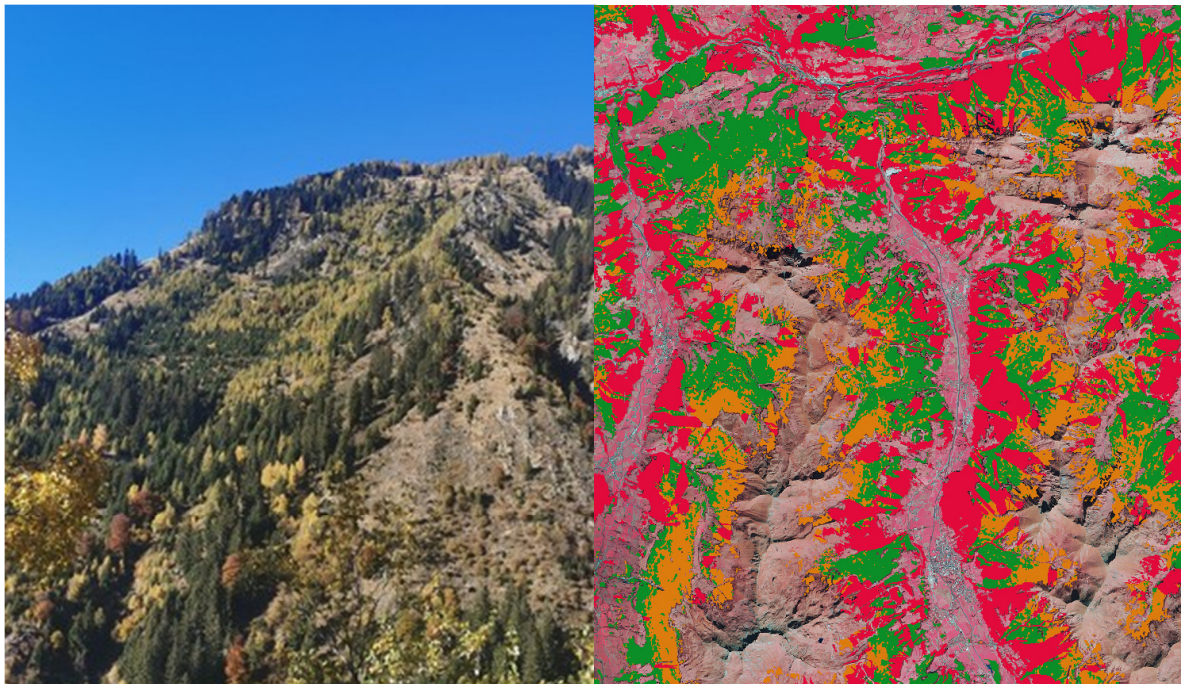


Aufbau einer Digitalisierungsinitiative Schutzwald

Endbericht



Wien, Jänner 2024

Projektleitung:

Klemens Schadauer, Institut für Waldinventur, BFW

Projektteam:

Ambros Berger, Christoph Bauerhansl, Gernot Felfernig, Susanne Karel, Tobias Schadauer, Markus Löw, Ursula Knieling, Alexandra Freudenschuß

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald,
Naturgefahren und Landschaft
Institut für Waldinventur
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien

Foto- und Bildnachweis: Cover: BFW

Im Auftrag des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und
Wasserwirtschaft, Abteilung III/4

Inhalt

Präambel	5
Zusammenfassung	6
Summary	10
1 Einleitung	14
2 Arbeiten zu einer bundesweit einheitlichen Standortschutzwaldkarte	16
2.1 Gliederung der Schutzwaldkategorien.....	16
2.2 Ausgangssituation	18
2.3 Methoden zur automatisierten Ableitung einer Standortschutzwaldkarte	23
2.3.1 Regelbasierter Ansatz.....	23
2.3.2 Machine-Learning Ansatz	25
2.4 Ergebnisse und Diskussion.....	27
2.5 Methodenkritik des wissenschaftlichen Modells (Machine Learning)	31
2.5.1 Datenbasis für die Indikatoren und Entscheidungsbäume.....	32
2.5.2 Vergleich Methoden 1 und 3 mit der Hinweiskarte Schutzwald .	34
2.5.3 Validierung	35
2.6 Weitere Vorgehensweise.....	37
3 Pilotstudie zur geografischen Abgrenzung der Kampfzone Wald	39
3.1 Ausgangssituation	39
3.2 Einrichtung einer Arbeitsgruppe zur Definition der Kampfzone des Waldes	40
3.3 Zusammenfassung der Sitzungen der Arbeitsgruppe Kampfzone Wald	40
3.4 Definition.....	41
3.4.1 Definitionsgrundlage	41
3.4.2 Definitionswortlaut.....	42
3.4.3 Erläuterungen zur Definition für die obere Kampfzone	42
3.4.4 Erläuterungen zur unteren Kampfzone.....	43
3.5 Literaturstudie Klimawandel und obere Waldgrenze	44

3.6 Prüfung der Einsatzmöglichkeiten von historischen Luftbildern zur Feststellung der Waldgrenzentwicklung	48
3.7 Prüfung der Eignung der Klimamodellierung der BOKU im Rahmen von ForSite für die Abgrenzung der oberen Kampfzone.....	51
3.8 Genauigkeitsanalyse der aktuellen Geländemodelle.....	53
3.9 Prüfung der Möglichkeiten für die Vegetationserfassung aus der Matching-Punktewolke und den Sentinel-2 Zeitreihenanalysen	56
3.10 Methodische Ansätze für die Automatisierung	59
3.11 Ergebnisse für das Testgebiet Steiermark	61
3.12 Vorschlag für die Umsetzung in ganz Österreich.....	62
4 Erarbeitung einer Auwaldkarte.....	63
5 Erstellung eines bundesweiten Layers für Windschutzanlagen.....	70
5.1 Übernahme der Layer aus den Ländern	70
5.2 Einrichtung einer Arbeitsgruppe zur Vereinheitlichung der Definition von Windschutzanlagen.....	71
5.3 Definitionsvorschlag der Windschutzanlagen	71
5.4 Arbeiten zur Sonderkarte Windschutzanlagen.....	72
6 Literaturverzeichnis.....	79
7 Abbildungsverzeichnis	81
8 Tabellenverzeichnis	84

Präambel

Ein Teil des Projektauftrags umfasste die Erstellung einer bundesweit einheitlichen, digitalen Standortschutzwaldkarte für Österreich. Dazu wurden vom Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) wissenschaftliche Methoden entwickelt, die auf Basis verschiedener Geodatenätze (z.B. digitales Geländemodell, Hangneigung, Geologie) sowie der Hinweiskarte Schutzwald einerseits, bzw. der Daten der Österreichischen Waldinventur andererseits, Standortschutzwaldflächen unter Einsatz von „Machine-Learning“ trainieren. Das daraus vorgelegte Ergebnis hat den Projektauftrag nicht im erwarteten Umfang erfüllt, da sich in einzelnen Fällen Abweichungen von in der Natur angesprochenen Situationen zeigen. Aus Sicht des BFW stellen diese wissenschaftlichen Methoden dennoch eine Verbesserung der Geodatenqualität zum Standortschutzwald mit Potenzial dar. Es wurde daher vereinbart, das Projekt als wissenschaftlichen Zwischenstand abzuschließen und unmittelbar einen Evaluierungsprozess unter Einbindung des Ministeriums (BML), der Länder, des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW), der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) anzuschließen, um das Potenzial der „Machine-Learning“ Methode und die Abweichungen der Ergebnisse zu analysieren. Erst in einem weiteren Schritt wird entschieden, wie zukünftig eine valide Standortschutzwaldkarte für Österreich hergestellt werden kann.

Zusammenfassung

Ziel des vorliegenden Projekts war, den Stand der Geoinformationen zum Österreichischen Schutzwald zu verbessern und Karten in digitaler Form für den Standortschutzwald, die Auwälder, die Windschutzanlagen und die Kampfzone des Waldes zu erarbeiten.

Die Standortschutzwaldkarte sollte nach einer bundesweit einheitlichen Methode eine Gliederung des Gesamtwaldes in Österreich nach seinen vorrangigen Schutzfunktionen (Standort-, Objektschutzfunktion) erlauben. Darüber hinaus wurden die Flächen der Windschutzanlagen, der Auwälder und im Rahmen einer Pilotstudie, der Kampfzone des Waldes verortet und ausgewiesen. Diese Flächen können zum Teil auch außerhalb des Waldes liegen.

Die Methoden und Hauptergebnisse dieser vier Projektteile, sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Standortschutzwald

Im Österreichische Forstgesetz (§21) sind die Begriffe Standortschutzwald und Objektschutzwald definiert. Zu den Standortschutzwäldern zählen jene Waldflächen, deren Standorte durch die abtragenden Kräfte von Wind, Wasser oder Schwerkraft gefährdet sind und die eine besondere Behandlung erfordern. Sechs Kriterien regeln, welchen Waldflächen eine Standortschutzfunktion zugewiesen wird. In der Praxis kommt es oft zu Überlappungen von Wäldern mit Objekt- und Standortschutzfunktion, zudem haben sich historisch durch unterschiedliche Ansätze in der Waldbewirtschaftung (Österreichische Waldinventur) oder der forstlichen Raumplanung (Waldentwicklungsplan) weitere Begriffe zur Differenzierung des Schutzwaldes etabliert. Das Kapitel 2.1 ist daher einer analytischen Gliederung des Schutzwaldes gewidmet.

Die Ableitung einer bundesweit einheitlichen, digitalen Standortschutzwaldkarte erfordert zunächst eine Überprüfung von österreichweit verfügbaren Geodatenätzen hinsichtlich ihrer Informationsgehalte für Schutzwälder und eine Analyse für ihre effiziente Verknüpfung.

Wissensdefizite in der expliziten Charakterisierung standörtlicher Gegebenheiten und das Fehlen flächiger Geoinformationen, wie sie laut Forstgesetz für die Festlegung von Standortschutzwäldern erforderlich wären, führten im Projektverlauf bald zu dem Schluss, dass ein einfacher regelbasierter Ansatz für die Ableitung einer österreichweit einheitlichen

Standortschutzwaldkarte nicht durchführbar ist. Aus diesem Grund wurden Machine-Learning Methoden eingesetzt, die genau jene Komplexität des Zusammenwirkens unterschiedlicher Grundlegendaten in einem Modell abbilden können.

Machine-Learning Methoden benötigen eine große Menge an Trainingsdaten um valide Ergebnisse zu liefern. Als Trainingsdaten wurden österreichweit verfügbare Geodatenätze herangezogen (z.B. digitales Geländemodell, Hangneigung, Krummholzlayer, Geologie). Diese Datensätze waren die Grundlage um einerseits auf Basis der Hinweiskarte Schutzwald (Starsich und Perzl, 2022), andererseits auf Basis der Probeflächendaten der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) Standortschutzwaldflächen unter Einsatz von Machine-Learning zu trainieren.

Methode 1: Auf Basis der ÖWI wurde der Trainingsdatensatz durch die Probeflächeninformation „Schutzwald“ („Schutzwald im Ertrag“ und „Schutzwald außer Ertrag“ gemeinsam) von den restlichen ÖWI-Probeflächen differenziert.

Methode 2 und 3: Auf Basis der Hinweiskarte Schutzwald wurde der Trainingsdatensatz anhand der Kategorien „Wald ohne Schutzfunktion“ und „Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion“ differenziert.

Dafür wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt: Einerseits wurde eine Stichprobe eines Bundeslandes verwendet. Hier fiel die Wahl auf die Steiermark als jenes Bundesland mit dem für Österreich repräsentativsten Wald (Methode 2). Andererseits wurde eine Stichprobe des gesamten Bundesgebietes herangezogen (Methode 3). Die Auswahl der Stichprobe orientierte sich am Rasternetz der Waldinventur. Fachlich haben diese beiden Methoden keinen Bezug zur ÖWI, sondern bilden vielmehr jene Bereiche ab, die im Rahmen der Erstellung der Hinweiskarte Schutzwald auf Basis der bestverfügbaren Geodatenätze und unter Berücksichtigung von lokalem Expertenwissen zur Ausweisung von Standortschutzwaldflächen geführt haben.

Bei den drei Methoden wurden im Vorhinein alle Bereiche, die laut Hinweiskarte Schutzwald als „Wald mit direkter Objektschutzfunktion“ ausgewiesen sind, für eine Bearbeitung ausgeschlossen. Dieser Layer ist somit ident mit der Hinweiskarte Schutzwald.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit allen drei Methoden in ähnlichen Gebieten Waldflächen mit Standortschutzfunktion ausgewiesen werden. In den bundesweiten Flächenberechnungen zeigen sich aber doch deutliche Unterschiede. Methode 1, mit den Trainingsdaten der ÖWI, hat den geringsten Flächenanteil (14%), Methode 3, mit den Trainingsdaten aus

der Hinweiskarte Schutzwald und Daten aus dem gesamten Bundesgebiet, den größten mit 23%. Die eingesetzten Machine-Learning Methoden erzielen homogene Ergebnisse für den gesamten Österreichischen Wald, wobei Methode 3 in der bundesweiten Flächenbilanz die beste Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Hinweiskarte Schutzwald zeigt. Erwartungsgemäß ergeben sich auch Abweichungen zur bestehenden Hinweiskarte Schutzwald. Die wissenschaftliche Validierung der Ergebnisse zeigt, dass 81% der Flächen korrekt den beiden Klassen „Standortschutzwald“ und „Wirtschaftswald“ zugeteilt wurden.

Aus Sicht des BFW stellen diese wissenschaftlichen Methoden eine Verbesserung der Geodatenqualität zum Standortschutzwald dar. Da für den Auftraggeber der Projektauftrag nicht im gewünschten Auftrag erfüllt wurde, wird unmittelbar nach Abschluss der Studie ein Evaluierungsprozess unter Einbindung des Ministeriums (BML), der Länder, des BFW und der WLWV angeschlossen, um das Potenzial der Machine-Learning Methode und die Abweichungen der Ergebnisse weiter zu analysieren.

Kampfbzonenlayer

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde die automatisierbare Erstellung eines Kampfbzonenlayers getestet. Dafür musste zunächst von einer Arbeitsgruppe eine operative Definition für die Kampfbzone des Waldes festgelegt werden. Es wurde beschlossen, dass im Rahmen des Projekts, nur die obere Kampfbzone behandelt wird. Diese wird laut Forstgesetz durch klimatische Eigenschaften bestimmt. Entsprechende Klimadaten lagen nur für die Steiermark aus dem Projekt ForSite vor, daher wurden die Methoden auch anhand dieses Bundeslandes festgelegt.

Auch bei der Erstellung des Kampfbzonenlayers wurden Machine-Learning Methoden angewendet. Die Datengrundlagen bildeten digitale Geländemodelle, Satellitendaten (Sentinel2) und die Klimadaten für die Steiermark. Als Trainingsdaten wurden einerseits manuell abgegrenzte Flächen verwendet, andererseits wurde der Krummholzlayer des BFW eingesetzt. Im Bereich der Almfutterflächen (INVEKOS) wurden keine Trainingsdaten erfasst, da dort die aktuelle Vegetation von der potenziellen abweicht.

Nach Anwendung des Machine-Learning Algorithmus wurde die Methode schließlich auf die gesamte Steiermark ausgerollt. Das Ergebnis zeigt, dass die Anwendung der wissenschaftlichen Methode für die Erstellung einer Kampfbzonenkarte möglich und sinnvoll ist. Diese Karte enthält nicht nur eine Entscheidung „Kampfbzone ja oder nein“ sondern auch die

Wahrscheinlichkeit zur Zugehörigkeit zur Kampfzone. Die Festlegung der Wahrscheinlichkeit (z.B. größer 80%) kann dann zur kartographischen Abgrenzung dienen.

Mit entsprechenden Klimadaten für ganz Österreich kann die Methode künftig auf das gesamte Bundesgebiet ausgerollt werden. Dazu wird empfohlen, die Arbeitsgruppe zum Thema Kampfzone für entsprechende Diskussionen und Lösungen auch nach dem Projekt weiterzuführen.

Auwaldlayer

Für die Erstellung eines bundesweiten Auwaldlayers wurden neben der Hinweiskarte Schutzwald, das Aueninventar des Umweltbundesamtes (UBA) sowie Probeflächen der ÖWI im Ausschlagwald verwendet. Das Aueninventar wurde um jene Gebiete reduziert, die außerhalb des Waldes liegen und danach mit den Daten der ÖWI und der Hinweiskarte Schutzwald verglichen. Die Übereinstimmung mit der ÖWI war zufriedenstellend. In der Hinweiskarte Schutzwald ist dem Auwald größtenteils keine Schutzfunktion zugewiesen. Der Auwaldlayer sollte daher als Sonderkarte zur Hinweiskarte Schutzwald ergänzt werden.

Windschutzanlagen

Im Rahmen der Erstellung eines bundesweiten Datensatzes zu Windschutzanlagen wurden die entsprechenden Layer von den Bundesländern zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Heterogenität der Daten betreffend Aktualität, Qualität und unterschiedlicher Herangehensweisen für die Ausweisung, wurde zu diesem Thema ebenfalls eine Arbeitsgruppe begründet. Diese Arbeitsgruppe hat die Definition von Windschutzanlagen (WSA) im Rahmen des Projekts festgelegt. Diese folgt im Wesentlichen den forstgesetzlichen Bestimmungen: Windschutzanlagen sind anthropogenen Ursprungs und vorwiegend linienförmig.

Die WSA-Layer der Bundesländer wurden seitens des BFW durch visuelle Kontrolle mit Orthophotos bereinigt. Es wird empfohlen, den bundesweit vereinheitlichten Layer der WSA als Sonderkarte zur Hinweiskarte Schutzwald zu verwenden. Eine Zuordnung der WSA zu Wald oder Nichtwald ist enthalten.

Summary

The aim of this project was to improve the status of the geoinformation on Austrian protective forests and to develop digital maps for site-protective forests, floodplain forests, windbreaks and the zone between Timberline and Tree species line ("Kampfzone").

The site-protective forest map should allow a breakdown of Austria's forests into their primary protective functions (site-protective, object-protective function) in a standardised nation-wide method. Additionally, areas of windbreaks, floodplain forests and, as part of a pilot study the zone between Timberline and Tree species line were localised and designated. Some of these areas may also be located outside the forest.

The methods and main results of these four parts of the project are briefly summarised below.

Site-protective forest

The Austrian Forest Act (§21) defines the terms site-protective forest and object-protective forest. Site-protective forests include those forest areas whose locations are endangered by the erosive forces of wind, water, or gravity and which require special treatment. Six criteria determine which forest areas are assigned to a site-protective function. In practice, there is often an overlap between forests with object-protective and site-protective functions, and other terms for differentiating protective forests have been established historically through different approaches in forest management (Austrian National Forest Inventory) or forest spatial planning (Forest Development Plan). Chapter 2.1 is therefore dedicated to an analytical categorisation of protective forests.

To derive a digital standardised nationwide site-protective forest map it is necessary to check geo-data sets that are available for all of Austria for their information on protective forests and to analyse whether linking them is efficient.

Knowledge deficits in the explicit characterisation of site-specific conditions and the lack of extensive geoinformation, as required by the Forest Act to determine site-protective forests, soon led to the conclusion that a simple rule-based approach for deriving a uniform Austria-wide site-protective forest map is not feasible. Therefore, "machine-learning" methods were used that can precisely show the complexity of the interactions of different basic data in a model.

Machine-learning methods require a large amount of training data to deliver valid results. Geo-data sets available throughout Austria were used as training data (e.g. digital terrain model, slope inclination, krummholz layer, geology). These data sets were the basis for training site-protective forest areas using machine learning based on the map of "Protective forest cover in Austria" (Starsich und Perzl, 2022) and on the sample site data from the Austrian National Forest Inventory (ÖWI).

Method 1: Based on the ÖWI, the training data set was distinguished by the sample site information for protective forests ("productive protective forests" and "non-productive protective forest" combined) and the remaining ÖWI sample sites.

Methods 2 and 3: Based on the map of "Protective forest cover in Austria", the training data set was distinguished using the categories "forest without primary protective function" and "forest with object and/or site-protective function".

Two different approaches based on the map of "Protective forest cover in Austria" were chosen. On one hand, a sample of a province was used. Styria was chosen as its forest is most representative for Austria (method 2). On the other hand, a sample for the whole country was used (method 3). The selection of the sample was based on the Austrian National Forest Inventory grid. Technically, these two methods do not relate to the ÖWI. Rather, they represent those areas that led to the designation of site-protective forest areas as part of the development of the map of "Protective forest cover in Austria" based on the best available geo-data sets and taking local expert knowledge into account.

With each of the three approaches all areas that were designated as "forest with a direct object-protective function" in the map of "Protective forest cover in Austria" were excluded for processing in advance. Hence, this layer is identical to the map of "Protective forest cover in Austria".

The results show that with all three methods areas in similar regions are designated as forests with a site-protective function. However, in the country-wide area assessment there are marked differences. Method 1 using ÖWI training data has the smallest share of area (14 %). Method 3 using the map of "Protective forest cover in Austria" and data of the whole country has the highest share with 23 %. The machine learning methods achieve homogeneous results for the entire Austrian forest, with method 3 showing the best agreement with the results of the map of "Protective forest cover in Austria" in the nationwide area balance. As expected, there are also deviations from the existing map of "Protective forest cover in Austria". The scientific validation of the results shows that 81% of the

areas were correctly allocated to both classes "site-protective forest" and "production forests".

From the BFW's point of view, these scientific methods represent an improvement in the quality of geodata on site-protective forests. As the project did not fulfil the project mandate as intended by the client, an evaluation process involving the Ministry (BML), provinces, BFW and WLV will be initiated immediately after completion of the study to further analyse the potential of the machine learning method and the variations of the results.

Kampfzonen layer

The automated creation of a layer for the zone between Timberline and Tree species line (German: "Kampfzone") was tested within the framework of a feasibility study. For this, a task force had to create an operative definition of this zone in advance. It was decided that within this project only the upper area of the zone between Timberline and Tree species line would be dealt with. According to the forest code this area is defined through climatic characteristics. Relevant climate data were only available for Styria, stemming from the ForSite project. Hence, the methods were defined based on this province.

During the creation of the "Kampfzonen" layer machine learning methods were also applied. Data were based on digital Terrain Models, satellite data (Sentinel-2) and climate data for Styria. Manually distinguished areas and the "Krummholz" layer of BFW were used as training data. Around alpine pasture fodder areas (INVEKOS) no training data were assessed, due to the actual vegetation differing from the potential vegetation. After applying the machine learning algorithm, the method was eventually rolled out for all of Styria. The results show that the scientific method to create the "Kampfzone" map is possible and sensible. This map not only contains a decision "zone between Timberline and Tree species line yes or no", but also the probability of belonging to the zone between Timberline and Tree species line. Specifying the probability (e.g. greater than 80 %) can assist in the cartographic distinction.

If relevant climate data for all of Austria are available, this method can be rolled out for the whole country in the future. For this, it is recommended that the taskforce for the zone between Timberline and Tree species line is kept active for discussions and solutions even after the completion of the project.

Floodplain forest layer

The map of protective forests, the floodplain inventory of the Environment Agency Austria, and sample sites of the ÖWI in coppice forests were used to create a nationwide floodplain forest layer. The floodplain inventory was reduced by the areas that are outside of forests and was then compared to data of the ÖWI and the map of "Protective forest cover in Austria". The accordance with the Austrian National Forest Inventory was satisfactory. In most cases the map of "Protective forest cover in Austria" does not assign a protective function to floodplain forests. Therefore, the floodplain forest layer should be used as a complementary map to the map of "Protective forest cover in Austria".

Windbreaks

Within the framework of the creation of a nationwide dataset on windbreaks, the corresponding layers were made available by the provinces. Due to the heterogeneity of the data in terms of timeliness, quality and different approaches for the designation, a task force was also founded for this topic. This task force agreed on a definition for windbreaks within the framework of the project. Essentially, it is in accordance with the forest code: windbreaks are man-made and predominantly linear. The windbreak layers of the provinces were corrected through visual comparison with orthophotos by the BFW. It is recommended to use the harmonised nationwide layer of windbreaks as a complementary map to the map of protective forests. An assignment of windbreaks to forested or non-forested land is included.

1 Einleitung

Die Geoinformationen zum Österreichischen Schutzwald sind derzeit nicht in ausreichendem Maße vorhanden. Der Waldentwicklungsplan (WEP) des BML bietet zwar einen Schutzwaldlayer an, aber für zukünftige Fragestellungen sind der Grad der Detaillierung und die Genauigkeit der Grenzziehungen nicht in allen Bereichen ausreichend. Die Arbeiten im vorliegenden Projekt bauen im Wesentlichen auf der Hinweiskarte Schutzwald (Starsich und Perzl, 2022, Stand: Juni 2022) auf.

Ein Ziel des Projekts war die Ausweisung einer bundesweit einheitlichen, digitalen Standortschutzwaldkarte, die eine Gliederung des Gesamtwaldes in Österreich nach seinen vorrangigen Schutzfunktionen (Standort-, Objektschutzfunktion) erlaubt. Auch Flächen wie die Kampfzone des Waldes oder Windschutzanlagen, die per se nicht auf Waldboden fallen müssen, wurden verortet und ausgewiesen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Methodenentwicklung und Ableitung einer österreichweit homogenen Standortschutzwaldkarte als wissenschaftliche Grundlage für einen weiteren Evaluierungsprozess
- Methodenentwicklung für die Georeferenzierung der Kampfzone des Waldes in Testgebieten, sowie Empfehlungen für eine bundesweite Umsetzung
- Erstellung einer Auwaldkarte für das Bundesgebiet
- Erstellung einer Windschutzanlagenkarte für das Bundesgebiet

Auf der Basis der validierten Hinweiskarte Schutzwald wurden Methoden für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) und zur Harmonisierung der Standortschutzwaldkarte erarbeitet. Dabei wurde die Anwendbarkeit von Machine-Learning Ansätzen getestet. Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse stellen aus Sicht des BFW eine Verbesserung der Geodatenqualität zum Standortschutzwald dar. Da sich in einzelnen Fällen noch Abweichungen von in der Natur angesprochenen Situationen zeigen, wird an diese Studie ein Evaluierungsprozess unter Einbindung des Ministeriums (BML), der Länder, des BFW, der WLW angeschlossen, in dem das Potenzial der Machine-Learning Methode und die Abweichungen der Ergebnisse analysiert werden. Erst dann wird entschieden, wie zukünftig

eine valide Standortschutzwaldkarte für Österreich hergestellt werden kann.

Für die Arbeiten zur Kampfzone Wald wurde ein Diskussionsprozess mit nationalen Experten gestartet, um eine Definition zur Kampfzone Wald und mögliche Abgrenzungskriterien zum unterliegenden (Schutz-)wald gemeinsam mit dem BML festzulegen. Basierend auf Daten der Fernerkundung wurden Vorschläge zur Definition der Kampfzone des Waldes erarbeitet. Diese wurden in Testgebieten umgesetzt und danach Vorschläge für die Umsetzung auf das gesamte Bundesgebiet erarbeitet.

Für die Auwälder und die Windschutzanlagen wurden harmonisierte, österreichweite Karten erstellt.

2 Arbeiten zu einer bundesweit einheitlichen Standortschutzwaldkarte

2.1 Gliederung der Schutzwaldkategorien

Der Begriff „Schutzwald“ ist ein Oberbegriff für den Standort- und Objektschutzwald. Für eine bessere Klarheit im Zuge der durchgeführten Arbeiten wird zunächst die begriffliche Gliederung der Schutzwaldkategorien erklärt.

Objektschutzwald

Das österreichische Forstgesetz definiert unter „Objektschutzwald“ jene Wälder, die vor Naturgefahren schützen und eine besondere Behandlung zur Erreichung und Sicherung der Schutzwirkung benötigen.

§ 21 (2) FG 1975 (2023): Objektschutzwälder im Sinne dieses Bundesgesetzes sind Wälder, die Menschen, menschliche Siedlungen oder Anlagen oder kultivierten Boden insbesondere vor Elementargefahren oder schädigenden Umwelteinflüssen schützen und die eine besondere Behandlung zur Erreichung und Sicherung ihrer Schutzwirkung erfordern.

Ein Objektschutzwald kann, muss aber kein Standortschutzwald sein.

Die ÖWI kann diese Waldfunktion vor Ort nicht erheben, da auf einer Probefläche von 300 m² weder ein Gefahrenprozess abgeleitet noch die Gefährdung von Objekten durch diesen Prozess eingeschätzt werden kann.

Waldstandorte mit „direkter Objektschutzfunktion“ können aber durch Modellierungen erfasst werden und sind in der Hinweiskarte Schutzwald (Starsich und Perzl, 2022) dargestellt. Für Wälder mit „indirekter Objektschutzfunktion“ gibt es bislang keine bundesweit einheitliche Definition. Im Forstgesetz gibt es dazu keinen Bezug.

Im Rahmen der vorliegenden Studie sind die Bereiche mit direkter Objektschutzfunktion laut Hinweiskarte Schutzwald nicht in die Bearbeitung für die Standortschutzwaldkarte eingeflossen. Wälder mit indirekter Objektschutzfunktion wurden nicht als eigene Kategorie behandelt. Laut Hinweiskarte Schutzwald sind diese in der Kategorie „Wälder mit Standortschutzfunktion und/oder indirekter Objektschutzfunktion“ enthalten.

Standortschutzwald

Wälder mit Standortschutzfunktion sind ebenfalls im Forstgesetz definiert:

§ 21 (1) FG 1975 (2023): Standortschutzwälder im Sinne dieses Bundesgesetzes sind Wälder, deren Standort durch die abtragenden Kräfte von Wind, Wasser oder Schwerkraft gefährdet ist und die eine besondere Behandlung zum Schutz des Bodens und des Bewuchses sowie zur Sicherung der Wiederbewaldung erfordern. Diese sind

- 1. Wälder auf Flugsand- oder Flugerdeböden,*
- 2. Wälder auf zur Verkarstung neigenden oder stark erosionsgefährdeten Standorten,*
- 3. Wälder in felsigen, seichtgründigen oder schroffen Lagen, wenn ihre Wiederbewaldung nur unter schwierigen Bedingungen möglich ist,*
- 4. Wälder auf Hängen, wo gefährliche Abrutschungen zu befürchten sind,*
- 5. der Bewuchs in der Kampfzone des Waldes,*
- 6. der an die Kampfzone unmittelbar angrenzende Waldgürtel.*

Im Rahmen der ÖWI kam seit Beginn der Erhebungen die Definition lt. Forstgesetz zur Anwendung. Der Standortschutzwald wird in die beiden Kategorien „Schutzwald im Ertrag“ und „Schutzwald außer Ertrag“ unterteilt. Diese Unterteilung spielt für die vorliegende Studie jedoch keine Rolle.

Bundesweit homogene Geodatensätze zu den sechs laut Forstgesetz für Standortschutzwälder festgelegten Kriterien sind bislang nicht verfügbar.

- **Auwald:** Wird von der ÖWI erhoben, aber nicht als Standortschutzwald klassifiziert.
- **Kampfzone:** Wird innerhalb des Waldes von der ÖWI als Standortschutzwald klassifiziert. Allerdings zählen auch Flächen außerhalb des Waldes zur Kampfzone, die von der ÖWI nicht erfasst werden. Eine Definition zur Kampfzone wurde im Rahmen dieser Studie erarbeitet (siehe Kapitel 3.4).
- **Windschutzanlagen:** Werden nur dann von der ÖWI erfasst, wenn sie unter die Walddefinition fallen. Diese Flächen werden jedoch nicht als Standortschutzwald klassifiziert. Windschutzanlagen außerhalb des Waldes werden von der ÖWI nicht erhoben.

2.2 Ausgangssituation

In der „Hinweiskarte Schutzwald in Österreich“ des BML sind drei Klassen von Wäldern ausgeschieden:

- Wald mit direkter Objektsschutzfunktion (WdOSF)
- Wald mit Objektschutz- und/oder Standortschutzfunktion (WOSSF)
- Wald ohne vorrangige Schutzfunktion (WoSF)

Der WOSSF Layer wurde in verschiedenen Projekten des BFW gemeinsam mit dem BML erarbeitet und von den Bundesländern validiert.

Die ÖWI kann die Unterscheidung des Schutzwaldes in WdOSF und WOSSF bei ihren Erhebungsarbeiten im Wald nicht durchführen, weil auf der Probefläche selbst keine Entscheidung möglich ist, ob ein Gefahrenprozess für ein darunter liegendes Objekt vorliegt. Die Erhebungsarbeiten im Wald kennen nur die seit Beginn der ÖWI durchgeführte Unterscheidung in Schutzwald im Ertrag (SiE) und Schutzwald außer Ertrag (SaE). Diese Unterscheidung hat forstpolitisch weiter Relevanz, da sie im nationalen wie internationalen Berichtswesen abgefragt wird, ist aber für dieses Projekt nicht von Bedeutung. Der Schutzwald der ÖWI kann generell sowohl in den WdOSF als auch in den WOSSF der Hinweiskarte Schutzwald fallen.

Im gegenständlichen Projekt wurden die verschiedenen Herangehensweisen der ÖWI-Schutzwald erfassung auf den Stichprobeflächen (SaE und SiE) und der WOSSF Erfassung im Projekt „Verbesserung der Darstellung der Österreichischen Wälder mit Objektschutzfunktion“ (PROFUNmap) verglichen und untersucht, welche Methoden geeignet sind, eine bundesweit einheitliche Standortschutzwaldkarte daraus abzuleiten.

Die Hinweiskarte Schutzwald wurde in zwei Versionen vom BML (damals BMLRT) übermittelt: Einmal als Endstand des Projekts PROFUNmap des BFW und einmal nach der erfolgten Evaluierung seitens der Bundesländer gemeinsam mit dem BML. In der Karte des BFW sind ausschließlich gravitative Prozesse behandelt worden. Das Ergebnis ist somit eine Verschneidung der Waldkarte des BFW mit Flächen der Modellierung von Lawinen, Steinschlag und flachgründigen Hangrutschungen.

Diese Karte wurde den Bundesländern zur Evaluierung übergeben. Die dort zuständigen Expertinnen und Experten ergänzten beziehungsweise verbesserten die Karte mit Hilfe von Ortskenntnissen und Kenntnissen über historische Ereignisse, wie Lawinen und Steinschläge. Dabei wurde die Karte um nichtgravitative Naturgefahren, wie zum Beispiel Wind, erweitert. Daher sind in der durch die Bundesländer evaluierten Karte

mehr Waldflächen mit Schutzfunktion ausgewiesen als in der ursprünglichen Karte des BFW (Tabelle 1).

In beiden Fällen wurden Waldflächen kleiner als ein Hektar nicht berücksichtigt und deswegen im Vorhinein aus der Waldkarte entfernt.

Nach Gegenüberstellung der beiden Karten ergibt sich österreichweit folgende Statistik:

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Klassifizierung in PROFUNmap und Hinweiskarte Schutzwald.

	PROFUNmap original	%	Hinweiskarte Schutzwald	%	Differenz
WdOSF	589.488	15,0	614.734	15,6	25.246
WOSSF	898.364	22,9	1.030.640	26,2	132.276
WoSF	2.435.280	62,1	2.292.890	58,2	142.390
Gesamt	3.923.132	100,0	3.938.264	100,0	15.132

Anmerkung: WdOSF: Wald mit direkter Objektschutzfunktion, WOSSF: Wald mit Objektschutz- und/oder Standortsschutzfunktion, WoSF: Wald ohne vorrangige Schutzfunktion

Wälder mit Schutzfunktion haben demnach bei der Evaluierung um insgesamt 158.000 ha zugenommen, wobei auch die Waldfläche insgesamt zugenommen hat (15.000 ha).

Im Folgenden werden beispielhaft zwei Gebiete mit größeren Veränderungen gezeigt (Abbildung 1, Abbildung 2, Abbildung 3).

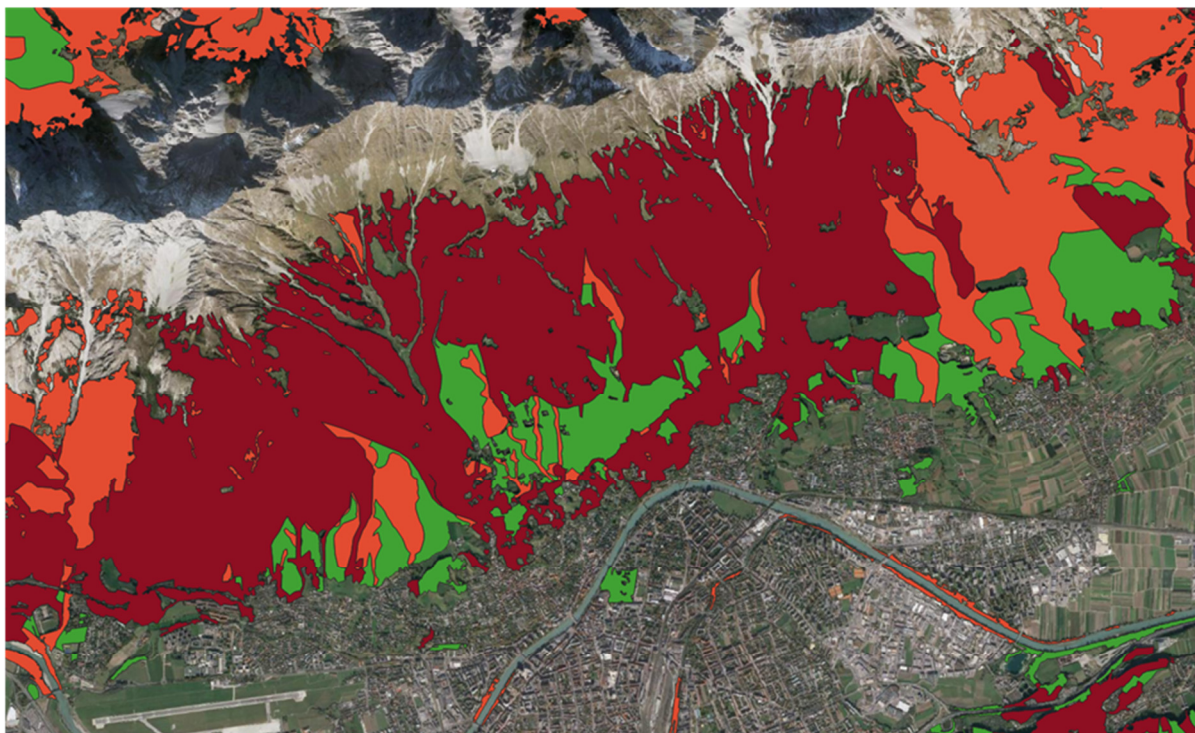
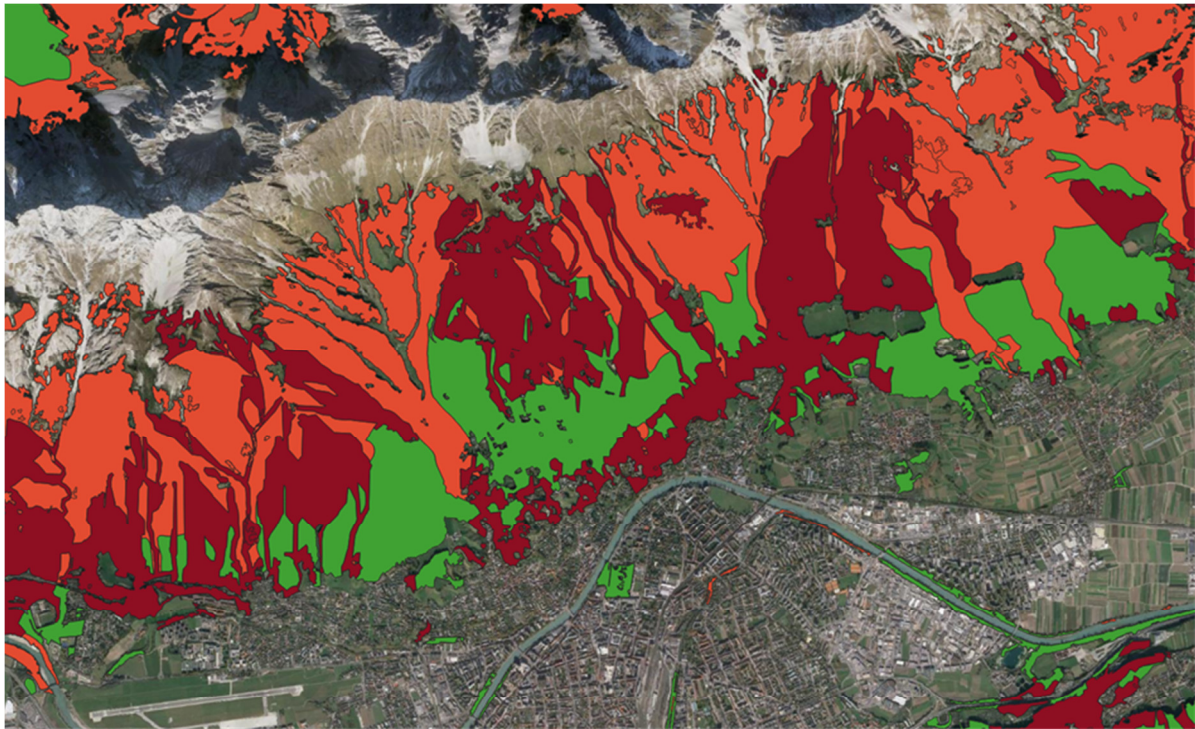


Abbildung 1: Gebiet nördlich von Innsbruck: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte.

Hier ist erkennbar, dass viele Wälder mit Objekt- und/oder Standortfunktion (orange) zu Wäldern mit direkter Objektschutzfunktion (rot) geworden sind.

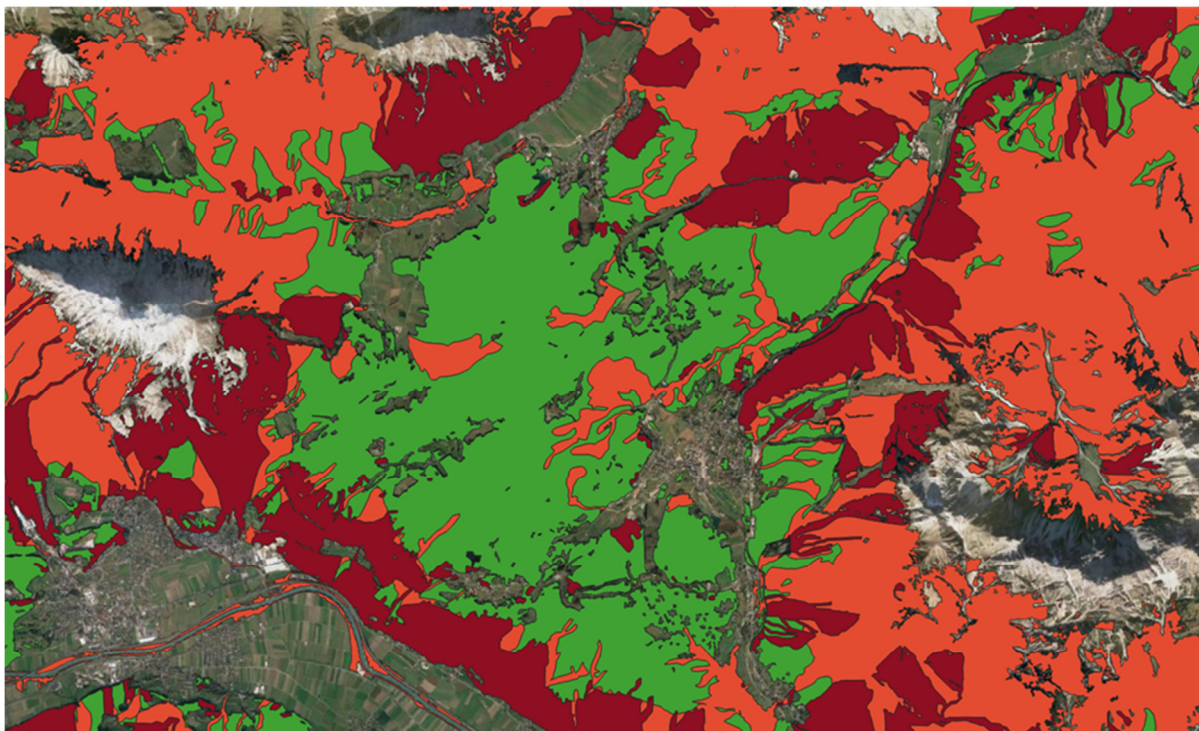
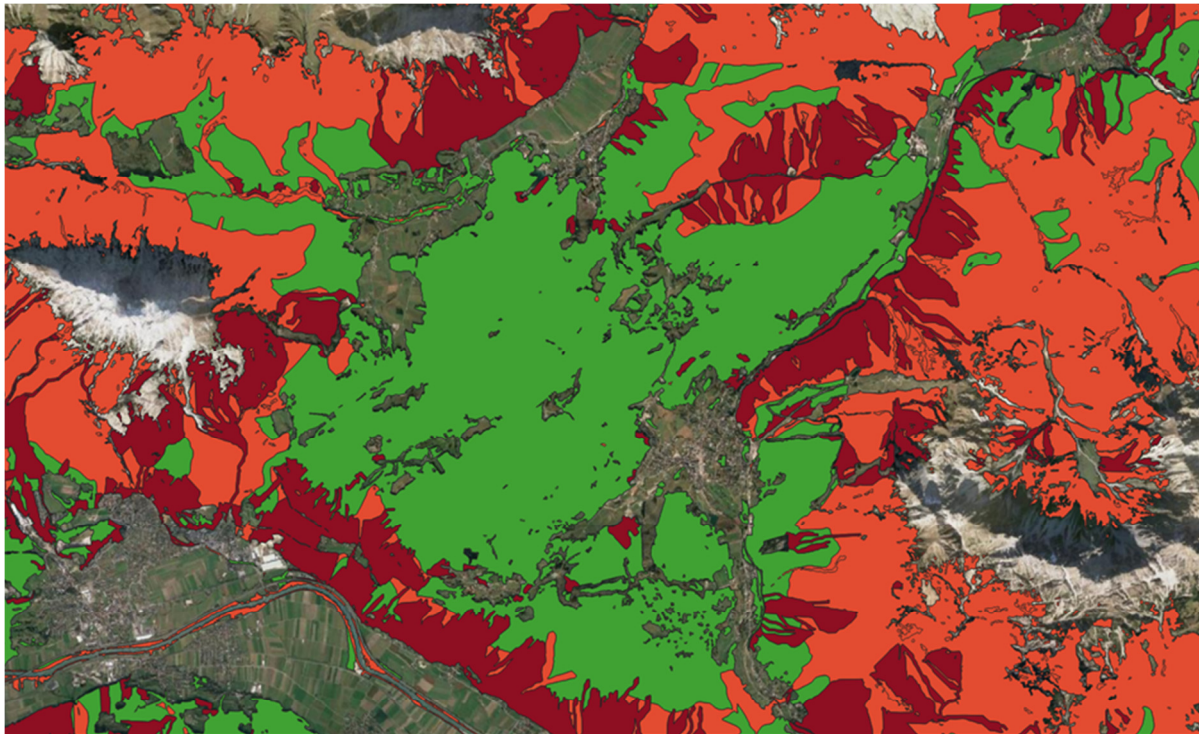


Abbildung 2: Gebiet nördlich von Telfs: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte. WOSSF (orange)

Hier ist erkennbar, dass WoSF-Wälder (grün) zu WOSSF (orange) und geringfügig auch zu WdOSF (rot) geworden sind.

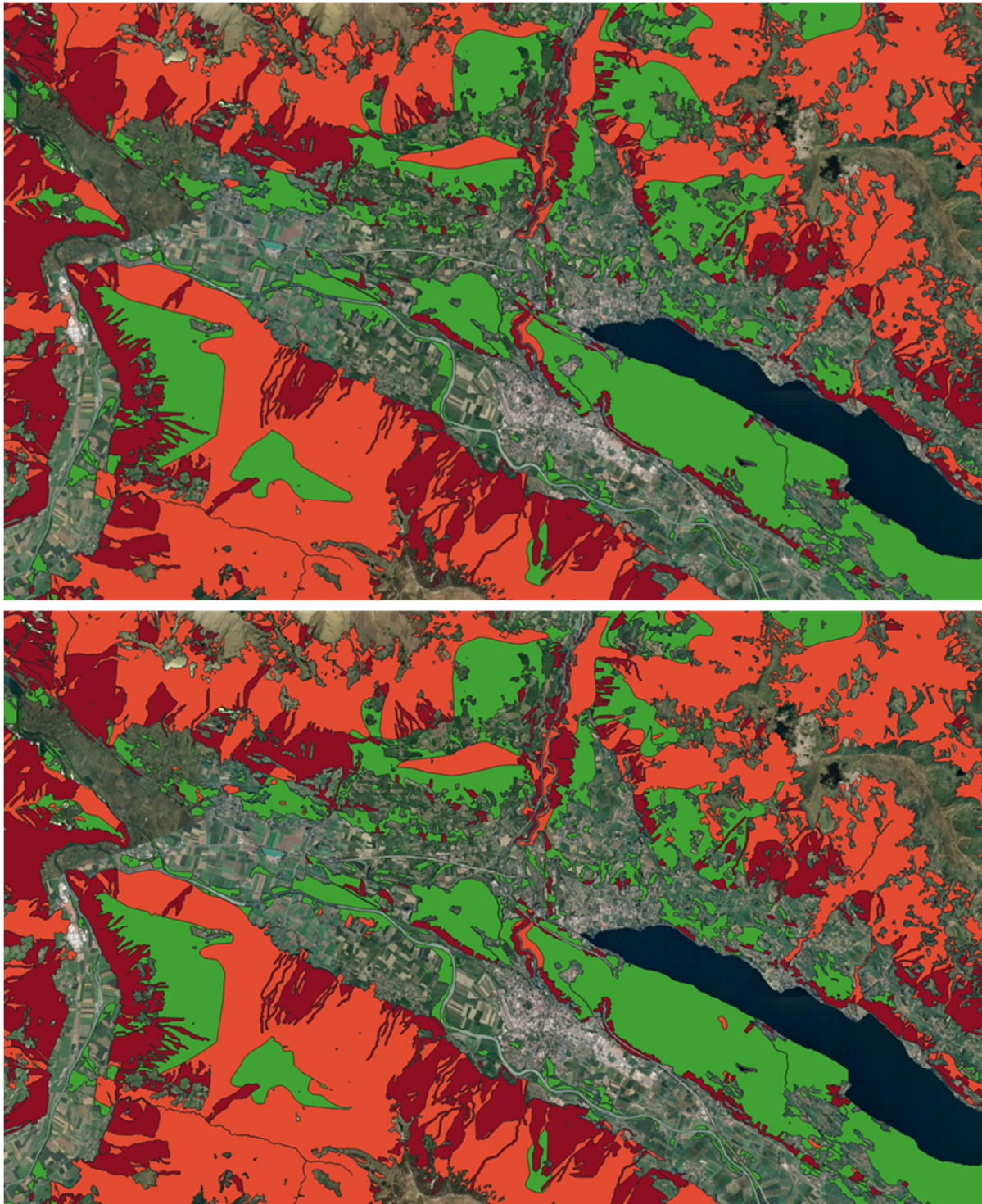


Abbildung 3: Gebiet um den Millstättersee: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte

Diese beiden Karten sind hingegen nahezu ident. Damit kann zunächst grob gezeigt werden, dass die im Zuge der Evaluierung vorgenommenen Abänderungen in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich stark waren.

2.3 Methoden zur automatisierten Ableitung einer Standortschutzwaldkarte

Bereits zu Beginn des Projekts zeigte sich, dass die Rechenzeiten für die bundesweiten Berechnungen und Auswertung relativ gering waren. Aus diesem Grund wurde auf die testgebietsweise Analyse unterschiedlicher Methodenansätze, die ursprünglich angedacht war, verzichtet.

Folgenden Methodenansätze wurde getestet:

2.3.1 Regelbasierter Ansatz

Zunächst wurden Einflussgrößen bestimmt, die für die Abgrenzung des WOSSF flächendeckend eingesetzt werden können:

- Digitales Geländemodell (DGM)
- Hangneigung (aus dem DGM abgeleitet)
- Normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM, aus dem DGM und dem aus Luftbildern mit Image-Matching abgeleiteten, digitalen Oberflächenmodell (IM DOM berechnet)
- Krummholzlayer (laut Baumartenkarte des BFW)
- Geologie (stark vereinfachte Gliederung aus Beck-Mannagetta (Geologische Bundesanstalt, 1991))

Bei den drei Parametern Seehöhe, Hangneigung und mittlere Vegetationshöhe wurde davon ausgegangen, dass sie einen Einfluss auf die Trennung des Schutzwaldes im Ertrag (SiE) und des Schutzwaldes außer Ertrag (SaE) vom Wirtschaftswald haben. Die Analyse der Parameter in Abbildung 4 zeigt, dass sich deren Verteilungen voneinander unterscheiden. Die Schwankungsbreiten der Parameter, die für einen eventuellen regelbasierten Ansatz verwendet werden könnten, sind jedoch sehr groß. Daher musste von der Idee, einen sinnvollen regelbasierten Ansatz entwickeln zu können, Abstand genommen werden. Stattdessen wurde ausschließlich ein Machine-Learning Ansatz durchgeführt.

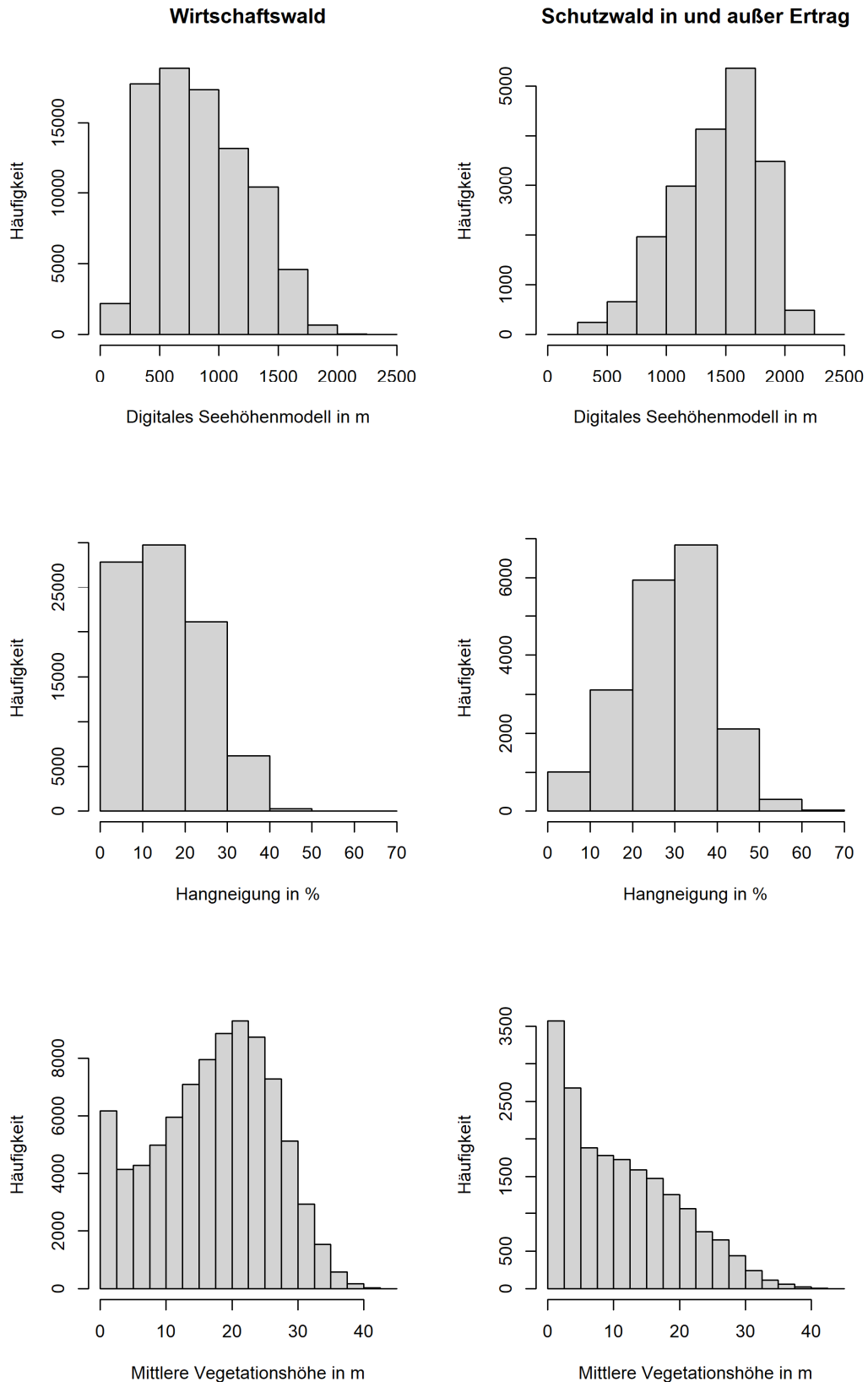


Abbildung 4: Histogramme für die drei Parameter Seehöhe (dem), Hangneigung (slope) und mittlere Vegetationshöhe (ndsm_mean) für den Wirtschaftswald (links) und den SiE und SaE (rechts) auf den Probeflächen der ÖWI.

2.3.2 Machine-Learning Ansatz

Es gibt generell verschiedene Machine-Learning Methoden. Die beiden folgenden Methoden werden jedoch öfter für Waldanwendungen eingesetzt:

- Random Forest (RF)
- Neuronale Netze (NN)

Für die spezielle Anwendung im Rahmen des Projekts wurde die RF-Methode ausgewählt, da die Komplexität hier nicht so hoch ist wie z.B. bei der Baumartenerkennung (siehe Kapitel 3.9). Im Allgemeinen ist es für alle Machine-Learning Verfahren wichtig, eine sehr große Anzahl von Trainingsdaten verfügbar zu haben. Zudem ist es günstig, wenn die Trainingsdaten möglichst repräsentativ für jenes Gebiet sind, in denen das Modell später angewendet wird.

Als räumliche Einheit wurden für die Trainingsdaten 10x10 m Pixel festgelegt. Diese wurden später auch für die Ausrollung auf ganz Österreich eingesetzt.

Drei verschiedene Trainingsdatensätze kamen zum Einsatz:

1. Daten der ÖWI (SiE und SaE gemeinsam)
2. Daten der Hinweiskarte Schutzwald in der Steiermark
3. Daten der Hinweiskarte in ganz Österreich

Die Steiermark wurde ausgewählt, weil sie im Verhältnis zu allen anderen Bundesländern, die größte Repräsentativität für den Österreichischen Wald aufweist. Würde hier ein Bundesland ausgewählt, das z.B. einen deutlich größeren Anteil am Schutzwald hat als bundesweit, dann würde in der Ergebniskarte der Schutzwaldanteil deutlich zu hoch liegen.

Dies zeigte sich bei einem Test, für den zum Trainieren ausschließlich Daten der Hinweiskarte Schutzwald des Bundeslandes Tirol verwendet wurden. Da dort der Anteil am Schutzwald im Verhältnis zu ganz Österreich stark überproportional ist, konnten die Ergebnisse wegen einer Verzerrung in Richtung Schutzwald nicht weiterverwendet werden.

Für Methode 1 konnten die Daten der ÖWI direkt verwendet werden, da sie auf einer repräsentativen Stichprobe für ganz Österreich beruhen. Dafür musste der ÖWI-Datensatz um jene Probeflächen reduziert werden, die laut Hinweiskarte Schutzwald in den Bereich des WdOSF fallen. Die verbleibenden ÖWI-Probeflächen des SiE und des SaE wurden dann als WOSSF reklassifiziert. Der restliche Ertragswald wurde als WoSF reklassifiziert.

Für die Methoden 2 und 3 mussten aus der Hinweiskarte Schutzwald Stichproben gezogen werden, weil der Datensatz für das Training sonst viel zu groß gewesen wäre. Dafür wurde der Stichprobenraster der ÖWI herangezogen. Bei der Erstellung des Trainingsdatensatzes wurden Puffer rund um die Koordinaten gelegt. Bei Testversionen hat sich ein Puffer von 20 m für die Methoden 1 und 3 am günstigsten erwiesen, bei Methode 2 waren es 40 m, um mehr Daten zu erhalten.

Auch für die Methoden 2 und 3 wurden jene Flächen, die laut Hinweiskarte Schutzwald in den WdOSF fallen, aus dem Trainingsdatensatz ausgeschlossen. Auch bei der Anwendung der Modelle wurden diese Waldflächen nicht umklassifiziert. Daher konnte, wie mit dem Auftraggeber abgesprochen, der Layer für den WdOSF aus der Hinweiskarte Schutzwald unverändert in die Ergebnisdarstellung übernommen werden.

Als Parameter für das Training wurden folgende Variablen verwendet:

- Digitales Geländemodell
- Hangneigung
- Normalisiertes Oberflächenmodell
- Krummholzlayer aus der Baumartenkarte des BFW
- Geologie

Die Modelle wurden mit der Funktion „ranger“ aus dem R-Paket für die zwei Klassen WOSSF und WoSF trainiert. Zunächst wurde nur die Zuordnung in die zwei Klassen ausgegeben. In einem weiteren Schritt wurde die Wahrscheinlichkeit der Vorhersage für eine der beiden Klassen ausgegeben. Damit konnte dann ein Grenzwert (der auch von 50% abweichen kann) für die Klassenzugehörigkeit festgelegt werden.

Die Ergebnisse wurden anschließend mit einer Filtertechnik geglättet, um kleinräumige Ausscheidungen zu eliminieren (siehe Abbildung 5).

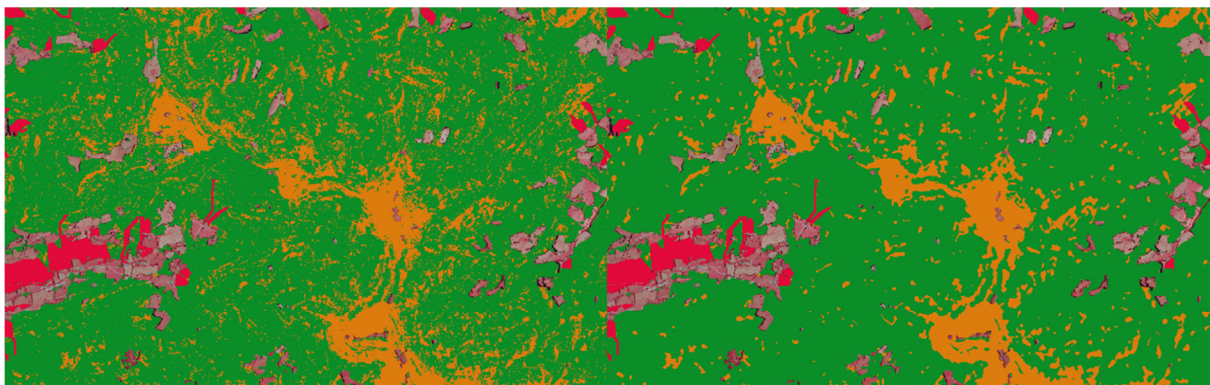


Abbildung 5: Beispiel für die ungefilterte Version (links) und für die gefilterte Version (rechts)

2.4 Ergebnisse und Diskussion

Die für ganz Österreich ausgerollten Ergebnisse zeigen, dass sich die drei Methoden in der Flächenbilanz deutlich voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Methode 1 weist im Vergleich zur Hinweiskarte Schutzwald eine deutlich geringere Waldfläche mit Schutzfunktion auf. Das war auch zu erwarten, weil laut ÖWI der Anteil des SiE plus SaE (ohne Flächen des WdOSF) 18,5% beträgt. Nach der Berechnung aus der Hinweiskarte Schutzwald beträgt dieser Anteil jedoch 31,0%. In PROFUNmap betrug er 26,9%.

Tabelle 2: Flächenbilanzen (in %) nach der Hinweiskarte Schutzwald und den drei Machine-Learning Methoden

Datensatz	WdOSF	WOSSF	Summe (WdOSF+WOSSF)	WoSF
Hinweiskarte	15,6	26,2	41,8	58,2
Methode 1 (ÖWI)	15,3	13,9	29,2	70,8
Methode 2 (STMK)	15,3	19,4	35,7	65,3
Methode 3 (ÖST)	15,3	22,9	38,2	61,8

Die Methoden 2 und 3 zeigen mit 19,4% und 22,9% erwartungsgemäß höhere Anteile am WOSSF.

Eine umfassende Validierung wurde für Methode 3 durchgeführt. Dabei wurde die gesamte Hinweiskarte Schutzwald mit der Machine-Learning Methode erstellten Karte verglichen. Es ergibt sich eine Gesamtgenauigkeit von 81%. Das bedeutet, dass auf 19% der Fläche Unterschiede in der Klassifizierung bestehen. Es werden sowohl Flächen, die nach der Hinweiskarte WOSSF sind, mit Machine-Learning als WoSF klassifiziert, wie auch umgekehrt. Eine detaillierte Analyse ist im Kapitel 2.5 ausgeführt.

Wie sich die Unterschiede der verwendeten Methoden räumlich darstellen, wird anhand von zwei Beispielen aufgezeigt.

Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen der Hinweiskarte und den Modellergebnissen der verschiedenen Methoden in der Steiermark. Die Unterschiede sind in diesem Maßstab kaum auszunehmen.

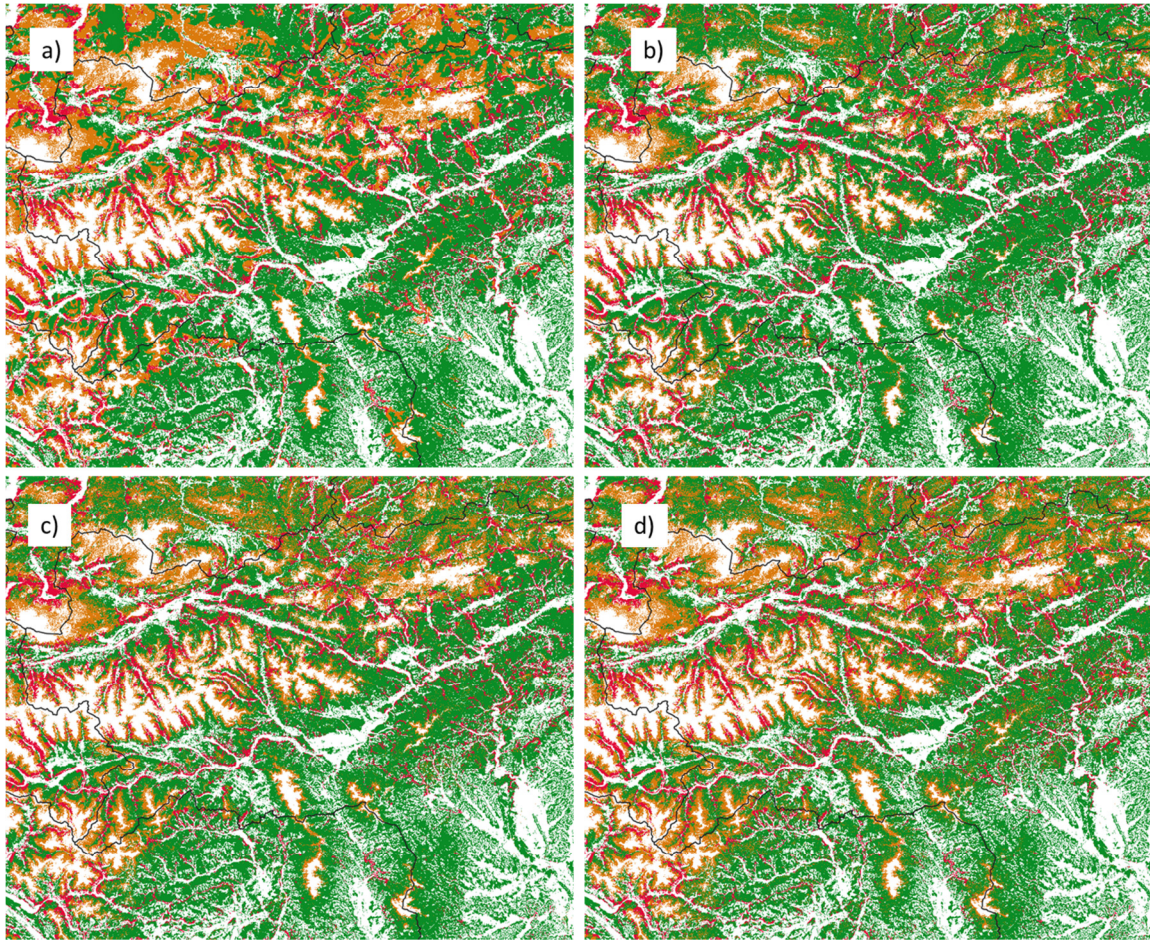


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für die Steiermark; Legende: rot: WdOSF, orange: WOSSF, grün: WoSF

Bei genauerer Analyse und höherem Zoomfaktor zeigen sich aber doch die Unterschiede zwischen der Originalkarte und den mit Machine-Learning erzeugten Layern (Abbildung 7).

Es ist hier gut ersichtlich, dass die trainierten Karten generell kleinräumigere Ergebnisse zeigen. Das war auch so zu erwarten, weil die Abgrenzung von Hand in der Hinweiskarte nicht alle Details auf kleinem Raum, wie sie der Machine-Learning Algorithmus berücksichtigt, gleichzeitig erfassen kann. In manchen Gebieten weicht die Ausscheidung des WOSSF mit dem Machine-Learning Ansatz doch deutlich von der Hinweiskarte ab, wobei die Abweichungen in beide Richtungen gehen können.

Es ist davon auszugehen, dass die Machine-Learning Layer eine sehr hohe Homogenität über ganz Österreich besitzen, da der Algorithmus in ganz Österreich völlig ident angewendet wird.

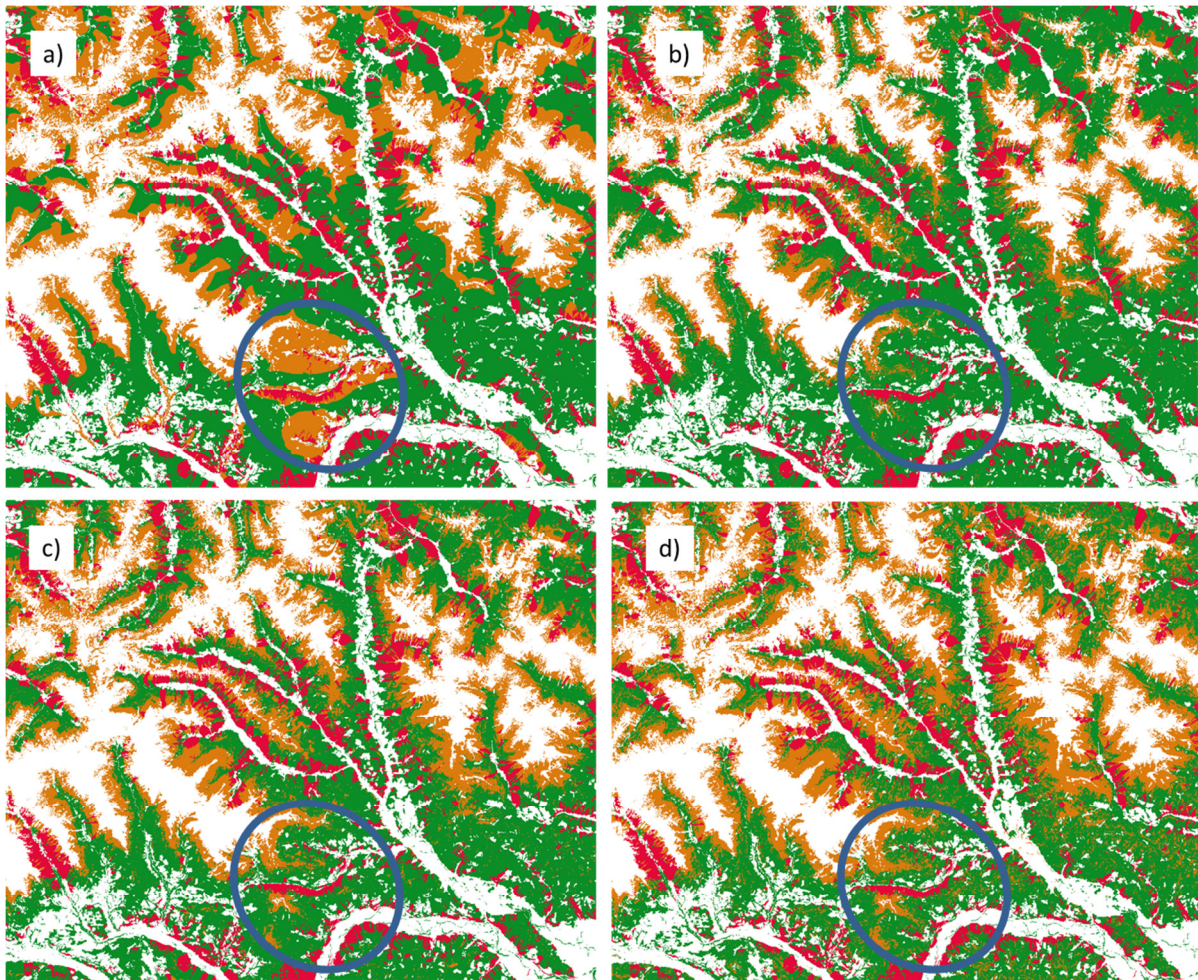


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für die Steiermark im Gebiet nordöstlich von Zeltweg; Legende: rot: WdOSF, orange:WOSSF, grün: WoSF

Ein weiteres Beispiel für die differenzierte Flächenausweisung mit Hilfe von Machine-Learning Ansätzen zeigt Abbildung 8. Der blau markierte Bereich zeigt eine für viele Teile der Karten zutreffende Situation: die Hinweiskarte weist den WOSSF hier großflächig aus, während alle Machine-Learning Versionen eine kleinere, differenziertere Ausscheidung vornehmen. Die kleinste Fläche mit WOSSF ergibt sich erwartungsgemäß mit Methode 1 (ÖWI-Informationen wurden zum Trainieren herangezogen). Die beiden anderen Methoden (Abbildung 8 c und d) unterscheiden sich in diesem Beispiel jedoch kaum.

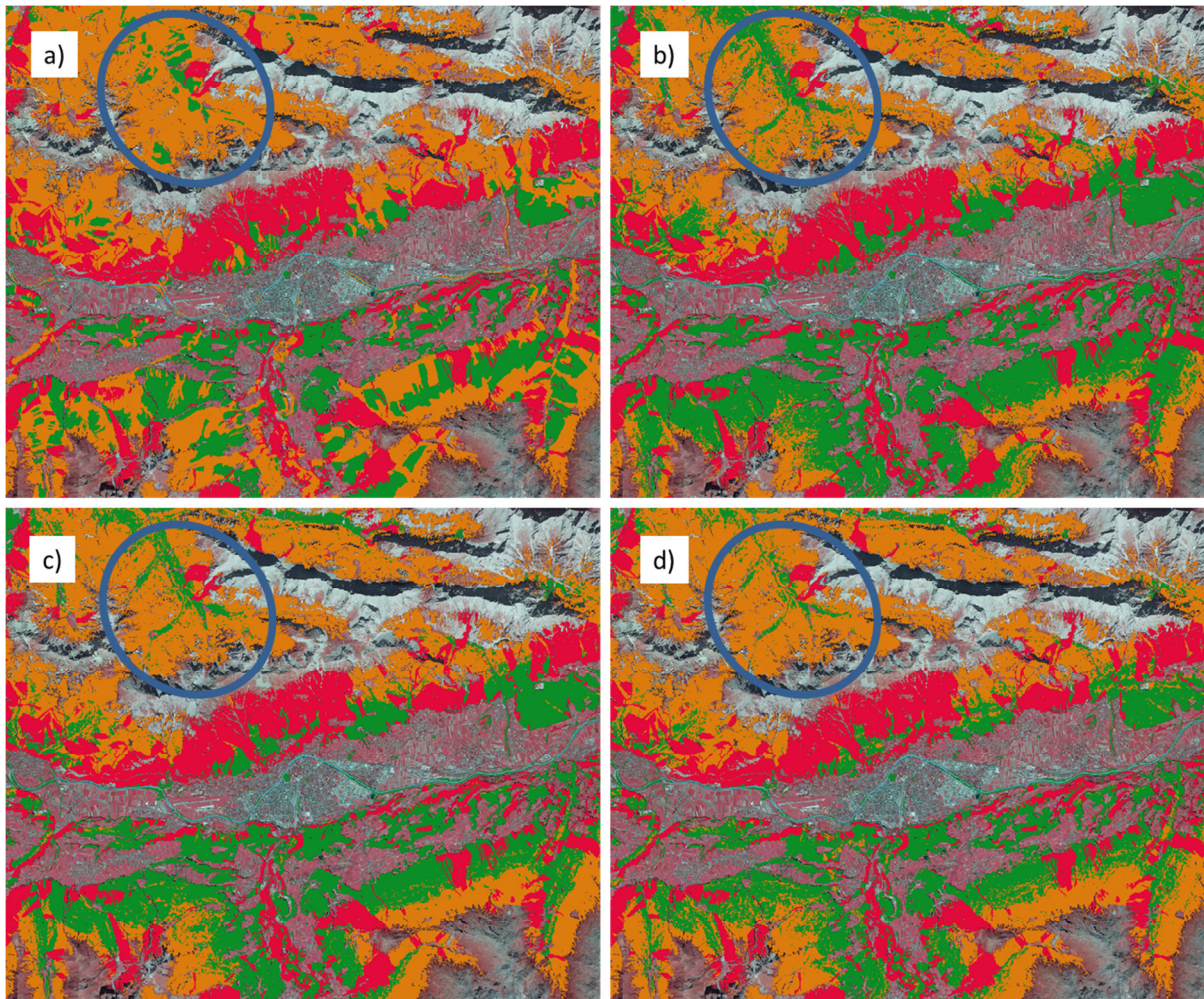


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für das Gebiet um Innsbruck; orange: WOSSF

In diesem Fall sind die Ergebnisse der Methoden 1 und 2 relativ ähnlich, obwohl die Methode der Ableitung von Trainingsdaten unterschiedlich ist. Methode 3 liefert zwar generell eine ähnliche Form, aber doch deutlich weniger WoSF-Fläche. Ein detaillierter Vergleich kann nur in einem GIS direkt durchgeführt werden.

Zusammenfassende Beurteilung der drei Varianten:

Von den drei Methoden wird Methode 2 hier nicht näher behandelt, da sie Methode 3 sehr ähnlich ist, jedoch die Trainingsdaten auf die Steiermark beschränkt wurden. Methode 3 umfasst eine Stichprobe aus ganz Österreich und hat daher eine bessere Repräsentativität, daher ist auch die Qualität des Ergebnisses höher.

Methode 1 bildet die Fläche des Schutzwaldes der ÖWI nach, wobei berücksichtigt wurde, dass der WdOSF nach der Hinweiskarte nicht abgeändert wurde. Da die ÖWI immer nur den Standortschutzwald ausweißt und die Überlappung mit dem WdOSF hier explizit vermieden

wird, kann das Ergebnis auch als Standortschutzwaldkarte bezeichnet werden und umfasst einen Anteil am Gesamtwald von 14%. Rechnet man den Wald mit direkter Objektschutzfunktion dazu beträgt der Anteil des Schutzwaldes 29% des Gesamtwaldes.

Methode 3 verwendet explizit den WOSSF als Trainingsdaten, daher ist das Ergebnis auch eine für ganz Österreich homogenisierte Version des WOSSF. Die Trennung in den reinen Standortschutzwald und den Wald mit ausschließlich indirekter Objektschutzwirkung ist hier nicht möglich. Der Anteil des Schutzwaldes insgesamt nach Methode 3 beträgt 38%.

Der Wald mit indirekter Objektschutzfunktion ist räumlich praktisch nicht fassbar. Er umfasst im Wesentlichen drei Gefahrenarten, die bislang nicht modelliert wurden: die fluviatilen Prozesse Hochwasser und Gerinnemuren sowie tiefgründige Rutschungen. Hier fehlt es noch an Grundlagenarbeiten, bevor eine Modellierung angedacht werden kann. Daher kann der Wald mit indirekter Objektschutzfunktion auch nicht als Differenzfläche zwischen den Methoden 1 und 3 berechnet werden. Zum einen beinhaltet der Standortschutzwald der ÖWI auch Flächen mit indirekter Objektschutzfunktion, zum anderen ist im WOSSF der Hinweiskarte Schutzwald höchstwahrscheinlich nicht der gesamte Wald mit indirekter Objektschutzfunktion abgebildet.

Im Rahmen des geplanten Evaluierungsprozesses wäre es wichtig, eine bundesweit einheitliche Definition für Wälder mit indirekter Objektschutzfunktion zu erarbeiten.

2.5 Methodenkritik des wissenschaftlichen Modells (Machine Learning)

In diesem Abschnitt werden die eingesetzten Methoden nochmals kurz erläutert, soweit das für eine kritische Diskussion erforderlich ist. Zunächst werden dafür kurz die Hintergründe zur Verwendung der Machine-Learning Technologie „Random Forest“ erläutert. Diese basiert auf der Verwendung von Entscheidungsbäumen, daher widmet sich der erste Teil dieses Kapitels diesem Verfahren. Weiters werden die Themen Vergleich Methode 1 und Methode 3, die Validierung, die Überlappung der Schutzwaldkategorien und die Minimum Mapping Unit diskutiert. Wegen der besseren Lesbarkeit wird in diesem Abschnitt auf die genauen Akronyme WdOSF, WOSSF, WoSF verzichtet und stattdessen die Begriffe Objektschutzwald, Standortschutzwald (SSW) und Wirtschaftswald (WW) verwendet.

2.5.1 Datenbasis für die Indikatoren und Entscheidungsbäume

Die Datenbasis für die Ausrollung der Modelle zur Ableitung einer bundesweit einheitlichen Standortsschutzwaldkarte wurde in Anlehnung an die im Forstgesetz beschriebenen Kriterien mit Daten, die österreichweit in einheitlicher Qualität verfügbar sind, gebildet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Gegenüberstellung der im Forstgesetz aufgezählten Eigenschaften des Standortsschutzwaldes und der dafür eingesetzten Indikatoren

Forstgesetz §21	Eingesetzter Indikator-Datensatz
Wälder auf Flugsand- oder Flugerdeböden	Geologie
Wälder auf zur Verkarstung neigenden oder stark erosionsgefährdeten Standorten	Geologie, Hangneigung
Wälder in felsigen, seichtgründigen oder schroffen Lagen, wenn ihre Wiederbewaldung nur unter schwierigen Bedingungen möglich ist	Geologie, Hangneigung
Wälder auf Hängen, wo gefährliche Abrutschungen zu befürchten sind	Kein Indikator eingesetzt
der Bewuchs in der Kampfzone des Waldes	Seehöhe, Krummholzlayer,
der an die Kampfzone unmittelbar angrenzende Waldgürtel	Seehöhe, Krummholzlayer,

Die aktuelle Datenlage ist bezüglich Qualität der vorhandenen Indikator-Daten als gut zu bezeichnen, die Treffgenauigkeit mit den Eigenschaften, wie sie im Forstgesetz beschrieben sind, ist jedoch nicht optimal. Die Datenlage erlaubt generell die Verwendung von Entscheidungsbäumen für die Klassifizierung zwischen „Standortsschutzwald ja oder nein“. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Überlappungsbereiche der Verteilung der Indikatorwerte zwischen den zwei Klassen relativ groß sind. Daher musste von der Erstellung eines einfachen Entscheidungsbaumes (einfacher regelbasierter Ansatz) Abstand genommen werden.

Diese Entscheidung wird anhand eines Beispiels zur möglichen Umsetzung eines einfachen Entscheidungsbaumes für die Indikatoren Seehöhe und Hangneigung näher erläutert (Abbildung 9). Hier werden die Häufigkeiten der 10x10 m Pixel über Klassen aus Seehöhe und Hangneigung

aufgetragen und mit der roten Linie die Schwellwerte für die Klassifizierung gekennzeichnet. Danach wären im Standortschutzwald alle Pixel links vom Schwellwert fehlklassifiziert und im Wirtschaftswald alle Pixel rechts des Schwellwertes. Das gilt analog für die Hangneigung. Ein einfaches Regelwerk würde zu sehr vielen Fehlklassifikationen führen und wurde daher bei der Methodenentwicklung nicht weiterverfolgt.

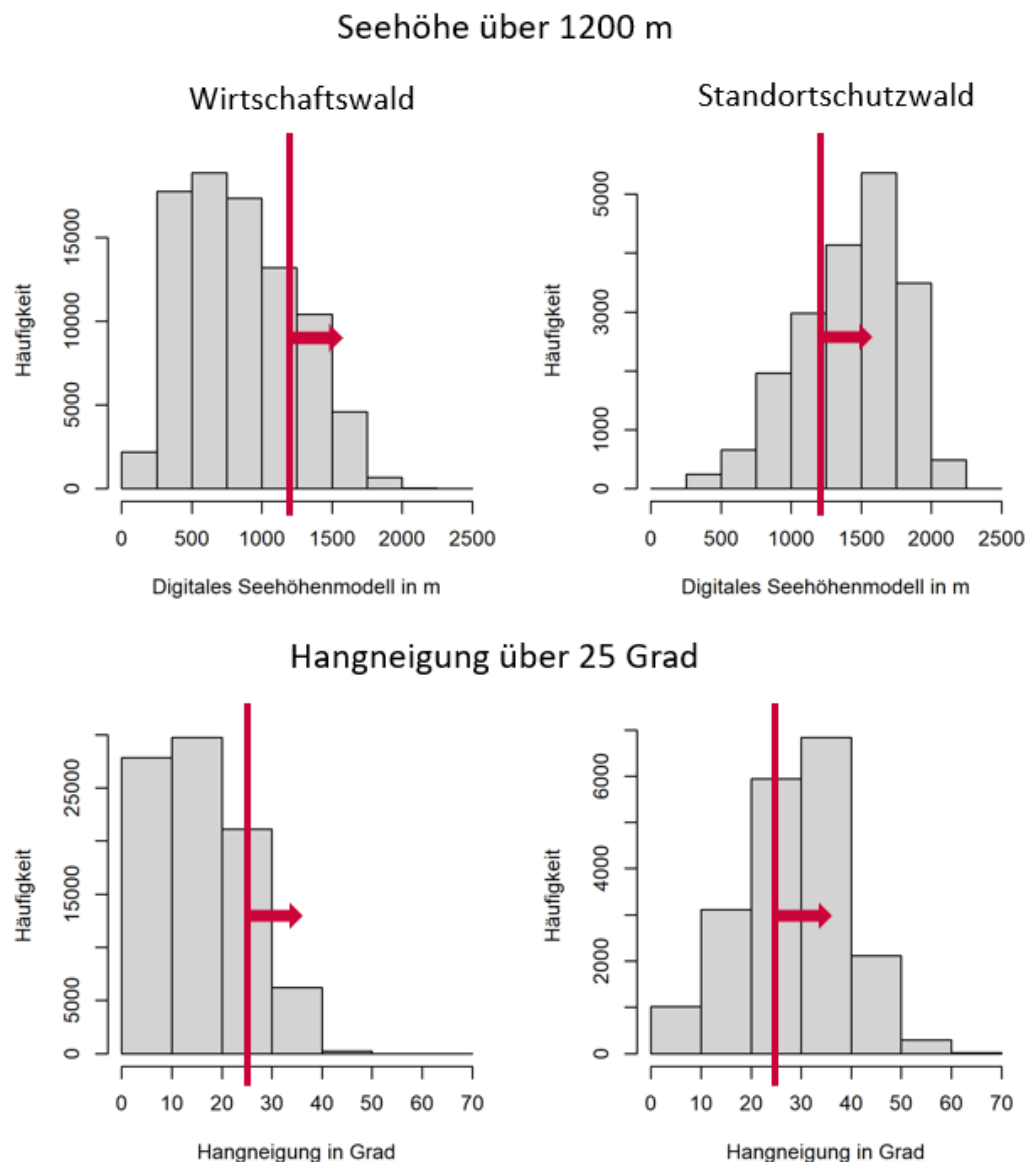


Abbildung 9: Verteilungen der Pixelhäufigkeiten für die Indikatoren Seehöhe und Hangneigung getrennt nach den Klassen Wirtschaftswald und Standortschutzwald. Die roten Linien markieren die möglichen Schwellwerte für ein einfaches Regelwerk.

Eine weitere Methode wäre ein hoch komplexer Entscheidungsbaum. Dieser müsste von einer Software berechnet werden, da solche Entscheidungen für mehrere hunderttausend Datenpunkte für Menschen nicht möglich sind. Die Methode könnte theoretisch jedes einzelne Pixel der Trainingsdaten korrekt berücksichtigen. So ein Modell wäre aber sehr anfällig für Ausreißer und würde auch jeden Fehler in den Trainingsdaten bei der Ausrollung für ganz Österreich umsetzen.

Die Methode „Random Forest“, die aus vielen Entscheidungsbäumen besteht, wurde zur Lösung der erwähnten Probleme entwickelt und führt daher zu besseren Ergebnissen als ein einzelner Entscheidungsbaum. Diese Methode ist ein Standard für derartige Klassifizierungsprobleme und wurde daher verwendet.

2.5.2 Vergleich Methoden 1 und 3

Für die Erstellung eines Klassifikationsmodells mit Random Forest wird eine sehr große Anzahl von Trainingsdaten benötigt. Das war bei der Datenlage in diesem Projekt kein Problem. Die Methoden 1 und 3 unterscheiden sich jedoch durch die völlig unterschiedliche Herkunft der Trainingsdaten. In Methode 1 werden die Ansprachen auf den ÖWI-Probeflächen verwendet und in Methode 3 die Daten aus der Hinweiskarte Schutzwald. Es ist daher interessant, dass die Ergebnisse grob betrachtet, relativ gut übereinstimmen. Das ist auch der Tatsache geschuldet, dass in beiden Methoden dieselben Indikatoren verwendet wurden. Wenn man jedoch die Details betrachtet, zeigt sich, dass die jeweilig ausgewiesene Standortschutzwaldfläche auf Basis der Hinweiskarte nahezu immer etwas größer ist. Die von Random Forest ermittelten Schwellwerte sind also zwischen den zwei Methoden etwas unterschiedlich.

Auf einen wichtigen Unterschied zwischen den Methoden 1 und 3 muss noch hingewiesen werden: Geht es in Methode 1 um die Erstellung einer flächendeckenden Karte aus einer Stichprobeninventur, wurde in Methode 3 eine bereits vorhandene Karte reproduziert, mit dem Ziel einer Homogenisierung über das ganze Bundesgebiet. Dabei wurde angenommen, dass nicht jede Erhebungsperson unter gleichen Bedingungen im Wald zu einer identen Klassifikation kommt. Diese Heterogenität in der Ansprache kann mit der gewählten Methode weitgehend ausgeglichen werden. Die Trainingsdaten fußen also ausschließlich auf dem von den Ländern erstellten Kartenwerk, das mit der gewählten Methode analysiert werden kann.

Die beiden Methoden unterschieden sich auch durch die zugrundeliegende Definition des Standortschutzwaldes. In der Hinweiskarte Schutzwald wird dezidiert auf die Tatsache hingewiesen, dass auch der indirekte Objektschutzwald in der Klasse Standortschutzwald enthalten ist. Die ÖWI kennt diese Kategorie nicht, da die Probeflächenerhebung sich seit jeher auf die Definition des Standortschutzwaldes aus dem Forstgesetz bezieht.

2.5.3 Validierung

Hier wird im speziellen auf die Validierung von Methode 3 eingegangen. Dafür wurden die gesamten Karten auf Unterschiede zwischen den Klassifizierungsergebnissen untersucht und nicht nur Stichproben, wie das „State of the Art“ wäre. In der Konfusionsmatrix (Tabelle 4) kann man in der Hauptdiagonale der ersten beiden Zeilen und Spalten die Anzahl der ident klassifizierten Pixel (WW: 203.752.073 bzw. SSW: 67.779.805) erkennen und in der Nebendiagonale die jeweils unterschiedlich klassifizierten Pixel.

Tabelle 4: Konfusionsmatrix der Methode 3; Zeilen enthalten die Anzahl der Pixel der Methode 3, Spalten die Anzahl der Pixel der Hinweiskarte Schutzwald.

		Random Forest Methode 3			
		WW	SSW	Summe	Nutzer
HWK SW	WW	203.752.073	24.457.895	228.209.968	89%
	SSW	37.923.205	67.779.805	105.703.010	64%
	Summe	241.675.278	92.237.700	333.912.978	
	Ersteller	84%	73%		81%

Die Gesamtgenauigkeit nach dieser Validierungsmethode liegt bei 81%. Die Genauigkeiten für die einzelnen Klassen und je nachdem, ob die Ersteller- oder die Nutzergenauigkeit betrachtet werden, liegen zwischen 64% und 89%.

Generell gibt es unterschiedliche Klassifizierungen in beide Richtungen. Es wird aber etwas häufiger der in der Hinweiskarte Schutzwald eingezeichnete Standortschutzwald in Methode 3 als Wirtschaftswald ausgewiesen als umgekehrt. Daher ist auch die Fläche nach Methode 3 etwas kleiner als in der Hinweiskarte. Die wichtigste Ursache dafür ist die streng nach den Indikatoren vorgehende Random Forest Methode im

Vergleich zur etwas großzügigeren Arrondierung des Standortsschutzwaldes in der Hinweiskarte.

Abbildung 10 zeigt eine Karte, in der unterschiedliche Farben die Identität bzw. die Unterschiede der Klassen anzeigen. Es gibt in manchen Bereichen eine Häufung von Verwechslungen in eine Richtung. Dies könnte darauf hindeuten, dass bei der Erstellung der Karte nicht überall die gleichen Indikatoren für die Ausweisung des Standortsschutzwaldes verwendet wurden oder die Wertigkeit der Indikatoren unterschiedlich gewichtet wurde. Es ist auch möglich, dass der dafür wesentliche Indikator österreichweit nicht verfügbar war und daher nicht eingesetzt wurde. Darüber hinaus kann es sich auch um Sondersituationen handeln, die nur in diesen speziellen Regionen vorkommen und daher von Random Forest nicht ins Regelwerk aufgenommen wurden. Besonders auffällig ist z.B. die Region des Bregenzer Waldes. Erwartungsgemäß kann Methode 3 so einer Klassifizierung nicht folgen.

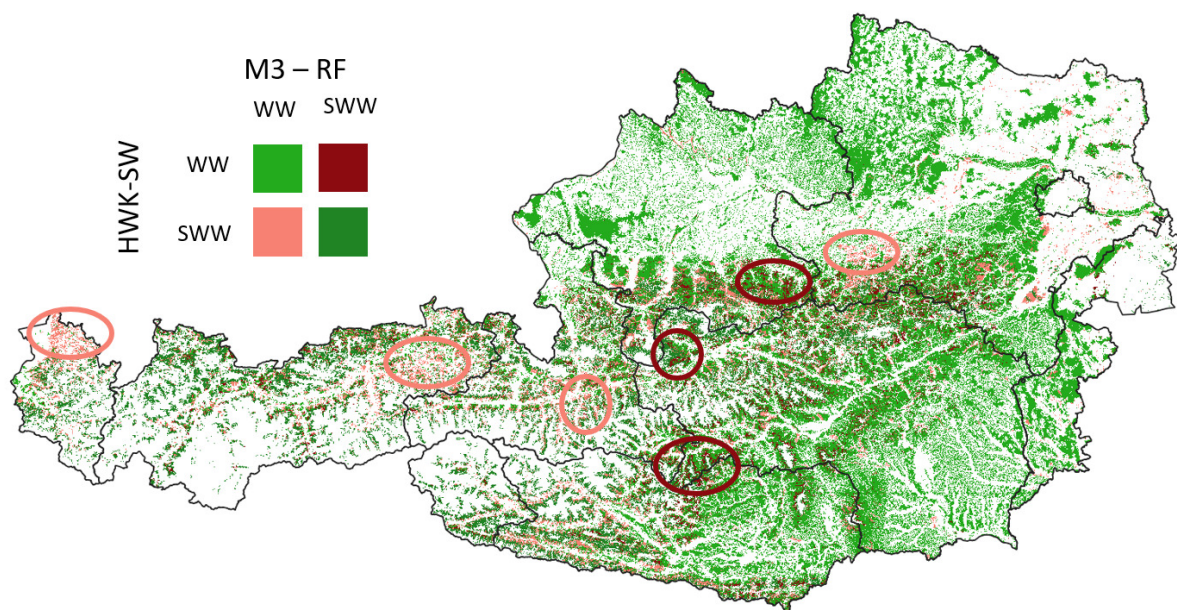


Abbildung 10: Identität und Unterschiede der Klassifizierung zwischen Hinweiskarte Schutzwald und Methode 3.: hellgrün: identer WW, dunkelgrün: identer SSW, rosa: SSW laut Hinweiskarte und WW laut M3, dunkelrot: WW laut Hinweiskarte und SSW laut M3. Die ovalen Formen deuten auf Gebiete hin, in denen sich Verwechslungen in eine Richtung häufen.

Hätte die Validierung der Methode 3 zu einer hundertprozentigen Übereinstimmung mit der Hinweiskarte Schutzwald geführt, hätte die Entwicklung der Karte kaum einen Mehrwert gebracht. Die korrekte

Schlussfolgerung wäre gewesen, dass sich alle Bearbeiter:innen der Hinweiskarte Schutzwald (bzw. des WEB) streng an ein identes Regelwerk, das ausschließlich aus den hier verwendeten Indikatoren besteht, gehalten haben. Da es jedoch in 19% der Fläche Unterschiede zwischen den beiden Karten gibt, stellt sich für die Zukunft die Frage, wie diese Unterschiede bestmöglich für eine Weiterentwicklung und Verbesserung der Karte in Kooperation mit den Ländern eingesetzt werden können.

Überlagerungen der Schutzwaldkategorien

In der Bearbeitung des Standortschutzwaldes in diesem Projekt wurde die Ausscheidung des direkten Objektschutzwaldes als solches unverändert gelassen und mögliche Überlagerungen von Objekt- und Standortschutzwald nicht berücksichtigt. Tatsache ist jedoch, dass sich die beiden Schutzwaldkategorien infolge ihrer Definition teilweise überlagern müssen. Wenn diese Überlagerungen auch dargestellt werden sollen, muss für Methode 3 noch geprüft werden, inwieweit die gewählte Random Forest Methode dafür geeignet ist. Es gilt jedoch als sehr wahrscheinlich, dass dies möglich sein wird. Für Methode 1 würde es kein Problem darstellen, so diese auch noch weiter weitergeführt werden soll, zumindest zum Vergleich.

Minimum Mapping Unit

Ein Vergleich zwischen der Hinweiskarte Schutzwald und der durch Random Forest erzeugten Karte zeigt deutlich, dass die Kleinteiligkeit bei der Random Forest Karte viel höher ist als die Hinweiskarte Schutzwald. Erstere folgt den Geländegegebenheiten mit viel mehr Details als die Hinweiskarte Schutzwald. Es ist daher zu klären, bis zu welcher kleinsten Fläche (Minimum Mapping Unit) Klassifizierungen für ein Klasse getroffen werden sollen. Im vorliegenden Projekt wurden die erstellten Karten nur leicht geglättet um nicht Einzelpixel, die nebeneinander liegen, unterschiedlichen Klassen zuzuordnen.

2.6 Weitere Vorgehensweise

Das BFW wird mit dem BML gemeinsam den Ländern die eingesetzten Methoden und Ergebnisse im Detail erläutern und die wissenschaftliche Evaluierung intensiv diskutieren. Darauf aufbauend soll entschieden werden, welches Potenzial in einer Weiterentwicklung der Methode zur Ableitung einer bundesweit einheitlichen Standortschutzwaldkarte liegt.

Dieser Prozess soll bis Mitte 2024 durchgeführt werden. Ziel ist es, sowohl die Harmonisierung als auch die praktische Anwendbarkeit zu maximieren.

Folgende Themenfelder stehen zur Diskussion:

- Erweiterung des Indikatorensets in Absprache mit den BML und den Ländern (Tabelle 5). Für die hier enthaltenen Vorschläge muss auch der Zeitplan für ihre österreichweite Verfügbarkeit berücksichtigt werden.
- Festlegung der Minimum Mapping Unit und eventueller anderer Glättungsalgorithmen.
- Zusätzliche technische Analyse des automatisch erstellten Regelwerkes mit Random Forest, um die Nachvollziehbarkeit zu erleichtern.
- Überschneidungen zwischen Objekt- und Standortschutzwald.
- Thema „indirekter Objektschutzwald“ mit dem Ziel einer einheitlichen Definition.
- Entscheidung, ob und wie die Entwicklungen zur Ableitung einer Standortschutzwaldkarte fortgeführt werden sollen.

Tabelle 5: Vorschläge für die Erweiterung des Indikatoren Sets (blau)

Forstgesetz §21	Eingesetzter Indikator-Datensatz
Wälder auf Flugsand- oder Flugerdeböden	ForSite
Wälder auf zur Verkarstung neigenden oder stark erosionsgefährdeten Standorten	Geologie, Hangneigung ForSite
Wälder in felsigen, seichtgründigen oder schroffen Lagen, wenn ihre Wiederbewaldung nur unter schwierigen Bedingungen möglich ist	Geologie, Hangneigung, kleinräumige Geländevariabilität, ForSite, Wachstum aus Fernerkundung
Wälder auf Hängen, wo gefährliche Abrutschungen zu befürchten sind	Modellierung flachgründiger Hangrutschungen (Gravimod II)
der Bewuchs in der Kampfzone des Waldes	Seehöhe, Krummholzlayer, modellierte Kampfzone
der an die Kampfzone unmittelbar angrenzende Waldgürtel	Seehöhe, Krummholzlayer, modellierte Kampfzone

3 Pilotstudie zur geografischen Abgrenzung der Kampfzone Wald

3.1 Ausgangssituation

Ziel dieses Projektteils ist eine Machbarkeitsstudie zur Abgrenzung der Kampfzone von dem darunter liegenden (Schutz-)wald und der möglicherweise darüber liegenden Gipfelregion. Dazu wurden zunächst Definitionen für die Kampfzone hinsichtlich ihrer schutztechnischen und forstpolitischen Relevanz und ihrer technischen Umsetzbarkeit für eine Kartendarstellung analysiert. Ein Einigungsprozess zur Festlegung auf eine Definition erfolgte mit den Expertinnen und Experten des BML und der Länder. Parallel dazu wurden verschiedene Ansätze für eine automatisierbare Abgrenzung zwischen der Kampfzone und dem unterliegenden bzw. angrenzenden Schutzwald entwickelt und technisch getestet.

Wichtig für die operationale, automatisierte Umsetzung ist die räumliche Skala, mit der die Kampfzone Wald abgegrenzt werden soll. In der Natur wird oft ein Geflecht von Wald- und Nichtwaldflächen verschiedener Ausprägungen vorgefunden, das mit quantitativen Festlegungen und Definitionen neu kategorisiert werden muss. Darüber hinaus sind die Flächen oft durch Almwirtschaft menschlich überprägt. Auch Lawinengänge und anstehende Lockersedimente prägen dieses Mosaik.

In diesem Zusammenhang wurden auch mögliche Auswirkungen des Klimawandels analysiert. Die Arbeiten, die in den weiteren Subkapiteln ausführlicher beschrieben sind, umfassten eine

- Literaturstudie
- Bewertung vorhandener Klimamodellierungen
- Analyse historischer Luftbilder
- Prüfung der Möglichkeiten für die Vegetationserfassung aus der Matching-Punktewolke, dem Airborn-Laserscanning (ALS) Geländemodell und den Sentinel-2 Daten

3.2 Einrichtung einer Arbeitsgruppe zur Definition der Kampfzone des Waldes

Um eine Expertengruppe zur Definition der Kampfzone Wald einzurichten, wurden in Absprache mit dem BML die Landesforstdirektoren von Burgenland, Niederösterreich, Salzburg, Steiermark und Tirol gebeten, Expertinnen und Experten für diese Gruppe zu benennen. Dabei wurden folgende Personen ausgewählt:

Hubert Iby (LFD BGLD), Christine Fichtinger (LFD NÖ), Josef Petzlberger (LFD Salzburg), Herwig Schüssler (LFD STMK), Anna Koch und Hubert Sint (LFD Tirol)

Darüber hinaus wurde Hannes Lungkofler aus Kärnten vorgeschlagen und hat ab der zweiten Sitzung ebenfalls zur Diskussion beigetragen. Zusätzlich nahmen Nikolaus Pedarnig (Unidata) und Hellen David (ÖBf) an den Arbeitsgruppentreffen teil.

Seitens des BML nahmen Alfred Grieshofer, Rainer Hinterleitner, Christoph Lainer und Alexander Starsich teil. Das BFW war mit Klemens Schadauer, Frank Perzl, Alexandra Freudenschuß und Christoph Bauerhansl vertreten.

3.3 Zusammenfassung der Sitzungen der Arbeitsgruppe Kampfzone Wald

Es wurden insgesamt drei Arbeitsgruppensitzungen abgehalten. Die Protokolle sind dem Bericht als Anhänge (Anhang 1 bis 3) beigefügt.

Ergebnisse der Diskussionen zu Zielen der Arbeitsgruppe:

- Die gesamtheitliche Sicht auf den Schutzwald soll mit diesem Prozess erleichtert werden.
- Ein künftiger Schutzwald-Layer soll die potenzielle Kampfzone beinhalten können.
- Es soll keine völlig neue Definition der Kampfzone erarbeitet werden. Die Definition muss sich am Forstgesetz orientieren, soll aber verfeinert werden.

Als technische Grundlagen für die Abgrenzung stehen zur Verfügung:

- Digitale Höhenmodelle (DOM und DGM)
- Satellitendaten Sentinel-2
- Klimadaten Steiermark aus dem Projekt ForSite

Zusammenfassung der Beschlüsse:

- Es soll derzeit nur die obere Kampfzone definiert ermittelt werden. Es gibt im Waldentwicklungsplan (WEP) praktisch keine Kampfzone in Tieflagen. Aus forstpolitischer Sicht bestehen keine Bedenken, dass die untere Kampfzone weniger geschützt wäre, wenn sie hier nicht definiert wird. Es wird auch nicht als Problem erachtet, wenn im Osten und Südosten Österreichs keine Kampfzone ausgewiesen wird.
- Einigung auf die Verwendung des Begriffs „potenzielle Kampfzone“
- Der Gesetzgeber weist eine Zone aus, in der der forstliche Bewuchs dem Bundesgesetz unterliegt, nicht jedoch die Fläche der Kampfzone per se
- Aus den Ergebnissen dieser Studie sind keine rechtlichen Bindungen ableitbar
- Nach der Ausrollung der Methode auf ganz Österreich soll eine „Hinweiskarte Kampfzone“ entstehen.
- Als Testgebiete wurden Hochschwab, Zirbitzkogel, Seckauer Alpen und Schladminger Tauern festgelegt. Das Testgebiet wurde im Projektverlauf auf die ganze Steiermark erweitert.

In drei produktiven Sitzungen wurde an der Definition mit vielen Details gearbeitet. Das Ergebnis ist im nächsten Kapitel beschrieben.

Die Protokolle der Sitzungen sind als Beilagen angefügt.

3.4 Definition

3.4.1 Definitionsgrundlage

Die Definition Kampfzone des Waldes im Projekt „Digitalisierung Schutzwald“ geht vom Text des Forstgesetzes § 2 Abs. 2 ForstG (BGBl. 440/1975 idgF BGBl. I Nr. 56/2016) aus:

§ 2. (2) Unter der Kampfzone des Waldes ist die Zone zwischen der natürlichen Grenze forstlichen Bewuchses und der tatsächlichen Grenze des geschlossenen Baumbewuchses zu verstehen.

Für die Definition werden bewusst teilweise vom Forstgesetz abweichende Begrifflichkeiten verwendet, weil die Definition für die fachlich-wissenschaftliche Arbeit in diesem Projekt einsetzbar sein muss.

3.4.2 Definitionswortlaut

Die Kampfzone des Waldes wird durch klimatische Eigenschaften bestimmt. Sie ist im Bereich zwischen dem potenziellen natürlichen Vorkommen von forstlichem Bewuchs und dem anzunehmenden Vorkommen eines geschlossenen Baumbewuchses angesiedelt.

3.4.3 Erläuterungen zur Definition für die obere Kampfzone

Im Folgenden werden einige Themenbereiche, die für die Abgrenzung der Kampfzone nach obiger Definition relevant sind, behandelt. Ziel ist es, die operationelle, automatisierte Darstellung der Kampfzone möglichst eindeutig zu gewährleisten.

- Schwellwert für die Überschirmung: Als Schwellwert für die Überschirmung ab der von einem geschlossenen Baumbewuchs gesprochen wird, werden 5/10 angesetzt. Die Begründung dafür findet sich in den Erläuterungen zum Forstgesetz von Bobeck.
- Klimawandel: Das potenziell natürliche Vorkommen von Vegetation wird durch den Klimawandel laufend beeinflusst. Hier erfolgt die Abgrenzung nach derzeitigem Klima und daher muss sie im Laufe der Zeit adaptiert werden. Eine Darstellung für eventuelle Klimaszenarien soll mit der im Projekt erarbeiteten Methode jedoch möglich sein.
- Kampfzone und dessen Bewuchs: Generell ist zwischen der Kampfzone - einem klimatischen Bereich - und dem forstlichen Bewuchs innerhalb der Kampfzone zu unterscheiden. Der Bewuchs ist daher für die Ableitung der oberen Grenze der Kampfzone nicht entscheidend. Für die untere Grenze der Kampfzone zum Wald spielt er nur insofern eine Rolle, als er eine Indikation für das Vorkommen des geschlossenen Baumbewuchses darstellt. Er dient damit nur zur Unterstützung der Grenzziehung für die automatisierte Ausscheidung für jene Bereiche, wo der Baumbewuchs fehlt oder lückenhaft ist.
- Sonderstandorte und anders genutzte Flächen: Geröllhalden, die nur deutlich erschwert von Vegetation bedeckt werden und potenziell nicht bewaldbare Kalk- oder Dolomitplatten werden nicht aus der Kampfzone ausgeschnitten. Das gilt auch für Standorte unter Weideeinfluss oder Schipisten, die damit Teil der Kampfzone sein können.

- Flächen mit überwiegendem Bewuchs aus Latschen und/oder Grünerlen: Innerhalb des klimatischen Gürtels gelten diese Strauchflächen als forstlicher Bewuchs. Darüber hinaus können natürlich auch Bäume in diesem klimatischen Gürtel vorkommen.
- Der Bereich von Lawinenbahnen: In Lawinenbahnen findet sich häufig infolge wiederkehrender Lawinenabgänge eine vom Baumbewuchs abweichende Vegetation, oft in Form von Strauchflächen. Die Lawinenbahnen können sowohl in der Kampfzone als auch außerhalb dieser liegen. Die untere Grenze der Kampfzone, die eventuell eine Lawinenbahn schneidet, wird nach dem anzunehmenden Beginn des geschlossenen Baumbewuchses gezogen.
- Unterscheidung zwischen Baum und Strauch: Hier wird auf die Definition von Brünig und Mayer (1980) zurückgegriffen:
 - Baum: Eine perennierende Pflanze mit einem durchgehenden, verholzten Stamm und einer mehr oder weniger wohlausgebildeten Krone; in der Regel über 5 m hochwerdend.
 - Strauch: Ausdauerndes, im erwachsenen Zustand etwa 0,5 bis 5m (8m) hohes Holzgewächs, das von Grund auf verzweigt ist.
- Waldflächen innerhalb der Kampfzone: In der Kampfzone des Waldes können sich durchaus als Wald abgegrenzte Flächen befinden. Es gibt hier keinen Widerspruch zur Eigenschaft als Kampfzone.

3.4.4 Erläuterungen zur unteren Kampfzone

Laut Forstgesetz und dessen Erläuterungen zu § 2 ForstG (Regierungsvorlage 1266 BlgNR XIII. GP, S. 84) beschränkt sich die Kampfzone nicht auf die alpinen Hochlagen. Es bezeichnet auch in zumeist gering bewaldeten Flachlandgebieten gelegene Wälder, deren Wachstum infolge des Klimas und Trockenheit mit dem Baumwachstum abträglichen natürlichen Gegebenheiten zu kämpfen hat.

Im Gegensatz dazu vertreten die BOKU (Institut für Waldbau) und die Landesforstdienste von Niederösterreich und dem Burgenland klar die Meinung, dass es im gesamten Bundesgebiet keine untere Kampfzone gibt. Die Steppengrenze ist bei durchschnittlich 300 Millimeter Jahresniederschlag anzusetzen, diese würde auch im Osten von Österreich derzeit nicht erreicht. Daher wird im vorliegenden Projekt auch keine

untere Kampfzone modelliert. Es besteht zwar unter Klimawandelszenarien eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass es tatsächlich zu Steppenklima in Ostösterreich kommen wird, eindeutig kann diese Frage derzeit jedoch weder bejaht noch verneint werden.

3.5 Literaturstudie Klimawandel und obere Waldgrenze

Die Literaturstudie enthält vor allem die Arbeiten der wichtigsten Vertreter der Waldgrenzforschung im alpinen Raum: Christian Körner von der ETH Zürich, der sich auch weltweit mit der Frage der oberen Waldgrenze auseinandergesetzt hat (siehe Abbildung 11) und Gerhard Wieser vom BFW, der sich im Detail mit den ökophysiologischen Ursachen der oberen Baumgrenze beschäftigt hat.

Nach Körner 2014 sind folgende Aspekte wesentlich, wenn man die Ursachen für die Wald- und Baumgrenze sucht:

- Alpine und polare Baumgrenzen gibt es weltweit. Höher oder nördlicher wachsen nur noch Zwergsträucher, Gräser und krautige Pflanzen. Im Norden liegt die Baumgrenze auf Meeressniveau und erreicht in den Subtropen 4800m.
- Das Fehlen von Bäumen an der biologischen Baumgrenze durch Störungen (Weidewirtschaft, Feuer, Lawinen) darf nicht mit den biologisch-klimatischen Ursachen der Waldverbreitung verwechselt werden.
- Die Position der klimatischen Baumgrenze lässt sich weltweit ausschließlich mit der Temperatur (6.5°C) und der Dauer der Wachstumsperiode (3 Monate) vorhersagen, dies aber erstaunlich genau.

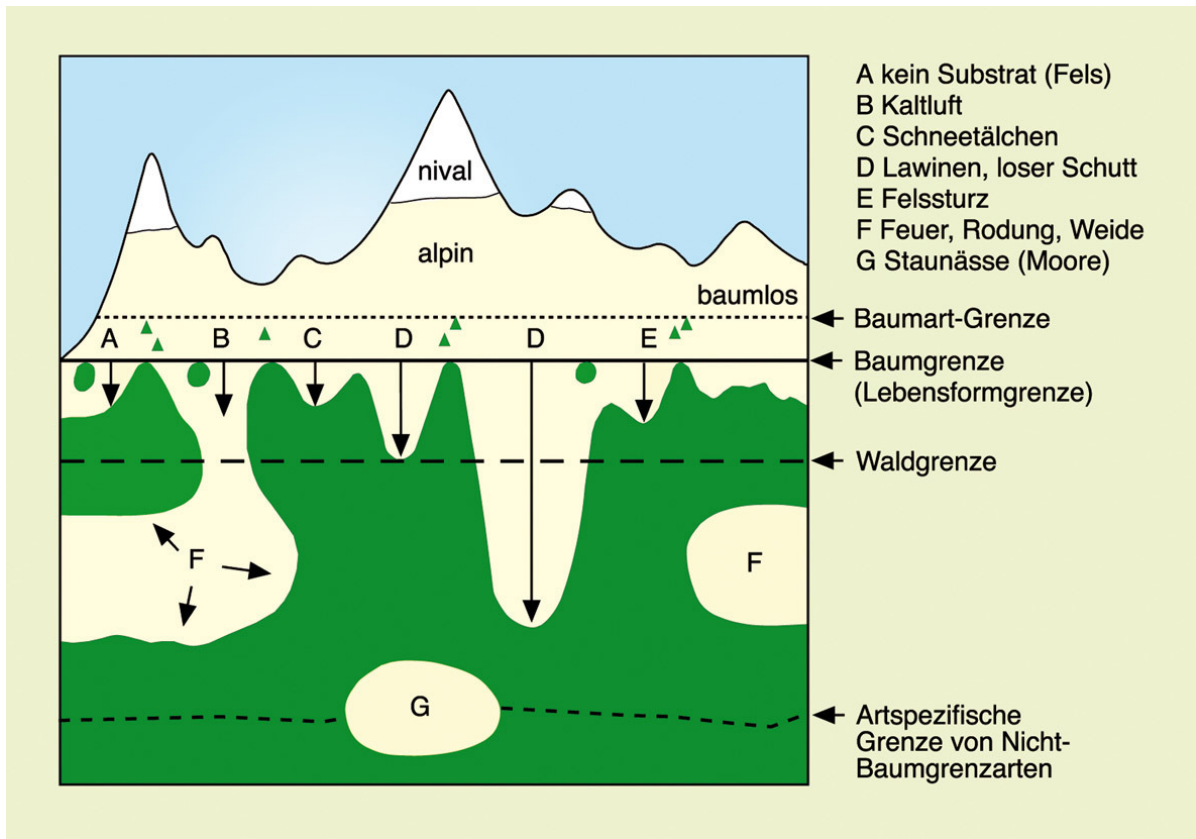


Abbildung 11: Das Waldgrenzökoton und seine Fragmentierung durch Störungen und lokale Einflüsse (Körner, 2014)

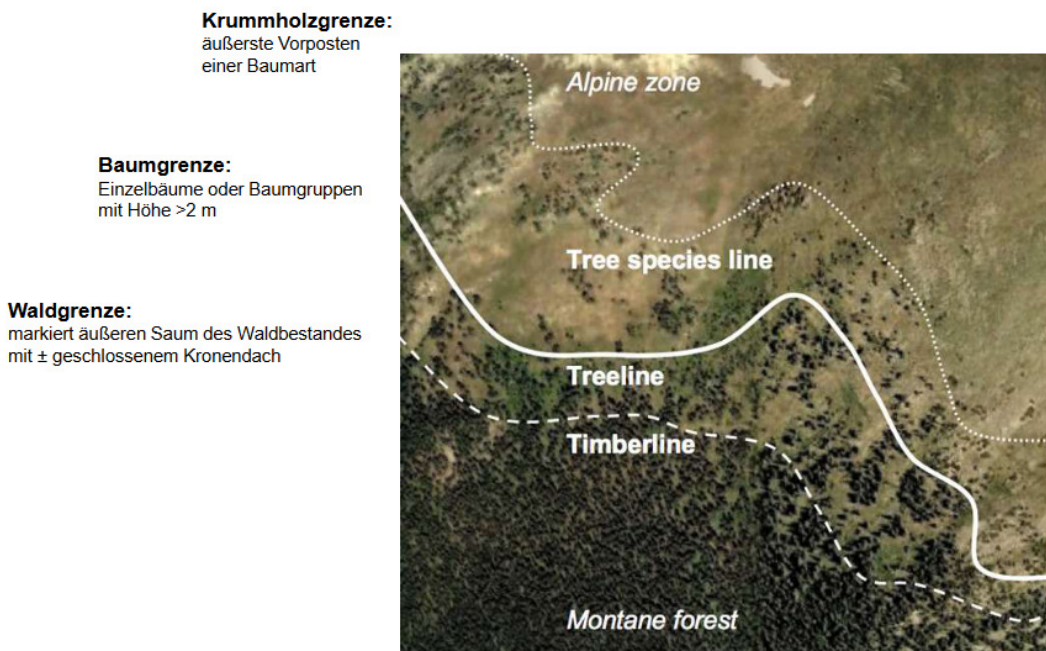


Abbildung 12: Struktur des Waldgrenzökotons in den Zentralalpen (Berdanier, 2010)

Ein praktisches Beispiel für einen Versuch, Grenzen in ein Orthophoto einzuzeichnen, kann aus Berdanier (2010) entnommen werden (siehe Abbildung 12). Dabei unterscheidet er, wie Körner, zwischen der Baumartengrenze, der Baumgrenze und der Waldgrenze.

Die Frage, warum strauchförmige Vegetation oberhalb der Baumgrenze vorkommen kann, wird bei Körner (2014) durch die Größe und die Gestalt der Sträucher erklärt. Durch Baumkronen weht der Wind und dadurch ist ein Baum aerodynamisch an die Atmosphäre gekoppelt. Das bedeutet, sein Mikroklima liegt bei starker Sonne höchstens ein oder zwei Grad über der Umgebungstemperatur. Hingegen können die Alpenmatten mehr als zehn Grad wärmer als die Luft sein. Davon profitieren die Sträucher. Es gibt eine generelle Temperaturgrenze, ab der Pflanzen keine neuen Zellen mehr bilden können.

Damit stellt sich die Frage, inwieweit der Klimawandel Potenzial zum Aufbruch der Waldgrenze nach oben hat. Prinzipiell kann der Wald über Samen und Sämlinge langsam nach oben rücken. Das kann nach Körner mitunter 100 bis 200 Jahren dauern. Neben dem Klima sind bei Körner auch andere Faktoren, wie der vermehrte Stickstoffeintrag, ein wichtiger Faktor.

Gehrig-Fasel et al. (2007), Wieser et al. (2009), Harsch et al. (2009) und Holtmeier (2009) fassen die wachstums- und entwicklungslimitierenden Faktoren an der alpinen Baumgrenze nach Körner (1998, 2012), Smith et al. (2003), Wieser und Tausz (2007) wie folgt zusammen:

- Mechanische Gewebeschädigung: mechanische Schäden durch Wind, Eis und Schneegebläse, Schneebruch, Lawinen, pilzliche Pathogene und Konsumenten
- Physiologische Gewebeschädigung: Schäden durch Fröste, Frostrocknis und Strahlung
- Nährstoffmangel: Eingeschränkte Nährstoffaufnahme durch verringertes Wurzelwachstum, Hemmung der Mykorrhizaentwicklung und/oder geringe Nährstoffverfügbarkeit
- Beeinträchtigte Reproduktion: Umweltbeeinflussung der Bestäubung, Samenentwicklung und Verbreitung, Keimung und Sämlingsetablierung.

Die Einflussfaktoren sind also vielfältig, trotzdem ist ein Anstieg der Temperatur im Vorfeld für die Verschiebung der Waldgrenze nach oben erforderlich. Als Beispiel für die Temperaturentwicklung seit 1760 werden hier Ergebnisse aus Hitalp in Abbildung 13 wiedergegeben:

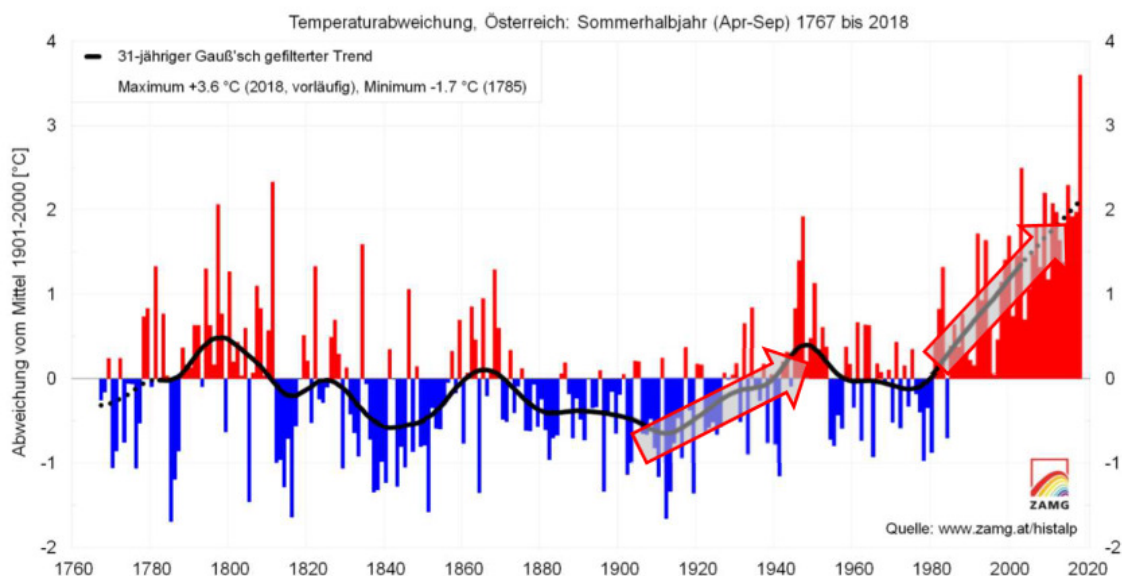


Abbildung 13: Temperaturabweichungen, Österreich - Sommerhalbjahr (Apr.-Sept.) 1767 bis 2018 (aus Oberhuber et al., 2020, Quelle: ZAMG)

Die Befunde für das Sommerhalbjahr zeigen eine massive Steigerung der Temperaturen (um 3,6 Grad Celsius) bezogen auf den Mittelwert des letzten Jahrhunderts.

Die Erwärmung ist aber nicht der einzige Klimaeinfluss, der auf die Veränderung der Waldgrenze wirkt. Darüber hinaus spielen Klimaextreme, deren Häufigkeit in der Vergangenheit zugenommen hat, ebenfalls eine Rolle. Sie wirken dann oft konträr zur Erwärmung (siehe Abbildung 14) nach Oberhuber et al. (2020).



Abbildung 14: Wirkungen von Klimaerwärmung und Klimaextremen auf die Wald- und Baumgrenze nach Oberhuber et al. (2020)

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum an der Waldgrenze nach Gehrig-Fasel et al. (2007), Wieser et al. (2009), Harsch et al. (2009) und Holtmeier (2009) können wie folgt zusammengefasst werden (aus Oberhuber et al., 2020):

- Verlängerung der Wachstumsperiode – Baumwachstum nimmt zu – Anstieg der Waldgrenze.
- Waldgrenzökotone rücken nicht unmittelbar als geschlossene Front in die bislang baumlose alpine Stufe vor
 - Primär Anstieg der Bestandesdichte im Waldgrenzökoton
 - Etablierung oberhalb der potenziellen Baumgrenze ist langfristiger (> 50 Jahre)
- Störereignisse und Klimaextreme beeinflussen die Waldgrenzdynamik
 - Hohe Keimlingsmortalität
 - Möglichkeit von großflächigen Bestandeszusammenbrüchen

Zusammenfassend passt die in 3.3 beschriebene Definition der Kampfzone gut zu den Ergebnissen der Literaturstudie. Auch in der Literatur wird das Klima als primärer Faktor der oberen Wald- und Baumgrenze angesehen. Die Möglichkeiten der Wiederbesiedlung und ihre Geschwindigkeit hängen aber darüber hinaus auch von anderen Faktoren ab. Generell wird Geschwindigkeit bei der Zunahme der Dichte der Bestockung in bereits vorhandenen Beständen als höher angesehen als die Neuansiedlung oberhalb der Baumgrenze. Letztere wird mit über 50 und bis zu 200 Jahren abgeschätzt. Die Rolle der Störereignisse kann zeitlich jedoch nur schwer abgeschätzt werden. Im nächsten Kapitel wird versucht, die gefundenen Zusammenhänge anhand von alten Luftbildern und Orthophotos zu bestätigen.

3.6 Prüfung der Einsatzmöglichkeiten von historischen Luftbildern zur Feststellung der Waldgrenzentwicklung

Am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen liegen Luftbilder der Jahre 1949 bis 2022 vor. Erst seit Anfang der 2000er Jahre kamen digitale Luftbildkameras zum Einsatz. Analoge Luftbilder der 1950er bis 1970er Jahre wurden mittlerweile eingescannt und somit digitalisiert. Die meisten analogen Bilder der 1980er und 1990er Jahre wurden noch nicht

eingescannt. Ab 2000 sind alle analogen Luftbilder eingescannt worden beziehungsweise wurden seit 2001 alle Luftbilder mit digitalen Kameras aufgenommen.

Luftbilder können über die Zeit hinweg nur erschwert miteinander verglichen werden, da sie Verzerrungen beinhalten. Gut geht das nur mit Orthophotos. Es gibt allerdings keine alten Orthophotos, vereinzelt sind solche aus den 1990er Jahren vorhanden. Eine Erstellung von älteren Orthophotos (Orthorektifizierung) wäre ein immenser Aufwand und ist am BEV erst für die Zukunft angedacht. Möglicherweise könnten Methoden der KI angewendet werden, um aus den vorhandenen Luftbildern und Passpunkten mit geeigneten digitalen Höhenmodellen eine Orthorektifizierung durchzuführen. Jedenfalls wäre die Erstellung von Orthophotos aus den 1950er bis 1970er Jahren mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

Die Luftbilder aus älteren Befliegungen können somit nur zu einer visuellen und groben Untersuchung der damaligen Waldgrenzregion verwendet werden. Der Zeitraum bis 2001 zurück ist wiederum zu kurz, um mit Hilfe der Luftbilder, beziehungsweise vor allem der daraus abgeleiteten Orthophotos, eine Veränderung der Waldgrenzregion feststellen zu können.

In der Folge wird ein Beispiel für vorhandene Luftbild- und Orthophotodaten im Bereich Donnersbach-Wald im Testgebiet Steiermark gezeigt.

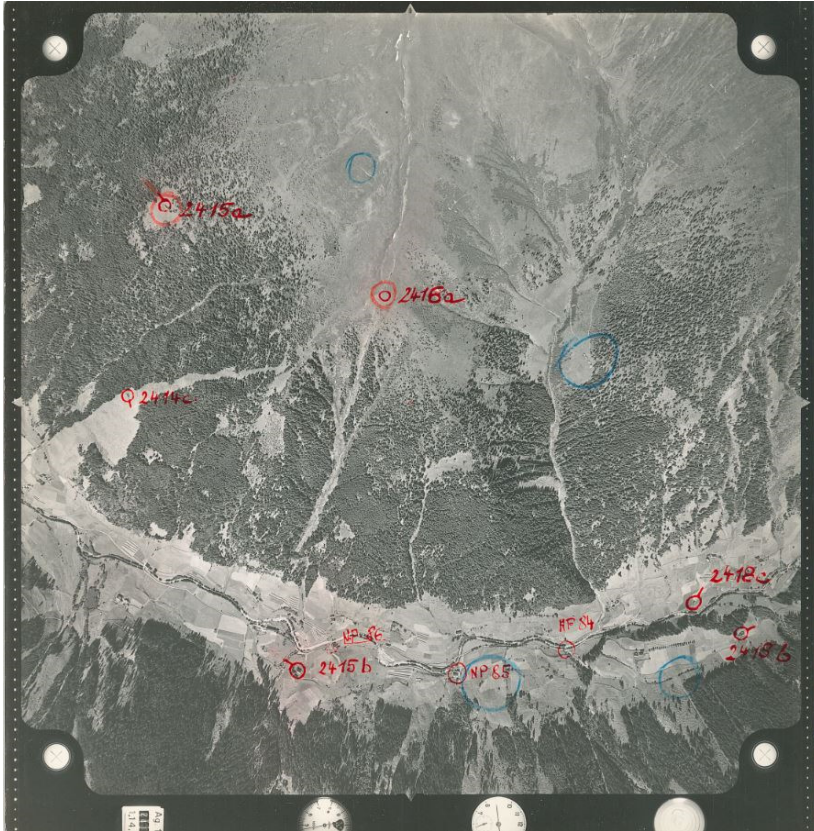


Abbildung 15: Kopie eines Schwarzweiß-Luftbildes der Luftbildbefliegung 1954 im Bereich Donnersbach-Wald mit eingetragenen Passpunkten

Abbildung 15 zeigt die Kopie eines Schwarzweiß-Luftbildes aus dem Jahr 1954 mit eingezeichneten Passpunkten zur Orientierung. Nach dem Einscannen und erfolgter Orientierung könnte mit einem geeigneten Höhenmodell nur unter sehr hohem Aufwand ein digitales Orthophoto erzeugt werden.

Die folgende Abbildung (Abbildung 16) zeigt nochmals dieses Luftbild und Ausschnitte von Orthophotos aus den Jahren 2001, 2009 und 2019 im Bereich Donnersbach Wald.

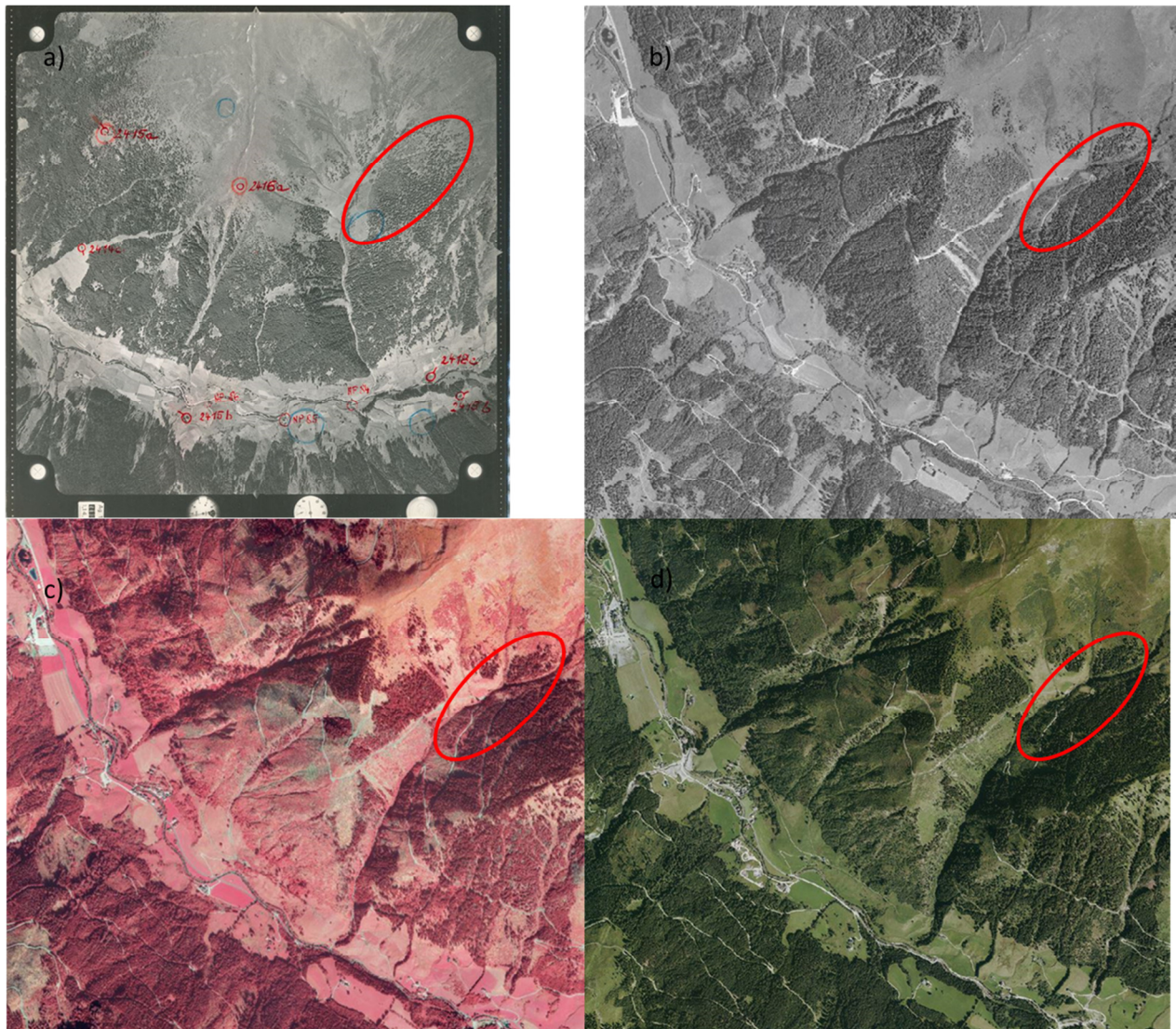


Abbildung 16: Oben links das SW-Luftbild aus dem Jahr 1954 (a); daneben ein SW-Orthophoto aus dem Jahr 2001 (b), unten links ein CIR-Orthophoto aus dem Jahr 2009 (c), daneben ein RGB-Orthophoto aus dem Jahr 2019 (d)

Links oberhalb des rot abgegrenzten Bereiches ist zu erkennen, dass sich der Krummholzbereich zwischen 1954 und 2019 praktisch nicht verändert hat. Die bewaldete Zone innerhalb des rot abgegrenzten Bereiches zeigt allerdings mittlerweile eine höhere Überschirmung. Das passt somit gut zu den in der Literatur gefundenen Aussagen.

3.7 Prüfung der Eignung der Klimamodellierung der BOKU im Rahmen von ForSite für die Abgrenzung der oberen Kampfzone

Die Daten aus dem Projekt ForSite sind in 30 m Auflösung öffentlich verfügbar, projektintern waren sie aber in 10 m Auflösung vorhanden. Für

das gegenständliche Projekt wurde auf diese 10 m Auflösung zurückgegriffen, weil sie zu den ebenfalls in 10 m vorliegenden Daten vom Sentinel2 Satelliten passt.

Zusätzlich war wichtig, dass die Klimamodellierung nicht auf die Waldfläche reduziert wird, sondern die gesamte Landesfläche der Steiermark umfasst. Für das Projekt ForSite wurden rund 30 Klimavariablen als Mittelwerte der Jahre 1989 bis 2018 modelliert. Im Folgenden sind die beiden Klimavariablen „Dauer der Vegetationszeit“ und „Vegetationszeittemperatur“, die von Körner (2014) als entscheidend für die Wald- und Baumgrenze angesehen werden, dargestellt (Abbildung 17 und Abbildung 18).

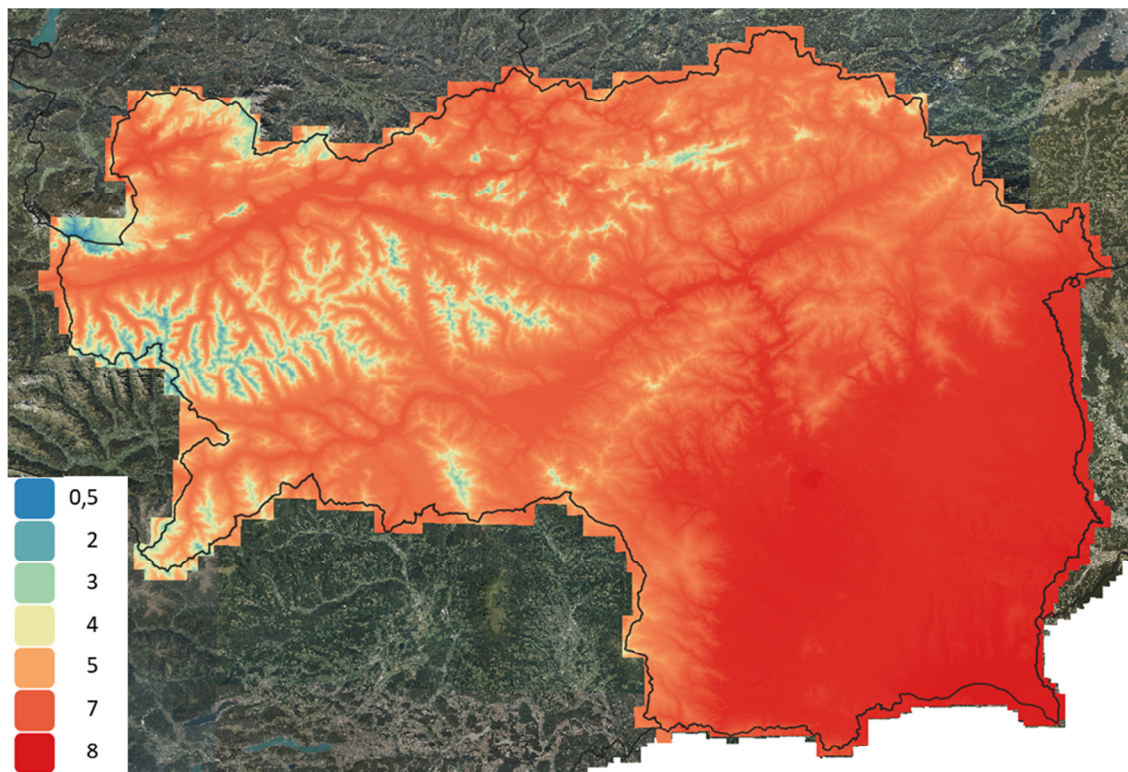


Abbildung 17: Dauer der Vegetationszeit in Monaten im Mittel der Jahre 1989 bis 2018 nach Daten aus ForSite

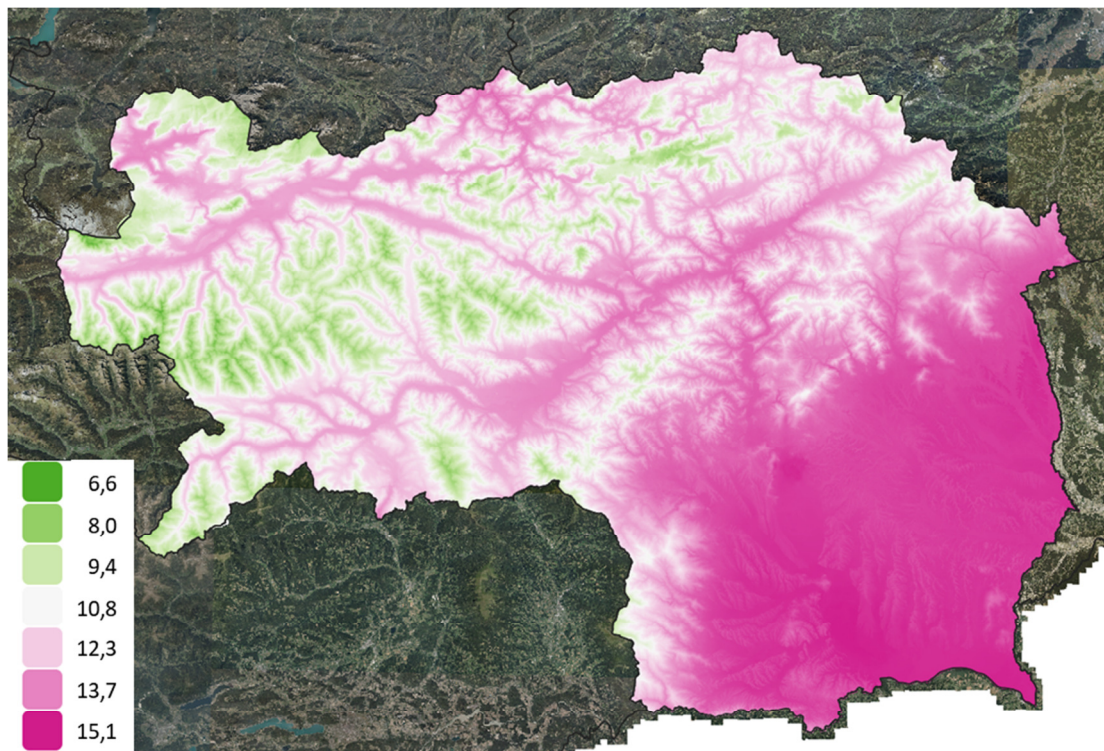


Abbildung 18: Vegetationszeittemperatur in Grad C im Mittel der Jahre 1989 bis 2018 nach Daten aus ForSite

Interessanterweise hat sich gezeigt, dass die Vegetationszeittemperatur in der Steiermark immer über dem von Körner als kritisch angegebenen Wert von 6,4 Grad Celsius liegt. Der niedrigste Wert liegt nach der Modellierung bei 6,6 Grad Celsius. Die Dauer der Vegetationszeit unterschreitet jedoch den Schwellwert von Körner (3 Monate) durchaus auch in der Steiermark. Auch wenn die Daten bei der Vegetationszeit also höher liegen als in der Literatur angegeben, können die Klimadaten, wie sie für ForSite modelliert wurden, für den Zweck der automatisierten Abgrenzung der Kampfzone eingesetzt werden, da hier absolute Schwellwerte keine Rolle spielen.

3.8 Genauigkeitsanalyse der aktuellen Geländemodelle

Das BFW verfügt über zwei verschiedene Arten von Höhenmodellen mit einem Meter Auflösung. Einerseits werden im Laufe von ALS-Befliegungen, die in unterschiedlichen zeitlichen Abständen von den Bundesländern durchgeführt werden, Gelände- und Oberflächenmodelle abgeleitet. Diese sind je nach Bundesland und Befliegungsgebiet unterschiedlich und maximal bis zu 15 Jahre alt. Andererseits erzeugt das BFW aus der regelmäßigen bundesweiten Luftbildbefliegung ein ebenso bundesweites Oberflächenmodell mit Image Matching (IM).

Die beiden Techniken unterscheiden sich grundlegend, wie in der Tabelle 6 angeführt wird.

Tabelle 6: Unterschiede zwischen der Qualität der Daten aus Laser-Befliegungen (ALS) und aus dem Image Matching (IM)

	ALS	IM
Verfahren	Aktives Verfahren – Keine Schatten	Passives Verfahren- Schatten
Zeitliche Auflösung	Keine bundesweite Planung, unregelmäßig bis zu 10 Jahren	Bundesweite Planung regelmäßig in 3 Jahreszyklen
Räumliche Auflösung	Zumindest 20 cm	20 cm
Farbauflösung	Keine	R, G, B, und I

Auf dieser Datenbasis lassen sich zwei unterschiedliche Vegetationshöhenmolle (nDOM) ableiten, je nachdem, ob das Oberflächenmodell aus der Laser-Befliegung (ALS-nDOM) oder dem Image Matching (IM-nDOM) stammt. Als Bezugsbasis wird in beiden Fällen das Geländemodell aus ALS verwendet.

Beide Verfahren haben Genauigkeitsgrenzen, die im Allgemeinen in Gebirgslagen ungünstiger sind als im Flachland. Im Zuge der Bearbeitung der BFW-Waldkarte hat sich auch gezeigt, dass die Genauigkeit beider Vegetationshöhenmodelle vor allem im Hochgebirge bundesweit uneinheitlich ist. Davon ist vor allem die automatisierte Ableitung von Krummholzflächen betroffen. Teilweise ist die Genauigkeit dafür ausreichend (Genauigkeit zumindest 1 m), teilweise jedoch nicht. In Abbildung 19 wird das Orthophoto mit dem ALS-nDOM vergleichend dargestellt. Es zeigt sich, dass in diesem Bereich der Großteil der Latschenflächen im ALS-nDOM unter 0,5 m liegt. Das ist sicherlich niedriger, als die Latschen tatsächlich sind und hat dieselbe Höhe wie Rasenmatten. Damit kann das Krummholz nicht automatisiert erfasst werden.

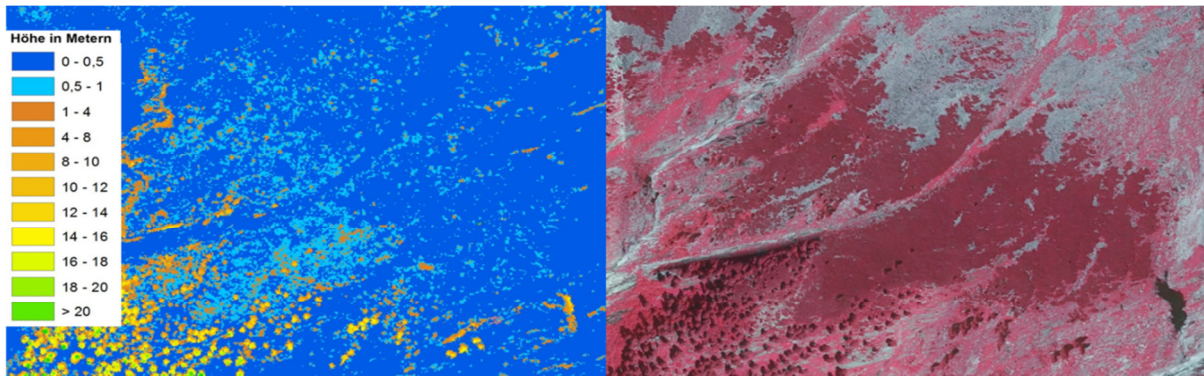


Abbildung 19: Beispiel für unzureichende Genauigkeit des ALS-nDOM für die Ableitung vom Krummholzlayer

Darüber hinaus sind Schattenlagen beim IM-nDOM mit Artefakten behaftet, was die Ableitung der Vegetationshöhe mit Image Matching in Bereichen von Schlagschatten sehr erschwert.

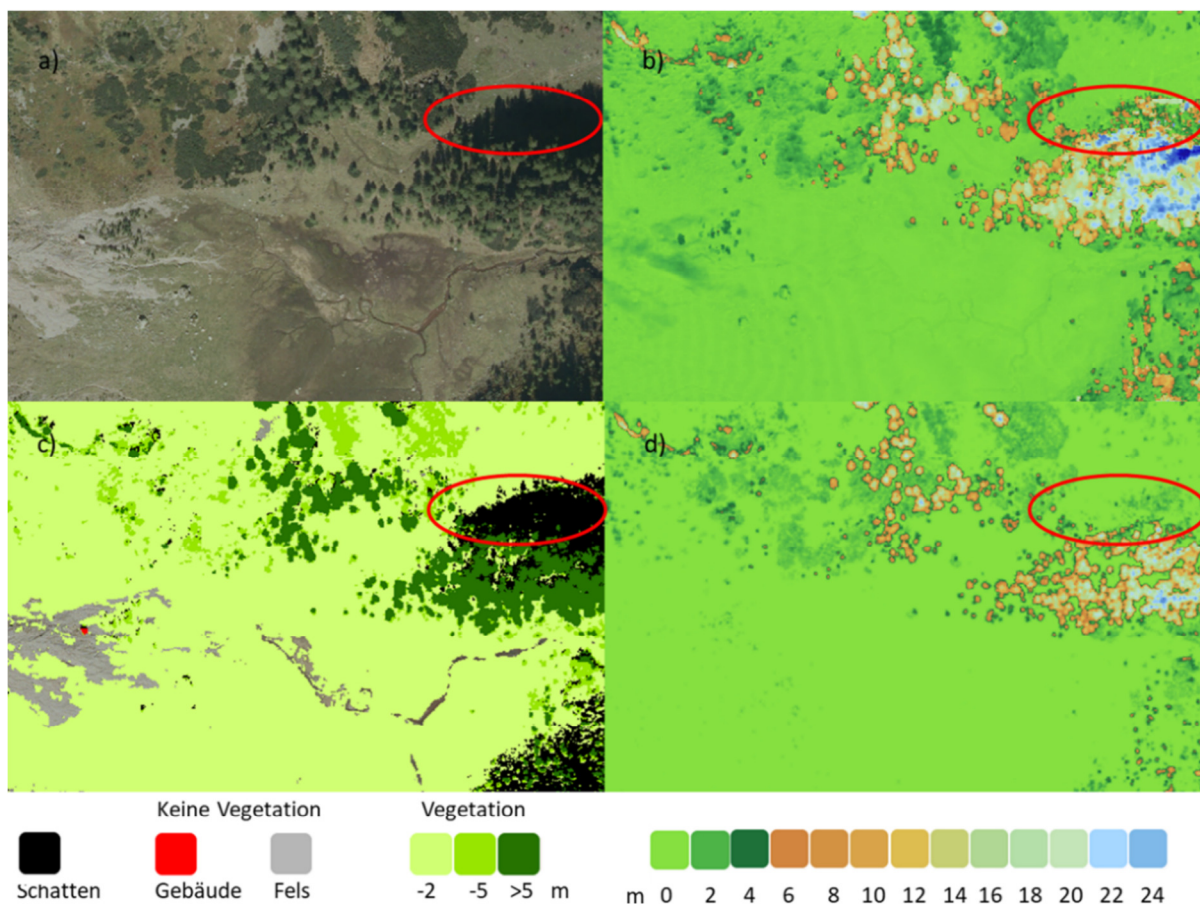


Abbildung 20: Unterschiedliche Genauigkeit von nDOM-ALS und nDOM-IM und Schattenproblematik (rot gekennzeichnet): (a) Orthophoto; (b) IM-nDOM; (c) davon abgeleiteter Vegetationslayer; (d) ALS-nDOM

Abbildung 20 zeigt deutlich das Schlagschattenproblem: Das ALS-nDOM (d) liefert die korrekten Höhen unabhängig vom Schatten, während im IM-nDOM (b) zahlreiche Höhenartefakte zu finden sind. Der Vergleich der beiden Layer zeigt aber auch, dass die Vegetation außerhalb des Schattens gewachsen ist und die Werte vom ALS-nDOM nicht mehr aktuell sind. Daher wird für das gegenständliche Projekt zur automatisierten Abgrenzung des Krummholzes ein satellitenbildgestütztes Verfahren eingesetzt (siehe Kapitel 3.9).

3.9 Prüfung der Möglichkeiten für die Vegetationserfassung aus der Matching-Punktwolke und den Sentinel-2 Zeitreihenanalysen

Das Institut für Waldinventur am BFW erweitert die Information, wie sie beim Image Matching in der 3D Punktwolke entsteht, in einem eigenen Prozess um den Infrarotkanal. Dieser Kanal kann theoretisch für die automatisierte Erkennung von Vegetation eingesetzt werden. Ein Vegetationslayer, der über die Waldfläche hinausgeht, wäre für die Erstellung eines Krummholzlayers wichtig. Essenziell dafür wäre, dass die Höhengenaugigkeit vom nDOM besser als 1 m ist. Es hat sich aber in Kapitel 3.7 gezeigt, dass diese Genauigkeit nicht überall gegeben ist. Zusätzlich ist auch die großflächig automatisierte Erstellung eines Vegetationslayers noch nicht gänzlich gelöst. Der Algorithmus muss derzeit noch automatisch kleinräumig kalibriert werden, wodurch kleinräumig auch Unterschiede in der Qualität entstehen. In Abbildung 21 sieht man deutlich kleinräumig Unterschiede, die in der Natur so nicht vorkommen.

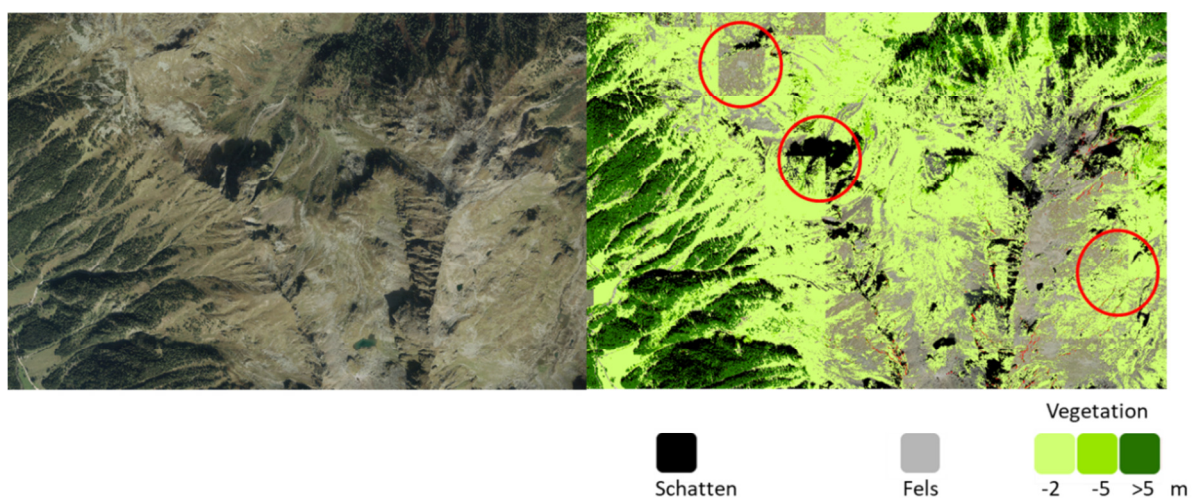


Abbildung 21: Vegetationslayer im Hochgebirge mit deutlich erkennbaren Inhomogenitäten (rot)

Im Vegetationslayer ergeben sich auch Probleme durch den Schlagschatten, die derzeit nicht vollständig gelöst sind. Die Probleme sind hier ähnlich wie bei der Vegetationserkennung. Diese Methode ist daher derzeit noch nicht ausgereift und es muss für den Krummholzlayer ein anderer Lösungsansatz gefunden werden, der im Folgenden beschrieben ist.

Das Institut für Waldinventur arbeitet an einer Baumartenkarte mit 30 Klassen, die auch das Krummholz beinhaltet. Dafür werden hauptsächlich Satelliten-Zeitreihendaten verwendet:

Anhand von Sentinel-2 (S2) Vegetations-Index-Zeitreihen sowie Gelände- und Vegetationshöhenmodellen wurde mit Neuronalen Netzen (NN) eine Baumartenkarte über das gesamte Österreichische Bundesgebiet erstellt.

Als Eingangsdaten für die NN wurden die Vegetations-Index-Zeitreihenmodelle sowie davon abgeleitete Statistiken, wie beispielsweise Mittelwert, Standardabweichung und einige Perzentile, das digitale Geländemodell (DGM), sowie das digitale Vegetationshöhenmodell (nDOM) und aus DGM und nDOM abgeleitete Parameter verwendet.

Die NN wurden mit gelabelten Daten, das bedeutet S2-Pixeln, denen eine der 30 Klassen der Baumartenkarte zugeordnet wird, trainiert. Hierfür wurden durch manuelle Interpretation von Orthophotos Polygone, die einzelne Klassen enthalten, erstellt. Diese wurden dann auf S2-Pixel-Basis in das Training miteinbezogen.

Die NN-Architektur ist eine Kombination aus einem Residual-Neural-Network-Block (Resnet), der besonders für Zeitreihenklassifikation geeignet ist, und einem Multi-Layer-Perceptron (MLP), einer einfachen NN-Struktur. Abbildung 22 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten NN-Architektur.

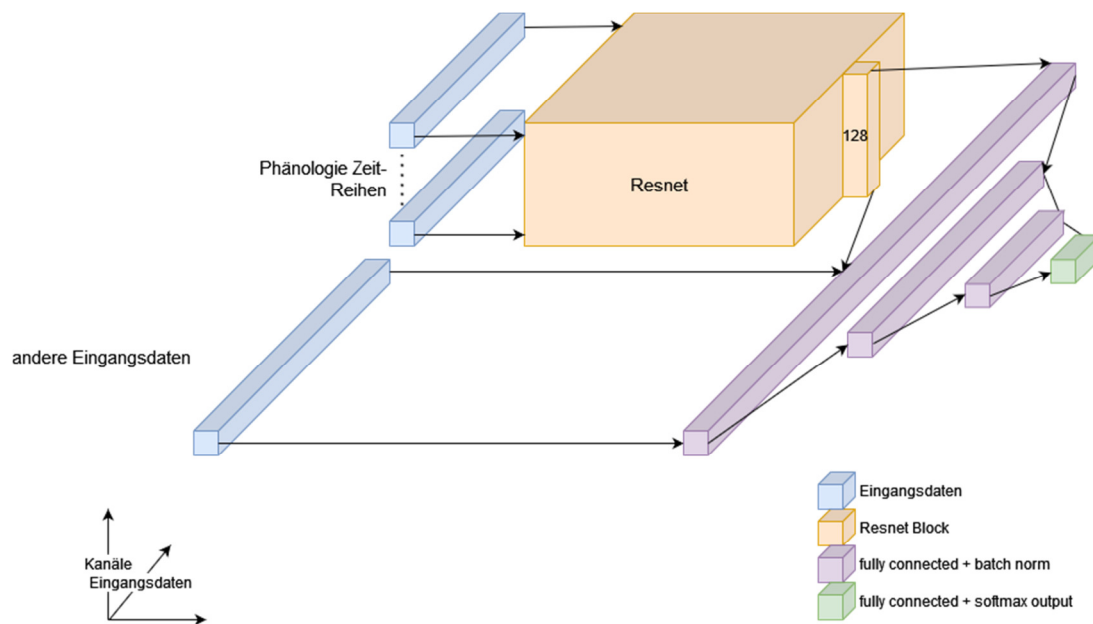


Abbildung 22: Schematische Darstellung der verwendeten NN-Architektur

Die Baumartenkarte ist in einer räumlichen Auflösung von 10x10 m verfügbar und unterscheidet 30 Klassen: Fichte, Tanne, Weiß- und Schwarzkiefer, Lärche, Zirbe, Latsche, Grünerle, Buche, Eiche, sonstiges Laub, niedrige bis keine Vegetation sowie Mischungen aus den aufgeführten Reinklassen (Abbildung 23).

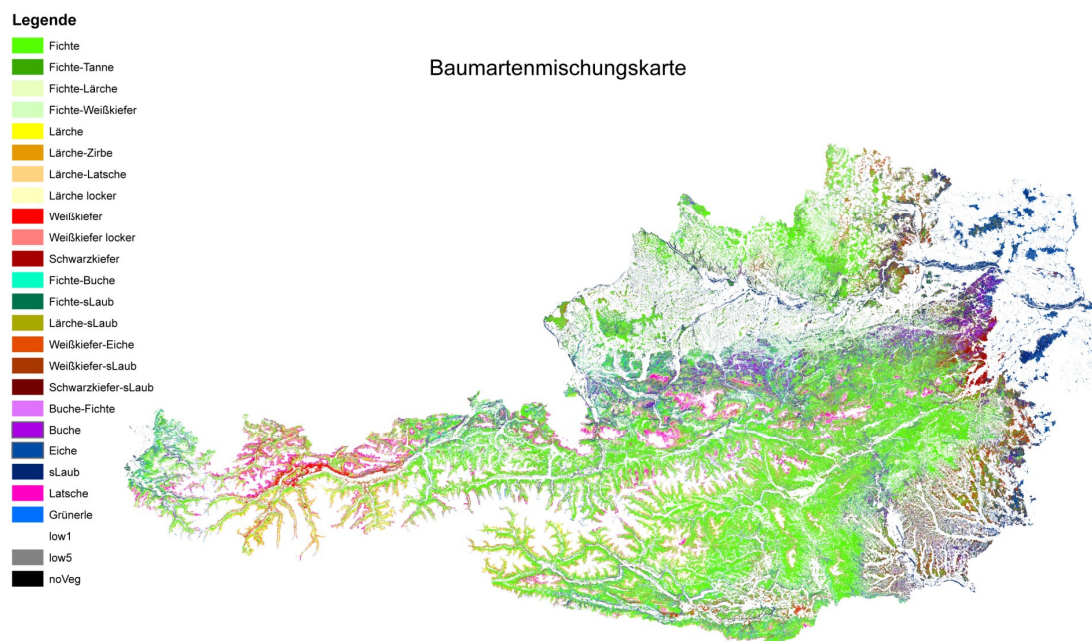


Abbildung 23: Baumartenkarte für ganz Österreich (Stand Dez. 2022)

Aus dieser Baumartenkarte wurde nun der Layer für Latsche und Grünerle als Input für die Abgrenzung der Kampfzone verwendet.

3.10 Methodische Ansätze für die Automatisierung

Zur testweisen automatischen Erkennung der Kampfzone wurde zuerst ein breiter Vegetationszeit-Temperaturgürtel (8,6°C – 10,6°C) definiert, der nach visueller Interpretation die Kampfzone sicher umfasst. In diesem Gürtel wurde dann ein Random Forest Algorithmus (eine Methode des Machine-Learnings) entwickelt. Die dafür notwendigen Trainingsdaten bestehen aus 10x10 m Pixeln in diesem Gürtel. In zahlreichen Gebieten der Steiermark wurden manuell Polygone gezeichnet und alle Pixel darin entweder der Klasse "Kampfzone" oder "keine Kampfzone" zugeordnet. Zusätzlich wurde die gesamte Krummholzfläche in dem Temperaturgürtel als Trainingsdatensatz für die Kampfzone verwendet. Diese Information wurde aus der BFW-Baumartenkarte entnommen. Wichtig war, dass sowohl Pixel über als auch unter der Kampfzone als Nicht-Kampfzone im Trainingsdatensatz enthalten waren. Aus diesem Datensatz wurden zufällig rund 180.000 Pixel in einer Form gezogen, dass die unterschiedlichen Bereiche (oberhalb, unterhalb und in der Kampfzone) gleich stark vertreten waren.

Da die Kampfzone in der erarbeiteten Definition als rein klimatische Zone verstanden wird, dürfen die Vorhersagemodelle nur auf Klimavariablen beruhen.

Daher wurden die Trainingsdaten mit Klimavariablen (Abbildung 25) aus dem Projekt ForSite verschnitten. Da viele Klimavariablen untereinander hoch korreliert sind, wurde der Datensatz mit Hilfe des Variance Inflation Factors schrittweise reduziert, bis die Daten ausreichend unabhängig waren. Die verbliebenen Variablen sind:

- Wasserbilanz
(WBIL_mean_year_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633_v02)
- Thermische Kontinentalität
(thermal_continentality_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633_v02)
- Relative Luftfeuchtigkeit
(RHmean_mean_year_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633)
- Globalstrahlung
(GLO_hori_yearsum_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633)
- Frosttage (frost_mean_year_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633)
- Evapotranspiration
(ET_mean_year_1989_2018_Stmk_10m_EPSG32633_v02)

Diese Variablen wurden verwendet, um mittels des Random Forest Algorithmus (Funktion ranger aus dem R-Paket ranger) im gesamten Temperaturgürtel zu modellieren, wie wahrscheinlich jedes einzelne Pixel zur Kampfzone des Waldes gehört. Das R^2 des Modells ist 0,7. Das bedeutet, dass in 70% der Fälle die Ausweisung mit den Trainingsdaten übereinstimmt.

Der relative Einfluss der Eingangsvariablen wurde in einem „Variable Importance Plot“ dargestellt (Abbildung 24).

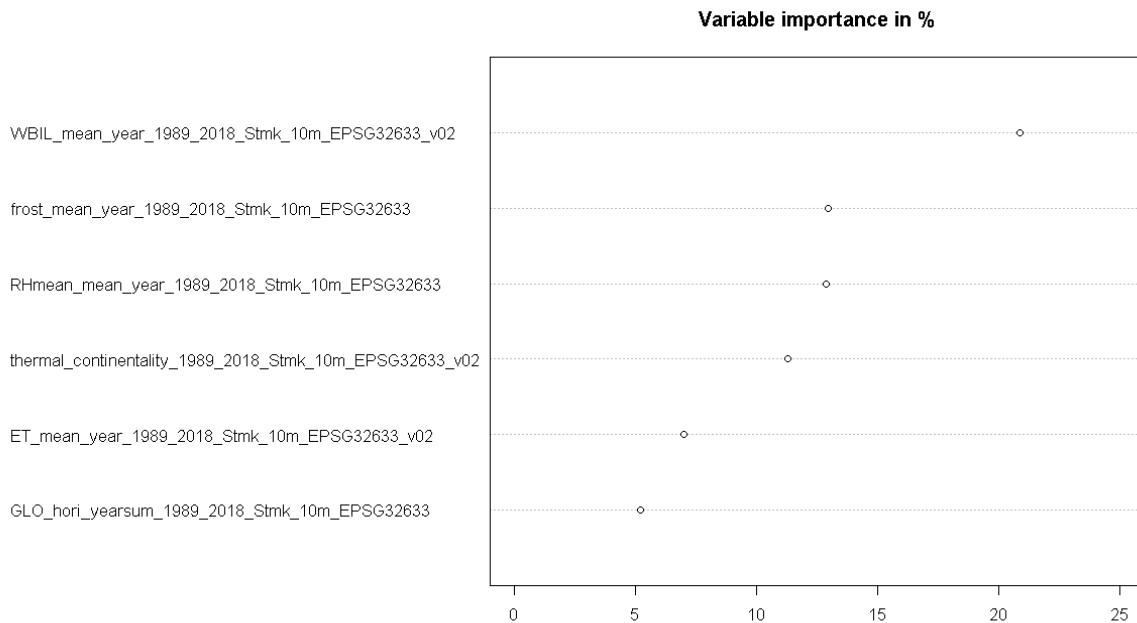
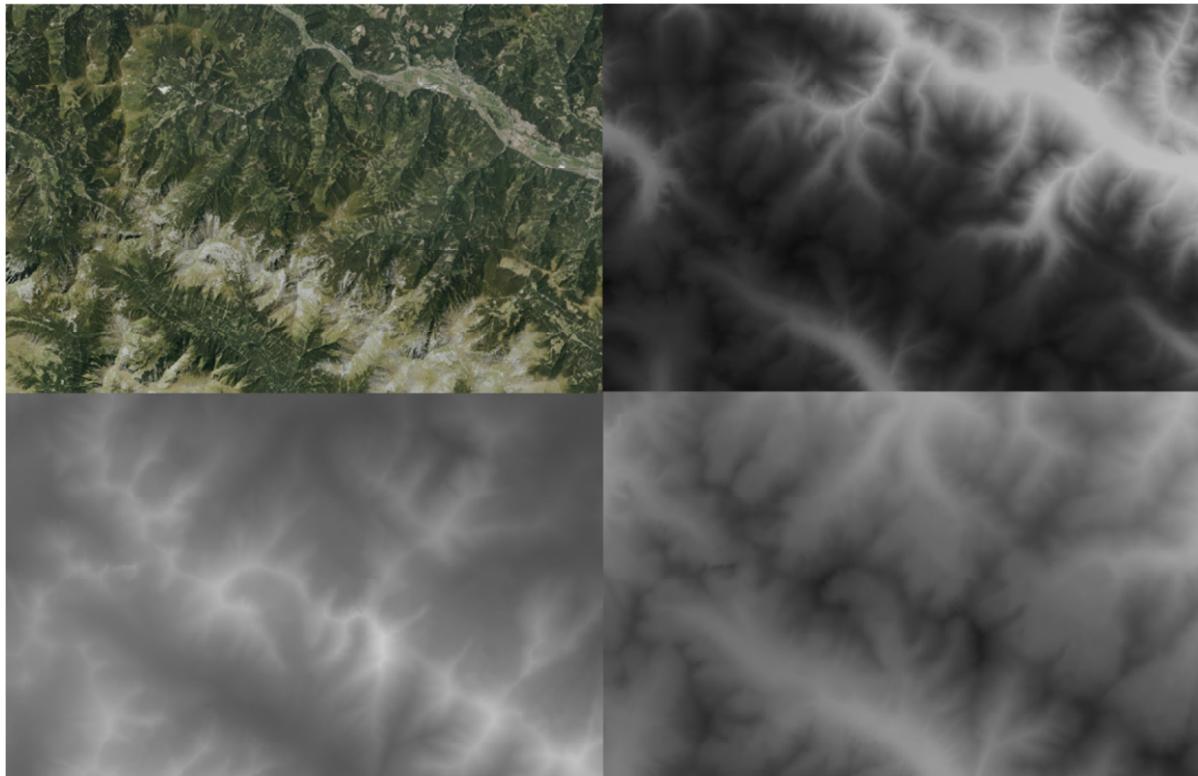


Abbildung 24: Verwendete Klimavariablen, gereiht nach Ihrer Bedeutung im Model



Orthophoto

Mittlere Anzahl an Frosttagen 1989 - 2018

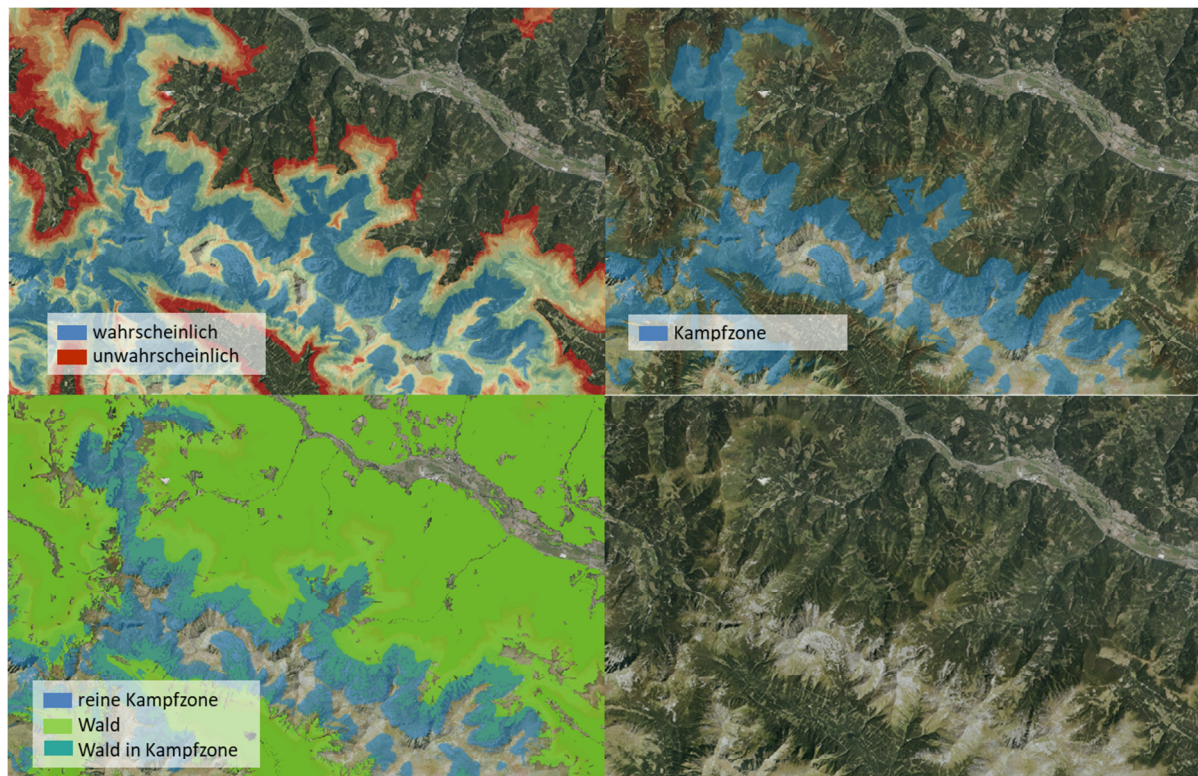
Mittlere thermische Kontinentalität 1989 - 2018

Mittlere Vegetationszeittemperatur 1989 - 2018

Abbildung 25: Beispiele für verwendete Klimawerte

3.11 Ergebnisse für das Testgebiet Steiermark

Die Ergebnisse zeigen, dass die errechneten Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit zur Kampfzone meistens grob einem Seehöhengradienten folgen. Für die Darstellung in Abbildung 26 wurde eine Wahrscheinlichkeit größer als 80% gewählt, die dann als Kampfzone bezeichnet werden kann. Es hat sich herausgestellt, dass es keine einheitliche Wahrscheinlichkeit gibt, die für das ganze Gebiet der Steiermark verwendet werden kann. Abbildung 24 zeigt auch, dass eine teilweise Überlappung mit der Waldkarte vorhanden ist, was gut in die Definition nach Kapitel 3.3 passt.



Wahrscheinlichkeitslayer Kampfzone

Kampfzone mit großer Wahrscheinlichkeit

Kampfzone mit großer Wahrscheinlichkeit und Waldlayer

Orthophoto

Abbildung 26: Beispiele für Ergebnisse der automatisierten Kampfzonenausweisung in der Steiermark

3.12 Vorschlag für die Umsetzung in ganz Österreich

Die erarbeitete Methode kann prinzipiell für ganz Österreich verwendet werden. Dafür müssten aber auch Trainingsflächen in ganz Österreich digitalisiert werden und die Klimamodellierung, wie sie für die Steiermark vorhanden ist, ebenfalls auf das ganze Bundesgebiet ausgerollt werden.

4 Erarbeitung einer Auwaldkarte

Die Arbeiten wurden auf Basis des vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellten Aueninventars, der Hinweiskarte Schutzwald und den Probeflächen der ÖWI durchgeführt. Die Datengrundlagen wurden GIS technisch verschnitten und darauf aufbauend analysiert. Dabei wurde im Wesentlichen das Aueninventar um jene Flächen reduziert, die laut Hinweiskarte kein Wald sind. Beispiele für die Ausweisung des Auwaldes basierend auf den genannten Datengrundlagen zeigen Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29.



Abbildung 27: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) im Bereich um Linz

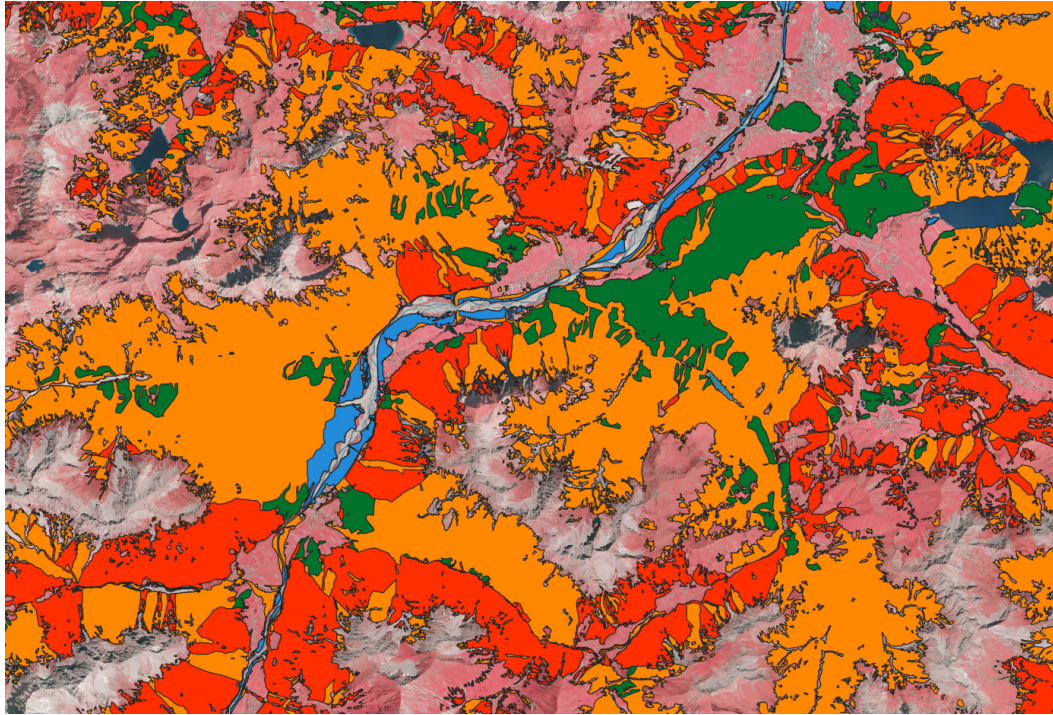


Abbildung 28: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) im Bereich Reutte

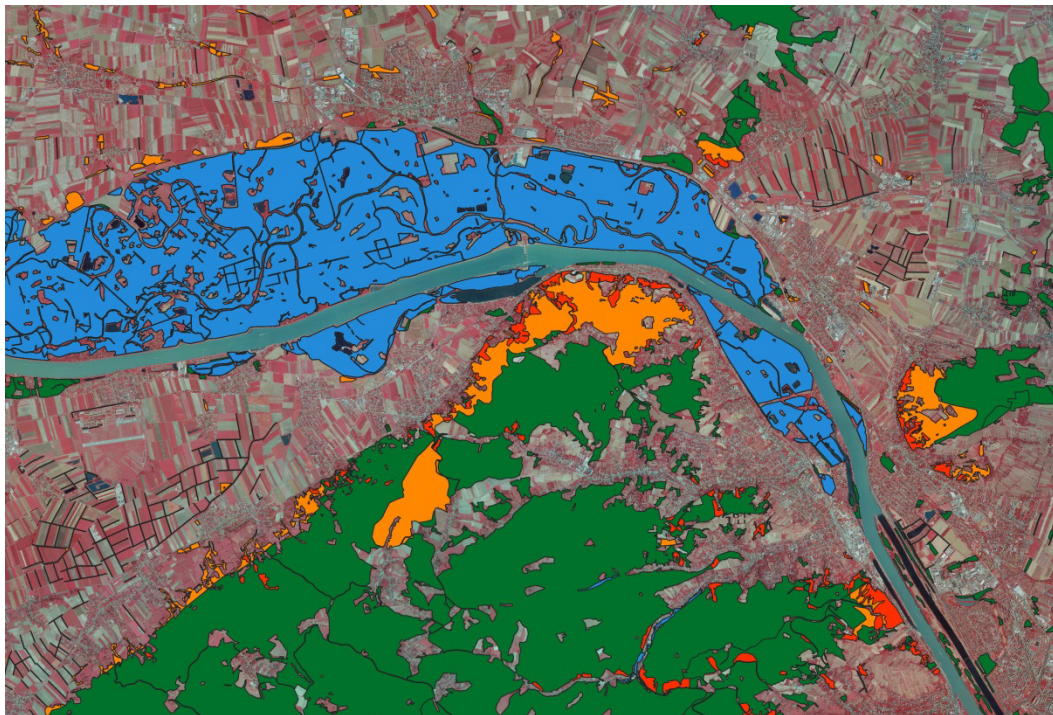


Abbildung 29: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) nördlich von Wien

Darüber hinaus wurde der Auwald in die Hinweiskarte Schutzwald eingearbeitet und liegt als Shape-File vor, welches dem BML übermittelt wurde. Im Shape-File wird unterschieden, ob es sich um Auwaldflächen im Bereich des WdOSF, im Bereich des WOSSF oder im Wald ohne diese beiden Funktionen handelt.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Kategorisierung der Auwaldfläche nach den vorrangigen Schutzfunktionen der Hinweiskarte Schutzwald.

Tabelle 7: Verschneidung des Aueninventars mit der Hinweiskarte Schutzwald zur Unterscheidung der Auwaldflächen nach ihrer „ursprünglichen“ Schutzfunktion

WSFCAT2	Attribut "Schutzfunktion"	Hektar	Prozent
	Waldfläche in AU Gesamtsumme	53.061	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	44.200	83
1	Wald mit Objekt und/oder Standortschutzfunktion	8.399	16
2	Wald mit Objektschutzfunktion	461	1

Verschneidungen mit den Probeflächen der ÖWI

Um die Unterschiede zwischen den Erhebungen auf den ÖWI-Flächen und dem Aueninventar analysieren zu können, wurden die ÖWI-Flächen, insbesondere für die Merkmale Auen-Ausschlagwald und Land-Ausschlagwald über den erstellten Auwaldlayer in der Hinweiskarte gelegt.

Bei der Betrachtung der ÖWI-Auen-Ausschlagwald Punkte wurde folgendes festgestellt: Von den 60 vorhandenen sind 41 (68%) in Au-Gebieten laut Aueninventar und 39 (65%) fallen in den erstellten Auwaldlayer, sind also im Wald. Das bedeutet, dass 19 ÖWI-Auen-Ausschlagpunkte außerhalb des Aueninventars liegen. Diese umfassen Grenzfälle mit Koordinatenunsicherheiten bzw. dürfte das Aueninventar nicht vollständig sein. Bei den Land-Ausschlagwald Punkten befinden sich prozentuell deutlich weniger in den beiden Au-Layern (15% bzw. 11%). Das entspricht den Erwartungen, weil die Definitionen nur zum Teil überlappen.

In Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigt sich, dass die höchsten Auwaldanteile naturgemäß im Osten Österreichs liegen. In Wien beträgt

der Anteil ca. 20%, in Niederösterreich knapp unter 4%. Das Bundesland mit dem kleinsten Auwaldanteil ist die Steiermark.

Tabelle 8: Auwälder in den Bundesländern nach Schutzwaldkategorien

WFSCAT2	Attribut "Schutzfunktion"	Hektar	Prozent
	Waldfläche Wien	8037	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1570	19,53
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	0	0
2	Wald mit Objektschutzfunktion	0	0
	Waldfläche Niederösterreich	764565	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	23880	3,12
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	4693	0,61
2	Wald mit Objektschutzfunktion	120	0,02
	Waldfläche Burgenland	130480	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	2502	1,92
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	1258	0,96
2	Wald mit Objektschutzfunktion	16	0,01
	Waldfläche Oberösterreich	503053	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	7218	1,43
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	160	0,03
2	Wald mit Objektschutzfunktion	7	0
	Waldfläche Salzburg	352767	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1649	0,47
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	134	0,04
2	Wald mit Objektschutzfunktion	45	0,01
	Waldfläche Steiermark	995967	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	3534	0,35
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	89	0,01
2	Wald mit Objektschutzfunktion	42	0
	Waldfläche Kärnten	553767	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	3066	0,55
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	166	0,03
2	Wald mit Objektschutzfunktion	33	0,01
	Waldfläche Tirol	537290	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1805	0,34
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	180	0,03
2	Wald mit Objektschutzfunktion	130	0,02
	Waldfläche Vorarlberg	92337	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	652	0,71
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	95	0,1
2	Wald mit Objektschutzfunktion	18	0,02

Tabelle 9: Auwälder gesamt nach Schutzwaldkategorien

WFSCAT2	Attribut "Schutzfunktion"	Hektar	Prozent
	Waldfläche Österreich	3938264	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	45876	1,17
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	6775	0,17
2	Wald mit Objektschutzfunktion	411	0,01

Tabelle 10: Anteil Auwälder am Gesamtwald

	Hektar	Prozent
Waldfläche Wien	8037	100
Auwald	1570	19,53
Waldfläche Niederösterreich	764565	100
Auwald	28693	3,75
Waldfläche Burgenland	130480	100
Auwald	3776	2,89
Waldfläche Oberösterreich	503053	100
Auwald	7385	1,47
Waldfläche Salzburg	352767	100
Auwald	1828	0,52
Waldfläche Steiermark	995967	100
Auwald	3665	0,37
Waldfläche Kärnten	553767	100
Auwald	3265	0,59
Waldfläche Tirol	537290	100
Auwald	2115	0,39
Waldfläche Vorarlberg	92337	100
Auwald	765	0,83
Waldfläche Österreich	3938264	100
Auwald	53062	1,35

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die Anteile des Auwaldes in den einzelnen Schutzwaldkategorien laut Hinweiskarte pro Bundesland und für ganz Österreich.

Tabelle 11: Auwald nach Schutzwaldkategorien in den Bundesländern

WFSCAT2	Attribut "Schutzfunktion"	Hektar	Prozent
	Auwald Wien	1570	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1570	100
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	0	0
2	Wald mit Objektschutzfunktion	0	0
	Auwald Niederösterreich	28693	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	23880	83,2
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	4693	16,4
2	Wald mit Objektschutzfunktion	120	0,4
	Auwald Burgenland	3776	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	2502	66,3
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	1258	33,3
2	Wald mit Objektschutzfunktion	16	0,4
	Auwald Oberösterreich	7385	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	7218	97,7
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	160	2,2
2	Wald mit Objektschutzfunktion	7	0,1
	Auwald Salzburg	1828	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1649	90,2
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	134	7,3
2	Wald mit Objektschutzfunktion	45	2,5
	Auwald Steiermark	3665	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	3534	96,5
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	89	2,4
2	Wald mit Objektschutzfunktion	42	1,1
	Auwald Kärnten	3265	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	3066	93,9
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	166	5,1
2	Wald mit Objektschutzfunktion	33	1
	Auwald Tirol	2115	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	1805	85,3
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	180	8,5
2	Wald mit Objektschutzfunktion	130	6,2
	Auwald Vorarlberg	765	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	652	85,2
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	95	12,4
2	Wald mit Objektschutzfunktion	18	2,4

Tabelle 12: Auwald nach Schutzwaldkategorien gesamt

WFSCAT2	Attribut "Schutzfunktion"	Hektar	Prozent
	Auwald Österreich	53062	100
0	Wald ohne vorrangige Schutzfunktion	45876	86,5
1	Wald mit Objekt- und/oder Standortschutzfunktion	6775	12,7
2	Wald mit Objektschutzfunktion	411	0,8

Der Großteil des Auwaldes ist bisher nicht als Schutzwald kategorisiert. Eventuell könnte der Auwald auch in Form einer Sonderkarte ausgewiesen werden.

5 Erstellung eines bundesweiten Layers für Windschutzanlagen

5.1 Übernahme der Layer aus den Ländern

Die seitens des BML bei den Ländern angefragten Layer für Windschutzanlagen (WSA) wurden dem BFW zur Verfügung gestellt (Abbildung 30). Diese wurden einerseits mit der Hinweiskarte Schutzwald und zusätzlich auch mit der Waldkarte des BFW im Detail verglichen. In den Bundesländern mit zahlreichen Windschutzanlagen haben viele Kartierungen sehr gute Qualität. Trotzdem haben sich allgemeine Fragen, und anhand sehr zahlreicher Beispiele, Fragen für die einzelnen Länder ergeben (siehe Anhang 4). Die zur Verfügung gestellten Geodaten wurden aus den aktuellen Waldentwicklungsplänen bereitgestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Revisionsstände kommt es zu einer regional unterschiedlichen Datengenauigkeit, insbesondere auf Bezirksebene. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ausweisung von WSA in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich erfolgte, sodass ein Definitionsprozess, ähnlich wie für die Kampfzone des Waldes vorgeschlagen und eine Arbeitsgruppe zur Vereinheitlichung der Definition eingerichtet wurde. Auch die Zuordnung bezüglich Schutzfunktion ist heterogen und würde einer Harmonisierung bedürfen.



Abbildung 30: Bearbeitung der WSA - Die mit Ziffern versehenen Bereiche wurden bearbeitet, 0: keine vorrangige Schutzfunktion, 1: Standorts- u/o Objektschutzfunktion, 2: Objektschutzfunktion

5.2 Einrichtung einer Arbeitsgruppe zur Vereinheitlichung der Definition von Windschutzanlagen

Wie oben beschrieben wurde kurzfristig eine Arbeitsgruppe mit folgenden Institutionen einberufen:

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
- Firma Unidata
- Landesforstdirektion Burgenland
- Landesforstdirektion Niederösterreich
- Landesforstdirektion Steiermark
- Landesforstdirektion Wien
- Bundesforschungszentrum für Wald

Bei dem Arbeitsgruppentreffen wurde ein Definitionsvorschlag erarbeitet, seitens des BFW zusammengestellt und zur nochmaligen Kommentierung an die Teilnehmer:innen ausgeschickt. Die vorgeschlagenen Änderungen wurden noch in die Definition eingearbeitet.

5.3 Definitionsvorschlag der Windschutzanlagen

Basierend auf dem Forstgesetz §2:

„Unter Windschutzanlagen sind Streifen oder Reihen von Bäumen oder Sträuchern zu verstehen, die vorwiegend dem Schutz vor Windschäden, insbesondere für landwirtschaftliche Grundstücke, sowie der Schneebindung dienen“

Basierend darauf gelten für die Windschutzanlagen für die Sonderkarte der Hinweiskarte Schutzwald folgende Kriterien:

- Die Ausweisungen der WSA folgen den obigen forstgesetzlichen Bestimmungen.
- Die WSA muss anthropogenen Ursprungs sein.
- Sie kann sowohl im Wald als auch außerhalb des Waldes liegen und Nichtwald laut §1a sein.
- WSA sind vorwiegend linienförmig, Flächen bis zu einer Breite von 100 m können ebenfalls eine WSA sein.

Bachbegleitende Baum- und Strauchvegetation fällt nur dann unter diese Definition, wenn sie anthropogenen Ursprungs ist und vorwiegend dem Windschutz dient.

Über WSA hinaus gibt es auch natürlich entstandene Windschutzstreifen, bzw. Waldflächen, die unter Umständen Windschutzwirkung ausüben. Diese fallen aber nicht unter die Definition der WSA.

Im gegenständlichen Projekt wird der Frage, welche Schutzfunktion laut Hinweiskarte vergeben werden soll, nicht nachgegangen. Derzeit wird dies sehr heterogen gehandhabt. Eine Entscheidung soll von der Arbeitsgruppe auf Basis des vorliegenden Endberichtes getroffen werden.

5.4 Arbeiten zur Sonderkarte Windschutzanlagen

Im Rahmen dieses Projektteils wurden die von den Bundesländern übermittelten WSA nach Zugehörigkeit zu Wald oder Nichtwald untersucht. Dafür wurde die Waldkarte des BFW verwendet. Darüber hinaus wurde eine visuelle Kontrolle durchgeführt (Anhang 4).

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 31, Abbildung 32, Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35) zeigen Beispiele für Windschutzanlagen, die im Wald und außerhalb des Waldes liegen.

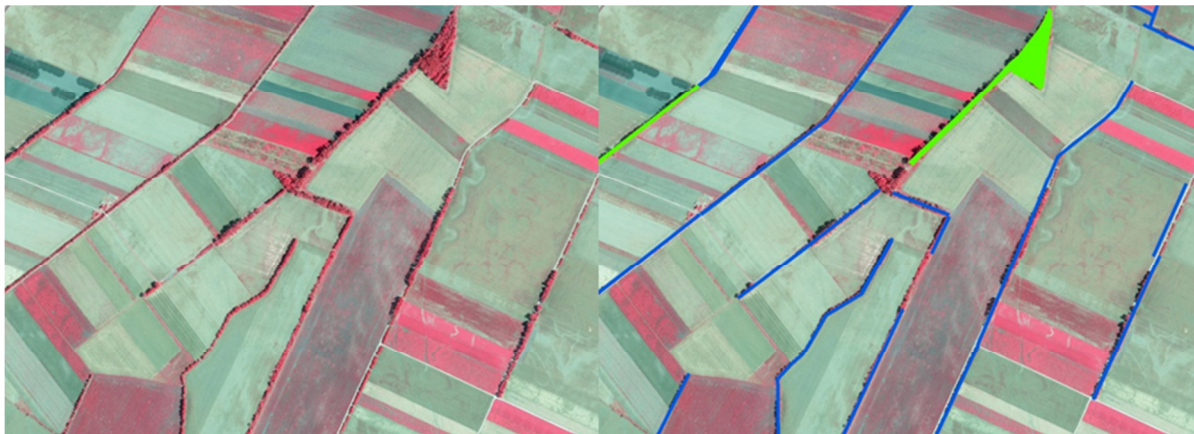


Abbildung 31: WSA östlich von Traiskirchen, in grün WSA im Wald, in blau außerhalb des Waldes



Abbildung 32: WSA bei Hof/Leithagebirge, in grün WSA im Wald, in blau außerhalb des Waldes



Abbildung 33: WSA bei Oberwart, in grün WSA im Wald, in blau außerhalb des Waldes

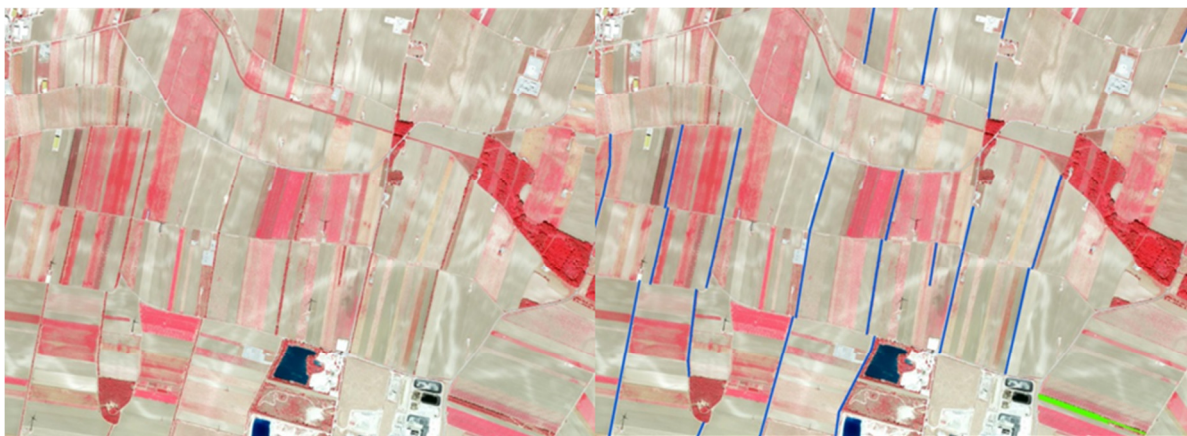


Abbildung 34: WSA bei Gänserndorf, in grün WSA im Wald, in blau außerhalb des Waldes



Abbildung 35: WSA bei Gerasdorf, in grün WSA im Wald, in blau außerhalb des Waldes

Die folgende Tabelle 13 beinhaltet die Flächen der WSA im Wald und im Nichtwald sowie deren Anteile in Prozentangaben an den gesamten WSA pro Bundesland und für ganz Österreich. Die Flächen ergeben sich nach Verschneidung der WSA mit der Waldkarte des BFW.

Tabelle 13: Übersicht über die Flächen der WSA nach Bundesländern

WSA	Wald in ha	in % der WSA	Nichtwald in ha	in % der WSA	Summe WSA in ha
Burgenland	1.379	98,4	22	1,6	1.402
Kärnten	10	100,0	0	0,0	10
NÖ	3.693	55,8	2.925	44,2	6.618
OÖ	81	100,0	0	0,0	81
Salzburg	16	83,7	3	16,3	20
Steiermark	335	100,0	0	0,0	335
Tirol	15	42,6	21	57,4	36
Vorarlberg	4	45,9	5	54,1	9
Wien	38	100,0	0	0,0	38
Österreich	5.572	65,2	2.976	34,8	8.548

Es ist zu erkennen, dass WSA im Nichtwald hauptsächlich in Niederösterreich einen großen Anteil ausmachen, immerhin fast 3000 ha.

Die WSA wurden mit Hilfe der aktuellen digitalen Orthophotos auf etwaige „Fehler“ untersucht. Somit wurden auf einer Fläche von insgesamt 18 Hektar WSA auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, Flächen in eingezäunten Privatgärten, Straßenflächen oder sonstigen Flächen ohne jegliche Vegetation entsprechend attribuiert (mit einer 0). Der WSA-Layer wurde danach um diese Flächen bereinigt.

In der Folge werden Beispiele der Bereinigung angeführt (Abbildung 36, Abbildung 37, Abbildung 38, Abbildung 39).

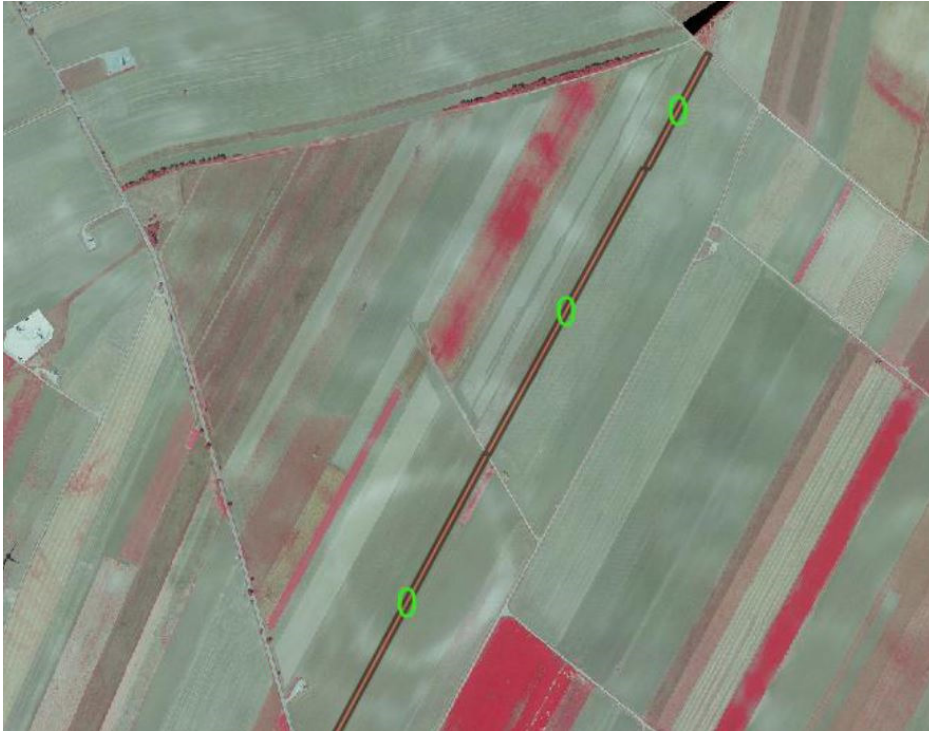


Abbildung 36: Diese WSA wurden mit 0 attribuiert, im Orthophoto ist keinerlei Vegetation erkennbar



Abbildung 37: Diese WSA liegt in einem eingezäunten Garten und wurde mit 0 attribuiert

Weitere Vorgangsweise:

Es wird empfohlen, die von den Bundesländern erhobenen, mit Ortskenntnis digitalisierten und vom BFW bereinigten WSA als Sonderkarte der Hinweiskarte Schutzwald auszuweisen. In dieser Sonderkarte sollte auch ersichtlich sein, ob die WSA im Wald oder außerhalb des Waldes liegen. In Zukunft sollte auch angedacht werden, ob der Datensatz der Windschutzgürtel des BEV bei der Erstellung dieser Sonderkarte hilfreich sein kann. Dieser wurde dem BFW bereits zur Verfügung gestellt.

6 Literaturverzeichnis

- Berdanier A.B. (2010): Global Treeline Position. *Nature Education Knowledge* 3(10):11
- Bobek, H. P., Plattner E. und Reindl P. (1977) *Forstgesetz 1975*, Manz, Wien 1977.
- Brünig, E.F., Mayer, H. (1980): *Waldbauliche Terminologie: Fachwörter der forstlichen Produktion*, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N.E. (2007): Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *J Veg Sci* 18:571-582
- Geologische Bundesanstalt (1991): *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000*. Wien
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S. et al. (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to global warming. *Ecol Lett* 12:1040-1049
- Holtmeier F.K. (2009): *Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands; Boston, MA, USA; London, UK
- Körner C. (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115:445-459
- Körner C. (2012): *Alpine Treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*; Springer: Basel, Switzerland
- Körner, C. (2014): Warum gibt es eine Waldgrenze? *Biologie in unserer Zeit*, 44: 250–257. doi:10.1002/biuz.201410542
- Oberhuber W., Gruber A., Wieser G. (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum.
https://bfw.ac.at/cms_stamm/050/PDF/praxistag2020/BFW_Praxistag2020_oberhuber_waldgrenze.pdf
- Smith W.K., Germino M.J., Hanckock T.E., Johnson D.M. (2003): Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. *Tree Physiol* 23:1101–1112
- Starsich, A., Perzl, F. (2022): Die österreichische Hinweiskarte Schutzwald – Geodatenmanagement für die Ingenieurpraxis. *Wildbach- und Lawinenverbau* 189, 175-182.

Wieser G., Tausz M. (eds) (2007): Trees at Their Upper Limit: Treelife Limitation at the Alpine Timberline; Springer: Berlin, Germany, Volume 5

Wieser G., Matyssek R., Luzian R. et al. (2009): Effects of atmospheric and climate change at the timberline of the Central European Alps. *Ann For Sci* 66, 402

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gebiet nördlich von Innsbruck: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte.....	20
Abbildung 2: Gebiet nördlich von Telfs: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte. WOSSF (orange)	21
Abbildung 3: Gebiet um den Millstättersee: oben PROFUNmap, unten die von den Bundesländern evaluierte Karte.....	22
Abbildung 4: Histogramme für die drei Parameter Seehöhe (dem), Hangneigung (slope) und mittlere Vegetationshöhe (ndsm_mean) für den Wirtschaftswald (links) und den SiE und SaE (rechts) auf den Probeflächen der ÖWI.	24
Abbildung 5: Beispiel für die ungefilterte Version (links) und für die gefilterte Version (rechts)	26
Abbildung 6: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für die Steiermark	28
Abbildung 7: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für die Steiermark im Gebiet nordöstlich von Zeltweg.....	29
Abbildung 8: Gegenüberstellung der Hinweiskarte (a) mit den Modellergebnissen: ÖWI (b), STMK (c) und ÖST (d) für das Gebiet um Innsbruck	30
Abbildung 9: Verteilungen der Pixelhäufigkeiten für die Indikatoren Seehöhe und Hangneigung getrennt nach den Klassen Wirtschaftswald und Standortschutzwald.	33
Abbildung 10: Identität und Unterschiede der Klassifizierung zwischen Hinweiskarte Schutzwald und Methode 3	36
Abbildung 11: Das Waldgrenzökoton und seine Fragmentierung durch Störungen und lokale Einflüsse.....	45
Abbildung 12: Struktur des Waldgrenzökotons in den Zentralalpen	45
Abbildung 13: Temperaturabweichungen, Österreich - Sommerhalbjahr (Apr.-Sept.) 1767 bis 2018	47
Abbildung 14: Wirkungen von Klimaerwärmung und Klimaextremen auf die Wald- und Baumgrenze	47
Abbildung 15: Kopie eines Schwarzweiß-Luftbildes der Luftbildbefliegung 1954 im Bereich Donnersbach-Wald mit eingetragenen Passpunkten.....	50

Abbildung 16: Oben links das SW-Luftbild aus dem Jahr 1954 (a); daneben ein SW-Orthophoto aus dem Jahr 2001 (b), unten links ein CIR-Orthophoto aus dem Jahr 2009 (c), daneben ein RGB-Orthophoto aus dem Jahr 2019 (d)	51
Abbildung 17: Dauer der Vegetationszeit in Monaten im Mittel der Jahre 1989 bis 2018 nach Daten aus ForSite	52
Abbildung 18: Vegetationszeittemperatur in Grad C im Mittel der Jahre 1989 bis 2018 nach Daten aus ForSite	53
Abbildung 19: Beispiel für unzureichende Genauigkeit des ALS-nDOM für die Ableitung vom Krummholzlayer	55
Abbildung 20: Unterschiedliche Genauigkeit von nDOM-ALS und nDOM-IM und Schattenproblematik: (a) Orthophoto; (b) IM-nDOM; (c) davon abgeleiteter Vegetationslayer; (d) ALS-nDOM.....	55
Abbildung 21: Vegetationslayer im Hochgebirge mit deutlich erkennbaren Inhomogenitäten	56
Abbildung 22: Schematische Darstellung der verwendeten NN-Architektur	58
Abbildung 23: Baumartenkarte für ganz Österreich (Stand Dez. 2022) ..	58
Abbildung 24: Verwendete Klimavariablen, gereiht nach Ihrer Bedeutung im Model.....	60
Abbildung 25: Beispiele für verwendete Klimawerte	61
Abbildung 26: Beispiele für Ergebnisse der automatisierten Kampfzonenausweisung in der Steiermark	62
Abbildung 27: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) im Bereich um Linz	63
Abbildung 28: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) im Bereich Reutte	64
Abbildung 29: Beispiel für die Ausweisung des Auwaldes (blau) nördlich von Wien	64
Abbildung 30: Bearbeitung der WSA.....	70
Abbildung 31: WSA östlich von Traiskirchen	72
Abbildung 32: WSA bei Hof/Leithagebirge	73
Abbildung 33: WSA bei Oberwart	73
Abbildung 34: WSA bei Gänserndorf.....	73
Abbildung 35: WSA bei Gerasdorf	74

Abbildung 36: WSA wurden mit 0 attribuiert, im Orthophoto ist keinerlei Vegetation erkennbar	76
Abbildung 37: WSA liegt in einem eingezäunten Garten	76
Abbildung 38: WSA, die durch Straßen unterbrochen werden	77
Abbildung 39: WSA liegt in einer Schottergrube.....	77

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Klassifizierung in PROFUNmap und Hinweiskarte Schutzwald.	19
Tabelle 2: Flächenbilanzen (in %) nach der Hinweiskarte Schutzwald und den drei Machine-Learning Methoden	27
Tabelle 3: Gegenüberstellung der im Forstgesetz aufgezählten Eigenschaften des Standortschutzwaldes und der dafür eingesetzten Indikatoren	32
Tabelle 4: Konfusionsmatrix der Methode 3; Zeilen enthalten die Anzahl der Pixel der Methode 3, Spalten die Anzahl der Pixel der Hinweiskarte Schutzwald.	35
Tabelle 5: Vorschläge für die Erweiterung des Indikatoren Sets	38
Tabelle 6: Unterschiede zwischen der Qualität der Daten aus Laser-Befliegungen (ALS) und aus dem Image Matching (IM).....	54
Tabelle 7: Verschneidung des Aueninventars mit der Hinweiskarte Schutzwald zur Unterscheidung der Auwaldflächen nach ihrer „ursprünglichen“ Schutzfunktion	65
Tabelle 8: Auwälder in den Bundesländern nach Schutzwaldkategorien..	66
Tabelle 9: Auwälder gesamt nach Schutzwaldkategorien.....	67
Tabelle 10: Anteil Auwälder am Gesamtwald	67
Tabelle 11: Auwald nach Schutzwaldkategorien in den Bundesländern...	68
Tabelle 12: Auwald nach Schutzwaldkategorien gesamt.....	69
Tabelle 13: Übersicht über die Flächen der WSA nach Bundesländern....	75