bild 6-13: Erkennungsraten bekannter Individuen mittels 3M-Pufferflächen für KHM-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

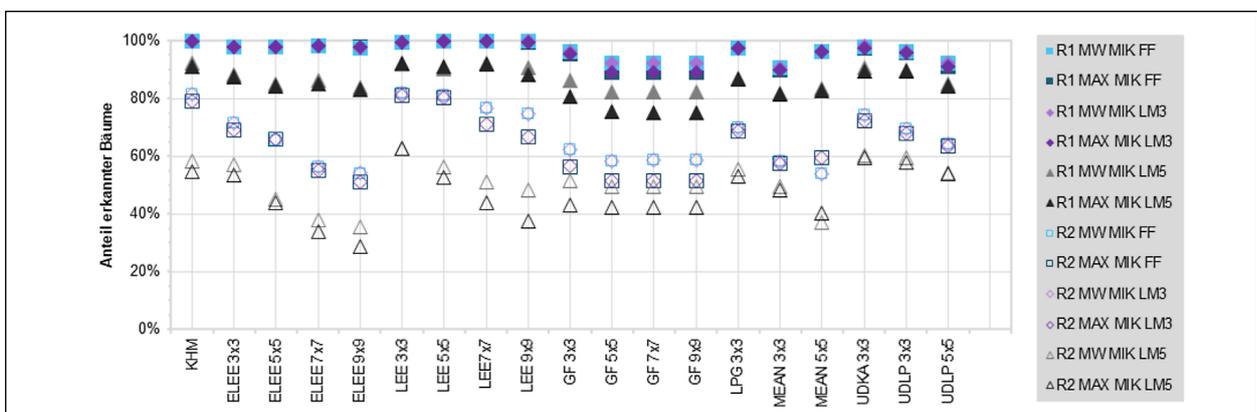


Bild 6-14: Erkennungsraten bekannter Individuen mittels 3M-Pufferflächen für MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung, FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

KHM_{R1}-Modellen nicht mehr so deutlich ausgeprägt ist wie in den KHM_{R2}-Modellen. Hierbei spricht die offensichtlich schlechtere Performance der KHM_{R2}-Modelle eindeutig für eine Verwendung der Datensätze mit 1 m Auflösung (KHM_{R1}).

Bild 6-14 stellt die Ergebnisse der MIK_{R1}- und MIK_{R2}-Modelle dar. Diese sind grundlegend vergleichbar mit denen der KHM-Modelle, insbesondere der KHM_{R2}-Versionen, erreichen jedoch für beide Auflösungsversionen deutlich höhere Erkennungsraten, welche nur bei Verwendung der größten Maske (LM5) sowie den Gauß-Filtern sichtbar abfallen. Auf Grund der enormen Erkennungsrate von sehr häufig bis zu 100 % ist hier jedoch auch mit einer hohen Zahl an Fehlklassifikationen aufgrund von zu vielen Nebenmaxima zu rechnen, sodass insbesondere Individuen mit großen Kronen praktisch überklassifiziert werden. Für die MIK_{R2}-Modelle scheinen dabei speziell die LEE- sowie die Tiefpass-Filter mit Erkennungsraten zwischen 70 % und 80 % zur weiteren Evaluierung interessant. Auch bei den MIK-Versionen schneiden die LM5-Varianten gegenüber den FF- und LM3-Modellen am schlechtesten ab.

6.4.2 Erste Glättungsstufe: Mehrfachbelegung (prozentuale Anteile)

Eine Mehrfachbelegung von 3M-Pufferflächen bedeutet, dass je 3M-Fläche eines bekannten Bau-

mes mehr als ein Punkt durch ein Modell generiert wurde. Werte um 100 % entsprechen dem Ideal, Werte unter 100 % bedeuten, dass nicht genügend Punkte generiert wurden, um alle Bäume zu erkennen. Entsprechend sinkt auch die Erkennungsrate. Zu hohe Werte hingegen deuten auf eine starke Anfälligkeit für Rauschen oder in den Daten real vorhandene Nebenmaxima hin (z. B. ungünstiger Aufnahmezeitpunkt). Bild 6-15 zeigt exemplarisch die Belegung innerhalb der 3M- (A) sowie der KR10M-Flächen (B) an MIK LEE 3x3-Modellen. Die Angaben in Prozent bedeuten, dass z. B. im Modell MIK_{R1}-LEE 3x3 LM3 mit 280 % im Schnitt fast 3 Punkte je Fläche auftreten.

In Bild 6-16 werden die Validierungsergebnisse der KHM- (obere Abbildung) und MIK-Modelle (untere Abbildung) dargestellt. Wie bereits durch die enorm hohen Erkennungsraten und Gesamtzahlen an Baumkandidaten abzusehen war, besitzen die auf den kleineren Nachbarschaften basierenden FF- und LM3-Versionen besonders bei den MIK_{R1}-Modellen deutlich zu viele Punkte je bekanntem Baum bzw. bekannter Baumkrone. Lediglich die KHM- sowie übergreifend die LM5-Varianten erzeugen Ergebnisse von unter 130 %.

Weiterhin ist auffällig, dass insbesondere die GF- und UDLP-Filter deutlich stärker glätten als die anderen Filter im Feld, da hier der Anteil an Mehrfach-

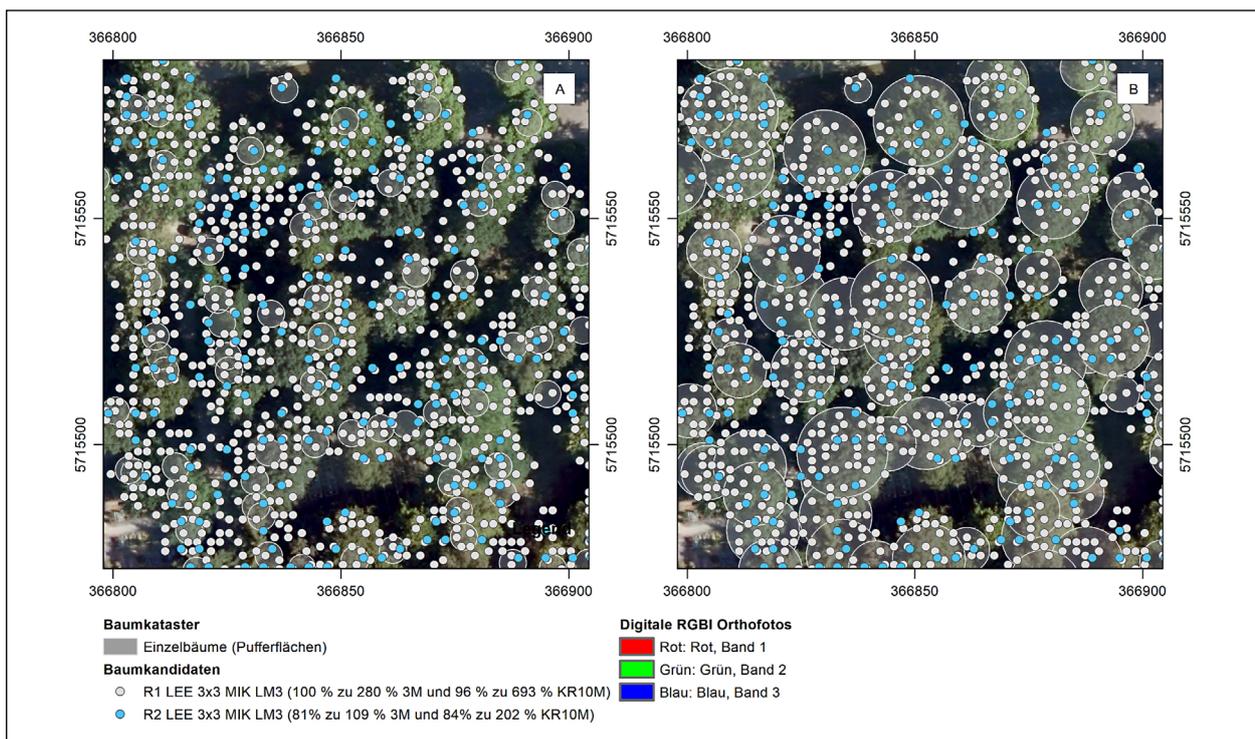


Bild 6-15: Mehrfachbelegung der erstellten Pufferflächen. A: 3 m Radius. B: Radius abhängig von Kronendurchmesser.

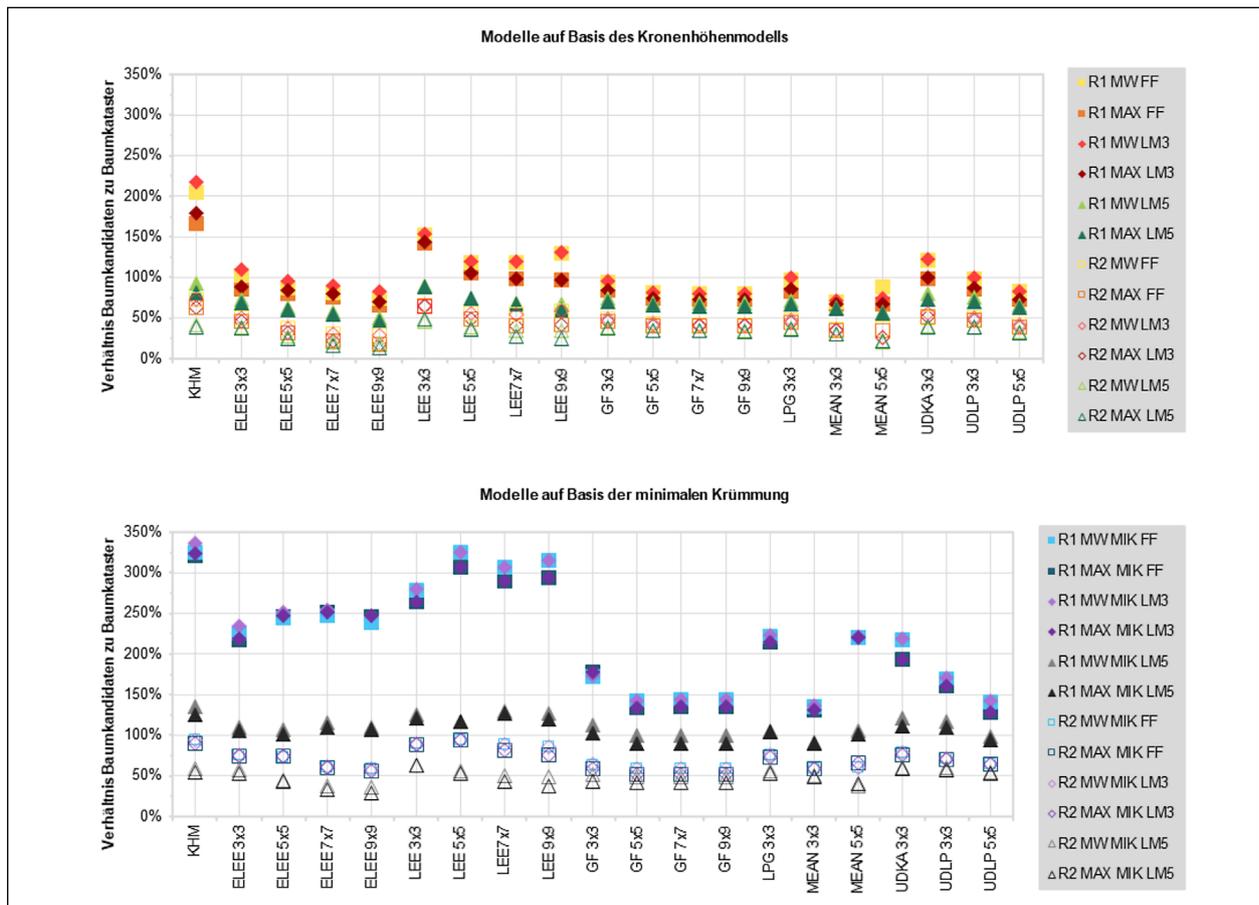


Bild 6-16: Verhältnis von Punktzahl (3M) und Anzahl bekannter Bäume der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

belegungen sichtbar geringer ist als z. B. bei den LEE- oder ELEE-Filtern. Aus diesem Grund wurden die Filter GF 3x3 und GF 5x5 auch für die Glättungsstufen 2 und 3 ausgewählt. Auf den Filter UDLP 5x5 wurde aus praktischen Gründen verzichtet, da dieser vergleichbare Ergebnisse wie der GF 5x5-Filter erzeugt.

Bei dem Vergleich der Mittelwert- und Maxima-Versionen sind nur geringe Unterschiede erkennbar, wobei die Maxima-Modelle scheinbar systematisch etwas geringere Werte aufweisen als die Mittelwert-Versionen, was in Bezug auf den untersuchten Kennwert tendenziell für die Verwendung der Maxima-Varianten sprechen würde, da insgesamt weniger Punkte je bekanntem Baum ausgewiesen werden. Dies ist grundsätzlich für beide Auflösungen zu erkennen, jedoch bei R2- gegenüber R1-Modellen in deutlich abgeschwächter Form.

6.4.3 Erste Glättungsstufe: Mehrfachbelegung (Klassen)

Für diesen Kennwert wurde die Anzahl erzeugter Punkte innerhalb der 3M-Pufferfläche ermittelt, wobei jeder Wert für eine Klasse steht (z. B. 1: 1 Punkt in einem 3M-Umring, 20: 20 Punkte im 3M-Umring). Das Ergebnis ist in Bild 6-17 dargestellt (oben: KHM-Modelle, unten: MIK-Modelle).

Für diesen Parameter gleichen sich die KHM- sowie die MIK-Modelle stark, wobei besonders die R1 LM3- und LM5-Varianten eine sehr hohe Punktzahl innerhalb der 3M-Pufferzone erreichen (teils 25 – 30 Punkte in einer Baumkrone). Weiterhin ist zu erkennen, dass zumindest bei den LEE- und GF-Filtern die maximale Anzahl an Punkten innerhalb einer 3M-Fläche mit zunehmender Filtergröße abnimmt, gleiches gilt für die Reduzierung der Auflösung von R1 nach R2. Beim Vergleich der MW- und MAX-Versionen wird erneut deutlich, dass die MAX-Modelle speziell für die LM-Varianten insgesamt geringere Maximalwerte der Klassen aufweisen als die MW-Versionen, weshalb darauf geschlossen

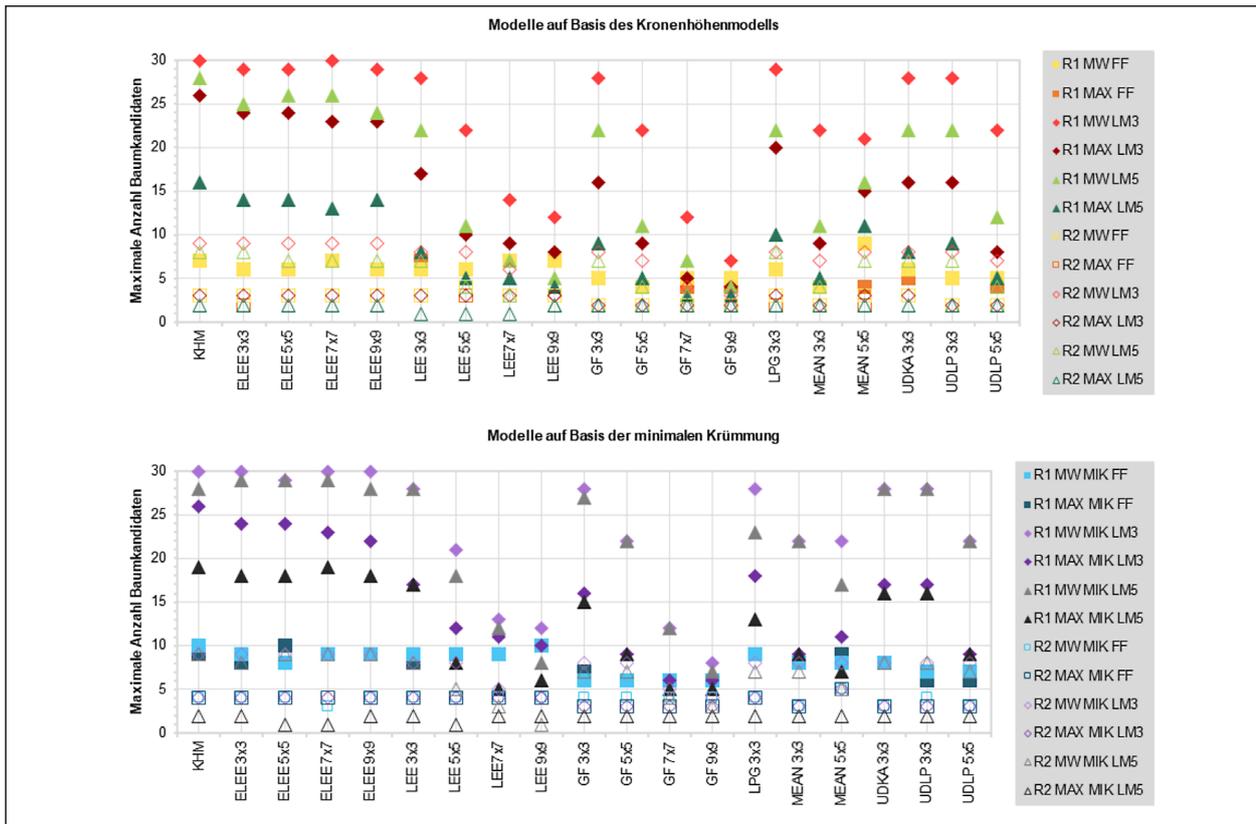


Bild 6-17: Maximale Anzahl von Baumkandidaten innerhalb der gepufferten Fläche (3M) der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} ; MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

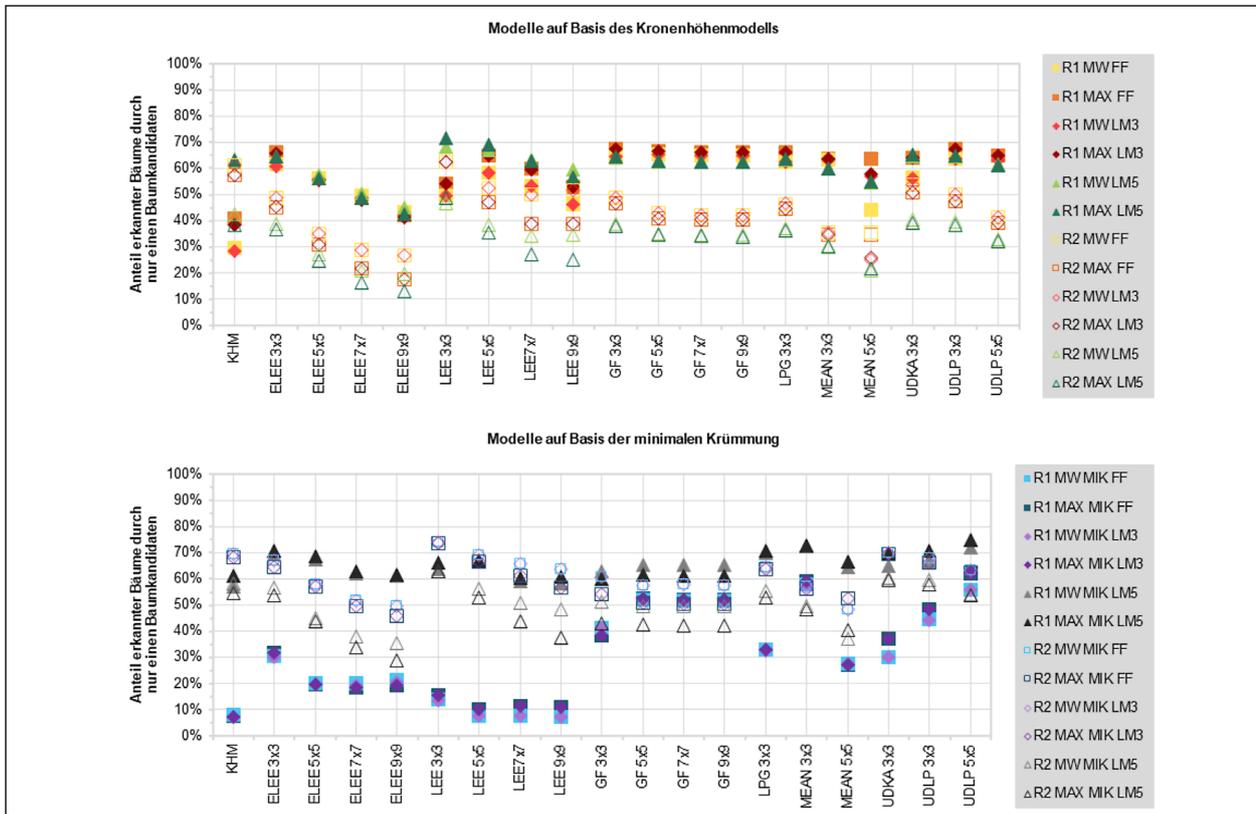


Bild 6-18: Anteil von erkannten Bäumen mit nur einem Punkt innerhalb des 3M-Puffers der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} ; MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

werden kann, dass diese auch im Allgemeinen dazu neigen, diesbezüglich weniger fehleranfällig zu sein.

Die Modelle mit den konstant geringsten maximalen Punkten je 3M-Fläche sind die FF-Modelle, welche deshalb bei ansonsten gleichen Ergebnissen der LM-Methode zu bevorzugen wären. Relevant wird dies jedoch erst, wenn es sehr viele einzelne 3M-Flächen gibt, die eine hohe bis sehr hohe Belegung aufweisen, wovon nach Sichtung der Daten jedoch nicht ausgegangen werden muss. Weiterhin treten die sehr hohen Klassen besonders in Ebenen auf, in denen es ggf. keine Höhenunterschiede oder Krümmung zu verzeichnen gibt, womit praktisch alle Pixel als lokales Maximum gekennzeichnet würden. Dieser Umstand kann bereits durch Setzen eines minimalen Höhenwertes für das Kronenhöhenmodell (z. B. 0,5 m) korrigiert werden. Für die Beurteilung der Mehrfachbelegung sind daher vor allem kleinere Klassen unter 10 Punkten je 3M-Fläche interessant.

6.4.4 Erste Glättungsstufe: Einfache Belegung

Für diesen Parameter wurde untersucht, wie hoch der Anteil der erkannten 3M-Flächen ist, welche nur durch einen Punkt belegt werden. Ein Wert von 100 % stellt den Idealfall dar und würde zudem bedeuten, dass keine anderen Baumkronen bzw. 3M-Flächen mit mehr als einem Punkt existieren. Das Ergebnis ist in Bild 6-18 dargestellt. Der Wertebereich für die Anzahl der nur durch einen Punkt belegten Baumkronen reicht von ca. 10 % in den schlechten bis ca. 75 % in den vielversprechendsten Modellen. Die höchsten Werte werden hierbei nur durch die Lee- und Tiefpass-Filter erreicht.

Im Umkehrschluss zu den Klassen der Mehrfachbelegung bedeutet dies, dass bei den besten Modellen diesbezüglich nur ca. 25 % der 3M-Flächen mit mehr als einem Punkt belegt wurden.

6.4.5 Glättungsstufen 2 und 3

Die folgenden Abbildungen stellen die Ergebnisse der Glättungsstufen 2 und 3 im Vergleich mit den dazugehörigen Modellen aus Stufe 1 gegenüber. Zur Analyse wurden 2 KHM_{R1}- und 5 MIK_{R1}-Modelle (S1) ausgewählt und mit den Filtern LEE 3x3, GF 3x3 und GF 5x5 ein weiteres Mal geglättet (S2), der dritte Durchlauf (S3) wurde nur mit Gauß-Filtern durchgeführt.

Für den Anteil an erkannten Bäumen (Bild 6-19) bietet sich das bereits bekannte Bild: mit zunehmender Größe der Nachbarschaft (LM3 vs. LM5) verringert sich auch der Anteil wieder erkannter Bäume. Weiterhin ist zu erkennen, dass auch die Glättungsstufe Einfluss auf das Ergebnis besitzt, da von Stufe 1 an begonnen bis zu Stufe 3 die Erkennungsrate praktisch kontinuierlich und filterunabhängig sinkt. Zudem performen auch bei mehrfacher Glättung die KHM_{R1}-Modelle für in Hinblick auf die Erkennung der Individuen aus den Baumkatastern schlechter als die MIK_{R1}-Modelle.

Bezüglich der Mehrfachbelegung der 3M-Umringe (Bild 6-20) bestätigt sich zunächst das Bild, dass die 3M-Flächen in den MIK-Modellen gegenüber den KHM-Modellen aufgrund der auch insgesamt höheren Punktzahl häufiger überbelegt werden. Dennoch wird auch deutlich, dass die mehrstufige Glättung, insbesondere der Gauß-Filter die Menge an Mehrfachklassifikationen drastisch senkt, wobei die größte Verbesserung von Stufe 1 zu Stufe 2 zu erkennen ist. Stufe 3 reduziert zwar weiterhin, je-

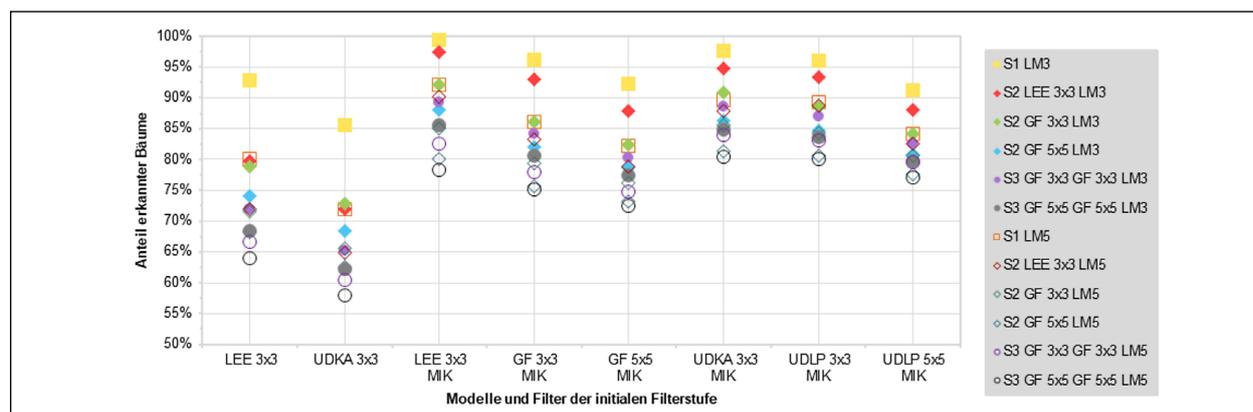


Bild 6-19: Anteil erkannter Bäume (3M) für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.

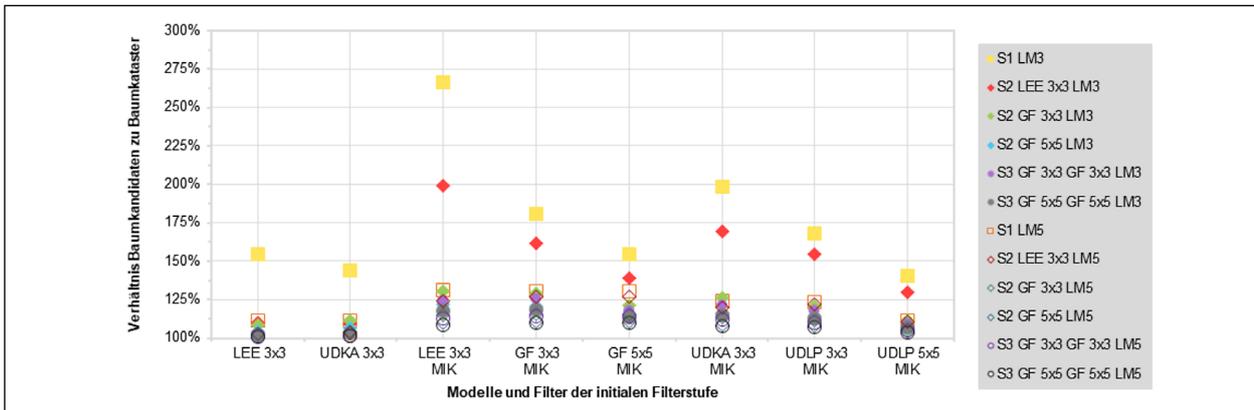


Bild 6-20: Verhältnis von Punktzahl und bekannten Bäumen (3M) für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.

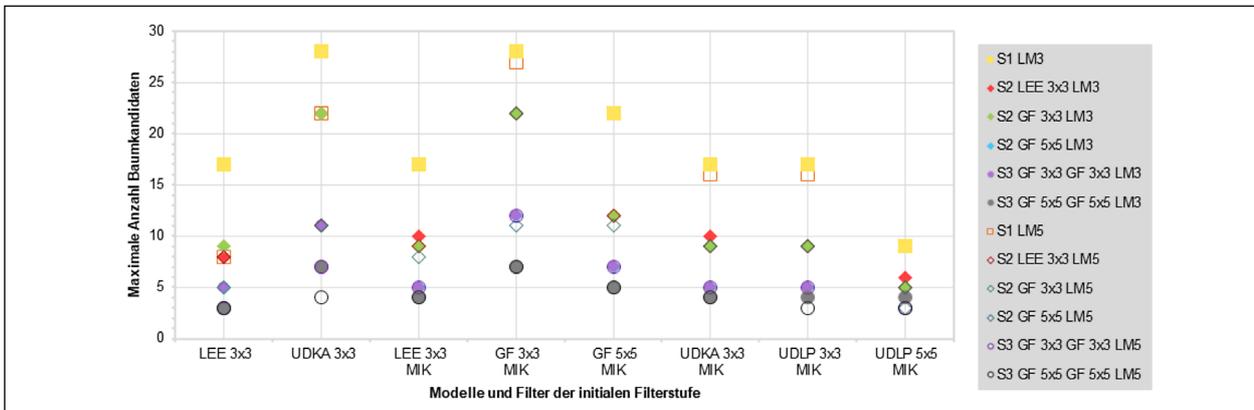


Bild 6-21: Anzahl von Punkten (Maximum) innerhalb 3M-Puffer für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.

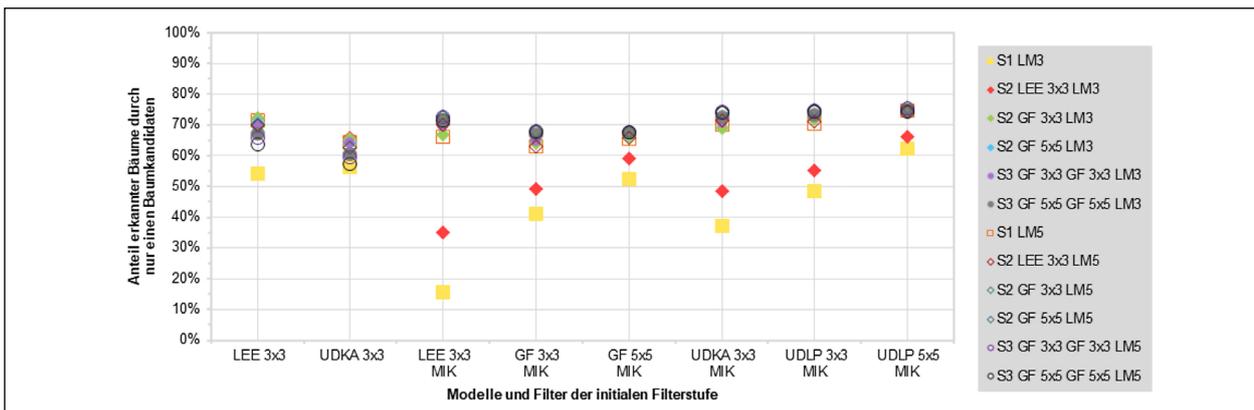


Bild 6-22: Anteil der 3M-Pufferflächen mit nur einem Punkt für Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.

doch lässt der Effekt im Vergleich zum vorherigen Schritt deutlich nach.

Die maximale Anzahl bzw. die Klassenanzahl von generierten Punkten innerhalb einer 3M-Pufferzone nimmt mit zunehmender Glättungsstufe sowie Filtergröße ab (Bild 6-21). Die Größe der Nachbarschaft zur Erkennung der lokalen Maxima (LM3 vs.

LM5) spielt hier jedoch scheinbar nur eine sehr untergeordnete Rolle, da die LM3- und LM5-Modelle weitestgehend gleichauf sind. Weiterhin bestätigt sich, dass der Gauß-Filter gegenüber dem Lee-Filter stärker glättet und somit auch ggf. Fehlklassifikationen verringert werden.

Bezüglich des Anteils an 3M-Umringen mit nur einem Belegpunkt (Bild 6-22) befinden sich die meisten Modelle zwischen 60 % und 70 %. Im Vergleich zur ersten Glättungsstufe können die Ergebnisse zudem mit zwei- oder dreifacher Glättung leicht verbessert werden (mehr Baumkronen mit nur einem Belegpunkt). Weiterhin wird deutlich, dass die größere Nachbarschaft des LM5 gegenüber dem LM3 insbesondere bei den MIK-Modellen zur Reduzierung der Mehrfachklassifikationen und somit zur Erhöhung der durch nur einen Punkt belegten 3M-Flächen führt.

6.5 Modelle zur Feinabstimmung und Methodikauswahl

6.5.1 Vorgehen

Zur Auswertung der zur weiteren Abstimmung ausgewählten und angepassten Modelle (Kapitel 5.8.2) wurden hinsichtlich der Erkennungsrate zuzüglich des 3M-Datensatzes auch der KRM10M-Validierungsdatensatz, welcher auf den bekannten Kronendurchmessern beruht, genutzt. Die Einschätzung der Modellgüte bezüglich der Anzahl von Individuen je Fläche wurde differenziert nach Baumtyp mit dem DB- sowie ohne Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen mit den BK-Datensätzen durchgeführt. Weiterhin wurden die Optionen (Kapitel 5.6) zur Reduzierung der Mehrfachbelegung mithilfe des objektorientierten Ansatzes geprüft. Speziell zur Einschätzung des Ansatzes mittels dynamischer Segmentierung bzw. Verwendung von unveränderlichen Gitternetzen wurde zusätzlich der OB-Datensatz einbezogen, sodass hier an den Lokationen der bekannten Punkte aus den Baumkatastern anstelle der kreisförmigen Pufferflächen (3M-Versi-

on) nun von der Baumkrone abhängige Formen bzw. entsprechend die einzelnen Kacheln der Gitternetze in den Größen 5x5, 7x7 und 9x9 m genutzt wurden.

Die entsprechenden Modelle wurden so ausgewählt, dass eine hohe Bandbreite der Ergebnisse abgedeckt wird, wobei als Grenzwert für die minimale Trefferquote der 3M-Validierung 70 % angesetzt wurde. Weiterhin wurde bei der Auswahl auf eine möglichst geringe Mehrfachklassifikation – bzw. einen hohen Prozentsatz erkannter Bäume mit nur einem Punkt innerhalb des 3 m Radius – geachtet. Insgesamt wurden 11 Modelle weiter ausgewertet, davon 3 auf Basis des Kronenhöhenmodells (3 KHM_{R1}) und 8 auf Grundlage der minimalen Krümmung (6 MIK_{R1}, 2 MIK_{R2}).

Da sich die FF- und die LM3-Versionen hinsichtlich der Erkennungsraten nur sehr geringfügig unterscheiden, wurde für die Erkennung der Baumkronen aus praktischen Gründen der Fokus auf die LM3-Maske gelegt. Analog gilt dies für die Varianten KHM_{MW} und KHM_{MAX}. Da bei letzterem sowohl die Baumhöhe genauer ist als auch insgesamt weniger Klassen bei der Mehrfachklassifikation gegenüber den KHM_{MW} Versionen auftreten, wurde das KHM_{MAX} für die weitere Auswertung genutzt.

6.5.2 Objektorientierter Ansatz

Die Ergebnisse bezüglich der lagebezogenen Auswertung bekannter Bäume auf Basis der OB-Datensätze sind in Bild 6-23 dargestellt. Hierbei wurde geprüft, wieviel Objekte (die im Vorfeld mit den bekannten Individuen der Baumkataster verschnitten wurden) noch mit den Baumkandidaten der Modellberechnungen übereinstimmen. Es wird gezeigt,

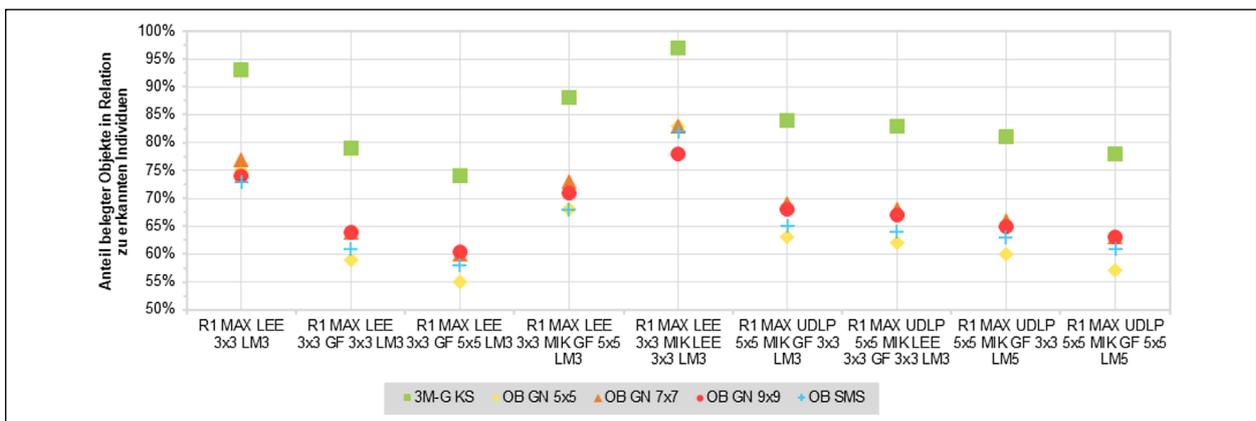


Bild 6-23: Ergebnisübersicht der Feinabstimmungsmodelle mit dem auf Objekten basierenden OB-Datensatz für den Gesamtbestand. KS: Keine Segmentierung/Objektbildung, GN: Gitternetz als Pseudo-Objekte, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

dass die Anzahl der Objekte, in denen sich die Punkte der berechneten Modelle befinden, erheblich geringer ist als die Zahl der zum Vergleich dargestellten Flächen der 3M-Version. Im Durchschnitt wird somit die Punktzahl zum Ausgangswert der 3M-Modelle um ca. 20 % reduziert, wobei die Abweichung innerhalb einer Modellvariante nicht mehr als 5 % beträgt. Als Gründe hierfür sind vorrangig die Form und Größe der Objekte zu nennen, welche weder bei der dynamischen Segmentierung und auch erwartungsgemäß bei Verwendung der Kronenform-unabhängigen Gitternetze nicht exakt mit den realen Umrissen übereinstimmen. Besonders kleine Objekte, die mit einem Individuum aus dem Baumkataster überlagern, bilden ggf. durch die abweichende Lage der Baumkandidaten aus den Modellberechnungen keine Schnittmenge. Große Segmente oder Kacheln können u. U. zu einer Zusammenfassung der Bäume führen (Verringerung der Punktmenge), wobei dies nur dann relevant wird, wenn sehr viele engstehende Bäume existieren. Weiterhin kann festgestellt werden, dass mithilfe der formabhängigen Objekte bei einer mittleren Größe von ca. 50 m² eine im Durchschnitt etwas stärkere Reduzierung als bei den Kacheln mit 7x7 m Kantenlänge und praktisch gleicher Flächengröße stattfindet.

Weitaus unabhängiger in Bezug auf die Lage der Bäume ist der Vergleich hinsichtlich der Anzahl von Objekten innerhalb einer Fläche, für welche auch die Anzahl der vorhandenen Individuen bekannt ist. Hierbei wurde zwar ebenfalls geprüft, wieviele Objekte innerhalb der vorgegebenen Fläche von den Baumkandidaten der Modellberechnungen belegt

werden, jedoch ohne vorherige Abfrage zur Lage der bekannten Bäume. Die Ergebnisse hierfür sind in Bild 6-24 dargestellt und sind für die händisch digitalisierte Fläche (DB-Datensatz) sowohl für den Gesamtbestand (G) als auch separat für den Nadelbaumbestand (NB) ausgewiesen. Für die vier Modelle, welche zusätzlich innerhalb der BK-Fläche getestet wurden, kam der undifferenzierte Datensatz zur Anwendung. Zusätzlich wurden die Baumkandidaten zur Abfrage mit den dynamisch erzeugten Objekten (Segment-Mean-Shift-Funktion) im Voraus mit einem Mindestwert für das Kronenhöhenmodell (2 m) und den NDVI (0,2) gefiltert.

Hinsichtlich der DB-Fläche ist für den Gesamtbestand eine durchschnittliche Reduzierung der Ausgangspunktmenge zwischen ca. 3 % und 75 % zu verzeichnen, im Durchschnitt etwa 14 % für das Gitternetz mit 5x5 m Kachelgröße und ca. 50 % für das Gitternetz mit 9x9 m Kachelgröße. Dieser Trend ist modellunabhängig. Die dynamisch generierten Objekte verzeichnen im Schnitt eine ca. 20 % geringere Belegung, wobei auch hier die Spannweite zwischen ca. 10 % Minimum und 40 % Maximum liegt. Bezüglich der Nadelbäume werden insgesamt etwa 5 % bis 10 % weniger Objekte als beim Gesamtbestand ausgewiesen, was aufgrund des weitaus geringeren Kronenumfangs gegenüber den restlichen Laubbäumen im Datensatz plausibel erscheint.

Bezüglich der BK-Fläche reichen die Modellmittelwerte von ca. 2 % Reduzierung für das 5x5 m Gitternetz bis zu ca. 23 % Verringerung für das 9x9 m Gitter. Bei den dynamisch erstellten Segmenten wurden im Vergleich zum unsegmentierten Ergebnis ca. 20 % weniger Objekte belegt.

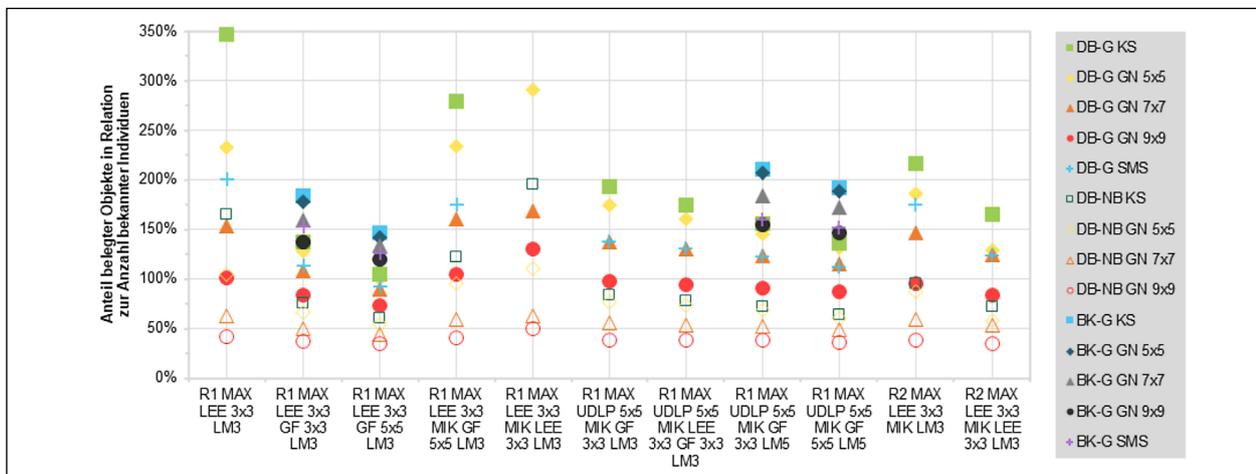


Bild 6-24: Ergebnisübersicht der Feinabstimmungsmodelle mit den DB- und BK-Datensätzen für den Gesamtbestand (G) als auch separat für die Nadelbäume (NB, nur DB-Daten). KS: Keine Segmentierung, GN: Gitternetz als Pseudo-Objekte, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

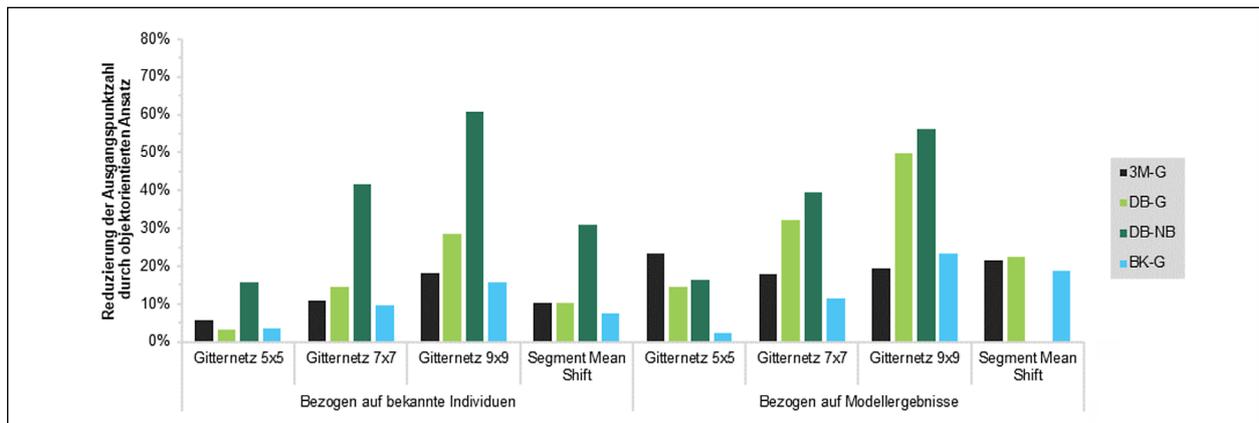


Bild 6-25: Durchschnittliche Reduzierung der Punktzahl mithilfe generierter Objekte für bekannte Individuen aus den Testdatensätzen sowie den Modellergebnissen. 3M: Testdatensatz B, DB: Digitalisierte Bäume unter Berücksichtigung aller Individuen (G) sowie separat der Nadelbäume (NB), BK: Bäume der Testfläche BK.

Weiterhin wurde der Vergleich anstelle eines Abgleichs der Objekte mit den Modellergebnissen zusätzlich mit den vorhandenen Baumkatastern bzw. digitalisierten Individuen durchgeführt (Bild 6-25). Dabei konnten die bekannten Bäume im Durchschnitt um nachfolgende Prozentsätze reduziert werden: 4 % für Kacheln 5x5 m, 12 % für Kacheln 7x7 m, 20% für Kacheln 9x9 m. Drastisch wirkt sich diese Maßnahme jedoch bei den Nadelbäumen aus. Hier wird die Punktemenge bei der Verwendung der 9x9-m-Kacheln bereits um ca. 67 % verringert, sodass diese Flächengröße praktisch ausgeschlossen werden kann. Durch die dynamisch erzeugten Objekte wird im Mittel ca. 10 % der Punktemenge entfernt (31 % bei Nadelbäumen). Generell ist ersichtlich, dass ein Gitternetz mit kleinen Kacheln auch Individuen mit kleinen Kronendurchmessern besser abbildet, jedoch insgesamt zu wenige Punkte gefiltert werden. Umgekehrt gilt das auch für Gitternetze mit großen Kacheln. Aufgrund der zu erwartenden Heterogenität im Baumbestand, des Kronendurchmessers, erscheint hier aufgrund der Formeigenschaften die Nutzung von dynamisch erzeugten Objekten als sinnvoll. Die Filterleistung dieser Objekte ist dabei im Allgemeinen im Bereich von den Gitternetzen mit 5x5 m und 7x7 m Kachelgröße anzusiedeln, jedoch geschieht dies viel selektiver, da die Segmentgröße auch von der jeweiligen Baumkrone abhängt.

Mit Blick auf die Nadelbaumanzahl lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen ebenfalls ableiten, dass eine Differenzierung von Laub- und Nadelbäumen im Voraus als Grundlage zur Nutzung verschiedener Baumtyp-abhängiger Modelle (z. B. mit und ohne Segmentierung) sinnvoll wäre und insgesamt zur Verbesserung der Ergebnisse beitragen

kann, da speziell bei den Nadelbäumen die Zahl der Baumkandidaten in dicht bewachsenen Gebieten signifikant sinkt.

6.5.3 Vergleich der Kronenhöhenmodelle (KHM_{BI} vs. KHM_{TRI})

Entsprechend den bisherigen Ergebnissen, insbesondere in Hinsicht auf die Anzahl der Baumkandidaten in den DB- und BK-Flächen und den Bereichen mit dichtem Baumstand, wurden die Modelle deshalb weiteren Auswertungen unterzogen und zusätzliche Anpassungen, wie z. B. der Vergleich zwischen den auf Binning und Triangulation basierenden Kronenhöhenmodellen (KHM_{BI} bzw. KHM_{TRI}), getestet. Bezüglich der Segmentierung wurde in einigen bestehenden Modellen die SMS-Version gegen die Alternative der ISO Cluster Classification (IC-Modelle) ausgetauscht.

Bild 6-26 stellt die Modellergebnisse der Einzelbaumdetektion mit den Validierungsdatensätzen 3M-G (3 m Radius, Gesamtbestand), 3M-NB (3 m Radius, Nadelbaumbestand) sowie KR10M-G (Kronenradius von max. 10 m, Gesamtbestand) dar. Die Auswahl der Methoden wurde dabei iterativ auf Basis der besten Ergebnisse ergänzt.

Der Vergleich der Kronenhöhenmodelle, welche auf Basis des DOM_{BI} bzw. DOM_{TRI} erstellt wurden, zeigt, dass die KHM_{BI} -Versionen (B) gegenüber den KHM_{TRI} (T) i. d. R. um 1 % bis 5 % besser abschneiden und somit mehr bekannte Bäume wiedererkennen. Bezüglich der späteren Auswahl eines Modells zur Übernahme in die ArcGIS-Werkzeuge sollte jedoch ein Modell gewählt werden, welches möglichst ähnliche Ergebnisse liefert und weniger abhängig von der Aufbereitung der Kronenhöhenmodelle ist,

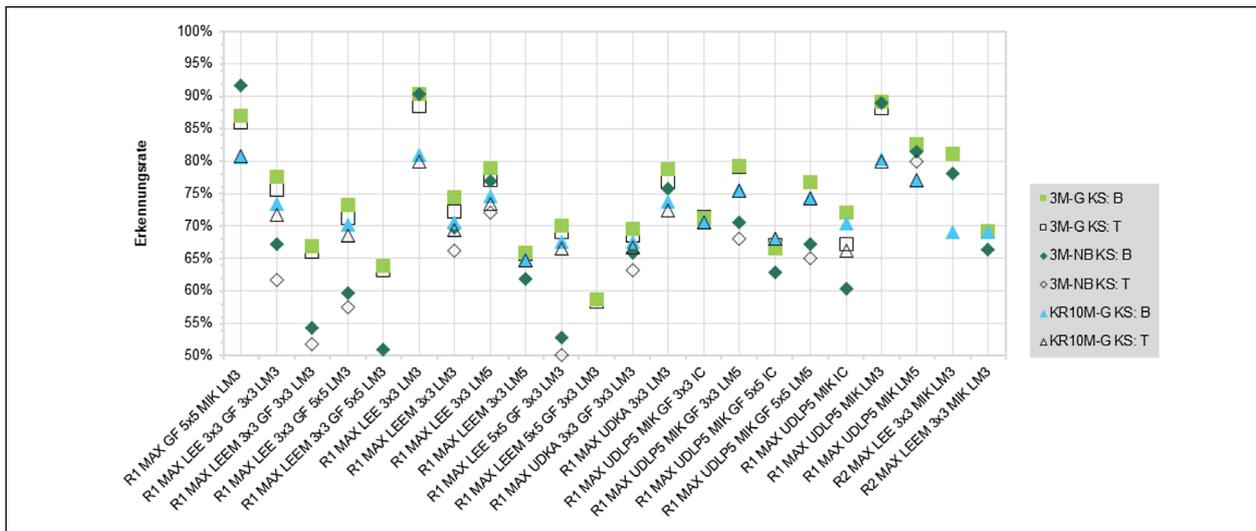


Bild 6-26: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit den 3M und KR10M-Datensätzen für den Gesamtbestand (G) sowie für Nadelbäume (NB, nur 3M-Daten). KS: Keine Segmentierung. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.

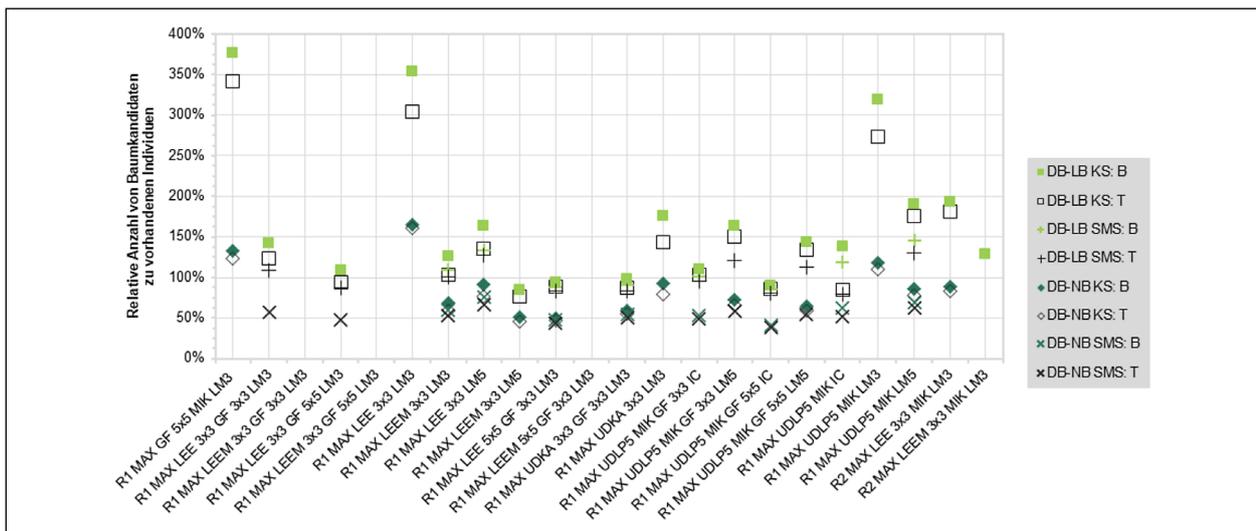


Bild 6-27: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit dem DB-Datensatz für den Laub- (LB) und für Nadelbaumbestand (NB). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.

da nicht einzuschätzen ist, welche Datenbasis und -qualität in anderen Bundesländern vorliegt. Bei der Auswertung des Gesamtbestandes mittels 3M- und KR10M-Datensätzen ist sichtbar, dass die Erkennungsraten des auf dem Kronenradius basierenden Validierungsdatensatzes durchweg schlechtere Erkennungsraten aufweisen als die des 3M-Datensatzes. Zudem sind hier KHM_{BI} und KHM_{TRI} häufig gleichauf. Diese Umstände deuten darauf hin, dass insbesondere kleinere Baumkronen nicht erfasst werden, da hier die Glättung und Aufbereitungsmethodik stärker zum Tragen kommt als bei großen Baumkronen, die von den meisten Modellen problemlos wiedererkannt werden. Weiterhin ist aus den

Ergebnissen abzulesen, dass die Modellqualität bezüglich der Erkennung des Nadelbaumbestandes erheblich von der Glättungsstufe abhängt. Eine Erkennungsraten von mehr als 70 % oder 80 % für Nadelbäume wird hierbei nur von den Modellen der initialen Glättungsstufe erreicht, die jedoch bei der flächenbezogenen Auswertung erheblich zu viele Baumkandidaten ausweisen. Die Ergebnisse der Modellberechnungen auf Basis der zweiten Glättungsstufe sind bereits deutlich schlechter und befinden sich im Allgemeinen im Bereich zwischen 50 % und 60 %, besitzen dafür plausiblere Werte in der Auswertung bezüglich der Baumanzahl pro Fläche (vorrangig Laubbäume mit größeren Kronen).

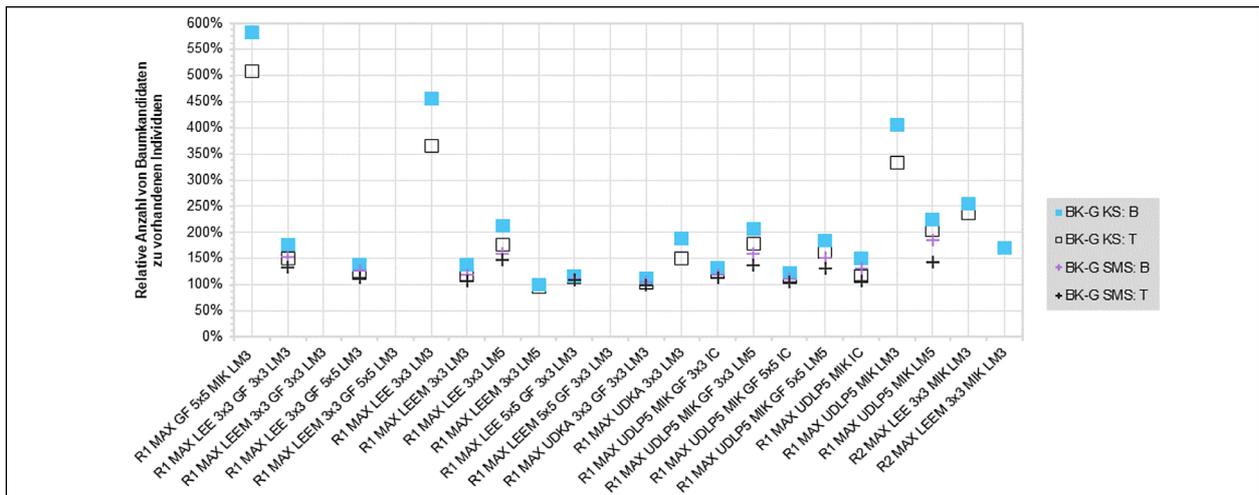


Bild 6-28: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit dem BK-Datensatz für den Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.

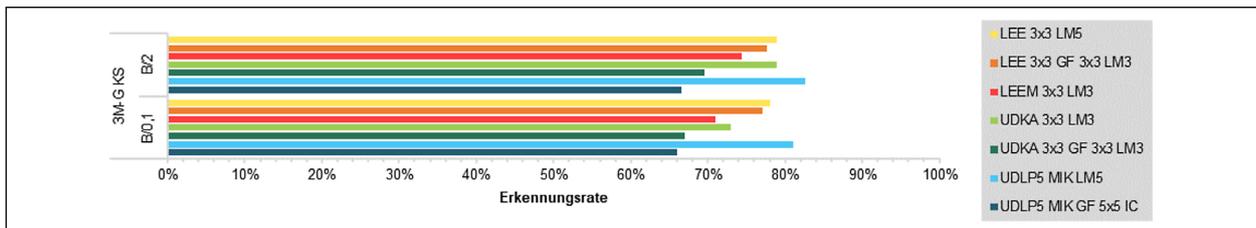


Bild 6-29: Vergleich ausgewählter Modelle auf Basis des KHM_{BI} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für den 3M-Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.

In Bild 6-27 sind die Resultate für die Auswertung des DB-Validierungsdatensatzes zum Vergleich der Baumanzahl innerhalb der DB-Fläche mit als auch ohne Segmentierung dargestellt. Insgesamt zeigt sich hier im Vergleich zu den 3M- und KR10M-Validierungsdaten ein vergleichbares Bild, wobei die Modelle mit Segmentierung bezogen auf die Laubbäume jeweils eine um 10 % bis 20 % verringerte Anzahl Baumkandidaten ausweisen (Nadelbäume ca. 10 %).

Die Auswertung der BK-Fläche (Bild 6-28) ergibt prinzipiell vergleichbare Resultate, jedoch liegt hier der Prozentsatz der Baumkandidatenanzahl im Verhältnis zu den tatsächlich vorhandenen Bäumen unabhängig vom gewählten Modell i. d. R. über dem der DB-Fläche, sodass es mit den vorhandenen Modellen nicht möglich ist, die Ergebnisse beider Validierungsdatensätze auf das gleiche Niveau zu bringen. Ursache hierfür kann z. B. die Vegetationsstruktur sein, welche in den DB-Daten durch sehr dichten Baumstand mit teils nicht sichtbaren Baumkronenübergängen gekennzeichnet ist, wohingegen in der BK-Fläche größtenteils Einzelbäume und Baumgruppen mit großen Baumkronen zu finden sind. Weiterhin besitzen auch die Baumhöhe

und -kronenform Einfluss auf das Ergebnis, da bei engem Stand und ähnlichen Höhen ggf. die kleinen Unterschiede durch die stärker geglätteten Modelle nicht erfasst werden können. Bezüglich der Kronenoberfläche ist darüber hinaus für das Modellergebnis entscheidend, ob diese speziell bei den Laubbäumen eher homogen ausgeprägt ist oder sehr unruhig verläuft, sodass ggf. Nebenmaxima erkannt werden. Insbesondere bei den DB-Daten ist dies aufgrund des großen Umfangs der Baumkronen nicht auszuschließen, weshalb an dieser Stelle auch etwas höhere Prozentsätze die Realität durchaus näher widerspiegeln können.

6.5.4 Vergleich der Mindesthöhendifferenz für Ausreißer

Nach dem Vergleich der Kronenhöhenmodellvarianten KHM_{BI} und KHM_{TRI} wurde zusätzlich zum bestehenden KHM_{BI} mit 2 m Ausreißerkorrektur (B/2) ein KHM_{BI} mit 0,1 m Korrektur erstellt (B/0,1). Die Ergebnisse bezüglich des 3M-Validierungsdatensatzes sind in Bild 6-29 dargestellt. Dabei zeigen die B/0,1-Modelle stets eine zwischen 1 % und 5 % geringere Erkennungsrate als die auf Basis des KHM mit B/2.

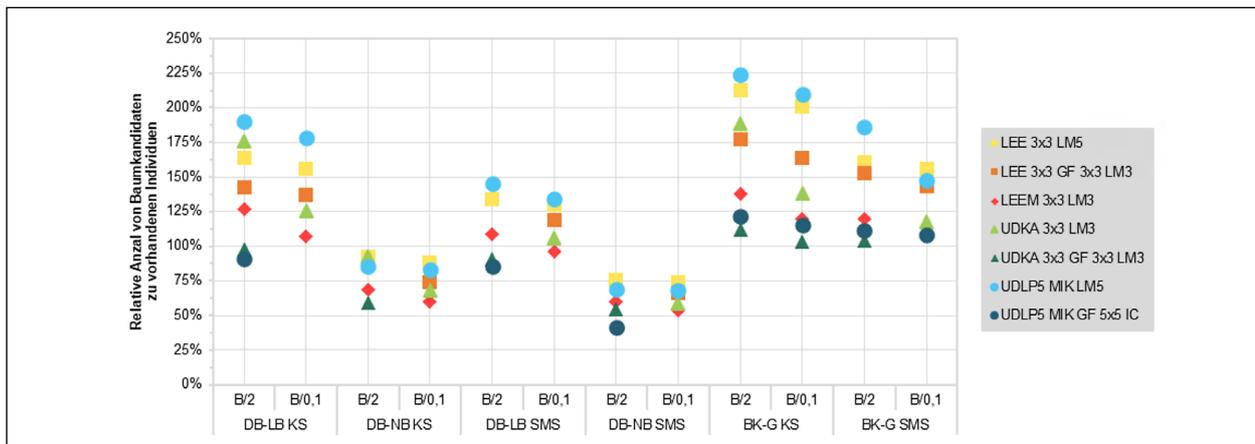


Bild 6-30: Vergleich ausgewählter Modelle auf Basis des KHM_{BI} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für die DB- und BK-Datensätze im Laubbaum- (LB), Nadelbaum- (NB) und Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.

Für die Validierung mithilfe der DB- und BK-Datensätze (Bild 6-30) zeichnet sich dabei prinzipiell das gleiche Bild ab. Weiterhin kann festgestellt werden, dass sich die Werte der B/0,1-Version hinsichtlich der Erkennungsraten und der Baumkandidatenanzahl mit denen der SMS-Segmentierung nur geringfügig unterscheiden.

6.5.5 Modellauswahl

Für die Eingrenzung der Modelle zur Integration in den GIS-Workflow wurde für die Ergebnisse des 3M-Datensatzes ein unterer Grenzwert von 70 % für den 3M-Gesamtbestand bzw. 50 % für den Nadelbaumbestand angesetzt. Bezüglich der digitalisierten Fläche (DB-Datensatz) ist anzumerken, dass es methodisch bedingt bei der Digitalisierung von Bäumen mithilfe digitaler Orthofotos ggf. zu einer Unterschätzung der Baumanzahl kommen kann. Aus diesem Grund sollten die Modellergebnisse für diesen Validierungsdatensatz bezüglich der Laubbäume nicht viel weniger als 100 % und bezüglich der Nadelbäume nicht weniger als 50 % der digitalisierten Anzahl aufweisen. Für die Ergebnisse in Hinblick auf den BK-Datensatz wurde nach deren Durchsicht ein oberer Grenzwert von ca. 120 % festgelegt. Insgesamt wurde deutlich, dass die Ergebnisse der DB- und BK-Datensätze nicht vollständig auf ein Level zu bringen und die angestrebten Werte meist nur unter Einsatz des objektorientierten Ansatzes realisierbar sind. Der relativ niedrig angesetzte Wert für die 3M-Validierungsdaten ist, obwohl Modelle mit weitaus höheren Erkennungsraten existieren, in Verbindung mit der flächenhaften Auswertung zu sehen, da höhere Erkennungsraten auch stets eine viel höhere Zahl an

Baumkandidaten in den DB- und BK-Flächen mit sich bringen. Zusätzlich sollten die Modelle möglichst geringe Schwankungen hinsichtlich der KHM_{BI} und KHM_{TRI} -Variation sowie der B/2- und B/0,1-Korrekturen aufweisen. Unter Einbeziehung der Thematik aufgrund der durch Infrastruktur (z. B. Hochspannungsleitungen) verursachten Fehlklassifikationen sind darüber hinaus sowohl Modelle mit lokalem Maximum als auch dem ISO-Cluster-Classifer-Ansatz zu berücksichtigen, da letztere in Bezug auf die Filterung dieser Fehler weitaus effektiver funktionieren.

Basierend auf diesen Rahmenbedingungen kommen für die Auswahl möglicher Methoden folgende Versionen in die nähere Betrachtung:

- LEE 3x3 GF 5x5 LM3
- LEEM 3x3 LM3
- LEE 5x5 GF 3x3 LM3
- UDKA 3x3 GF 3x3 LM3
- UDLP 5x5 MIK GF 3x3 IC

Aus diesen potenziellen Verfahren wurden auf Basis der Erkennungsraten und Anzahl der Baumkandidaten bei der flächenbezogenen Auswertung zwei Methoden für eine weitere Analyse herangezogen:

- UDKA 3x3 GF 3x3 LM3
- UDLP 5x5 GF 3x3 IC

Anschließend wurde für diese beiden Ansätze letztlich noch anstelle der Segmentierung mittels Segment Mean Shift die Objektbildung mithilfe des ISO Cluster Classifiers durchgeführt und verglichen

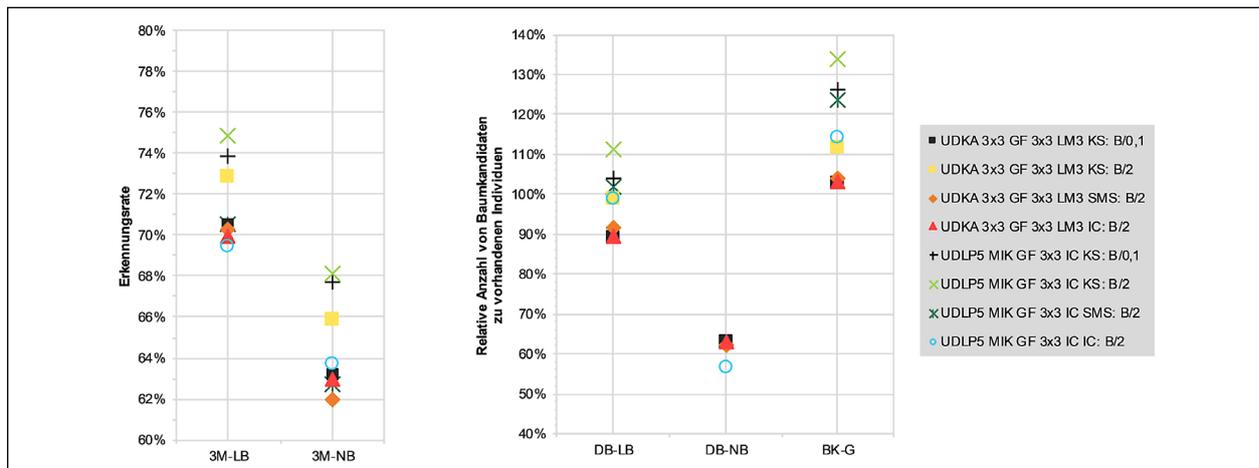


Bild 6-31: Finaler Modellvergleich auf Basis des KHM_{Bj} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für die 3M-, DB- und BK-Datensätze im Laubbaum- (LB), Nadelbaum- (NB) und Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, IC: ISO Cluster Classifier (sowohl zur Erkennung als auch zur Segmentierung).

(Bild 6-31). Bezüglich des 3M-Datensatzes konnte hierbei festgestellt werden, dass die Erkennungsrate durch die Objektbildung insgesamt um bis zu 5 % reduziert wird (d. h. ca. 5 % der ausgewiesenen Baumkandidaten werden zu einem Objekt zusammengefasst). Mit Blick auf die Ergebnisse der DB- und BK-Validierungsdaten wird zudem deutlich, dass die IC-Segmentierung gegenüber dem SMS-Ansatz erheblich effektiver funktioniert und die Anzahl der Punkte teils um ca. 20 % gesenkt werden konnte.

Basierend auf diesen Erkenntnissen sowie einer visuellen Überprüfung bzw. Einschätzung der Modellergebnisse sind für die Einzelbaumerkennung stets die Versionen mit Segmentierung zu empfehlen, unabhängig davon ob mittels SMS- oder IC-Ansatz, da diese insbesondere bei großen Baumkronen die einzelnen Bäume besser abbilden.

6.5.6 Einschätzung der Modellergebnisse

Bereits bei der Einführung des objektorientierten Ansatzes wurde deutlich, dass die Ergebnisse der Validierung bezüglich der Erkennungsrate von Einzelbäumen stark von der Größe und Form des Objektes bzw. des Puffers um den kartierten Baum herum abhängen. Aus diesem Grund wurde für ausgewählte Modelle der bisherige Pufferradius von 3 m (3M) auf 4 m (4M) und 5 m (5M) erweitert, um so auch Baumkandidaten zu erfassen, die ggf. innerhalb einer großen Baumkrone weiter als 3 m vom kartierten Punkt entfernt sind. Darüber hinaus können so auch ggf. vorhandene Abweichungen in der Kartierung etwas ausgeglichen werden. Zusätzlich wird der KR10M-Datensatz einbezogen und für die-

sen ebenfalls auf Basis des bekannten Kronendurchmessers der Minimalwert auf 3 m, 4 m bzw. 5 m gesetzt.

Bild 6-31 zeigt die Ergebnisse der Auswertung für die ausgewählten Modelle mit und ohne Segmentierung. Hierbei wird deutlich, wie sehr die Beurteilung der Erkennungsrate von der Wahl des maximalen Abstands zu den bekannten Bäumen abhängt. Bereits eine Erhöhung des Abstandes von 1 m in alle Richtungen (4M) bringt eine Verbesserung der Detektionsrate von bis zu 10 %, um 2 m sogar um fast 20 %. Der Validierungsdatensatz, bestehend aus Bäumen bekannten Kronendurchmessers, erreicht bereits bei den Varianten mit Segmentierung Erkennungsrate von über 85 %. Ebenfalls wird aufgezeigt, dass die Segmentierung die Detektionsrate für diese Modelle um ca. 3 % senkt.

Insgesamt lässt sich darauf schließen, dass Einzelbäume mit größeren Kronendurchmessern als 6 m prinzipiell mit ca. 70 % und mit Kronendurchmessern ab 10 m bereits mit über 80 % erkannt werden. Bei kleineren Bäumen sinkt die Rate jedoch in Richtung 60 % ab, was jedoch zumindest teilweise auch auf die Genauigkeit der Kartierung zurückgeführt werden kann. Die weitaus höheren Erkennungsrate der KR10M-Versionen sind damit zu erklären, dass hier jeweils die Individuen mit kleineren Kronenradien als 3 m, 4 m und 5 m ausgeschlossen wurden und somit nur größere Baumkronen betrachtet werden.

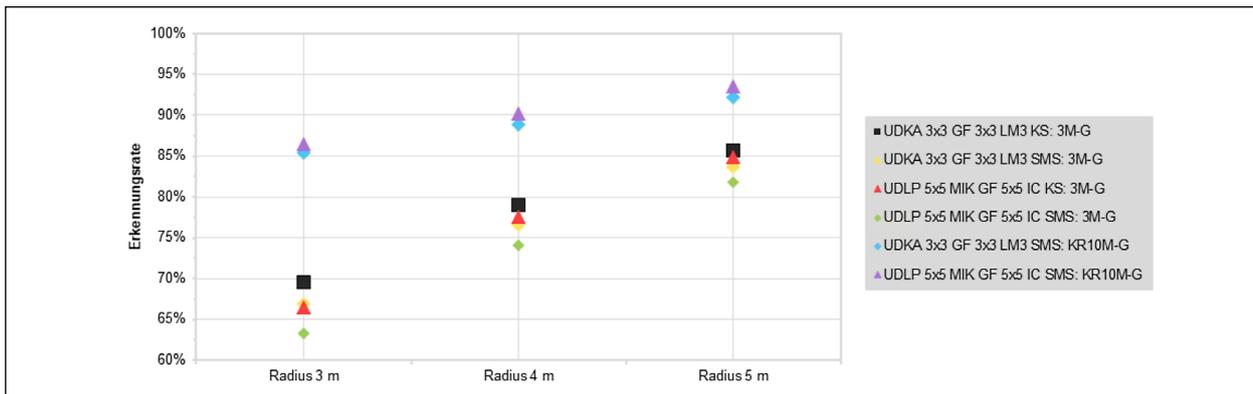


Bild 6-32: Vergleich ausgewählter Modelle bei Variation der Puffergröße um die bekannten Bäume für den 3M- und KR10M-Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, IC: ISO Cluster Classifier.

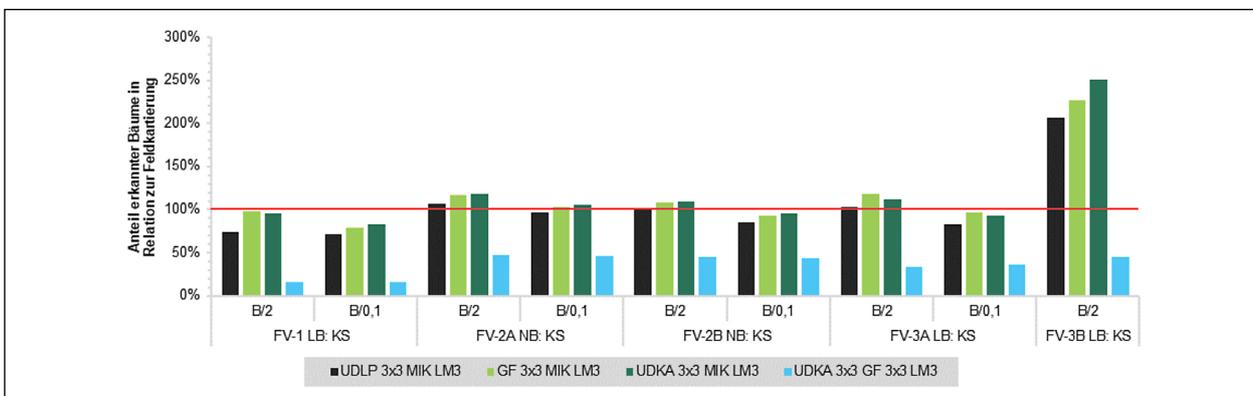


Bild 6-33: Ergebnisübersicht der Feldvalidierung. FV: Feldvalidierungsfläche mit vorherrschend Laub- (LB) oder Nadelbäumen (NB). KS: Keine Segmentierung. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3.

6.6 Integration der Kartierungsergebnisse

Die Feldkartierung wurde zur weiteren Beurteilung der Modellergebnisse hauptsächlich in Gebieten mit dichter Vegetation, d. h. in Waldgebieten, weitestgehend ohne einzelnstehende Individuen durchgeführt, da bereits durch die Baumkataster die Anzahl zur Validierung der Einzelbäume ausreichend abdeckt ist.

Bild 6-33 zeigt exemplarisch die mithilfe der Modelle erkannte Anzahl von Bäumen innerhalb der Validierungsflächen FV-1 bis FV-3B für die in der Fläche jeweils relevanten Baumtypen an. Zusätzlich zum Ansatz KHM_{BI} mit 2 m (B/2) Korrektur wurde das gleiche Modell mit 0,1 m Ausreißerkorrektur (B/0,1) berechnet und verglichen. Da insbesondere die Nadelbäume in den kartierten Flächen sehr dicht beieinanderstehen, wird die Anzahl in diesen Flächen, ebenso wie in der DB-Fläche, in dem Modell mit zweifacher Glättung signifikant unterschätzt (nur ca. 45 % der Nadelbäume werden erkannt). Bei den kleinen Laubbäumen (FV-1) werden sogar

nur ca. 16 % der kartierten Anzahl ausgewiesen. Dieser Effekt ist praktisch bei allen Ansätzen zu beobachten, welche für die Einzelbaumdetektion infrage kommen.

Aufgrund dieser bestätigenden Ergebnisse wurde zusätzlich für diese dicht bewachsenen Bereiche nach passenden Verfahren gesucht. Die zur Durchführung potenziell erfolgversprechendsten Methoden sind:

- UDLP 3x3 MIK LM3
- GF 3x3 MIK LM3
- UDKA 3x3 MIK LM3

Bei Verwendung dieser Ansätze wird jedoch auch deutlich, dass die Fläche FV-3B deutlich überschätzt wird. Für diese Kombination aus dicht stehenden Bäumen mit großem Kronendurchmesser müsste stattdessen eine etwas konservativere Methode verwendet werden.

Zusammenfassend unterstreichen die Ergebnisse der Feldvalidierung den bisherigen Eindruck, dass

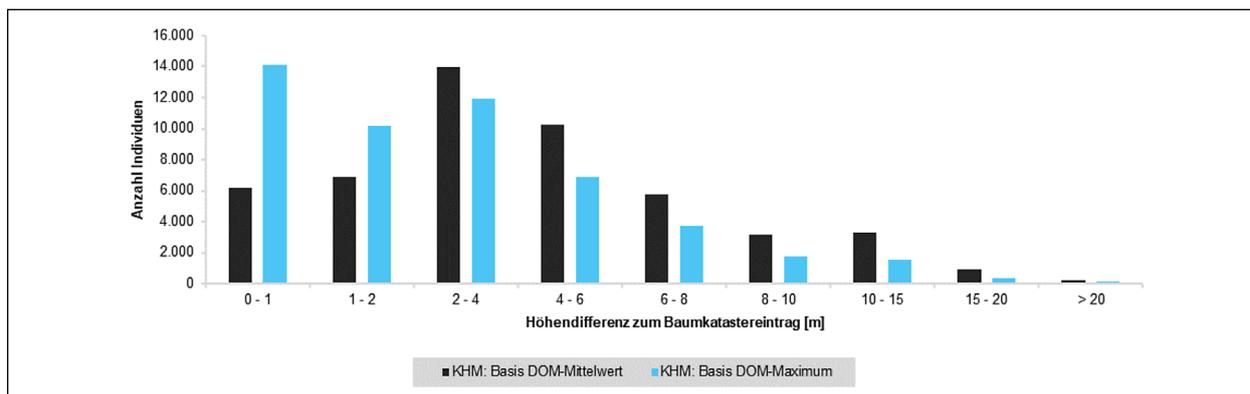


Bild 6-34: Darstellung der Baumhöhengenaugkeit. Höhendifferenz von KHM_{MW} und KHM_{MAX} im Vergleich zu bekannten Validierungsdaten der Baumkataster.

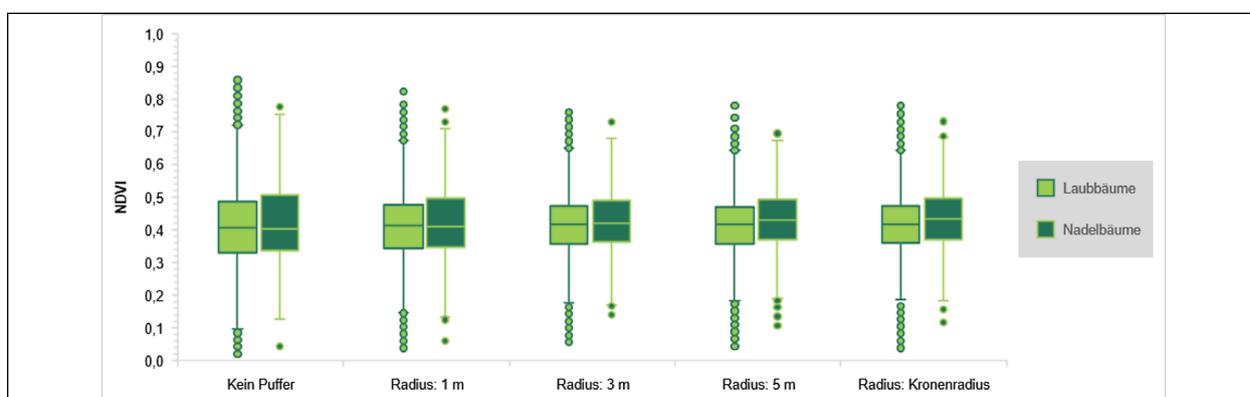


Bild 6-35: Normalized Difference Vegetation Index und Baumtypen (n: 30.188 Laub- und 701 Nadelbäume).

die unterschiedlichen Vegetationsarten bzw. -typen nicht mithilfe eines allumfassenden, generalisierten Ansatzes behandelt, sondern mit differenzierten Modellen, zumindest auf Grundlage der Baumtypen sowie der Vegetationsdichte, bearbeitet werden sollten.

6.7 Genauigkeit der Baumkronenhöhen

Unabhängig von der Qualität der Methodik zur Erkennung der Baumkronen besitzt die Art und Weise der Generierung des digitalen Oberflächenmodells – und somit auch des Kronenhöhenmodells – einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Höhen für die später zu attributierenden Baumkandidaten.

Bild 6-34 zeigt den Vergleich der Baumhöhengenaugkeit, resultierend als Differenz des KHM_{MW} bzw. KHM_{MAX} und der Höhenangabe der im Testdatensatz A verwendeten Bäume (n: 50.649). Hierbei wird deutlich, dass sich die Verteilung der Klassen zwischen den Mittelwert-basierten (KHM_{MW}) und Maximum-basierten (KHM_{MAX}) Kronenhöhen-

modellen zwar grundsätzlich ähnelt, jedoch besonders viele Punkte des KHM_{MAX} in die ersten beiden Klassen mit Höhenunterschieden zwischen 0 und 2 m fallen, wohingegen in die Klassen mit größeren Höhendifferenzen mehr Punkte des KHM_{MW} entfallen. Daraus lässt sich schließen, dass das KHM_{MAX} gegenüber dem KHM_{MW} eine etwas bessere Genauigkeit aufweist. Dies wird ebenfalls durch die statistischen Kennwerte Mittelwert (KHM_{MW} : 4,61/ KHM_{MAX} : 3,16), Median (KHM_{MW} : 3,74/ KHM_{MAX} : 2,13) und Standardabweichung (KHM_{MW} : 3,76/ KHM_{MAX} : 3,26) gestützt.

6.8 Unterscheidung von Baumtypen mittels NDVI

Das Ergebnis zur Differenzierung von Laub- und Nadelbäumen mittels NDVI ist in Bild 6-35 dargestellt. Hierfür wurden anhand des Testdatensatzes A die bekannten Bäume aus den Baumkatastern mit verschiedenen großen Radien von 1 m, 3 m und 5 m gepuffert, die Kronenradien genutzt sowie die Punkte direkt ohne Pufferung abgefragt. Für die erhaltenen Flächen wurde der NDVI-Mittelwert berechnet und in die Auswertung einbezogen. Bei Betrachtung

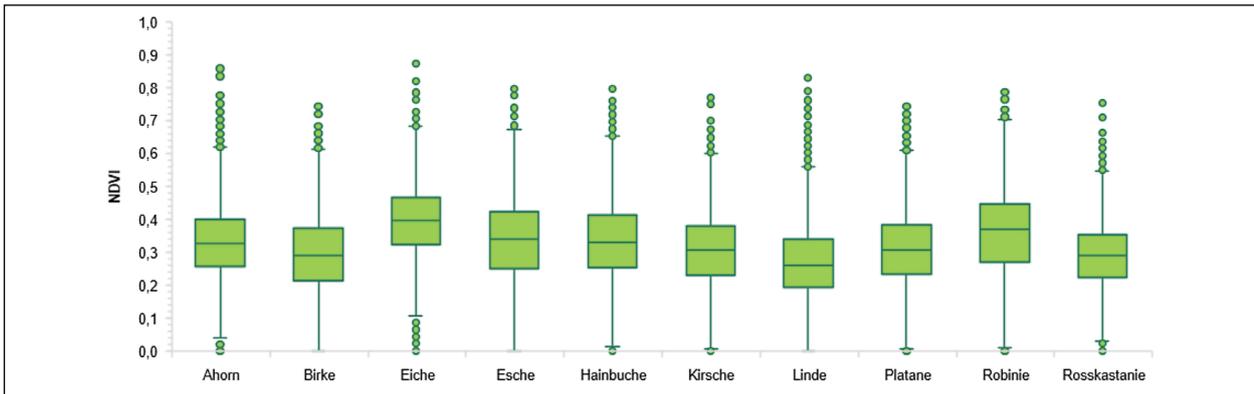


Bild 6-36: Normalized Difference Vegetation Index und Baumarten (n: 107.207 Laubbäume).

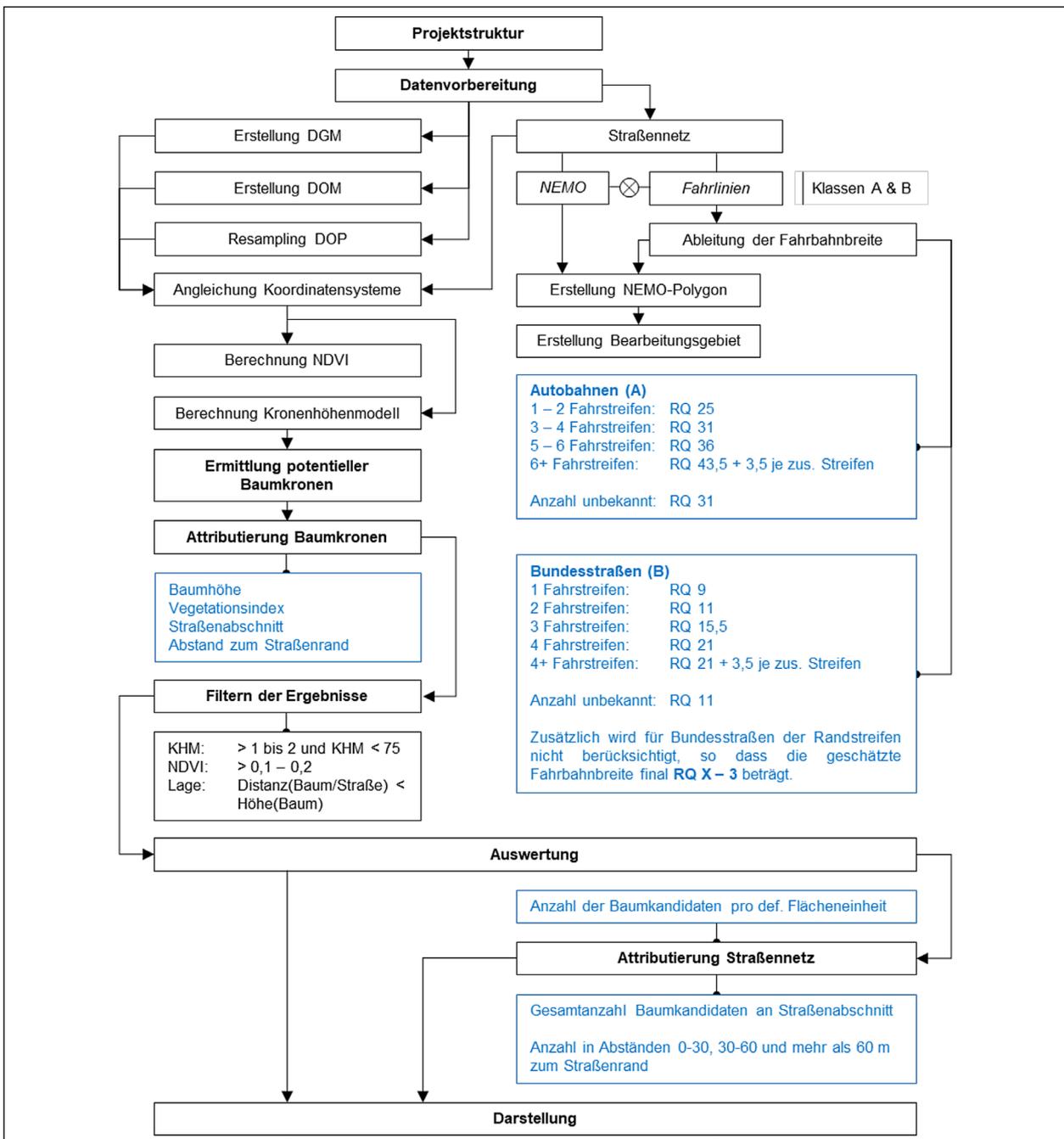


Bild 7-1: Prozess-Schema für die ArcGIS-Werkzeuge.

der Ergebnisse wird dabei deutlich, dass eine Unterscheidung der Baumtypen mittels NDVI allein nicht möglich ist, da die statistischen Kennwerte mit Ausnahme der Ausreißer praktisch die gleichen Wertebereiche abdecken und somit nicht eindeutig differenziert werden können.

Zur Unterscheidung der Baumtypen lässt sich in Anbetracht dessen maximal festhalten, dass ein Punkt mit einem NDVI von höher als 0,7 wahrscheinlich dem Typ Laubbaum zuzuordnen ist, da die Nadelbäume diesen Wert nur sehr selten überschreiten.

6.9 Unterscheidung von Baumarten mittels NDVI

Die zusätzlich zur Untersuchung der Baumtypendifferenzierung durchgeführte Baumartenunterscheidung auf Basis von Testdatensatz A ergibt im Prinzip ein ähnliches Bild wie die der Baumtypen (Bild 6-36). Zwar sind prinzipiell größere Unterschiede der statistischen Kennwerte sichtbar, jedoch liegen sowohl die Box als auch die Ausreißer einiger Baumarten sehr nah beieinander, sodass hier keine generelle Unterscheidbarkeit auf Basis des NDVI durchgeführt werden kann. Die scheinbaren Abweichungen (z. B. Eiche von Linde) können zudem auch durch ungleiche Aufnahmezeiträume zurückzuführen sein. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Baumarten auch zu verschiedenen Zeitpunkten beginnen auszutreiben und damit die vollständige Ausprägung des Blattwerkes zu unterschiedlichen Zeiten erreicht wird.

Es bleibt festzuhalten, dass für ein ganzes Landes- oder Staatsgebiet die Artenvielfalt und Datengrundlage zu heterogen sind. In einem kleineren Gebiet mit homogenen Datengrundlagen und geringer Artenvielfalt sind ggf. auch vielversprechendere Ergebnisse denkbar.

7 Umsetzung als GIS-Tool für Esri ArcGIS Desktop 10.5.1

Die Umsetzung als GIS-Toolbox wurde nach dem Schema in Bild 7-1 umgesetzt. Die Aufbereitung des Straßennetzes und der Fahrstreifen erfolgt auf Basis der Richtlinien für die Anlage von Autobahnen [FGSV, 2008] sowie der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen [FGSV, 2012].

Die detaillierte Beschreibung zum Ablauf sowie den einzelnen Werkzeugen und Funktionen wird separat in einem Handbuch für die ArcGIS Toolbox zur Verfügung gestellt.

8 Durchführung und landesweite Anwendung

8.1 Anwendung

Die Erfassung von Einzelbäumen auf Grundlage der ausgewählten Methodik UDLP 5x5 MIK GF 3x3 IC erfolgte unter Einsatz der erstellten ArcGIS-Werkzeuge für das gesamte Bearbeitungsgebiet nach dem in Bild 7-1 dargestellten Schema. Die letztendlichen Bearbeitungs- und Berechnungszeiten hängen dabei wesentlich von der Fläche des Zielgebietes und der verfügbaren Rechentechnik ab. Bei der Verwendung von externen Speicherlösungen zur Bearbeitung (d. h. handelsübliche Desktop-Festplatten o.ä.), ist eine Vervielfachung der in Tabelle 8-1 angegebenen Zeiten aufgrund der enormen Datenmenge zu erwarten. Insgesamt sind folgende Zeiträume für die Aufbereitung und Berechnung (1 m Auflösung) realistisch:

Zusätzlich zum vorhandenen Modell für die Einzelbaumerkennung (EB) wurde ein weiteres Modell berechnet, welches die Anzahl der Nadelhölzer in dichten Wäldern realistischer abschätzen soll (BGW). Die Auswahl der entsprechenden Methode (UDLP 3x3 MIK LM3) erfolgte auf Basis der Feldvalidierungsergebnisse. Zur Differenzierung der beiden Bereiche wurde die Punktdichte der EB-Berechnung herangezogen und die Datensätze zunächst mittels eines empirisch ermittelten Grenzwertes gefiltert und anschließend zusammengeführt. Hierfür dienten insbesondere die Flächen DB-NB sowie FV-2A, FV-2B und FV-3A. Der Grenzwert

Tätigkeit	Zeitraum
Entpacken aller Daten	< 7 d
Umwandlung der DGM/DOM-Punktdateien	< 7 d
Ausgabe von DGM/DOM für gesamtes Bundesland	2 d
Resampling des DOP und Berechnung des NDVI	1 d bis 7 d
KHM-Berechnung und Ausreißerkorrektur	1 d
Ermittlung der Baumkandidaten	1 d bis 2 d
Aufbereitung Straßennetz und Attributierung	1 d bis 2 d

Tab. 8-1: Abgeschätzte Zeiten zur Bearbeitungsdauer.

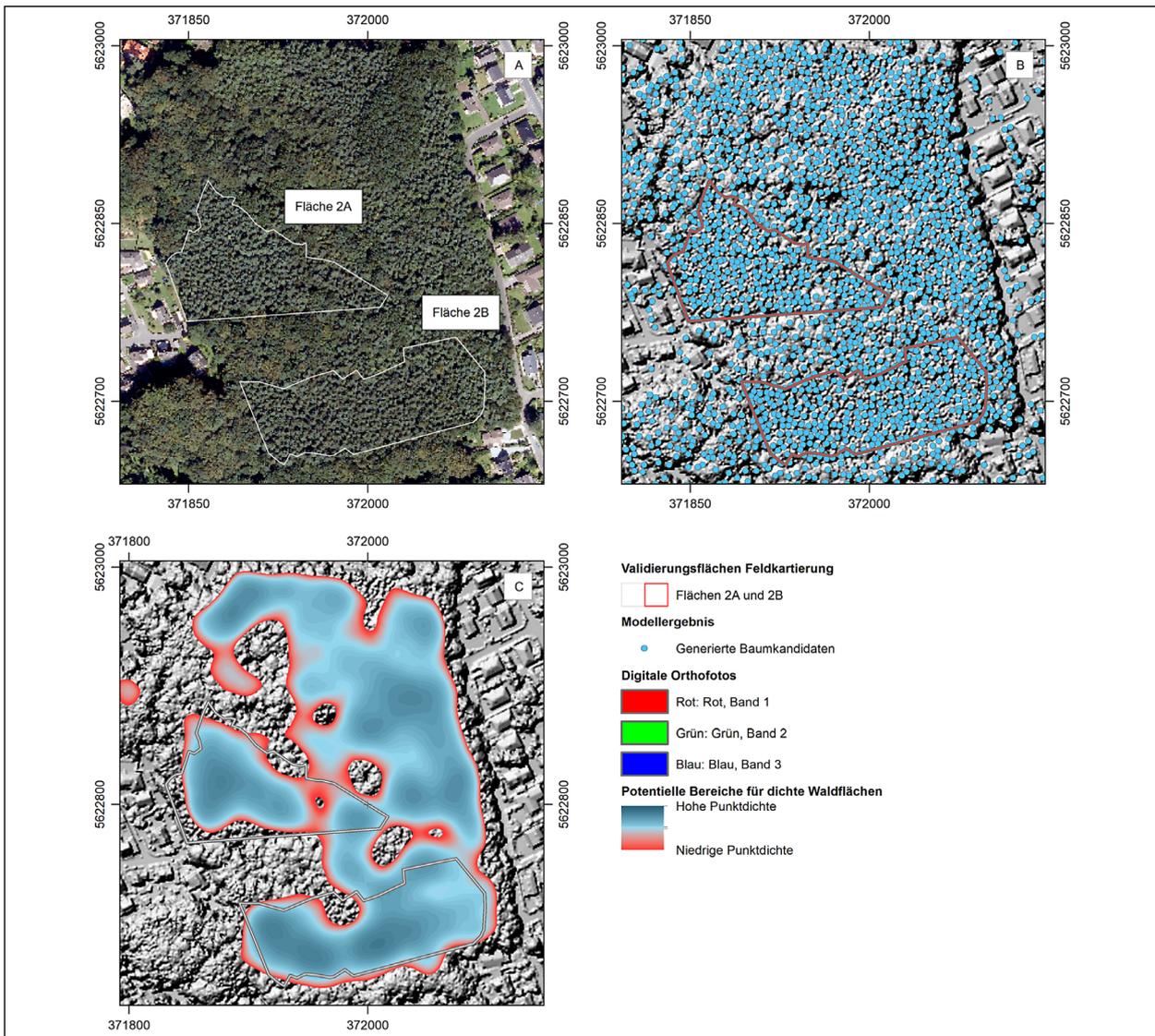


Bild 8-1: Beispiel für die Bereiche mit hoher potenzieller Baumdichte bei den Feldvalidierungsgebieten FV-2. A: Digitale Orthofotos. B: Verteilung der generierten Punkte. C: Ausgewiesener Bereich mit erhöhter Punktdichte, vorrangig für Nadelbäume.

wurde dabei so gewählt, dass die Grenzen der bekannten Nadelwälder möglichst gut abgebildet werden. Da die Laubbäume im Allgemeinen eine deutlich geringe Dichte an Baumkandidaten aufweisen, ist gleichzeitig sichergestellt, dass bis auf ggf. wenige Ausnahmen auch hauptsächlich Flächen mit Nadelhölzern von dieser Methodik profitieren. Für die BGW-Bereiche wurde darüber hinaus eine Mindestflächengröße von 1.000 m² festgelegt, um nur möglichst zusammenhängende Bereiche zu erhalten.

Bild 8-1 zeigt am Beispiel der Flächen 2A und 2B das Ergebnis zur Unterscheidung beider Modelle. Trotz dieser Maßnahme ist jedoch nur mit einer sehr geringen Anpassung des Gesamtergebnisses zu rechnen, da in Bezug auf das vorhandene Bearbeitungsgebiet auf Grundlage des Bundesfernstraßennetzes Nordrhein-Westfalens lediglich ca. 1 %

der Fläche dem BGW-Modell entspricht. Dennoch ist diese Herangehensweise durchaus berechtigt, da die Anwendung der ArcGIS-Werkzeuge nicht auf das Straßennetz beschränkt ist, sondern auch für größere zusammenhängende Flächen durchgeführt werden kann, in denen eine Unterscheidung mitunter sinnvoll ist und zur Verbesserung des Gesamtergebnisses beitragen kann.

8.2 Attributierung

8.2.1 Attributierung der Baumkandidaten

An die generierten Baumkandidaten können mithilfe der ArcGIS-Werkzeuge folgende Parameter attribuiert werden:

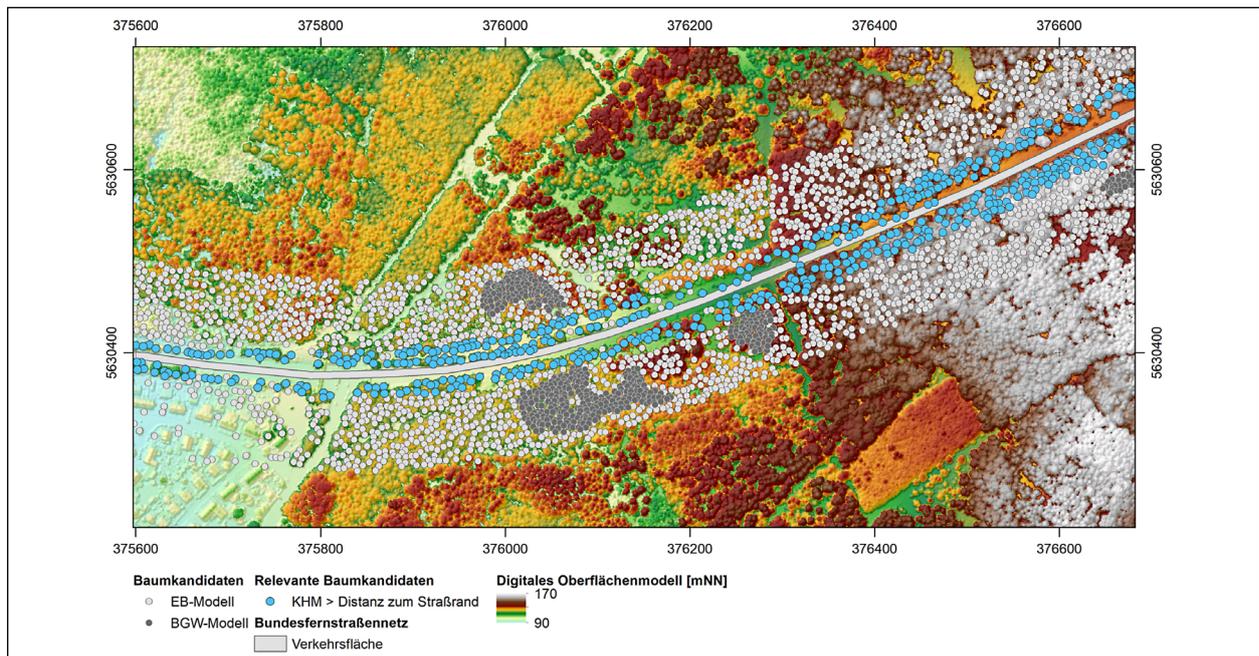


Bild 8-2: Exemplarische Darstellung der Baumkandidaten. Ergebnis zusammengesetzt aus EB- und BGW-Modell. Die Höhe der als relevant gekennzeichneten Baumkandidaten ist höher als deren Abstand zum Straßenrand

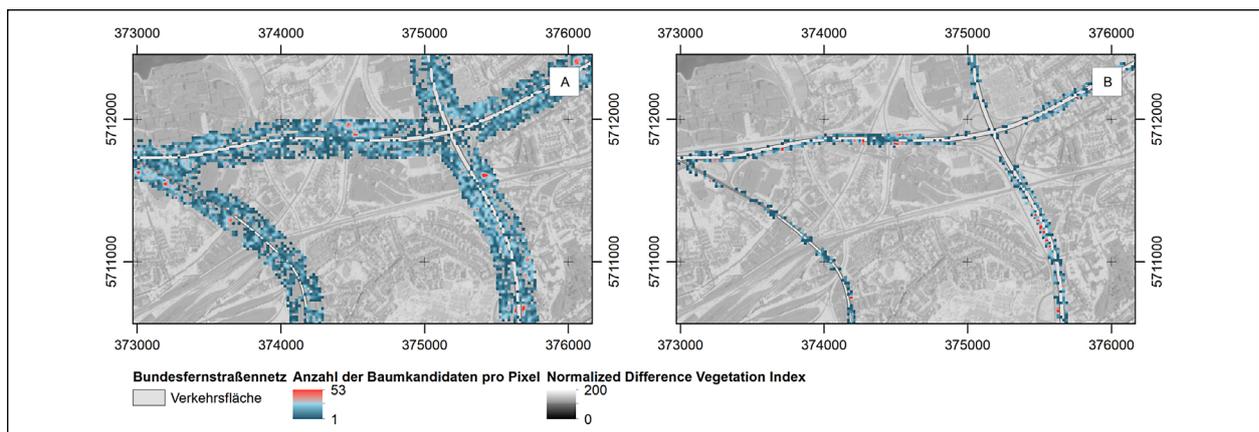


Bild 8-3: Ergebnistraster mit Anzahl der Baumkandidaten je Pixel (20x20 m). A: Gesamte Baumkandidaten. B: Relevante Baumkandidaten mit KHM > Distanz zum Straßenrand.

- X- und Y-Koordinaten
- Höhe des Kronenhöhenmodells
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- Abstand zur Linie des NEMO-Sträßennetzes
- Abstand zum geschätzten Straßenrand inklusive Korrektur für Punkte, die sich innerhalb des Puffers befinden (Punkte auf der geschätzten Verkehrsfläche wurden auf den Wert null gesetzt)

Insofern das Kronenhöhenmodell sowie das Straßennetz zur Abfrage angegeben wurden, wird darüber hinaus die Differenz von Baumhöhe und Abstand zum Straßenrand berechnet, um später die potenziell gefährlichen Baumkandidaten von denen zu trennen, die beim Umstürzen bzw. Abknicken

aufgrund des zu hohen Abstands zum Rand die Straße nicht erreichen würden (Bild 8-2).

Darüber hinaus wurden zwei Rasterdatensätze erzeugt, welche sowohl die Summe der relevanten Baumkandidaten innerhalb eines Pixels anzeigen, als auch die nach KHM und NDVI gefilterte Gesamtanzahl der Baumkandidaten abbilden (Bild 8-3). Die Größe der Pixel ist dabei nach Bedarf anpassbar, der Standardwert wurde nach verschiedenen Testläufen auf 20x20 m gesetzt.

8.2.2 Attributierung des Straßennetzes

Für die Attributierung des Straßennetzes sind die mit KHM und NDVI versehenen Baumkandidaten notwendig. Jedem einzelnen Abschnitt des Stra-

ßennetzes werden die folgenden Parameter zugewiesen:

- Anzahl relevanter Baumkandidaten im gesamten zugehörigen Bereich
- Anzahl relevanter Baumkandidaten im Abstand bis 30 m zum Straßenrand
- Anzahl relevanter Baumkandidaten im Abstand zwischen 30 m und 60 m zum Straßenrand
- Anzahl relevanter Baumkandidaten im Abstand von mehr als 60 m zum Straßenrand

8.3 Ergebnisse

Die mittels der Modellberechnungen erhaltenen Ergebnisse in Bezug auf die Gesamtpunktzahl sind in Bild 8-4 dargestellt. Dabei wurden für das Einzelbaummodell (EB) insgesamt nur ca. 22 % der durch das BGW-Modell (Wald) erhaltenen Punkte generiert. Durch die Kombination beider Modelle konnte die Gesamtzahl an Baumkandidaten (ohne Filter) um ca. 250.000 Individuen in den sehr dicht bewaldeten Gebieten erhöht werden. Nach Anwendung der Grenzwerte für die Kronenhöhenmodellmin-

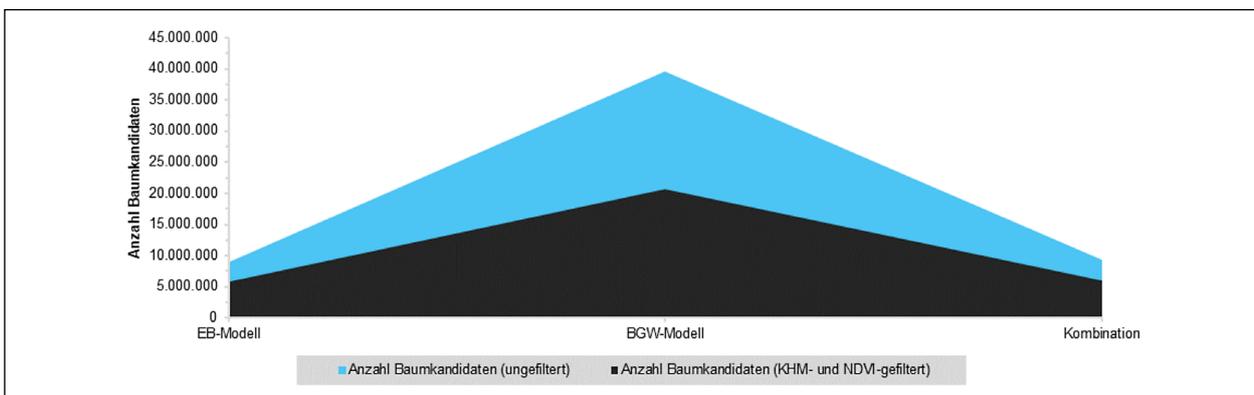


Bild 8-4: Anzahl der generierten Baumkandidaten durch die Einzelbaum- (EB) und Waldflächen-Methodik (BGW).

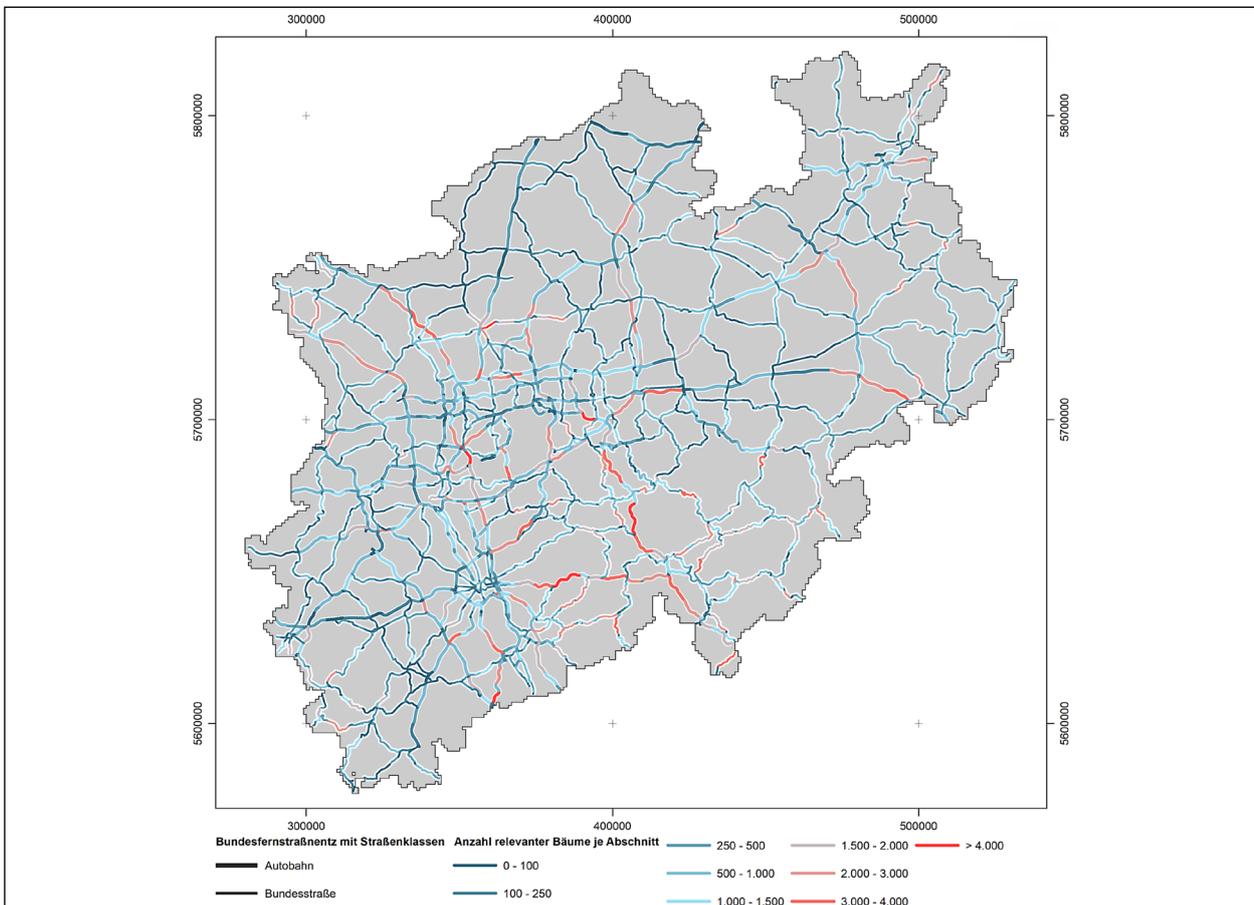


Bild 8-5: Attributiertes Bundesfernstraßennetz für Nordrhein-Westfalen.

desthöhe von 2 m und einen NDVI von mindestens 0,1 bleiben im EB-Modell noch ca. 65 % und im BGW-Modell noch ca. 52 % der Punkte erhalten. Für den kombinierten Datensatz aus beiden Modellen, welcher sich aus ca. 96 % der EB-Modellpunkte und ca. 4 % BGW-Modell-Baumkandidaten zusammensetzt, sind nach der Filterung noch ca. 66 % der Ausgangsmenge im Datensatz vorhanden.

Bezüglich der als relevant definierten Baumkandidaten, deren Baumhöhe größer ist als der Abstand zum Straßenrand, verbleiben final noch ca. 16 % der Baumkandidaten, welche zur Attributierung des Bundesstraßennetzes genutzt werden. Das Ergebnis der Attributierung ist in Bild 8-5 dargestellt.

9 Diskussion und Ausblick

Ausgehend von der gesichteten Literatur existiert eine Fülle von Ansätzen und Möglichkeiten zur Erkennung von Einzelbäumen, wie z. B. verschiedene rasterbasierte Herangehensweisen, punktbasierte Verfahren, Full-Waveform-Analysen usw. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit sowohl der grundlegenden Möglichkeit notwendige Daten zu beschaffen als auch hinsichtlich der Abdeckung gesamter Bundesländer, des Datenhandlings sowie der Vorgabe zur bundesweiten Durchführbarkeit wurde der Fokus vor allem auf die rasterbasierten Verfahren gerichtet. Modernere Verfahren, z. B. auf Basis einer direkten Analyse von hochgenauen 3D-Punktwolken, stehen derzeit weder landes- noch bundesweit zur Verfügung und sind zudem nicht vollständig kostenneutral zu beschaffen.

Die gewählte Herangehensweise auf Basis eines Kronenhöhenmodells zur Ermittlung der Einzelbäume bedingt insbesondere auch aufgrund des Rauschverhaltens der Rasterdatensätze praktisch auch die Einbeziehung der digitalen 4-Kanal-Orthofotos inklusive Nahinfrarotkanal, da mit deren Hilfe durch Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index die vegetationsbedeckten von den unbedeckten Flächen bis auf wenige Ausnahmen zuverlässig differenziert werden können. Speziell aufgrund der geringen Überlappung der Aufnahmezeiträume der digitalen Höhenmodelle und der Orthofotos kann es jedoch unabhängig von der entwickelten Methodik zu einer geringen Reduzierung der Erkennungsraten kommen. Darüber hinaus konnte mithilfe der Metadaten der Rasterdatensätze ermittelt werden, dass die Überfliegungen für die

Datenaufnahme zur Generierung des digitalen Oberflächenmodells hauptsächlich in den Wintermonaten durchgeführt wurden. Dies ist grundsätzlich sehr günstig für die Aufnahme der Daten des digitalen Geländemodells, jedoch ggf. auch hinderlich für die korrekte Abbildung des Oberflächenmodells, welches auf dem ersten reflektierten Impuls des LiDAR-Systems beruht. Da in diesen Monaten speziell die Laubbäume noch kein Blattwerk ausgebildet haben, ist davon auszugehen, dass die aufgenommenen Baumkronengeometrien schlechter und vor allem auch unruhiger bzw. unsteter abgebildet werden, als dies in den Sommermonaten der Fall wäre. Auch dies kann möglicherweise zu einer Reduzierung der Erkennungsergebnisse führen. Aus diesen Gründen ist damit zu rechnen, dass in keiner der durchgeführten Modellberechnungen das Optimum erreicht wurde.

Weiterhin hat die methodische Entwicklung eindeutig gezeigt, dass die Leistung der getesteten Modelle vor allem aufgrund der Vegetationseigenschaften und -strukturen teils sehr deutlichen Schwankungen unterliegen kann und auch entsprechend von diesen abhängt. Dies wird durch den Umstand gestützt, dass die Ergebnisse eines Modells im Vergleich mit allen Validierungsdatensätzen trotz verschiedener Anpassungen praktisch kaum auf ein verwendbares Level eingependelt werden konnten. Beispielsweise müssen Laubbäume mit großem Kronenumfang, die gehäuft Unregelmäßigkeiten in den Kronen aufweisen, demnach anders behandelt werden als Flächen eines Nadelbaumbestandes mit dicht stehenden Individuen, weshalb hier grundsätzlich eine Unterscheidung der zu analysierenden Bereiche sowie ebenfalls eine getrennte Bearbeitung dieser Gebiete angestrebt werden sollte, um eine Verbesserung des Gesamtergebnisses zu erzielen. Eine Differenzierung ist hierbei prinzipiell auf Basis der Punktdichte möglich und kann zur Verbesserung des Gesamtergebnisses beitragen. Dabei können jedoch keine weiteren Aussagen bezüglich des Baumtyps und der Kronengröße getroffen werden. An diesem Punkt ist die klassische Herangehensweise praktisch ausgereizt.

Die Analyse zur Unterscheidung von Baumtypen und weiter auch von Baumarten mithilfe der vorhandenen Daten, speziell des aus den digitalen Orthofotos abgeleiteten Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ergab ein negatives Ergebnis, da aufgrund der landesweit hohen Artenvielfalt sowie insbesondere auch bedingt durch die unterschiedlichen Aufnahmezeiträume zu viele Überschneidun-

gen der Wertebereiche existieren und sich somit weder Baumart noch Baumtyp mittels NDVI eindeutig zuordnen lassen. Der Ansatz selbst ist dabei jedoch nicht vollständig auszuschließen. Speziell in kleineren Gebieten mit stark eingeschränktem Artenspektrum kann eine solche Differenzierung ggf. auch zum Erfolg führen. Für die Anwendung auf Landesebene und dem Hintergrund frei verfügbare Datensätze zu nutzen, kommen diesbezüglich vor allem Satellitendaten, wie z. B. die der Sentinel-Satelliten (vor allem Sentinel- 2A) des ESA-Copernicus-Programms mit Aktualisierungsintervallen von wenigen Tagen, infrage. Die Verwendbarkeit dieser Datensätze im Zusammenspiel mit modernen Machine-Learning-Algorithmen wurde in den letzten Jahren bezüglich der (auf ein gewisses Artenspektrum begrenzten) Baumartenklassifizierung sowie der Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen mehrfach in Studien belegt, weshalb eine Erweiterung der im vorliegenden Projekt entwickelten Methodik zur Unterscheidung, insbesondere der Baumtypen, zu empfehlen ist. Weiterhin ist auf dieser Grundlage auch eine Differenzierung von gesunden und kranken Bäumen, z. B. durch Borkenkäferbefall, denkbar. Da die höchste Auflösung der frei zugänglichen Satellitendaten derzeit jedoch nur maximal 10 m beträgt, ist dieser Ansatz hauptsächlich für Waldgebiete effektiv, die aus homogen zusammengesetzten Verbänden bestehen. Für Bereiche, in denen Laub- und Nadelbäume dicht und durchmischt auftreten, ist jedoch auch diese Methodik aufgrund der Bildung von Mischwerten einzelner Pixel nicht optimal. Gleiches gilt für Einzelbäume mit Kronendurchmessern kleiner als 10 m, da auch hier die Umgebung den Pixelwert mitbestimmt und es somit zu Verfälschungen kommen kann. Weiterhin ist es denkbar, aufgrund der enorm hohen Auflösung der digitalen Orthofotos von teils 10x10 cm die Erkennung und Unterscheidung von Einzelbäumen und einzelnen Individuen im Verbund mithilfe einer Muster- bzw. Bilderkennung zu realisieren.

Durch die Tatsache, dass die Baumerkennung bereits bei nur kleinen Veränderungen und Anpassungen in den Ausgangsdaten sehr sensitiv reagiert, ist davon auszugehen, dass es bei der Anwendung in anderen Bundesländern mit ggf. unterschiedlicher Qualität der Ausgangsdaten auch zu Abweichungen bezüglich der Modellergebnisse kommen kann, obwohl bei der Auswahl der Methodik auf eine möglichst geringe Variation diesbezüglich geachtet wurde.

Die mit dem Modell zur Einzelbaumerkennung (EB) erreichte Erkennungsrate befindet sich dabei im Bereich von ca. 70 % für Laubbäume und ca. 65 % für Nadelbäume. Alternative Modelle mit höheren Quoten zur Lagebestimmung einzelner Bäume existieren, sind dann jedoch so sensitiv, dass die Mehrfachbelegung großer Baumkronen durch zu viele Punkte nicht mehr auf ein passables Niveau reduziert werden kann. Das Modell zur Beurteilung von Flächen mit dichtem Bewuchs von Individuen mit geringen Kronendurchmessern (BGW) befindet sich auf etwa dem Level des tatsächlichen Bestandes, insbesondere für Nadelbäume, macht jedoch nur ca. 3 % der Gesamtheit aller ermittelten Baumkandidaten in Bezug auf das Bearbeitungsgebiet aus. Bei Laubbäumen kann das Verfahren sehr schnell zu einer Überschätzung der vorhandenen Baumanzahl führen. Unterschiede zu vorhandenen Studien, in denen die Erkennung von Nadelbäumen bessere Ergebnisse lieferte als die für Laubbäume, sind insbesondere mit der Kalibrierung auf die vorhandene Datenbasis (vorwiegend Laubbäume), der Lagegenauigkeit bekannter Einzelbäume in den Validierungsdaten sowie im Allgemeinen mit den verschiedenen Vegetationseigenschaften zu begründen. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass auch die Auflösung von 1 m Pixelgröße für Individuen mit geringem Kronendurchmesser bei entsprechend starker Glättung ggf. nicht ausreichend ist.

Weiterhin ist zu beachten, dass die genannten Einschätzungen zur Leistung der Modelle für Einzelbäume stark von der Lagegenauigkeit der Validierungsdatensätze abhängen, denn bereits bei einer Erhöhung des Toleranzwertes von 3 m auf 4 m kann eine Verbesserung um mehrere Prozentpunkte festgestellt werden. Die Verwendung von Bäumen mit bekanntem Kronendurchmesser zur Validierung lässt darüber hinaus den Schluss zu, dass insbesondere Individuen mit größeren Kronen als 6 m Durchmesser mit Detektionsraten von teils deutlich über 80 % sehr gut erkannt werden, Bäume mit kleineren Kronen jedoch in den Ergebnissen ggf. unterrepräsentiert werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mithilfe der entwickelten Methode ein Großteil der vorhandenen Einzelbäume zuverlässig detektiert werden kann, insbesondere jedoch die Anzahl von Nadelhölzern in dicht bewachsenen Gebieten stark unterschätzt wird. Um dies zu korrigieren, wird eine zweite Anwendung mit einer darauf angepassten Methodik durchgeführt und die Ergebnisse beider Modellberechnungen anschließend kombiniert. Die

Auswahl der Flächen, in denen entweder die Einzelbaumerkennung oder die Erkennung von eng stehenden Nadelhölzern zum Einsatz kommt, beruht dabei allein auf Basis der Punktdichte generierter Baumkandidaten. Zur Verbesserung dieser Situation auf Grundlage kostenneutral nutzbarer Datengrundlagen sollte daher sowohl die Erweiterung der Methodik unter Einbeziehung von Satellitendaten als auch die alternative Herangehensweise mithilfe der Mustererkennung hochauflösender Orthofotos in Betracht gezogen werden.

Literatur

- BAUMANN, A.B.G. [2015]: Einzelbaumdetektion in bewaldetem Gebiet auf Basis von luftgestützten LiDAR-Daten. Master Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 119p.
- BORTOLOTTI, Z.J., WYNNE, R.H. [2005]: Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6):342-360.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T.A., LANDENBERGER, R.E., MCGRAW, J.B. [2003]: Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3):290–303.
- BURT, A., DISNEY, M., CALDERS, K. [2019]: Extracting individual trees from lidar point clouds using treeseg. *Methods Ecol Evol.* 2019, 10:438-445.
- CHAN, R.H., CHUNG-WA, H., NIKOLOVA, M. [2005]: Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(10):1479-1485.
- CHEN, Q., BALDOCCHI, D., GONG, P., KELLY, M. [2006]. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(8):923–932.
- DAVIES, E. [1990]: *Machine Vision: Theory, Algorithms and Practicalities*. Academic Press. 572p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) [2017]: *ArcGIS Desktop Help 10.5.1*. URL: <https://desktop.arcgis.com/de/documentation/>
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf [2008]: *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*, RAA, FGSV-Verlag, Köln, 120p.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf [2012]: *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen*, RAL, FGSV-Verlag, Köln, 136.
- FORZIERI, G., GUARNIERI, L., VIVONI, E.R., CASTELLI, F., PRETI, F. [2009]: Multiple attribute decision making for individual tree detection using high-resolution laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 258(11):2501-2510.
- HEINZEL, J., WEINACKER, H., KOCH, B. [2011]: Prior knowledge based single tree extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 32(17):4999-5020.
- HEURICH, M., GÜNTHER, S., SCHRÖDER, S., KENNEL, E. [2004]: Baumhöhenmessung mit flugzeuggetragenen Laserscannern. *AFZ-Der Wald 2004*, 945-947.
- HOSOI, F., MATSUGAMI, H., WATANUKI, K., SHIMIZU, Y., OMASA, K. [2012]: Accurate detection of tree apices in coniferous canopies from airborne scanning light detection and ranging images based on crown-extraction filtering. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1):063502-1-063502-13.
- HUNTER, M.O., KELLER, M., VICTORIA, D., MORTON, D.C. [2013]: Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences* 10:8385-8399.
- HYYPÄ, J., PYYSAALO, U., HYYPÄ, H., SAMBERG, A. [2000]: Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. *Proceedings of the 4th Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Lea*, Dresden, Germany: EARSeL.
- HYYPÄ, J., KELLE, O., LEHIKONEN, M., INKINEN, M. [2001]: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(5):969-975.
- HYYPÄ, J., HYYPÄ, H., LECKIE, D., GOUGEON, F., YU, X., MALTAMO, M. [2008]: Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5):1339-1366.
- IIZUKA, K., YONEHARA, T., ITOH, M., KOSUGI, Y. [2017]: Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and Orthofotos obtained with an unmanned aerial system for a japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. *Remote Sensing* 2018, 10(1), 13.
- IMMITZER, M., ATZBERGER, C., KOUKAL, T. [2012]. Tree species classification with Random Forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. *Remote Sensing*, 4(9): 42661–2693.
- IMMITZER, M., EINZMANN, K., BÖCK, J., MATTIUZZI, M., NG, W.-T., WALLNER, A., PINNEL, N., REICHMUTH, A., FROST, M., MÜLLER, A., SEITZ, R., ATZBERGER, C. [2015]: Erstellung von Fichten- und Kiefernanteilskarten auf Basis von Satellitendaten für Bayern. *Forstl. Forschungsberichte München*: 21–34.
- KAARTINEN, H., HYYPÄ, J. [2008]: EuroSDR/ ISPRS Project, Commission II “Tree Extraction”; Final Report, Official Publication No. 53; EuroSDR (European Spatial Data Research): Dublin, Ireland. 60p.
- KAARTINEN, H., HYYPÄ, J., YU, X., VASTARANTA, M., HYYPÄ, H., KUKKO, A., HOLOPAINEN, M., HEIPKE, C., HIRSCHMUGL, M., MORS DORF, F., NÆSSET, E., PITKÄNEN, J., POPESCU, S., SOLBERG, S., WOLF, B.M., WU, J.-C. [2012]: An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing* 2012, 4(4):950-974.
- KHOSRAVIPOUR, A., SKIDMORE, A.K., ISENBURG, M., WANG, T., HUSSIN, Y.A. [2014]: Generating pit-free canopy height models from airborne LiDAR. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(9):863-872.
- KHOSRAVIPOUR A., SKIDMORE, A.K., WANG, T., ISENBURG, M., KHOSHESHAM K. [2015]: Effect of slope on treetop detection using a LiDAR canopy height model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104:44-52.
- KOCH, B., HEYDER, U., WEINACKER, H. [2006]: Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4):357-363.
- KRAUSE, S., SANDERS, T.G.M., MUND, J.-P., GREVE, K. [2019]: UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing* 2019, 11(7), 758.
- LECKIE, D., GOUGEON, F., HILL, D., QUINN, R., ARMSTRONG, L., SHREENAN, R. [2003]: Combined high-density LiDAR and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):633-649.
- LEE, J.-S. [1980]: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2(2): 165-168.
- LEITERER, R., MORS DORF, F., SCHAEPMAN, M.E., MÜCKE, W., PFEIFFER, N., HOLLAUS, M. [2012]: 3D Vegetationskartierung: flugzeuggestütztes Laserscanning für ein operationelles Waldstrukturmonitoring. 1-10. 10.5167/uzh-75127.
- LI, W.K., GUO, Q.H., JAKUBOWSKI, M.K., KELLY, M. [2012]: A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(1):75-84.
- LIU, J., SHEN, J., ZHAO, R., XU, S. [2013]: Extraction of individual tree crowns from airborne LiDAR data in human settlements. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4):524-535.
- LOPES, A., TOUZI, R., NEZRY, E. [1990]: Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(6): 992-1000.
- MOHAN, M., SILVER, C.A., KLAUBERG, C., JAT, P., CATTS, G., CARDIL, A., HUDAK, A.T., DIA, M. [2017]: Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy

- height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests* 2017, 8, 340.
- PERSSON, Å., HOLMGREN, J., SÖDERMAN, U. [2002]: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(9):925-932.
- PITKÄNEN, J., MALTAMO, M., HYYPPÄ, J., YU, X. [2004]: Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(8):187-191.
- POPESCU, S.C., WYNNE, R.H. [2004]: Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5):589-604.
- POULIOT, D., KING, D., PITT, D. [2005]: Development and evaluation of an automated tree detection delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(10):2332-2345.
- SHARY, P.A., SHARAYA, L.S., MITUSOV, A.V. [2002]: Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107:1-32.
- SOLBERG, S., NAESSET, E., and BOLLANDSAS, O.M. [2006]: Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(12):1369-1378.
- SRINIVASAN, S., POPESCU, S.-C., ERIKSSON, M., SHERIDAN, R.D., KU, N.W. [2015]: Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sensing* 2015, 7(2):1877-1896.
- TIAN, J., DAI, T., LI, H., LIAO, C., TENG, W., HU, Q., MA, W., XU, Y. [2019]: A novel tree height extraction approach for individual trees by combining TLS and UAV image-based point cloud integration. *Forests* 2019, 10(7), 537.
- TIEDE, D., HOCHLEITNER, G., BLASCHKE, T. [2005]: A full GIS-Based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36:9-14.
- TUCKER, C.J. [1979]: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environment*, 8: 127-150.
- VAUHKONEN, J., ENE, L., GUPTA, S., HEINZEL, J., HOLMGREN, J., PITKÄNEN, J., SOLBERG, S., WANG, Y., WEINACKER, H., HAUGLIN, K.M., LIEN, V., PACKALÉN, P., GOBAKKEN, T., KOCH, B., NAESSET, E., TOKOLA, T., MALTAMO, M. [2012]: Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85:27-40.
- VAN LEEUWEN, M., COOPS, N.C., WULDER, M.A. [2010]: Canopy surface reconstruction from a LiDAR point cloud using Hough transform. *Remote Sensing Letters*, 1(3):125-132.
- VÉGA, C., DURRIEU, S. [2011]: Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on LiDAR data: application to a mountainous forest with heterogeneous stands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4):646-656.
- WULDER, M., NIEMANN, K.O., GOODENOUGH, D.G. [2000]: Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 73(1):103-114.
- YU, X., HYYPPÄ, J., VASTARANTA, M., HOLPINEN, M., VIITALA, R. [2011]: Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1):28-37.
- ZEUG, G., IMMITZER, M., ATZBERGER, C. [2019]: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Satellitenfernerkundungsdaten (Copernicus) für Zwecke der Ableitung ökologischer Belastungsgrenzen und der Verifizierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Texte 16/2019: 100p.
- ZHAO, D., PANG, Y., LI, Z., SUN, G. [2013]: Filling invalid values in a LiDAR-derived canopy height model with morphological crown control. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13):4636-4654.

ZIMBLE, D., EVANS, D., CARLSON, G., PARKER R., GRADO, S. GERARD, P. [2013]: Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 87(2-3):171-182.

Bilder

- Bild 3-1: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegsdaten des DGM1. A: Jahre, B: Monate.
- Bild 3-2: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DGM1.
- Bild 3-3: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegsdaten des DOM1I. A: Jahre, B: Monate.
- Bild 3-4: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DOM1I.
- Bild 3-5: Räumliche temporale Verteilung der Überfliegsdaten des DOP. A: Jahre, B: Monate.
- Bild 3-6: Flächenanteile nach Jahren und Monaten für die Überfliegungen des DOP.
- Bild 3-7: Übereinstimmung der Aufnahmedaten für DOM1I und DOP.
- Bild 3-8: Flächenanteile der Unterschiede in Jahren zwischen DOM1I und DOP.
- Bild 3-9: Alleenkataster für Nordrhein-Westfalen.
- Bild 3-10: Häufigkeit der Bäume und zugehöriger Attribute aus den Baumkatastern.
- Bild 3-11: Anzahl der Individuen nach Baumart bei mehr als 1.000 Einzelbäumen.
- Bild 3-12: Bäume aus Baumkatastern pro km² in Nordrhein-Westfalen.
- Bild 3-13: Räumliche Verteilung von Vegetationstypen, -aufnahmen und Landschaftselementen.
- Bild 3-14: Windwurfschadflächen von Orkantief Kyrill (2007) und Orkantief Friederike (2018).
- Bild 3-15: Bundesfernstraßennetz (NEMO) kategorisiert nach Straßenklassen und Fahrstreifenanzahl.
- Bild 4-1: DGM1. A: Punktdaten mit 1 m Gitterweite. B: Generiertes DGM1 für Nordrhein-Westfalen aus Punktdaten von A.
- Bild 4-2: DOM1I. A: Punktdaten mit 1 m mittlerem Punktabstand. B: DOM1I basierend auf dem ersten Impuls (DOM_{MAX}).
- Bild 4-3: Mögliche Fehlerquellen im DOM. A: Fehler im DOM1I. B: Hochspannungsleitungen im DOM1I.
- Bild 4-4: DOP. A: Falschfarben-DOP mit Vegetation in Rottönen. B: Abgeleiteter NDVI. C: Potenzielle vegetationslose Flächen.
- Bild 5-1: Grundlegende Herangehensweise zur Ermittlung einer geeigneten Methodik für die Einzelbaumerkennung.
- Bild 5-2: Kronenhöhenmodelle, 1 m Pixel. A: Generiert aus Punkt-Mittelwerten. B: Generiert aus Punkt-Maxima (erster Impuls).
- Bild 5-3: Kronenhöhenmodelle, 1 m Pixel. A: Binning-Ansatz. B: Triangulation.
- Bild 5-4: Kronenhöhenmodell und Pixel mit Höhendifferenzen größer als 2 m zu mindestens 6 anliegenden Zellen.
- Bild 5-5: Kronenhöhenmodelle. A: 0,5 m Pixelgröße B: 1 m Pixelgröße, C: 2 m Pixelgröße.
- Bild 5-6: Darstellung der verwendeten Filtergrößen.
- Bild 5-7: Kronenhöhenmodelle, geglättet mit verschiedenen Filtern und Filtergrößen.
- Bild 5-8: KHM-Filterstufen. A: Initiale Stufe. B: Dreifachfilterung. Höhendarstellung auf Basis des ungefilterten KHM.
- Bild 5-9: KHM und Krümmungsparameter. A: Kronenhöhenmodell. B: Minimale Krümmung auf Basis von A.
- Bild 5-10: Ansätze zur Ermittlung der Lage potenzieller Baumkronen von Einzelbäumen.
- Bild 5-11: Beispiel der Ansätze mit Bezug zu möglichen Fehlerquellen, wie z. B. Hochspannungsleitungen.

- Bild 5-12: Objektbildung. A, B: 5x5 m und 9x9 m Zellen. C, D: Dynamisch: Segment Mean Shift und ISO Cluster Classifier.
- Bild 5-13: Auswirkungen der Segmentierung auf die Mehrfachklassifikationen und Anzahl Baumkandidaten.
- Bild 5-14: Vegetationslose Oberflächen. A: Falschfarben-DOP. B: NDVI. C: Überlagerung von A mit NDVI (klassifiziert).
- Bild 5-15: NDVI für 36.588 Laub- und 6.582 Nadelbäume nach Aufnahmemonaten der digitalen Orthofotos.
- Bild 6-1: A: Beispiel für 3M-Puffer. B: Beispiel für KR10M-Puffer.
- Bild 6-2: Zusammenfassung der Validierungsoptionen für Einzelbäume und Baumgruppen bzw. Waldstücke.
- Bild 6-3: A: Testdatensatz A. B: Testdatensatz B.
- Bild 6-4: Digitalisierte Baumkandidaten (DB-Datensatz) mit 3.033 Individuen, ca. 400 davon Nadelbäume.
- Bild 6-5: Lage des Baumgruppen-Bereiches aus dem Baumkataster (BK-Fläche).
- Bild 6-6: Lage der Validierungsflächen. A: Fläche 1. B: Flächen 2A und 2B. C: Flächen 3A und 3B.
- Bild 6-7: Gesamtpunktzahl von Modellberechnungen (Focal-Flow-Modelle) für Testdatensatz A. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.
- Bild 6-8: Prozentualer Anteil verbleibender Baumkandidaten der Focal-Flow-Modelle bei Anwendung eines Grenzwertes (KHM-Mindesthöhe: 1 m) für Testdatensatz A. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.
- Bild 6-9: Gesamtpunktzahl von Modellberechnungen (Focal-Flow-Modelle) für Testdatensatz B. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.
- Bild 6-10: Prozentualer Anteil verbleibender Baumkandidaten der Focal-Flow-Modelle bei Anwendung eines Grenzwertes (KHM-Mindesthöhe: 2 m) für Testdatensatz B. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow.
- Bild 6-11: Anteil der Baumkandidaten ausgewählter R1-Modelle von Glättungsstufe 2 mit Modellen aus Stufe 1. MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. LM: Lokales Maximum mit 3x3 bzw. 5x5 Fenster.
- Bild 6-12: Differenz der R1-Modelle aus Glättungsstufe 3 zu Glättungsstufe 2. MAX: KHM_{MAX} , MIK: Minimale Krümmung. LM: Lokales Maximum mit 3x3 bzw. 5x5 Fenster.
- Bild 6-13: Erkennungsraten bekannter Individuen mittels 3M-Pufferflächen für KHM-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-14: Erkennungsraten bekannter Individuen mittels 3M-Pufferflächen für MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-15: Mehrfachbelegung der erstellten Pufferflächen. A: 3 m Radius. B: Radius abhängig von Kronendurchmesser.
- Bild 6-16: Verhältnis von Punktzahl (3M) und Anzahl bekannter Bäume der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-17: Maximale Anzahl von Baumkandidaten innerhalb der gepufferten Fläche (3M) der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-18: Anteil von erkannten Bäumen mit nur einem Punkt innerhalb des 3M-Puffers der KHM- und MIK-Modelle mit 1 m (R1) und 2 m (R2) Zellgröße. MW: KHM_{MW} , MAX: KHM_{MAX} . MIK: Minimale Krümmung. FF: Focal Flow, LM3:

Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.

- Bild 6-19: Anteil erkannter Bäume (3M) für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.
- Bild 6-20: Verhältnis von Punktzahl und bekannten Bäumen (3M) für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.
- Bild 6-21: Anzahl von Punkten (Maximum) innerhalb 3M-Puffer für die Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.
- Bild 6-22: Anteil der 3M-Pufferflächen mit nur einem Punkt für Modelle mit 1, 2 und 3 Filterstufen. MIK: Minimale Krümmung. S1 – S3: Glättungsstufen 1 bis 3. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5. Grundlage ist das KHM_{MAX} mit 1 m Zellgröße.
- Bild 6-23: Ergebnisübersicht der Feinabstimmungsmodelle mit dem auf Objekten basierenden OB-Datensatz für den Gesamtbestand. KS: Keine Segmentierung/Objektbildung, GN: Gitternetz als Pseudo-Objekte, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-24: Ergebnisübersicht der Feinabstimmungsmodelle mit den DB- und BK-Datensätzen für den Gesamtbestand (G) als auch separiert für die Nadelbäume (NB, nur DB-Daten). KS: Keine Segmentierung, GN: Gitternetz als Pseudo-Objekte, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3:
- Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5.
- Bild 6-25: Durchschnittliche Reduzierung der Punktzahl mithilfe generierter Objekte für bekannte Individuen aus den Testdatensätzen sowie den Modellergebnissen. 3M: Testdatensatz B, DB: Digitalisierte Bäume unter Berücksichtigung aller Individuen (G) sowie separat der Nadelbäume (NB), BK: Bäume der Testfläche BK.
- Bild 6-26: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit den 3M und KR10M-Datensätzen für den Gesamtbestand (G) sowie für Nadelbäume (NB, nur 3M-Daten). KS: Keine Segmentierung. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-27: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit dem DB-Datensatz für den Laub- (LB) und für Nadelbaumbestand (NB). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-28: Ergebnisse weiterer Feinabstimmungsmodelle mit dem BK-Datensatz für den Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. B: Kronenhöhenmodell (Binning), T: Kronenhöhenmodell (Triangulation). MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-29: Vergleich ausgewählter Modelle auf Basis des KHM_{BI} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für den 3M-Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-30: Vergleich ausgewählter Modelle auf

- Basis des KHM_{BI} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für die DB- und BK-Datensätze im Laubbaum- (LB), Nadelbaum- (NB) und Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, LM5: Lokales Maximum 5x5, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-31: Finaler Modellvergleich auf Basis des KHM_{BI} mit 0,1 m (B/0,1) und 2 m (B/2) Korrektur für die 3M-, DB- und BK-Datensätze im Laubbaum- (LB), Nadelbaum- (NB) und Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, IC: ISO Cluster Classifier (sowohl zur Erkennung als auch zur Segmentierung).
- Bild 6-32: Vergleich ausgewählter Modelle bei Variation der Puffergröße um die bekannten Bäume für den 3M- und KR10M-Gesamtbestand (G). KS: Keine Segmentierung, SMS: Segmentierung mittels Segment Mean Shift. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3, IC: ISO Cluster Classifier.
- Bild 6-33: Ergebnisübersicht der Feldvalidierung. FV: Feldvalidierungsfläche mit vorherrschend Laub- (LB) oder Nadelbäumen (NB). KS: Keine Segmentierung. MIK: Minimale Krümmung. LM3: Lokales Maximum 3x3.
- Bild 6-34: Darstellung der Baumhöhengenaugigkeit. Höhendifferenz von KHM_{MW} und KHM_{MAX} im Vergleich zu bekannten Validierungsdaten der Baumkataster.
- Bild 6-35: Normalized Difference Vegetation Index und Baumtypen (n: 30.188 Laub- und 701 Nadelbäume).
- Bild 6-36: Normalized Difference Vegetation Index und Baumarten (n: 107.207 Laubbäume).
- Bild 7-1: Prozess-Schema für die ArcGIS-Werkzeuge.
- Bild 8-1: Beispiel für die Bereiche mit hoher potenzieller Baumdichte bei den Feldvalidierungsgebieten FV-2. A: Digitale Orthofotos. B: Verteilung der generierten Punkte. C: Ausgewiesener Bereich mit erhöhter Punktdichte, vorrangig für Nadelbäume.
- Bild 8-2: Exemplarische Darstellung der Baumkandidaten. Ergebnis zusammengesetzt aus EB- und BGW-Modell. Die Höhe der als relevant gekennzeichneten Baumkandidaten ist höher als deren Abstand zum Straßenrand.
- Bild 8-3: Ergebnisraster mit Anzahl der Baumkandidaten je Pixel (20x20 m). A: Gesamte Baumkandidaten. B: Relevante Baumkandidaten mit $KHM > \text{Distanz zum Straßenrand}$.
- Bild 8-4: Anzahl der generierten Baumkandidaten durch die Einzelbaum- (EB) und Waldflächen-Methodik (BGW).
- Bild 8-5: Attributiertes Bundesfernstraßennetz für Nordrhein-Westfalen.

Tabellen

- Tab. 4-1: Abgeleitete Regelquerschnitte für Autobahnen und Bundesstraßen unter Berücksichtigung der RAA und RAL. 25
- Tab. 5-1: Übersicht der verwendeten Filtertypen und Filtergrößen. Zellgrößen: R05: 0,5 m. R1: 1 m. R2: 2 m.
- Tab. 5-2: Modelle der Filterstufen 2 und 3. Markierungen x^1/x^2 entsprechen der Kombination für Stufe 3.
- Tab. 5-3: Konzeptionelle Modelle der ersten Glättungsstufe. Berechnung jeweils für KHM_{MW}/KHM_{MAX} - und MIK_{MW}/MIK_{MAX} -Versionen. FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). Grau hinterlegte Zellen ohne MIK-Versionen.
- Tab. 5-4: Modelle der zweiten Glättungsstufe. Gefüllte Zellen mit 2 m-Version (R2). FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.

- Tab. 5-5: Modelle der dritten Glättungsstufe, ausschließlich für Testdatensatz B. FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.
- Tab. 5-6: Erste Auswahl der Modelle zur Feinabstimmung. Gefüllte Zellen mit 2 m-Version (R2). FF: Focal-Flow-Ansatz, LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5). MW: Mittelwert, MAX: Maximum.
- Tab. 5-7: Erweiterte und finale Auswahl von Kombinationen zur Feinabstimmung. Gefüllte Zellen mit 2-m-Version (R2). B: DOM (Binning), T: DOM (Triangulation), LM: Bestimmung des lokalen Maximums mit Fenstern der Größe 3x3 (LM3) bzw. 5x5 (LM5), IC: ISO Cluster Classifier. x¹: Segmentierung (Segment Mean Shift), x²: Segmentierung (ISO Cluster Classifier), x³: KHM mit Grenzwert von 0,1 m in Ausreißerkorrektur.
- Tab. 6-1: Testgebiete und enthaltene Informationen. * prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtanzahl der bekannten Bäume aller Kataster (363.477). ** 115.010 (32 %) mit mindestens 20 m Kronendurchmesser.
- Tab. 8-1: Abgeschätzte Zeiten zur Bearbeitungsdauer.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins

€ 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost

€ 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser

€ 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Radenberg, Flottmann, Drewes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummi-modifiziertem Bindemittel

Radenberg, Manke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.