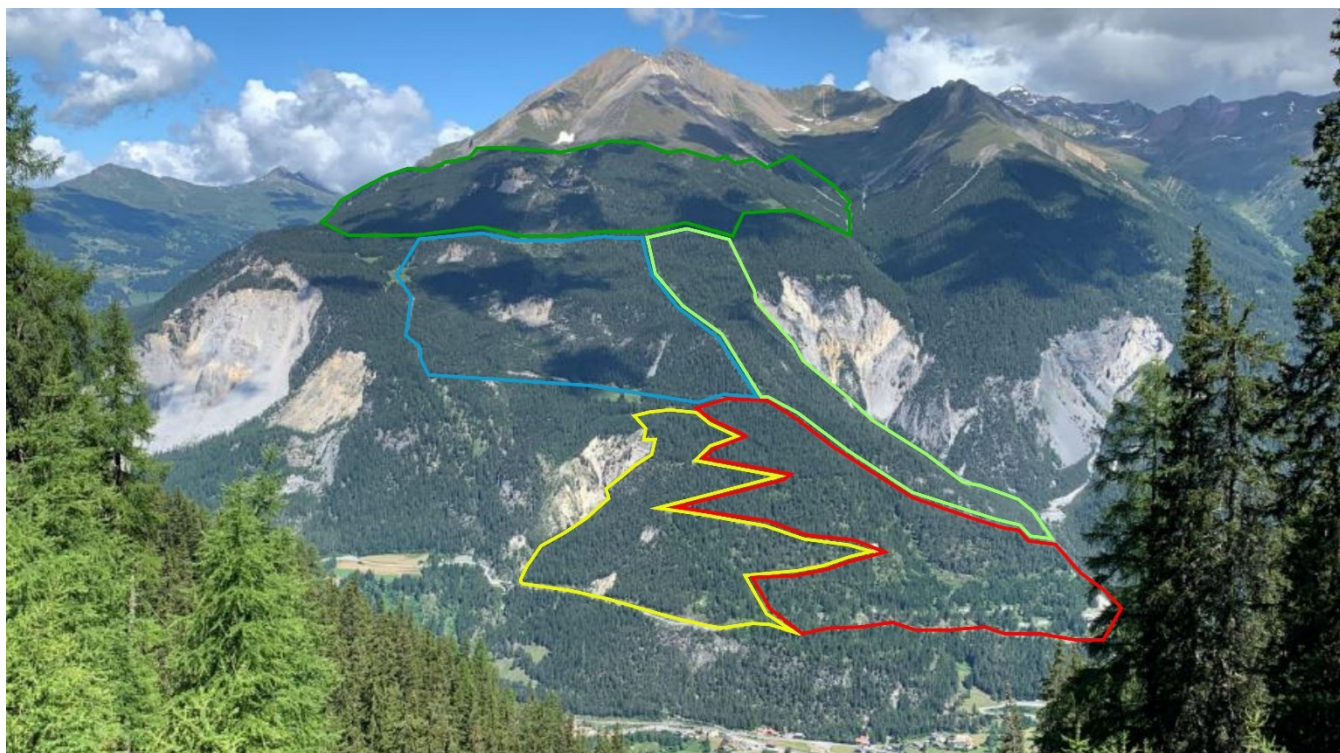


Schlussbericht

PLANSTUFIG: Neue Grundlagen für die forstbetriebliche Planung stufiger Wälder



Finanzierung	Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH / Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft (KWL) Kanton Graubünden Kanton Zug Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Projekt-Nr.:	2020.12
Verfügungs-Nr.:	01.0101.PZ/0011/2020.12
Laufzeit	01.02.2021 – 31.01.2023
Datum	16. Mai 2023
Autoren	Leo Bont, Lioba Rath, Janine Schweier

Impressum

Kontakt

Leo Bont

leo.bont@wsl.ch

Eidg. Forschungsanstalt WSL

Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Projektmitarbeitende

Leo Bont, Lioba Rath, Janine Schweier

Praxispartner

Kanton Aargau

Forstbetrieb Suhrental-Ruedertal

Forstbetrieb Homberg-Schenkenberg

Kanton Graubünden

Kanton Zug

Kanton Neuchâtel

SFV-AG Waldplanung und -management

iBW Maienfeld

BAFU

PanBern

Forstbetrieb Liestal

Forstbetrieb Birmensdorf

Iris Wehrli

Urs Gsell

Rolf Treier

Viola Sala, Riet Gordon, Claudia Bieler

Sabrina Maurer, Hanspeter Nussbaumer, Linus Ender

Romain Blanc

Raphaëla Tinner

Robert Schickmüller, Lukas Glanzmann

Roberto Bolgè

Andreas Bernasconi

Simon Janssen

Anton Bürgi

Zitiervorschlag

Bont, L.; Rath, L.; Schweier, J. Planstufig: Neue Grundlagen für die forstbetriebliche Planung stufiger Wälder. Schlussbericht an die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL: S. 77.

Dank

Wir bedanken uns bei Riet Gordon, Viola Sala und Claudia Bieler vom Amt für Wald und Naturgefahren (GR) für das hilfreiche Feedback, sowie bei allen weiteren Partnern und Beteiligten (Iris Wehrli, Urs Gsell, Rolf Treier, Andreas Freuler, Sabrina Maurer, Hanspeter Nussbaumer, Linus Ender, Romain Blanc, Raphaëla Tinner, Robert Schickmüller, Lukas Glanzmann, Roberto Bolgè, Andreas Bernasconi, Simon Janssen, Anton Bürgi), die im Laufe des Projekts den Bezug zur Praxis sicherten. Ein Dank geht auch an Prof. Dr. Verena Griess und Hussain Abbas von der Professur für nachhaltiges Ressourcenmanagement an der ETH Zürich, sowie Clemens Blattter von der WSL für die fachliche Unterstützung. Danke auch an Christian Bänziger (WSL) der massgebend zum Erfolg des Workshops beitrug. Dieses WSL-Projekt wurde realisiert mit Unterstützung der Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft (KWL), der Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH, Projektnummer 2020.12) und dem Kanton Graubünden.

Inhaltsverzeichnis

IMPRESSUM	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
I ABKÜRZUNGEN UND GLOSSAR	V
II ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
III TABELLENVERZEICHNIS	XI
IV ZUSAMMENFASSUNG	XII
V RÉSUMÉ	XIV
1 EINLEITUNG	1
1.1 AUSGANGSLAGE	1
1.2 PROJEKTZIELE	1
1.3 PROJEKTORGANISATION	2
2 METHODEN UND MATERIAL	5
2.1 DEFINITION UND AUSSCHIEDUNG VON BWEs	5
2.2 AUSSCHIEDUNG VON GRUNDEINHEITEN	7
2.2.1 Feinerschliessungseinheiten für befahrbares Gelände	8
2.2.2 Seilgestütztes Gelände	9
2.2.3 Luftgestütztes Gelände	14
2.2.4 Synthese zu Holzernteeinzugsgebieten	14
2.3 SEILLINIENLAYOUT UND ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN	16
2.4 RESILIENZ IM KLIMAWANDEL	16
2.5 DATENGRUNDLAGEN	16
2.6 FALLSTUDIENGEBIETE	17
3 ERGEBNISSE	19
3.1 DEFINITION UND AUSSCHIEDUNG VON BWEs	19
3.1.1 Definition und Einsatzgebiet von BWEs	19
3.1.2 Übersicht Workflow Ausscheidung BWEs	20
3.1.3 Bilden der Grundeinheiten	23
3.1.4 Aggregation der Grundeinheiten zu Bewirtschaftungseinheiten	23
3.1.5 Mathematische Formulierung der Optimierung	24
3.1.6 BWEs im Forstbetrieb Albula	28
3.1.5 BWEs im Staatsforstbetrieb Zug	32
3.2 FEINERSCHLIESSUNGSEINHEITEN UND HOLZERNTTEEINZUGSGEBIETE	34
3.2.1 Bodengestütztes Gelände	34
3.2.2 Seilgestütztes Gelände	36
3.2.3 Luftgestütztes Gelände	38
3.2.4 Holzernteeinzugsgebiete	38
3.3 SEILLINIENLAYOUT UND ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN	41
3.3.1 Einteilung relevanter Ökosystemleistungen	41
3.3.2 Einfluss des Seillinienlayouts auf Ökosystemleistungen	42
3.3.3 Modellierung möglicher Seillinien	49
3.4 UMGANG MIT STÖRUNGEN UND KLIMAWANDEL	50
4 DISKUSSION	53
4.1 HAUPTERGEBNISSE	53

4.2	HAUPTERKENNTNISSE	54
4.3	KRITISCHE REFLEXION UND EMPFEHLUNGEN FÜR KÜNFTIGE ARBEITEN	55
4.4	AUSBlick	55
4.4.1	<i>WSL-Projekt Mountex</i>	55
4.4.2	<i>Projekt mit Graubünden</i>	56
4.4.3	<i>Individuelle Beratungen</i>	56
5	UMSETZUNG DER ERGEBNISSE	57
5.1	CODE	57
5.2	PUBLIKATIONEN	57
5.3	LEHRE/VORTRÄGE	57
6	BEDEUTUNG FÜR PRAXIS UND FORSCHUNG	58
7	LITERATUR	59
8	ANHANG	61

I Abkürzungen und Glossar

Abteilung	Eine Flächeneinheit im Wald, die zur Planung und Kontrolle der Waldbewirtschaftung sowie zur Orientierung genutzt wird (Wikipedia, 2020). Die Abteilung hat ihren Ursprung im 17. Jahrhundert, als sie von Colbert als Verwaltungseinheit eingeführt wurde. Abteilungen sind noch heute in den deutschsprachigen Ländern in vielen Wäldern vorhanden, wenn sie auch nicht mehr überall in der Planung verwendet werden. Sie umfassen meist eine Grössenordnung von 10-30 ha und werden z.B. durch Strassen, Schneisen, Gräben oder Rücken begrenzt (Cotta, 1804).
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Bestand engl. forest stand	Forstwirtschaftliche Einheit im Wald, die mit leicht unterschiedlicher Definition in fast allen Bereichen der Erde zum Einsatz kommt. In der Schweiz gewöhnlich definiert als Waldteil, der in Zusammensetzung (Baumarten), Alter (Durchmesserverteilung) und Struktur (vertikal und horizontal, Entwicklungsstufen und Kronenschluss) genügend homogen ist, um sich von den umliegenden Waldteilen räumlich abgrenzen zu lassen (Heinimann, 2018; Service des forêts et de la nature, 2021). Der Bestand wird meist als kleinste Einheit waldbaulichen Handelns angesehen. Als solche verwendet, sollte im Forstbetrieb eine aktuelle Bestandskarte inklusive Beschreibungen vorhanden sein. In dieser Karte sollte für jeden Bestand aufgelistet sein, welche Massnahmen in der Vergangenheit durchgeführt wurden, oder in den nächsten Jahren geplant sind.
Ökosystemleistungen Engl.: BES, Biodiversity and Ecosystem Services,	Deutsch: Biodiversität und Ökosystemleistungen. Als Ökosystemleistungen werden die Leistungen des Waldes für den Menschen bezeichnet. Dazu gehören (nicht abschliessend) der Schutz vor Naturgefahren, die Bereitstellung von Lebensgrundlagen für die Waldbiodiversität, die Bereitstellung von Holz und Biomasse, das Bereitstehen als Erholungsraum, der Beitrag zu einem ansprechenden Landschaftsbild und die Wirkung als CO ₂ -Speicher zu nennen.
BWE, Bewirtschaftungseinheit Engl.: FMU, Forest Management Units	Konzept in der schweizerischen Waldplanung. Instrument, das auf der betrieblichen Ebene der Planung genutzt werden kann. Das Konzept wird in dieser Arbeit ausgearbeitet und beispielhaft angewendet. Innerhalb einer Bewirtschaftungseinheit sollte die betriebliche Planung der Massnahmen koordiniert erfolgen.
Bodengestützte Rückeverfahren	Dieser Begriff fasst die Verfahren zur Entfernung von gefällttem Holz aus dem Wald zusammen, bei denen der Transport über den Boden erfolgt. Hierzu zählen sämtliche Arbeitsabläufe mit Trägermaschinen, die auf dem Waldboden fahren, wie Forwarder oder Forsttraktoren, sowie das Rücken mittels Seilwinde im Bodenzug.
Eingriffseinheit	Eine zusammenhängende Fläche im Wald auf der eine waldbauliche Massnahme zu derselben Zeit stattfindet.

Erschliessung	Gesamtheit der befestigten und dauerhaften Strassen- und Wegeinfrastruktur im Wald, inklusive Brücken, Tunnel und ähnliches. Die Erschliessung kann LKW-befahrbar sein, oder auch nicht.
Feinerschliessung	Gesamtheit der temporären Strassen- und Wegeinfrastruktur im Wald. Meist nur mit Forstmaschinen befahrbar, wie Rückegassen oder Seillinien.
Femelschlag	Verjüngungsverfahren mit schweizerischem Ursprung. Im Femelschlagbetrieb wird die Verjüngung durch ungleichmässig grosse, räumlich und zeitlich verteilte Hiebseingriffe eingeleitet. Die Bestandespartien werden in frei gewählter Hiebswart von Schirmhieb bis Saumhieb und allen Zwischenarten gruppenweise verjüngt (Leibundgut, 1946).
Hochwald- bewirtschaftung (Altersklassenwald, schlagweiser Hochwald)	Art der Waldbewirtschaftung, bei der der Wald in Bestände einheitlicher Entwicklungsstufe eingeteilt ist. Das Ziel ist es eine Oberschicht zu erhalten, in der möglichst viele Bäume als Wert- und Nutzholz genutzt werden können. Die darunterliegende Bestockung, die Unterschicht, ist viel weniger ausgeprägt und dient nur der Unterstützung der Oberschicht (Amt für Wald beider Basel, 2020)
HPU – Homogenous property Unit	Eine zusammenhängende Waldfläche mit denselben Eigenschaften wie z.B. denselben Waldstandort, oder die Umschliessung durch dieselbe Strasse
LFI	Landesforstinventar
Maschinenweg	Ein Weg, der in der Holzernte genutzt und von Forstmaschinen befahren wird. Ein Maschinenweg ist nicht befestigt und nicht lastwagenbefahrbar und gehört zur Feinerschliessung. Im Unterschied zu einer Rückegasse ist er jedoch zumindest teilweise mit Erdbewegungen speziell angelegt. Er dient der Erschliessung von andererseits nicht befahrbarem Gelände, meist steileren Hangpartien (Administration de la nature et des forêts, 2013; Bont, 2021)
QGIS	QGIS ist ein geographisches Open-Source Informationssystem (QGIS). Mit QGIS kann eine Vielzahl an Vektor-, Raster-, und Datenbankfunktionen ausgeführt werden. Die frei erhältliche Software eignet sich zur Verarbeitung und Darstellung von Geodaten in einer Vielfalt an Datenformaten (QGIS, 2021).
RG, Rückegasse	Ein unbestockter Weg im Wald, der zur Befahrung durch für die Holzbereitstellung notwendige Forstmaschinen vorgesehen ist und zur Feinerschliessung gehört. Rückegassen werden nicht künstlich befestigt oder angelegt, es werden lediglich sämtliche Bäume auf einer Fahrspurbreite entfernt. Eine Rückegasse ist nicht durch andere Fahrzeuge ausser Forstmaschinen befahrbar (Administration de la nature et des forêts, 2013).
Seil- und luftgestützte Rückeverfahren	Dieser Begriff fasst die Verfahren zur Entfernung von gefällttem Holz aus dem Wald zusammen, bei denen der Transport ganz oder teilweise in

der Luft erfolgt. Hierzu zählen vor allem das Rücken mittels Seilkran oder Helikopter.

Rückeweg	Der Weg, den ein Stamm im Gelände zurücklegt von seinem Wuchsstandort bis zu einer befestigten Strasse. Rückewege sind die Zusammenfassung aus Landtransport, Rückegassen, Seillinien und Helikopterflugrouten.
Seillinie, oder auch Seiltrasse	Ein unbestockter Korridor im Wald, in steilerem Gelände, das nur mit seilgestützten Rückeverfahren bewirtschaftet werden kann. Als Seillinie wird sowohl der Korridor bezeichnet, der im Wald die Position eines in der Vergangenheit installierten Seilkrans anzeigt, als auch die Installation eines Seilkrans an sich.
stufiger Wald (Plenterwald, Dauerwald)	In dieser Arbeit wird weitestgehend der Begriff stufiger Wald als Oberbegriff für den Dauerwald und den Plenterwald verwendet. In einem stufig bewirtschafteten Wald sind sämtliche Entwicklungsstufen von der Ansamung bis zum Altholz auf kleinstem Raum nebeneinander vorhanden (Schütz & Röhnisch, 2003). Einwachsende und Auswachsende Bäume befinden sich für alle Durchmesserklassen im Gleichgewicht, eine klare räumliche Ordnung fehlt (Leibundgut, 1948). Ziel ist es möglichst hochwertige Vorräte in einem ökologisch wertvollen Wald zu erreichen, indem hauptsächlich mit Naturverjüngung gearbeitet wird (Amt für Wald beider Basel, 2020).
Grundeinheit (engl. Subunit)	Kleinste Fläche, aus denen die BWEs gebildet werden. Die Grundeinheit ist die Fläche im Wald, von der aus das Holz zum selben Strassenabschnitt, mit dem gleichen Verfahren gerückt wird. Eine Grundeinheit besteht jeweils nur aus einer Strassenseite dieses Abschnitts.
Waldfunktion	In diesem Bericht werden Waldfunktionen als Spezifizierung von Ökosystemleistungen verwendet. Gemeint sind die meist vom Kanton ausgeschiedenen Vorrangfunktionen bestimmter Waldflächen. Diese sind bestimmend für die hoheitliche Kontrolle und das Subventionswesen.
Waldstrasse	Als Waldstrassen werden alle befestigten und mindestens zeitweise LKW befahrbaren Weg und Strassen im Waldgebiet bezeichnet. Waldstrassen können auch anderen Fortbewegungen wie der Waldbewirtschaftung und der Holzabfuhr dienen. Maschinenwege und Rückegassen sollten immer in eine Waldstrasse einmünden, auf der dann selbst jedoch möglichst wenig gerückt werden sollte, um Schäden zu vermeiden. Waldstrassen zählen mit Rückegassen und Maschinenwegen zur Erschliessung im Wald (Administration de la nature et des forêts, 2013).

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Workflows über alle vier Arbeitspakete. _____	4
Abbildung 2: Experten der Waldplanung von der nationalen bis zur betrieblichen Ebene diskutieren über die Einflussfaktoren bei der Ausscheidung und Anwendung von BWEs. _____	6
Abbildung 3: Konzept der Feinerschliessungseinheit. Jede Waldzelle wird zu einem Waldstrassensegment zugewiesen, über welches auch der Abtransport des Holzes erfolgt. _____	8
Abbildung 4: Beispiel von modellierten Feinerschliessungseinheiten. _____	9
Abbildung 5: Analyse der Erreichbarkeit mit Seilkränen. Für jedes Waldstrassenstück werden im Abstand von ca. 30m einzelne Installationsplätze ausgeschieden (a). Von jedem Installationsplatz aus werden kreisförmig potentielle Seillinien angelegt (b) und für jede einzelne Seillinie deren Machbarkeit und maximale Seillinienlänge evaluiert (c). _____	10
Abbildung 6: Algorithmus zur Evaluation der maximalen Länge einer Seillinie. _____	12
Abbildung 7: Schematische Darstellung des 3D Netzwerkes. Wegen der Übersichtlichkeit halber wurden nicht alle Kanten eingezeichnet. _____	14
Abbildung 8: Links: Holzernte-Einzugsgebiete im Forstbetrieb Albula. Pro Strassenabschnitt wird zusammengefasst aus welchem Gebiet Holz abgeführt wird. Rechts: Die Feinerschliessungseinheiten, die als Grundlage dienen. _____	15
Abbildung 9: Lage der Fallstudiengebiete. _____	17
Abbildung 10: Zustimmung und Ablehnung der Planungsexperten aus der Praxis zu verschiedenen Aussagen bezüglich der Anwendung von BWEs. _____	19
Abbildung 11: Antworten der Planungsexperten bezüglich der genaueren Verwendung von BWEs in der forstlichen Planung auf betrieblicher oder kantonaler Ebene. _____	20
Abbildung 12: Set an Kriterien, das für die Ausscheidung der BWEs verwendet werden kann. _____	21
Abbildung 13: Workflow des Programm-Prototyps. _____	22
Abbildung 14: Kriterien, die als fixe Grenzen bei der Bildung von Grundeinheiten verwendet werden können. _____	23
Abbildung 15: Kriterien, anhand denen die Grundeinheiten zu BWEs aggregiert werden können. _____	24
Abbildung 16: Links: Hintergrundkarte des Waldgebiets auf dem BWEs (= FMU, Forest Management Units) ausgeschieden werden sollen. Das farbige Gebiet ist der Wald, die schwarzen Linien sind Strassen. Die blau gestrichelte Linie ist ein Fluss. Jede Grundeinheit (Grundeinheit, innerhalb des farbigen Gebiets mit grauen Linien abgetrennt) wird durch einen Knoten repräsentiert. Rechts: Dieselbe Waldfläche, mit dem Netzwerk an Knoten (Grundeinheiten) und den möglichen Verbindungen zu benachbarten Grundeinheiten. Die unterschiedlichen Farben stellen die aggregierten BWEs dar. _____	25
Abbildung 17: Left: Forest with subunits. Each subunit has a specific property L, here exemplified with letters. Right: The subunits with the same property are taken together and turned into an HPU with that property L. There can be more than one HPU with the same property. _____	27
Abbildung 18: Varianten an Kriterien-Kombinationen für die Modellierung, jeweils mit leicht anderem Fokus. Variante 2 und drei unterscheiden sich durch die Gewichtung der Kriterien Holzerntekonzept und Transportgrenzen einerseits, und Waldfunktion andererseits. _____	29

Abbildung 19: Ergebnisse der Optimierung für die Variante 1. Nur die kürzesten Distanzen innerhalb von Holzernteeinzugsgebieten und Transportgrenzen wurden beachtet. Die BWEs wurden in drei Grössenabstufungen modelliert. © swisstopo 2022.	30
Abbildung 20: links: Modellierte BWEs der Variante 1, unter ausschliesslicher Berücksichtigung der Transportgrenzen und Holzernteeinzugsgebiete, mit 40 resultierenden BWEs. Rechts: Grundeinheiten (=Untereinheiten) vor der Aggregation zu BWEs bei der Variante 1. © swisstopo 2022.	31
Abbildung 21: Vergleich der Varianten 2 und 3, bei denen die Waldfunktion mit verschiedenen Gewichtungen in die Optimierung mit einbezogen wird. © swisstopo 2022.	32
Abbildung 22: Lage des Staatswaldes im Kanton Zug, rechts die Auswahl der Kriterien für die Bildung von BWEs.	33
Abbildung 23: Oben links: Modellierung der Transportgrenzen und Feinerschliessungseinheiten. Oben rechts: Aggregierte BWEs mit 80 BWEs über dem gesamten Testgebiet. Unten links: Aggregierte BWEs mit 40 BWEs über dem gesamten Testgebiet. (Untereinheiten = Grundeinheiten) © swisstopo 2022.	33
Abbildung 24: Detailansicht der aggregierten BWEs im Gebiet des Gottschalkenbergs. Die Grenzen der BWEs orientieren sich an den Transportgrenzen, die durch steile Bacheinhänge gegeben sind. © swisstopo 2022.	34
Abbildung 25: Links: Rückedistanzen für das befahrbare Gelände im Forstbetrieb Homberg-Schenkenberg, Kt. AG (Ausschnitt).. Je dunkler das blau, desto kleiner die Distanz zur Waldstrasse. Rechts: Feinerschliessungseinheiten für denselben Ausschnitt. © swisstopo 2022.	35
Abbildung 27: Rechts: Modellierung Feinerschliessungseinheiten für den Seilkran im Betrieb Albula. Links: Mit hinterlegten Transportrichtungen © swisstopo 2022.	37
Abbildung 28: Modellierte Feinerschliessungseinheiten für die Helikopter-bringung im Forstbetrieb Albula. © swisstopo 2022.	38
Abbildung 29: Rechts: Modellierung der Holzernteeinzugsgebiete für den Betrieb Albula (Ausschnitt). Links: Mit Transportrichtungen © swisstopo 2022.	40
Abbildung 30: Die drei Walfunktionen sind in der Mitte dargestellt, darum herum die jeweiligen Waldleistungen (nicht weiter betrachtete Leistungen in grau). Im äussersten Kreis sind die Einflussfaktoren auf die Waldleistungen abgebildet. Die Einflussfaktoren treffen auf alle Waldleistungen zu. Erschliessung und Topografie sind zentrale Einflussgrössen für fast alle Leistungen, die laut Planungsexperten und -expertinnen aus der Praxis auf betrieblicher Ebene in der Waldbewirtschaftung wichtig sind.	41
Abbildung 31: relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie.	48
Abbildung 32: Die Abbildungen zeigen den Einfluss der Begrenzung der Abweichung der Richtung Seillinien im Vergleich mit der Falllinie (Val Tasna bei Ftan). Links: Ohne Begrenzung; Rechts: Begrenzung auf 20° ($d_{\text{grenz}} = 20^\circ$). Die Transportrichtungen ergeben mit einer Begrenzung der Abweichung der Richtung der Seillinien im Vergleich mit der Falllinie mehr Sinn.	50
Abbildung 33: Kriterien der Ausscheidung von Bewirtschaftungseinheiten, mit dem neuen Kriterium «Hot-Spot Karte».	51
Abbildung 34: Illustration des Indikators zur Messung der Abdeckung der Risikogebiete durch möglichst wenige Seillinien.	52
Abbildung 35: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen. Quelle: Frehner et al. 2005	74

Abbildung 36: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen, Erosion, Murgängen Quelle: Frehner et al. 2005 _____ 75

Abbildung 37: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Steinschlag. Quelle: Frehner et al. 2005__ 76

Abbildung 38: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Gerinneprozessen. Quelle: Frehner et al. 2005 _____ 76

Abbildung 39: Vergleich einer parallelen Seilerschliessung in Falllinie oder schräg. Quelle: (Aggeler 2002). _____ 77

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Rückekategorien im Seilkrangelände. _____	10
Tabelle 2: Eingangsparameter für die Prüfung der Machbarkeit von Seillinien (Modellierung der Lastwegkurve). _____	13
Tabelle 3: Grundlagendaten, auf denen die Modellierungen aufbauen, und ihre Verarbeitung. ____	17
Tabelle 4: Zusammenhang der Parameter im Seillinienlayout und Kenngrößen im Wald. _____	42
Tabelle 5: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout, dem ökonomischen Gewinn und der Arbeitssicherheit _____	44
Tabelle 6: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und dem Schutz vor Naturgefahren ____	45
Tabelle 7: Zusammenhang zwischen dem Landschaftsbild, der Erholungswirkung und dem Seillinienlayout _____	46
Tabelle 8: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und der Resilienz des Waldes _____	47
Tabelle 9: Penalty Werte für die relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie. _____	48

IV Zusammenfassung

Problemstellung

In der heutigen Waldplanung wird es immer wichtiger, vorhandene Effizienzpotenziale auszuschöpfen und Synergien innerhalb einer Forstorganisation auszunutzen. Es geht unter anderem um die Frage, wie sich ein grösserer Wald in sinnvolle Bewirtschaftungseinheiten (BWEs) zur Planung, Ausführung und Kontrolle der Waldbewirtschaftung aufteilen lässt. Mehrere, teils entgegengesetzte Zielsetzungen müssen mit einem wachsenden Angebot an digital verfügbaren Grundlagendaten zusammengebracht werden. Aus diesem Grund wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, BWEs automatisiert auszuscheiden. Diese BWEs sollen auf objektiven Kriterien beruhen, die individuell kombiniert werden können und deshalb optimal auf die jeweiligen Bedingungen im Forstbetrieb ausgerichtet sind.

Ziele

Ziel einer effizienten Waldplanung ist es, den Wald so in BWEs zu unterteilen, dass nicht nur waldbaulichen Aspekten, sondern auch der technischen Ausführung und der Kontrolle Rechnung getragen wird. Insbesondere in stufigen Wäldern ohne Bestandesgrenzen und in Gebirgswäldern mit seilgestützter Holzernte ist dies von Bedeutung. BWEs sollen es ermöglichen, dass ein einzelner Eingriff, beispielsweise eine Seillinie, stets innerhalb einer BWE stattfinden kann und gleichzeitig waldbauliche und betriebliche Anforderungen, wie z.B. Gemeindegrenzen oder Waldfunktionengrenzen berücksichtigt werden. Bei der Ausscheidung von BWEs handelt es sich um ein komplexes Problem, da vor allem in grossen Betrieben sehr viele Kombinationsmöglichkeiten denkbar sind. Eine händische Ausarbeitung ist mühsam und mit viel Aufwand verbunden. Unser Projektziel war es daher die Einteilung in BWEs durch die Eingabe von individuellen Zielen zu lenken, aber IT-basiert zu teilautomatisieren.

Methodik, IT-basierte Berechnung

BWEs werden in einer räumlich expliziten mathematischen Optimierung aus kleineren Einheiten, sogenannten Grundeinheiten, zusammengesetzt. Die Optimierung verfolgt im Kern drei Ziele:

(Ziel 1) BWEs sollen möglichst kompakte, räumliche zusammenhängende Flächen sein, innerhalb derer soll

(Ziel 2) die Waldbewirtschaftung technisch aufeinander abgestimmt sein, und diese Fläche soll zusätzlich

(Ziel 3) möglichst einheitliche Eigenschaften aufweisen.

Je nach Gewichtung dieser Ziele ergeben sich unterschiedliche Lösungen. Der Benutzer kann innert kurzer Zeit verschiedene Lösungen berechnen, vergleichen und diejenige Lösung wählen, welche nach seiner Einschätzung am besten ist. Grundlage für die Optimierung ist die Unterteilung des Waldes in Grundeinheiten. Als Grundeinheit wird der Teil des Waldes bezeichnet, der ähnliche oder gleiche Eigenschaften aufweist (z.B. Ökosystemleistungen, Waldstruktur), und in welchem Eingriffe zur Waldbewirtschaftung zwingend aufeinander abgestimmt werden müssen, sie also zur gleichen Zeit oder kurz aufeinander erfolgen. Sind beispielsweise für einen Betrieb eine technisch abgestimmte Holzernte und Ökosystemleistungen relevant für die Ausscheidung von BWEs, dann sind die Grundeinheiten räumlich zusammenhängende Flächen, welche der gleichen Feinerschliessungseinheit und jeweils einer bestimmten Ökosystemleistungen zugeordnet werden können. Ein zentraler Punkt zur Herleitung der Grundeinheiten ist die Modellierung der Feinerschliessung, welcher auf der Modellierung der Rückewege der boden-, seil- und luftgestützten Verfahren basiert. Waldzellen, bei welchen zum gleichen Strassenabschnitt gerückt wird, werden zu einer Feinerschliessungseinheit

zusammengefasst. Mit dem Aufbau der BWEs auf Grundeinheiten, die von den modellierten Rückewegen abhängen, wird sichergestellt, dass Eingriffe zur Bewirtschaftung des Waldes immer innerhalb einer BWE planbar und ausführbar sind.

Umsetzung und Anwendung

Mit dem Forstbetrieb Albula bzw. dem Kanton Graubünden bestand die engste Zusammenarbeit. Im Forstbetrieb Albula werden im Zuge der Betriebsplanerneuerung BWEs modelliert und dadurch Planung, Ausführung und Kontrolle der Waldbewirtschaftung aufeinander abgestimmt. Durch die automatisierte Berechnung der BWEs konnten mehrere Varianten direkt verglichen werden. Im Fall des Forstbetriebs Albula wurde der Einfluss verschiedener Gewichtungen der beiden Kriterien, sowie unterschiedlich grosser BWEs verglichen. Als Zwischenprodukt der Modellierung entstehen weitere Karten, die von der Praxis ebenfalls als sehr hilfreich empfunden wurden. So gibt es unter anderem eine Karte der möglichen Erntemethoden, eine Karte der Grundeinheiten, sowie Karten von technisch möglichen Seillinien und Rückewegen.

Erfahrung und Ausblick

Die Modellierung mit unterschiedlichen Parametern hat gezeigt, dass die IT-basierte Berechnung unter verschiedenen Bedingungen zuverlässig und korrekt abläuft. Dennoch kann eine Modellierung nie die ganze Realität abbilden. Die Resultate hängen stark von der Qualität der berücksichtigten Eingangsdaten ab. Zentral ist dabei der Datensatz der Walderschliessung, welcher die Befahrbarkeits- und Tragfähigkeitslimiten der Waldstrassen korrekt wiedergeben muss. Für die Verwendung der Modellergebnisse sind das Fachwissen und die Lokalkenntnisse der Förster unersetzlich, sie prüfen die BWEs und integrieren Aspekte, welche das Modell nicht berücksichtigen konnte. Momentan ist die selbstständige Berechnung von BWEs schon für Spezialisten mit ausreichenden IT-Kenntnissen möglich. Unser langfristiges Ziel ist es, ein breit anwendbares Tool für die Forstpraxis zu erstellen. Das Konzept der BWEs, verschiedene Ansprüche von der technischen Bewirtschaftung hin zu den waldbaulichen Kriterien zusammenzubringen, kann schon jetzt von jedermann verwendet werden.

V Résumé

Problématique

Dans la planification forestière actuelle, il est de plus en plus important d'exploiter les potentiels d'efficacité existants et de tirer parti des synergies au sein d'une organisation forestière. Il s'agit notamment de savoir comment diviser une grande forêt en unités de gestion (UG) judicieuses pour planifier, exécuter et contrôler la gestion forestière. Plusieurs objectifs, parfois opposés, doivent être conciliés avec une offre croissante de données de base disponibles sous forme numérique. C'est pourquoi une méthode a été développée, qui permet de délimiter des UG de manière automatisée. Ces UG doivent être basées sur des critères objectifs qui peuvent être combinés individuellement et qui sont donc adaptés de manière optimale aux conditions locales de l'exploitation forestière.

Objectifs

L'objectif d'une planification forestière efficace est de subdiviser la forêt en UG de manière à tenir compte non seulement des aspects sylvicoles, mais aussi de l'exécution technique et du contrôle. Cela est particulièrement important dans les forêts étagées sans limites de peuplements et dans les forêts de montagne, où la récolte du bois se fait à l'aide de câbles. Les UG doivent permettre qu'une intervention individuelle, par exemple une ligne de câblage, puisse toujours avoir lieu à l'intérieur d'une UG, tout en tenant compte des exigences sylvicoles et de gestion, comme par exemple les limites communales ou les limites des fonctions forestières. La délimitation des UG est un problème complexe, car de très nombreuses combinaisons sont envisageables, surtout dans les grandes exploitations. Une élaboration manuelle est fastidieuse et implique beaucoup de travail. L'objectif de notre projet était donc de guider la répartition en UG par la saisie d'objectifs individuels, et de l'automatiser partiellement sur la base de l'informatique.

Méthodologie, calcul basé sur les technologies de l'information

Les UG sont constituées d'unités plus petites, appelées unités de base, dans le cadre d'une optimisation mathématique spatialement explicite. L'optimisation poursuit trois objectifs principaux :

(Objectif 1) Les BWE doivent être des surfaces spatialement cohérentes aussi compactes que possible,

(Objectif 2) à l'intérieur desquelles la gestion forestière doit être techniquement harmonisée,

(Objectif 3) et cette surface doit en outre présenter des caractéristiques aussi uniformes que possible.

Les solutions varient en fonction de la pondération de ces objectifs. L'utilisateur peut toutefois calculer et comparer différentes solutions en peu de temps et choisir celle qu'il estime être la meilleure. La base de l'optimisation est la subdivision de la forêt en unités de base. L'unité de base est la partie de la forêt qui présente des caractéristiques similaires ou identiques (p. ex. services écosystémiques, structure de la forêt, etc.) et dans laquelle les interventions de gestion forestière doivent impérativement être coordonnées entre elles, c'est-à-dire qu'elles ont lieu au même moment ou à court terme. Si, par exemple, une récolte de bois et des prestations écosystémiques techniquement coordonnées sont pertinentes pour la délimitation d'UG, les unités de base sont des surfaces spatialement contiguës qui peuvent être attribuées à la même unité de desserte fine et chacune à une prestation écosystémique déterminée. Un point central pour la déduction des unités de base est la modélisation de la desserte fine, qui se base sur la modélisation des chemins de débardage pour des procédés terrestres, aériens et par câble. Les cellules forestières pour lesquelles le débardage s'effectue vers le même tronçon de route sont regroupées en une unité de desserte fine. La structure

des UG sur des unités de base qui dépendent des chemins de débardage modélisés permet de garantir que les interventions pour la gestion de la forêt peuvent toujours être planifiées et exécutées au sein d'une UG. La plupart du temps, seules quelques entrées de données sont nécessaires pour modéliser les UG. Les inputs nécessaires varient en fonction de l'objectif de l'optimisation, mais la base est souvent constituée de données librement disponibles à l'échelle de la Suisse, telles que la surface forestière, le réseau de routes forestières, la topographie, le degré de mélange des forêts ou les services écosystémiques.

Mise en œuvre et application

La collaboration la plus étroite a été établie avec l'exploitation forestière Albula. Dans l'exploitation forestière d'Albula, les UG sont modélisées dans le cadre du renouvellement du plan de gestion, ce qui permet d'harmoniser la planification, l'exécution et le contrôle de la gestion forestière. Le calcul automatisé des UG permet de comparer directement plusieurs variantes. Dans le cas de l'exploitation forestière d'Albula, l'influence de différentes pondérations des deux critères ainsi que de différentes tailles d'UG a été comparée. Le produit intermédiaire de la modélisation est constitué par d'autres cartes qui ont également été jugées très utiles par les praticiens. Il existe ainsi, entre autres, une carte des méthodes de récolte possibles, une carte des unités de base, ainsi que des cartes des lignes de cordée et des chemins de débardage techniquement possibles.

Expérience et perspectives

La modélisation avec différents paramètres a montré que le calcul basé sur l'informatique se déroule de manière fiable et correcte dans différentes conditions. Néanmoins, une modélisation ne peut jamais représenter toute la réalité. Les résultats dépendent fortement de la qualité des données d'entrée prises en compte. Le jeu de données de la desserte forestière, qui doit refléter correctement les limites de praticabilité et de portance des routes forestières, joue un rôle central. L'expertise et les connaissances locales des forestiers sont irremplaçables pour l'utilisation des résultats du modèle, ils vérifient les UG et intègrent les aspects que le modèle n'a pas pu prendre en compte. Actuellement, le calcul autonome des UG est déjà possible pour les spécialistes ayant des connaissances suffisantes en informatique. Notre objectif à long terme est de créer un outil largement utilisable par tous les utilisateurs de la pratique forestière. Le concept des UG, qui rassemble différentes exigences allant de la gestion technique aux critères sylvicoles, peut déjà être utilisé par tous.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Für das Bereitstellen von Biodiversität und den in der Schweiz relevanten Ökosystemleistungen (z.B. Produktion von Holz, Schutz vor Naturgefahren wie Steinschlag, Lawinen und Murgängen, Erholung, Kohlenstoffspeicherung und Trinkwasserfilterung) ist eine Bewirtschaftung der Wälder oftmals notwendig. Durch die forstbetriebliche Planung wird festgelegt, welche Massnahmen zu welchem Zeitpunkt und an welchen Orten innerhalb eines Planungssperimeters ausgeführt werden, um die anvisierten Ökosystemleistungen bereitzustellen. Gleichzeitig führt eine adäquate Planung dazu, dass viele Aspekte der Nachhaltigkeit besser integriert werden können. Klassischerweise umfasst diese Planung vor allem waldbauliche Massnahmen wie etwa Jungwaldpflege, Durchforstungen oder Endnutzungen.

Für die Planung solcher Eingriffe ist es nötig, die Gesamtwaldfläche in kleinere Einheiten aufzuteilen. Deshalb werden Waldflächen, die im Hinblick auf Struktur, Baumartenzusammensetzung und Alter ähnlich sind, wenn möglich als «Bestand» zusammengefasst (Hochwald Bewirtschaftung). Aus betrieblicher Sicht macht das dann Sinn, wenn Eingriffe bestandesweise erfolgen können. Dies ist in Wäldern, in denen die Holzernte auf bodengestützten Holzerntesystemen basiert, einfach umzusetzen, weil bei einem Eingriff keine nennenswerten, spezifischen Fixkosten für die Feinerschliessung anfallen. Anders ist die Situation in stufig bewirtschafteten Voralpen- und Gebirgswäldern, in denen seilgestützte Systeme das Rückgrat der Holzernte bilden. Die Installation eines Seilkrans ist mit Planungsaufwand und relevanten Fixkosten verbunden, weshalb es aus waldbaulicher, wirtschaftlicher und praktischer Sicht wenig zielführend ist, den waldbaulichen Handlungsbedarf und die daraus abgeleiteten Massnahmen nur basierend auf dem aktuellen Waldzustand, respektive den Beständen, zu betrachten. Vielmehr müssen bei der Planung zunächst die waldbaulichen Ziele im Vordergrund stehen und dann bei der technischen Umsetzung unter anderem auch die Feinerschliessung sowie die Topografie berücksichtigt werden. Auch im Dauerwald (Bewirtschaftung mit stufigen Strukturen) hat der einzelne Bestand keine Relevanz für die forstbetriebliche Planung, da die Bewirtschaftung hier einzelstammweise oder in Gruppen erfolgt. Dies gilt auch selbst für Wälder, in welchen die Holzernte auf bodengestützten Mitteln und einer guten Feinerschliessung basiert.

Doch nicht nur in Voralpen-, Gebirgs- und Dauerwäldern fehlt die Ausscheidung sinnvoller Planungseinheiten wie etwa Bewirtschaftungs- und Eingriffseinheiten, sowie die Lage der dazugehörigen Feinerschliessung. Auch in anderen Wäldern ist es von Vorteil schon bei der Planung die möglichen Holzerntemethoden und die vorhandene Infrastruktur zu beachten. Vor allem in kleinflächig parzellierten Gebieten lassen sich so dringend nötige Synergien in der Holzernteplanung nutzen. Als **Bewirtschaftungseinheit, kurz BWE**, wird ein Perimeter verstanden, innerhalb dessen sich die Holzschläge waldbaulich, oder von der Eingriffslogistik her so stark beeinflussen, dass die Planung aufeinander abgestimmt sein muss. Als **Eingriffseinheit** wird ein Waldteil bezeichnet, in welchem waldbauliche Eingriffe zur gleichen Zeit oder kurz aufeinanderfolgend durchgeführt werden.

1.2 Projektziele

Durch den hohen Komplexitätsgrad der Planung und die hohen Fixkosten einzelner Massnahmen ist es besonders in Gelände mit seil- und luftgestützten Rückeverfahren wichtig, die Feinerschliessung konsistent und gesamtheitlich zu berücksichtigen. Ziel des Projektes war es deshalb, methodische Grundlagen zu erarbeiten, die in voralpinen, Gebirgs- und Dauerwäldern das Ausscheidensinnvoller Bewirtschaftungs- und Eingriffseinheiten erlauben. Es soll erreicht werden, dass innerhalb einzelner

BWEs die Feinerschliessung unter Berücksichtigung der Wirkung auf die Biodiversität und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen optimiert werden kann. Dadurch wird die forstbetriebliche Planung zielgerichteter und effizienter.

1.3 Projektorganisation

Um die Ziele zu erreichen, wurde das Projekt nach dem Prinzip vom Groben zum Detail thematisch in **vier Arbeitspakete** (Abbildung 1) unterteilt, die im Folgenden dargestellt werden.

Arbeitspaket 1: Ausscheidung von Bewirtschaftungseinheiten

Innerhalb von BWEs beeinflussen sich waldbauliche Eingriffe gegeneinander stark. Anders ausgedrückt können Massnahmen in unterschiedlichen Einheiten unabhängig voneinander geplant und ausgeführt werden. In diesem Arbeitspaket sollen die methodischen Grundlagen erarbeitet werden, die zur Ausscheidung von BWEs nötig sind. Dazu gehört eine Abklärung der Definition von BWEs, sowie die Beschreibung des Einsatzbereiches. Weiter soll geklärt werden, wie sich die Bewirtschaftungseinheiten anhand von objektiven Kriterien voneinander abgrenzen lassen. Mit den erarbeiteten Kriterien sollte eine Methode entstehen, mit der die räumlich explizite Ausscheidung von BWEs automatisiert und basierend auf massgeschneiderten räumlichen Optimierungsmodellen erfolgt. Folgende Leitfragen wurden formuliert:

- Was sind BWEs und wie werden sie eingesetzt?
- Welche Grundlagen sind nötig, um BWEs räumlich explizit abzugrenzen?
- Wie lassen sich die Grundlagen quantifizieren und zu einem automatisierten Arbeitsablauf für die Ausscheidung von BWEs zusammenfügen?

Arbeitspaket 2: Ausscheidung von Feinerschliessungseinheiten

Mit der Ausscheidung von BWEs ist der grössere räumliche Rahmen für die forstliche Planung gegeben. Das genaue Feinerschliessungslayout und die dazugehörigen **Feinerschliessungseinheiten** sind jedoch noch nicht bekannt. Laut der Definition soll die Feinerschliessung innerhalb einer BWE möglichst in sich abgeschlossen sein. Die Modellierung darauf abzielen, dass eine BWE vollständig in **Feinerschliessungseinheiten**, mit jeweils einem zugewiesenen Holzerntekonzept aufgeteilt werden kann. Folgende Leitfragen wurden formuliert:

- Mit welchen Holzerntekonzepten wird eine BWE optimalerweise bewirtschaftet?
- Wie kann innerhalb einer BWE, im Bereich der seil- und luftgestützten Rückeverfahren ein Feinerschliessungslayout (Seillinienlayout) modelliert werden?

Arbeitspaket 3: Zielfunktionen zur Messung von Ökosystemleistungen

Biodiversität und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen kann durch ein unterschiedliches Layout der Feinerschliessung und Eingriffseinheiten beeinflusst werden. Zum Beispiel spielt es im Gebirge eine grosse Rolle, wie Seillinien im Hang angelegt sind. Senkrecht zur Falllinie können sie die Lawinenbildung begünstigen und sind im Landschaftsbild sichtbarer für die Bevölkerung. Basierend auf den von Bont et al. (2019) entwickelten Zielfunktionen für die Modellierung von Seillinien, sollten in diesem Arbeitspaket im gleichen Stil Wechselwirkungen zwischen dem Seillinienlayout und der Bereitstellung weiterer Ökosystemleistungen quantifiziert werden. Besonders der Einfluss auf den Schutz vor Naturgefahren und das Landschaftsbild sollten mit Zielfunktionen versehen werden, anhand derer ein bestehendes Feinerschliessungslayout bewertet werden, oder ein neu modelliertes Layout optimiert werden kann. Folgende Leitfragen wurden formuliert:

- Welche Ökosystemleistungen werden vom Layout der Feinerschliessung beeinflusst?
- Wie quantifiziert sich dieser Einfluss?

- Wie kann die bestehende Modellierung des Seillinienlayouts (AP2) basierend auf ihrem Einfluss auf die Bereitstellung von Ökosystemleistungen optimiert werden?

Arbeitspaket 4: Störereignisse und klimasensitive Waldbewirtschaftung

Für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen und die damit einhergehende forstliche Planung stellt der Klimawandel mit möglichen einhergehenden Veränderungen eine grosse Herausforderung dar. Primär sollen BWEs möglichst langfristig bestehen. In Ausnahmen kann es jedoch Sinn machen, die BWEs anzupassen, etwa wenn nach einem extremen Schadereignis andere Holzerntemethoden eingesetzt werden müssen als ursprünglich geplant. Ziel dieses Arbeitspaketes war es die Grundlagen zu erarbeiten, damit beim Design der BWEs sowie beim Workflow diesen Aspekten Rechnung getragen wird.

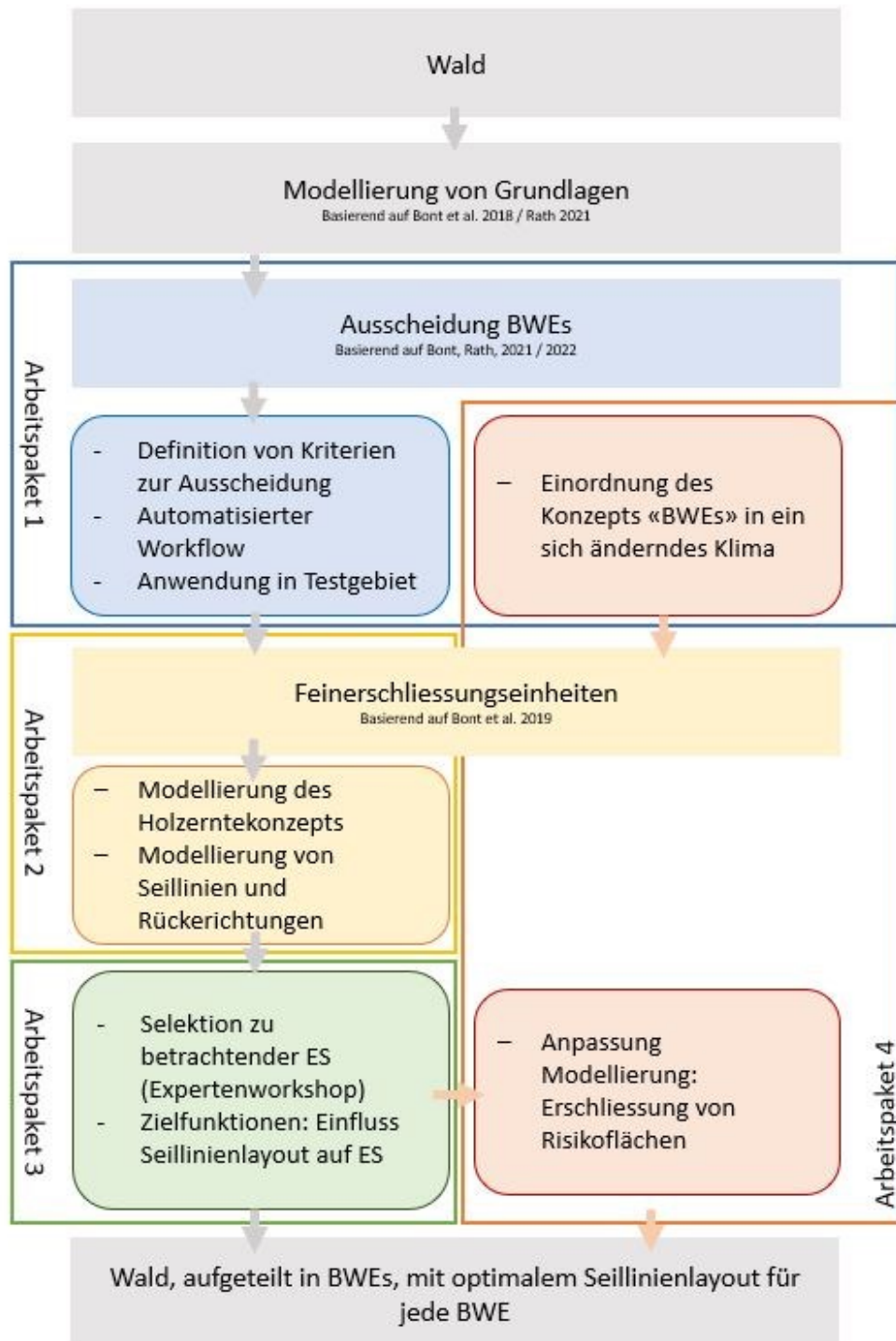


Abbildung 1: Darstellung des Workflows über alle vier Arbeitspakete.

2 Methoden und Material

Während der Bearbeitung der Arbeitspakete stellte sich heraus, dass die vier Teile nur schwer strikt voneinander zu trennen sind. Vor allem die Ausscheidung von Feinerschliessungseinheiten (AP2) und die Ausscheidung von BWEs (AP1) sind stark miteinander verbunden, weshalb der Projektablauf laufend abgesprochen, validiert und angepasst wurde. Dies war vor allen Dingen durch den frühen Einbezug verschiedener Experten und Partner aus der Praxis bereits zu Beginn des Projektes möglich. Von ihnen haben wir wertvolle Rückmeldungen zum methodischen Vorgehen bekommen und es entstand ein äusserst konstruktiver und konstanter Austausch.

Grundsätzlich orientierte sich das methodische Vorgehen an den vier Arbeitspaketen. Die Definition und Ausscheidung von BWEs stellte sich als grösster und ausführlichster Teil der Arbeiten heraus (Kapitel 2.1). Stark damit verknüpft war die Ausscheidung von Feinerschliessungseinheiten für die Holzernte (Kapitel 2.2). Ein weiterer Teil diente der Anpassung und Entwicklung von Zielfunktionen zur Bewertung eines Seillinienlayouts (Kapitel 2.3). Im letzten Teil wurden Lösungen gesucht, wie ein erhöhtes Windwurfrisiko und eine klimaangepasste Bewirtschaftung in den Ablauf der Ausscheidung von BWEs und der Bewertung des Seillinienlayouts eingebracht werden können (Kapitel 2.4). Entwickelt und getestet wurde der Workflow am Beispiel von zwei Testgebieten. Hier stellten sich die Projektpartner, der Kanton Graubünden und der Kanton Zug mit Daten und Testbetrieben zur Verfügung (Kapitel 2.5 und Kapitel 2.6). Am intensivsten war die Zusammenarbeit mit dem Kanton Graubünden.

2.1 Definition und Ausscheidung von BWEs

Einheiten wie die BWEs werden in der forstlichen Planung schon lange verwendet, so zum Beispiel in Form von Abteilungen im Hochwaldbetrieb. Während Abteilungen allerdings nicht im Dauerwald oder auch im Schutzwald des Alpenraums verwendet werden können, sind BWEs die überall anwendbare Weiterentwicklung des Konzepts. In der Schweizer Forstpraxis haben solche Flächeneinheiten viele Namen und leicht unterschiedliche Definitionen erhalten. Waldzellen, Betriebsklassen, Eingriffseinheiten und Bestände sind alles Konzepte für Arten der Planungsflächen im Wald. Für die neu erarbeitete Methode haben wir den Namen «**Bewirtschaftungseinheiten**», «**BWEs**», für die Planungsflächen ausgewählt. Hintergrund des Projekts, die Definition und die Ausscheidung von Planungseinheiten neu aufzurollen war der Wunsch der Partnerkantone, eine einheitliche und objektive Definition, sowie Methode zur Ausscheidung zu schaffen.

Da der Anstoss zum Projekt aus der Waldplanungspraxis kam, sowie das Produkt auch angewendet werden soll, wurde viel Wert auf den Einbezug von Anwendern und Experten gelegt. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden zuerst in einer **Literaturrecherche** die Grundlagen zu bisher in der Schweiz und im Ausland verwendeten Planungsflächen zusammengetragen (Rath 2021). Ausserdem wurden Faktoren gesammelt, die für die Ausscheidung von BWEs wichtig sein könnten.

Als nächstes wurde der Kontakt zu sechs Personen aus Forstbetrieben und der kantonalen Planung gesucht, um einen (wenigstens stichprobenartigen) Einblick in die gängige Praxis und ihre Bedürfnisse bezüglich Planungseinheiten zu erhalten. Im Besonderen standen die Verantwortlichen der Forstbetriebe Suhrental-Ruedertal, Kt. AG, (ehemals Muhen-Hirschtal-Holziken), Homberg-Schenkenberg, Kt. AG und des Kantons und Staatsforstbetriebs Zug für detaillierte **Gespräche** zur Verfügung. Darauf aufbauend wurde im Rahmen des Projekts eine Masterarbeit geschrieben, welche sich intensiv mit der Definition und einer Methode zur Ausscheidung von BWEs auseinandergesetzt hat (Rath 2021). Im April 2022 wurde dann das bisherige Konzept der BWEs, deren Anwendung und Ausscheidung im Rahmen eines **Workshops** vorgestellt und verfeinert (Abbildung 2). Der Workshop mit 12 Teilnehmenden aus Forstbetrieben, kantonalen Verwaltungen, dem BAFU, der AG WaPlaMa,

der Forschung und Lehre stellte den Auftakt einer äusserst produktiven und wertvollen Zusammenarbeit im weiteren Verlauf des Projekts dar (siehe auch Rath et al. 2022).



Abbildung 2: Experten der Waldplanung von der nationalen bis zur betrieblichen Ebene diskutieren über die Einflussfaktoren bei der Ausscheidung und Anwendung von BWEs.

Im Nachgang des Workshops wurden zudem vertiefte **Expertengespräche** mit den Teilnehmenden des Workshops geführt. Einige Antworten der Teilnehmenden wurden pro Organisation zusammengefasst. Zusammen mit den Ergebnissen aus den vorhergegangenen Interviews mit Förstern gab dies somit eine auszuwertende Datengrundlage von 11 Positionen, welche schliesslich massgeblich zur Erarbeitung einer Definition von BWEs beigetragen hat.

Parallel zum Workshop und den Expertengesprächen wurden mit den zwei Partnerbetrieben Albula im Kanton Graubünden und dem Staatsforstbetrieb des Kantons Zug massgeschneiderte Methoden **zur Ausscheidung der BWEs** entwickelt. Insbesondere der Betrieb Albula im Kanton Graubünden diente dem Testen der Methode. Erste Ergebnisse wurden in einem Gespräch mit der Arbeitsgruppe Betriebsplanung des Kantons diskutiert und die Methodik daraufhin weiter verfeinert. Durch die Literaturrecherche und der Kontakt zur Praxis entstand der konzeptionelle Rahmen mit Definition, Einsatzbereich, Ansprüchen an und der Anwendung von BWEs. Die Entwicklung der effektiven Methode zur Ausscheidung von BWEs beruhte auf der Vorarbeit von Bont et al. (2019).

2.2 Ausscheidung von Grundeinheiten

Als Grundeinheit wird ein Waldteil bezeichnet, der über die gesamte Fläche ähnliche oder gleiche Eigenschaften (abhängig von der Zielsetzung: Ökosystemleistungen, Waldstruktur, etc.) aufweist, und in welchem waldbauliche Eingriffe zur gleichen Zeit oder kurz aufeinanderfolgend durchgeführt werden, also die Holzernte bzw. die Waldbewirtschaftung zwingend aufeinander abgestimmt werden muss. Sind beispielsweise für einen Betrieb das Holzernteeinzugsgebiet und die Ökosystemleistungen relevant für die Ausscheidung von BWEs, dann sind die Grundeinheiten räumlich zusammenhängende Flächen, welche den gleichen Holzernteeinzugsgebiet und Ökosystemleistungen zugeordnet werden können.

Die Grundeinheiten dienen einerseits als Grundlage für die Ausscheidung der BWEs (die BWE wird aus Grundeinheiten zusammengesetzt, darum der Name **GRUNDEinheit**), andererseits als feinere Unterteilungseinheit bei den fertig ausgeschiedenen BWEs.

Währenddem zahlreiche Eigenschaften wie Ökosystemleistungen, Standort, Waldstruktur über gute Datengrundlagen verfügen und in der Schweiz praktisch überall flächendeckend vorhanden sind, fehlen entsprechende Grundlagen für die Holzernte (Feinerschliessungseinheiten, Erntemethoden, Holzernteeinzugsgebiete). Der Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes bestand daher darin, diesbezüglich Grundlagen zu entwickeln.

Im Fall der Holzernte handelt es sich bei Grundeinheiten um Feinerschliessungseinheiten (Abbildung 3), bei denen die Holzerntemassnahmen aufeinander abgestimmt werden müssen. Um die Feinerschliessungseinheiten auszuschneiden wird der Geländetransport des Holzes modelliert und Waldzellen (z.B. 10m x 10m Auflösung), bei welchem der Geländetransport zum gleichen Waldstrassensegment erfolgt, werden zusammengefasst.

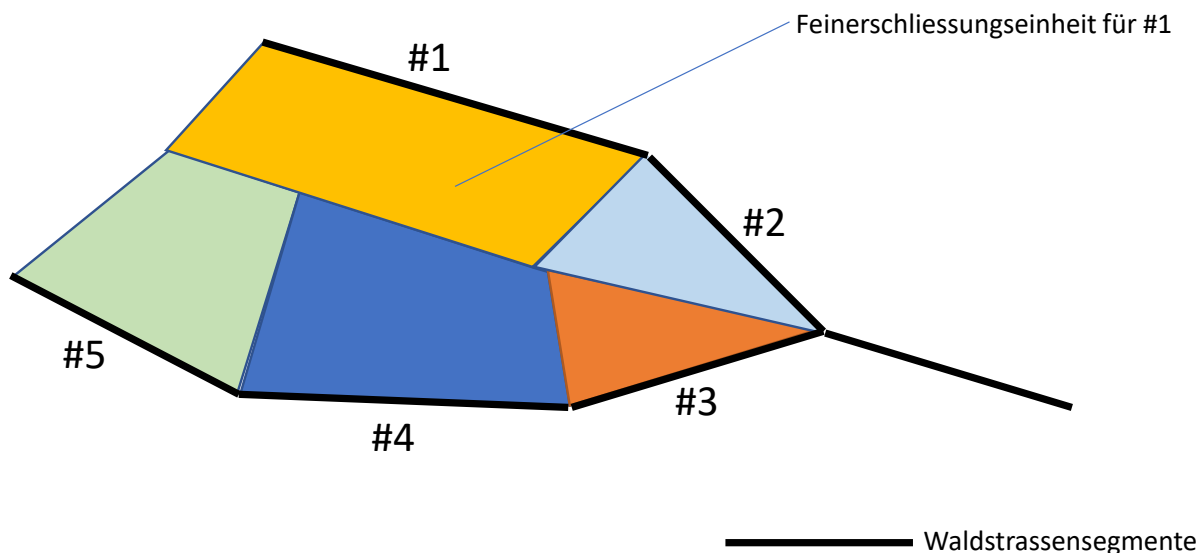


Abbildung 3: Konzept der Feinerschliessungseinheit. Jeder Punkt im Wald wird zu einem Waldstrassensegment zugewiesen, über welches auch der Abtransport des Holzes erfolgt.

2.2.1 Feinerschliessungseinheiten für befahrbares Gelände

Ob ein Fahrzeug im Gelände fahren kann, hängt von der [I] Neigung des Geländes, [II] von der Tragfähigkeit des Untergrundes sowie [III] von der Oberflächenrauigkeit ab. Da Daten zu Punkt [III] nicht flächig verfügbar sind, erfolgt die Analyse aufgrund der beiden ersten Faktoren, sowohl für die Flächen im Wald auf Grundlage der Verdichtungsrisikokarte bzw. der Bodeneignungskarte (BFS 2000).

Aufgrund des Vergleichs der maximalen Steigfähigkeit von Fahrzeugen auf verschiedenen Bodentypen mit der maximalen Hangneigung (Falllinie) kann die befahrbare Fläche ausgeschieden werden. Allerdings muss zusätzlich noch sichergestellt werden, dass die einzelnen befahrbaren Flächen auch mit einer Strasse verbunden sind. Es nützt nichts, wenn man irgendwo abgeschottet ein paar „befahrbare“ Flächen hat, aber die Flächen rundherum nicht befahrbar sind und das Holz deswegen nicht abtransportiert werden kann. Deswegen wird geprüft, ob jede einzelne befahrbare Waldfläche durch andere befahrbare Flächen mit einer lastwagenbefahrbaren Strasse verbunden ist. Die Prüfung erfolgt mittels einer Netzwerkanalyse mit 8er Nachbarschaften. Die Netzwerkanalyse dient auch dazu die Rückedistanzen zu berechnen. Es wird nicht nur die kürzeste Distanz zur Strasse evaluiert, sondern ein realistischer Rückeweg modelliert, der überall befahrbar ist.

Die Zuordnung einer Waldzelle zu einem Strassensegment erfolgt aufgrund der kürzesten Distanz. Das Skript wurde so aufgesetzt, dass als Input u.a. ein Raster mit befahrbaren Waldzellen eingegeben werden muss. Dies ermöglicht es auch selbst noch 'nicht befahrbare Zellen' zu definieren. Dies können beispielsweise Flussläufe oder sonstige Hindernisse sein. Abbildung 4 zeigt exemplarisch modellierte Feinerschliessungseinheiten für einen Ausschnitt im Kanton Aargau.

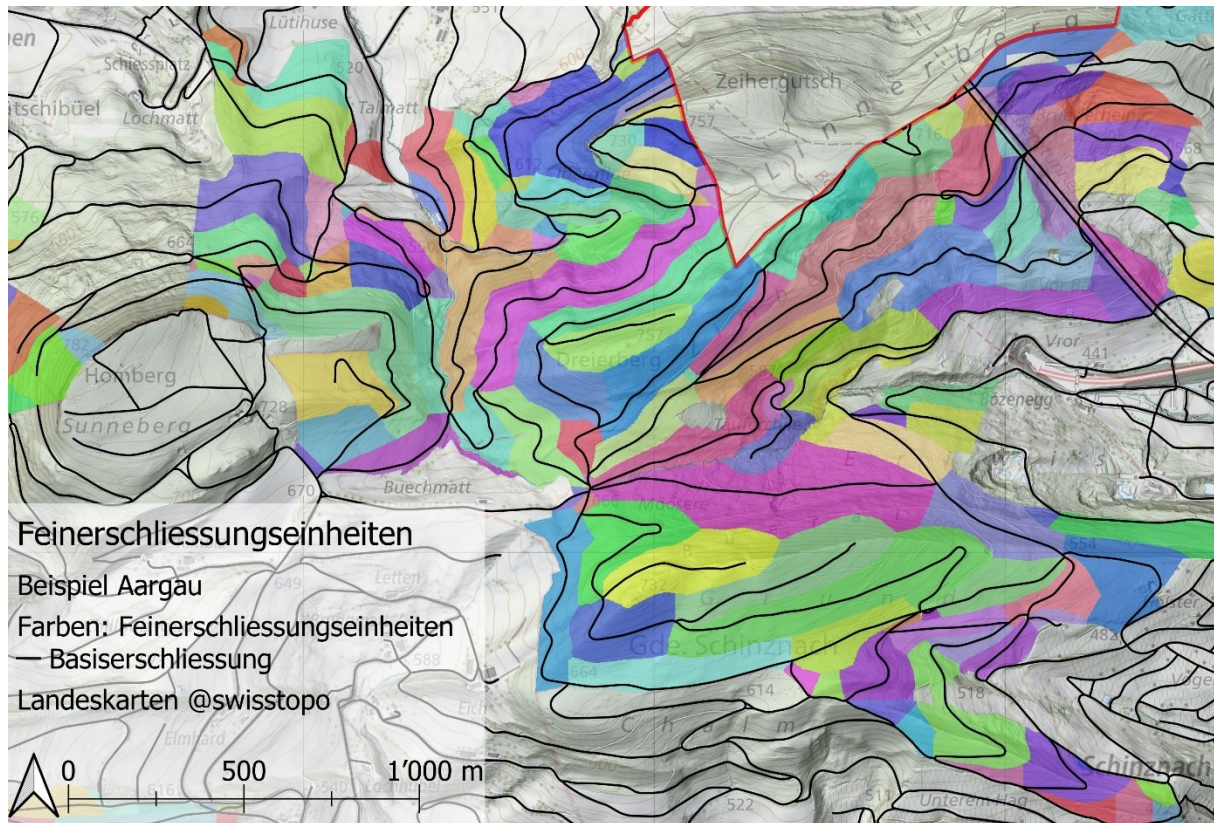


Abbildung 4: Beispiel von modellierten Feinerschliessungseinheiten.

2.2.2 Seilgestütztes Gelände

Die Erreichbarkeit von Waldflächen mittels Seilkran erfolgt aufgrund verschiedener Seilkran Rückekategorien (Tabelle 1). Seillinien länger als 1500m werden nicht berücksichtigt, da mit diesen kaum eine effiziente Holzernte möglich ist. Die Unterscheidung erfolgt aufgrund wirtschaftlicher, ökologischer und ergonomischer Aspekte. Ein Mobilseilkran (Seilkran Kat. 1) ist wirtschaftlich effizienter als ein konventioneller Seilkran (Seilkran Kat. 1), und Bergauftransport ist bezüglich Arbeitssicherheit, Effizienz und Bestandesschonung dem Bergabtransport vorzuziehen.

Mit Seilsystemen erreichbare Waldflächen werden aufgrund der Modellierung von einzelnen Seillinien identifiziert. Damit ist sichergestellt, dass Transportgrenzen (z.B. Kreten) für Seilkräne identifiziert werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 5 illustriert. Für jedes Waldstrassenstück, welches als Installationsplatz in Frage kommt, werden im Abstand von ca. 30m einzelne Punkt-Installationsplätze ausgeschieden (a). Von jedem Installationsplatz aus werden kreisförmig potenzielle Seillinien angelegt (b) und für jede einzelne Seillinie deren Machbarkeit und maximale Seillinienlänge evaluiert (c).

Tabelle 1: Übersicht Rückekategorien im Seilkrangelände.

Differenzierung	Beschreibung
Seilkran Kat. 1 bergauf	Seilkran mit Bergauftransport mit einer maximalen Rückedistanz 400m zur Waldstrasse. Entspricht dem Mobilseilkran System (Kombiseilgerät). Vorinstallierte Anker oder Möglichkeit der Verankerung an Bäumen muss gegeben sein.
Seilkran Kat. 1 bergab	Seilkran mit Bergabtransport mit einer maximalen Rückedistanz 400m zur Waldstrasse. Entspricht dem Mobilseilkran System (Kombiseilgerät). Vorinstallierte Anker oder Möglichkeit der Verankerung an Bäumen muss gegeben sein.
Seilkran Kat. 2 bergauf	Seilkran mit Bergauftransport mit einer maximalen Rückedistanz 1500m zur Waldstrasse. Entspricht dem konventionellen Seilkran. Vorinstallierte Anker oder Möglichkeit der Verankerung an Bäumen wird nicht vorausgesetzt.
Seilkran Kat. 2 bergab	Seilkran mit Bergabtransport mit einer maximalen Rückedistanz 1500m zur Waldstrasse. Entspricht dem konventionellen Seilkran. Vorinstallierte Anker oder Möglichkeit der Verankerung an Bäumen wird nicht vorausgesetzt.
Helikopter	Rücken mit Helikopter. Keine Restriktionen. Kategorie: Nicht erschlossen

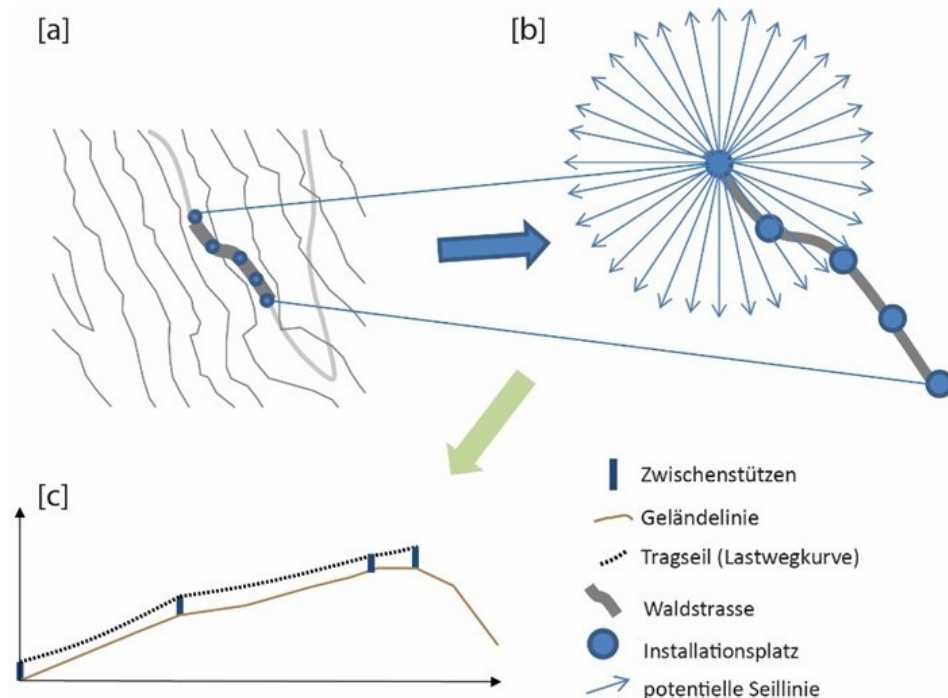


Abbildung 5: Analyse der Erreichbarkeit mit Seilkränen. Für jedes Waldstrassenstück werden im Abstand von ca. 30m einzelne Installationsplätze ausgeschieden (a). Von jedem Installationsplatz aus werden kreisförmig potentielle Seillinien angelegt (b) und für jede einzelne Seillinie deren Machbarkeit und maximale Seillinienlänge evaluiert (c).

Die maximale Linienlänge wird durch [I] die Länge des Tragseils, [II] durch Hindernisse im Längenprofil und [III] durch die physikalische Machbarkeit (Topographie des Geländes) limitiert. Als Hindernis gilt ein Objekt, über welches keine Seillinie gespannt werden kann: Siedlungen, Hochspannungsleitungen, Seilbahnen, Eisenbahnlinien und wichtige Strassen.

Die physikalische Machbarkeit ist abhängig von der Topographie, seilmechanischen Parametern und der Anzahl der Seilfelder (Als ein Seilfeld wird der Abschnitt zwischen 2 Stützen bezeichnet), die gebaut werden dürfen. Die maximale Linienlänge wird aufgrund der physikalischen Machbarkeit gemäss dem Algorithmus in Abbildung 6 evaluiert. Die Prüfung der Machbarkeit jedes einzelnen Feldes (Berechnung der Lastwegkurve und der auftretenden Kräfte) erfolgt nach einer vereinfachten und linearisierten Methode (nach Pestal 1961). Die Eingangsparameter für die Modellierung der Lastwegkurve sind in Tabelle 2 aufgelistet.

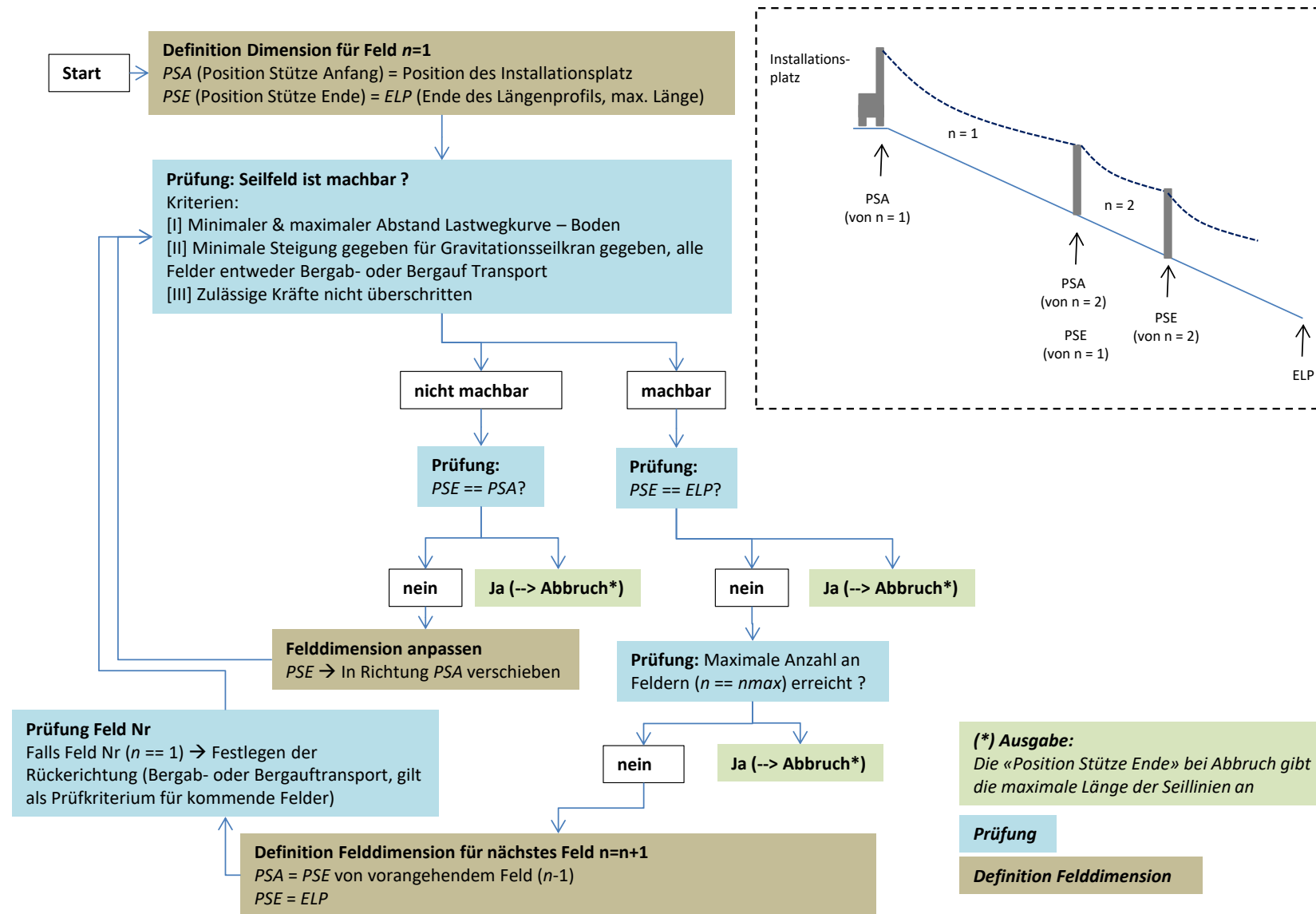


Abbildung 6: Algorithmus zur Evaluation der maximalen Länge einer Seillinie.

Tabelle 2: Eingangsparameter für die Prüfung der Machbarkeit von Seillinien (Modellierung der Lastwegkurve).

Parameter: Beschreibung und Masseinheit	Parameterwerte [SK 1000 / SK 1500]
Gewicht der Wanderlast [kN]	25 / 20
Gewicht des Tragseils [kN/m]	0.0228 / 0.02
Querschnittsfläche des Tragseils [mm ²]	380 / 209
E-Modul [kN/mm ²]	100 / 160
Wärmeausdehnungskoeffizient [K ⁻¹]	0.000011
Anfangsseilkraft [kN], bei Talstation	100 / 120
zulässige Seilkraft [kN]	179
Federkonstante des Ankers [kN/m]	inf
Gewicht des Zugseiles links [kN/m]: Bei Grav.betr. i.d.R. = 0	0.0058
Gewicht des Zugseiles rechts [kN/m]	0.0058
Rechenverfahren der Seilmechanik: 0 = Pestal, 1 = Zweifel	0
Maximal mögliche Masthöhe [m]	14
Minimale Masthöhe [m]	8
Delta der Masthöhe, Abstufungen in der Masthöhe [m]	1
Maximale Anzahl an möglichen Zwischenmasten []	5 / 6
Maximale schräge Trassenlänge der Seillinie [m]	1000 / 1500
Minimaler Abstand zwischen dem Boden und der Seillinie [m]	5.6
Maximaler Abstand zwischen dem Boden und der Seillinie [m]	70
Masthöhe am Anfang [m], (Masten auf Mobilseilkran Fahrzeug)	11
1 = Gravitationsseilkran, 0 = kein Gravitationsseilkran	1
Minimaler Abstand zwischen 2 Masten [m]	30
Maximaler Abstand zwischen 2 Masten [m]	400 / 1500
Minimale Länge, ab welcher ein Seilkran gebaut wird [m]	100
Breite des Seilkorridors (Arbeitsfeldbreite) [m]	100
Minimaler Gradient damit das Seiltrasse noch konstruiert werden kann, dient dem Vorausscheiden von möglichen potentiellen Seilkorridoren	

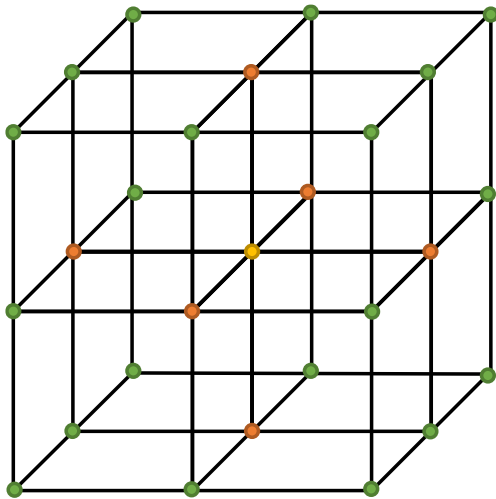
Bei der Ausscheidung der Verfahren des Seilkrans wird zwischen Bergab- und Bergauftransport unterschieden, wobei der Bergauf- dem Bergabtransport vorzuziehen ist (weniger Bestandesschäden, einfachere Installation des Tragseils, kostengünstiger). Bei den Erntesystemen werden Seilkräne mit zwei verschiedenen maximalen Tragseillängen berücksichtigt: ein Seilsystem bis zu 400m und eines mit 1500m maximaler Tragseillänge.

Bei der Zuweisung der Waldparzellen zu den Waldstrassensegmenten gilt folgende Priorisierung: (Kategorien gemäss Tabelle 1)

1. Seilkran Kat. 1 bergauf
2. Seilkran Kat. 1 bergab
3. Seilkran Kat. 2 bergauf
4. Seilkran Kat. 2 bergab

2.2.3 Luftgestütztes Gelände

Bestehende Modelle für die Modellierung der Helikopterernte wie Sessions and Chung (2003) erweisen sich leider als ungenügend. Um für die einzelnen Waldzellen die besten Abladeplätze für den Helikoptertransport zu identifizieren, wurde ein dreidimensionales Netzwerk erstellt, bei welchem eine 26er Nachbarschaft implementiert wurde (Abbildung 7). Die Kantenlänge der 'Würfel' im Netzwerk betrug 100m. Es wurden nur Knoten zugelassen, die sich über der Geländeoberfläche befinden. Vertikale Distanzen wurde im Vergleich mit horizontalen Distanzen mit dem Faktor 10 gewichtet (In Anlehnung an das in Heinimann and Caminada 1996 veröffentlichte Produktivitätsmodell).



- Zentrums-knoten
- Knoten 6 er Nachbarschaft
- Knoten 26 er Nachbarschaft

Abbildung 7: Schematische Darstellung des 3D Netzwerkes. Wegen der Übersichtlichkeit halber wurden nicht alle Verbindungen im Netzwerk (Kanten) eingezeichnet.

Dieses Modell ermöglicht es die Waldflächen, demjenigen Strassensegment zuzuweisen, bei welchem der zeitliche Aufwand für den Flug am geringsten ist.

2.2.4 Synthese zu Holzernteeinzugsgebieten

Um auch im gemischten Gelände (mit verschiedenen Extraktionsmethoden) flächendeckende Feinerschliessungseinheiten zu erhalten, wurden die errechneten Feinerschliessungseinheiten für die einzelnen Systeme in einem nächsten Schritt aggregiert. Dies erfolgte mit der folgenden Priorität:

1. Bodengestützte Systeme
2. Seilgestützte Systeme
3. Luftgestützte Systeme

Die sich daraus ergebene Karte der Feinerschliessungseinheiten hat sich für die später folgende Optimierung als zu detailliert erwiesen. Deswegen wurde eine Aggregation in Holzernteeinzugsgebiete ausgearbeitet.

Bei einem Holzernteeinzugsgebiet werden die Feinerschliessungseinheiten entlang der Transportrichtung des Holzes aggregiert, vergleichbar mit hydrologischen Einzugsgebieten. Für dessen Herleitung wurde in einem ersten Schritt der Holzfluss entlang der Waldstrassen modelliert, um die Nachbarschaften zu bestimmen (detaillierter Beschrieb siehe unten). Anschliessend wurden alle

Feinerschliessungseinheiten zwischen benachbarten Kreuzungen zu einem Holzernteeinzugsgebiet zusammengefasst.

Die Grundlage für Modellierung der Flüsse im Strassennetz bildet das Waldstrassennetz, in welchem Informationen über die Lastwagenbefahrbarkeit der Strassen gegeben sind. Die Lastwagenbefahrbarkeit kann entweder von einem kantonalen Datensatz kommen (GR hat beispielsweise ein sehr detaillierten Datensatz), vom nationalen LFI Datensatz abgeleitet werden oder vom jeweiligen Revierförster gutachtlich beurteilt werden. Untenstehend ist die Unterteilung aufgelistet, wie sie im Kanton Aargau vorhanden ist:

- **Strasse/Weg, mit Personenwagen befahrbar:** Mindestens 1,80 m breit. Bei normalen Verhältnissen mit PW befahrbar. Gute Wege (mit Kofferung) für Land- und Forstwirtschaft. Natur- oder Hartbelag möglich.
- **Strasse/Weg, Lastwagenbefahrbar:** Lastwagenbefahrbare Strassen/Wege müssen eine Mindestbreite von 2.5 m (besser 3m bis 3.5m) aufweisen und ihr Oberbau muss für Fahrzeuge mit einer Achslast von 10 t dimensioniert sein und diesen Standard aktuell erfüllen.

Für die Netzwerkanalysen werden **nur die lastwagenbefahrbaren Strassen/Wege** verwendet, da nur auf diesen der Holztransport stattfinden kann.

An den Hauptstrassen wurden „Anschlusspunkte“ (Anschlusspunkte ans übergeordnete Strassennetz) definiert (Grundlage z.B. LFI Anschlusspunkte), bis zu welchen der Abtransport betrachtet wird (Systemgrenzen). Von jedem Strassensegment wird nun die beste Route (in der Regel die kürzeste Route) zum Anschlusspunkt bestimmt. Auf diese Weise werden auch die Nachbarschaften im Netzwerk bekannt: es ist bekannt, welches Strassensegment in der Flussrichtung des Holzabtransport an das vorhergehende Strassensegment anschliesst.

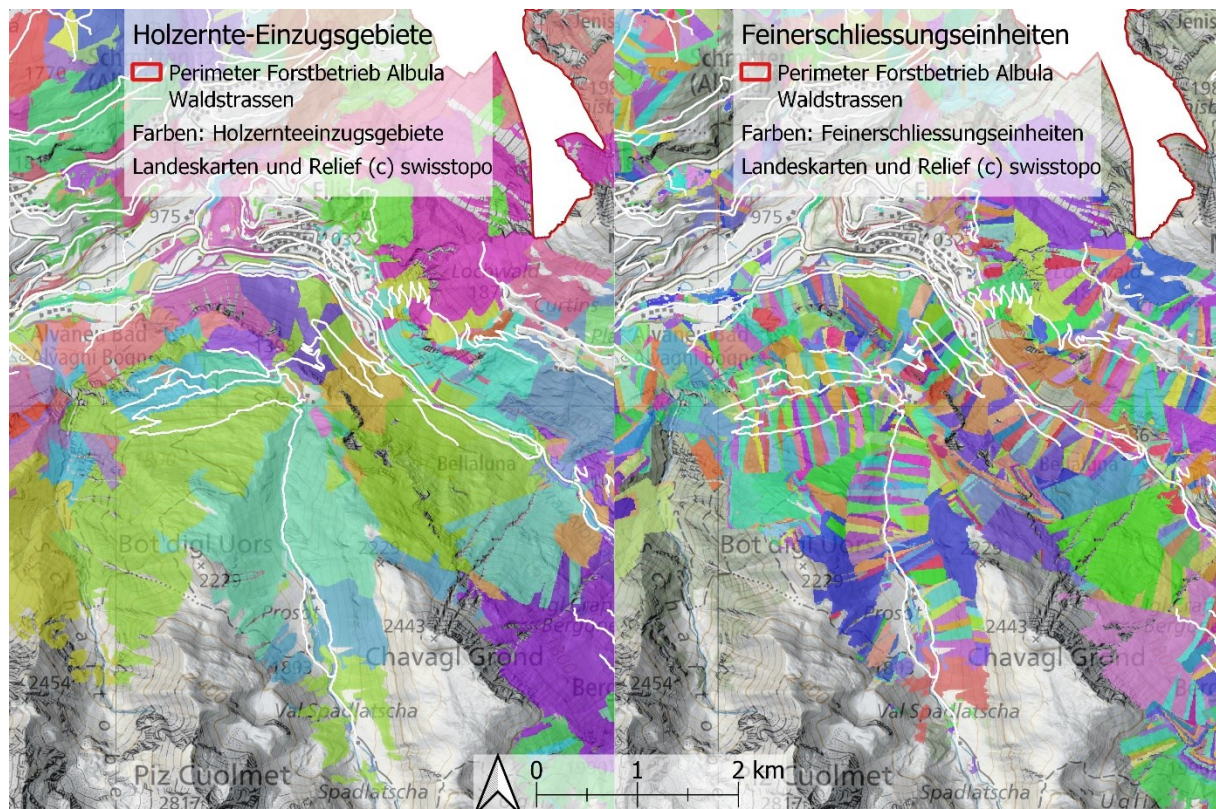


Abbildung 8: Links: Holzernte-Einzugsgebiete im Forstbetrieb Albula. Pro Strassenabschnitt wird zusammengefasst aus welchem Gebiet Holz abgeführt wird, dies umfasst sowohl boden-, seilgestützte als auch luftgestützte Methoden. Rechts: Die Feinerschliessungseinheiten, die als Grundlage dienen.

Auf diese Weise konnten jeweils alle Strassensegmente identifiziert werden, die sich zwischen Kreuzungen befinden. Die entsprechenden Waldparzellen, welche auf Strassensegmente eines solchen Strassenabschnitts (zwischen 2 Kreuzungen) gerückt werden, werden zu einem Holzernteeinzugsgebiet zusammengefasst. Die Holzernteeinzugsgebiete haben sich für die Ausscheidung von BWEs als sehr wichtig erwiesen.

2.3 Seillinienlayout und Ökosystemleistungen

Im Zuge des Projekts sollte das Seillinienlayout anhand seines Einflusses auf die Biodiversität und die Bereitstellung bestimmter Ökosystemleistungen optimiert werden. Hierfür wurden zuerst die relevanten Ökosystemleistungen zusammengetragen, und dann ein möglicher Zusammenhang mit dem Seillinienlayout beschrieben und quantifiziert. Die relevanten Ökosystemleistungen innerhalb der Systemgrenze des Forstbetriebs im Seilgebiet wurden am schon erwähnten Workshop im April von den Planungsexperten zusammengestellt. Grundlagen zu den Zusammenhängen zwischen dem Seillinienlayout und Ökosystemleistungen sind in Bont et al. (2019) beschrieben. Durch eine zusätzliche Literaturrecherche wurde evaluiert, ob und wie die bekannten Zielfunktionen zum Zusammenhang zwischen Seillinienlayout und Ökosystemleistungen ergänzt werden müssen.

Die hier abgeleiteten Indikatoren flossen ebenfalls in die Modellierung der seilgestützten Feinerschliessungseinheiten ein.

2.4 Resilienz im Klimawandel

Bei der Projektausarbeitung wurden von Seiten der Praxis mehrfach betont, dass Bewirtschaftungseinheiten der langfristigen forstlichen Planung dienen sollten und auch nach Störungen Gültigkeit haben sollten. Infolgedessen lag der Schwerpunkt auf den anderen Arbeitspaketen. Im Sinne von AP4 wurde der ganze Workflow entsprechend angepasst, so dass nach Störungen innert kurzer Zeit gegebenenfalls neue BWEs berechnet werden können. Zusätzlich wurde ein Indikator entwickelt, welcher die Indikatoren aus AP 3 ergänzt und eine gesamtheitliche Feinerschliessungsplanung unter Berücksichtigung von Dringlichkeiten (z.B. nach einem Sturm) ermöglichen soll.

2.5 Datengrundlagen

Vor allem die Kriterien zur Ausscheidung der BWEs beruhen auf sehr vielen Grundlagendaten. Immer wenn es möglich war, wurden frei verfügbare, nationale, hochaufgelöste Datensätze verwendet. In einigen Fällen musste jedoch auf kantonale Daten zurückgegriffen werden, die nur auf Anfrage erhältlich sind. Sämtliche Daten wurden in Raster mit einem einheitlichen Perimeter und einer einheitlichen, deckungsgleichen Zellgrösse umgewandelt. Als Referenz für diese Umwandlung wurde das zugrundeliegende Digitale Höhenmodell (DHM) Raster verwendet, sowie die Zellgrösse auf 2m, respektive 10m in Graubünden angepasst. Die Datenverarbeitung erfolgte mit Python oder QGIS. In der folgenden Tabelle 3 sind die Basisdaten, auf denen die Modellierungen aufbauen, aufgeführt, sowie deren Verarbeitungen beschrieben. Analog dazu finden sich die Grundlagen für die einzelnen Kriterien in Anhang 1.

Tabelle 3: Grundlegenden Daten, auf denen die Modellierungen aufbauen, und ihre Verarbeitung.

Basisdaten	
Input	
<ul style="list-style-type: none"> - Waldstrassen (Geometrie und Attribut über LKW Befahrbarkeit) / Feinerschliessung - Waldfläche - Digitales Höhenmodell - Perimeter des Betrachtungsgebiets 	
Verarbeitung	
<ul style="list-style-type: none"> - Das DHM mit der Auflösung in 2m oder 10m dient als Grundlage für die Ausdehnung, Auflösung und Zellanordnung sämtlicher Raster, die verwendet werden. - Aus dem DHM wird ein Referenzraster erstellt, dass zur Reklassifizierung sämtlicher anderer Raster dient. - Die Waldstrassen werden vor der Umwandlung in ein Raster in Strassenabschnitte aufgeteilt. Diese Abschnitte erstrecken sich, wenn immer möglich, von Kreuzung zu Kreuzung. 	
Output	
<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Waldfläche» - Raster «DHM» - Raster «Perimeter» - Raster und Vektor «Waldstrassen» 	

2.6 Fallstudiengebiete

Für Gebirgswälder erfolgte die Anwendung der Methode zur Ausscheidung von BWEs im Kanton Graubünden und für Dauerwälder in voralpinen Wäldern im Kanton Zug (Abbildung 9). Die Anwendung ist grundsätzlich auch in Gebieten mit bodengestützten Holzernteverfahren und gemischten Bewirtschaftungsstrategien möglich. Dies wurde in der Masterarbeit getestet. Genauere Ergebnisse sind dort zu finden (Rath 2021).

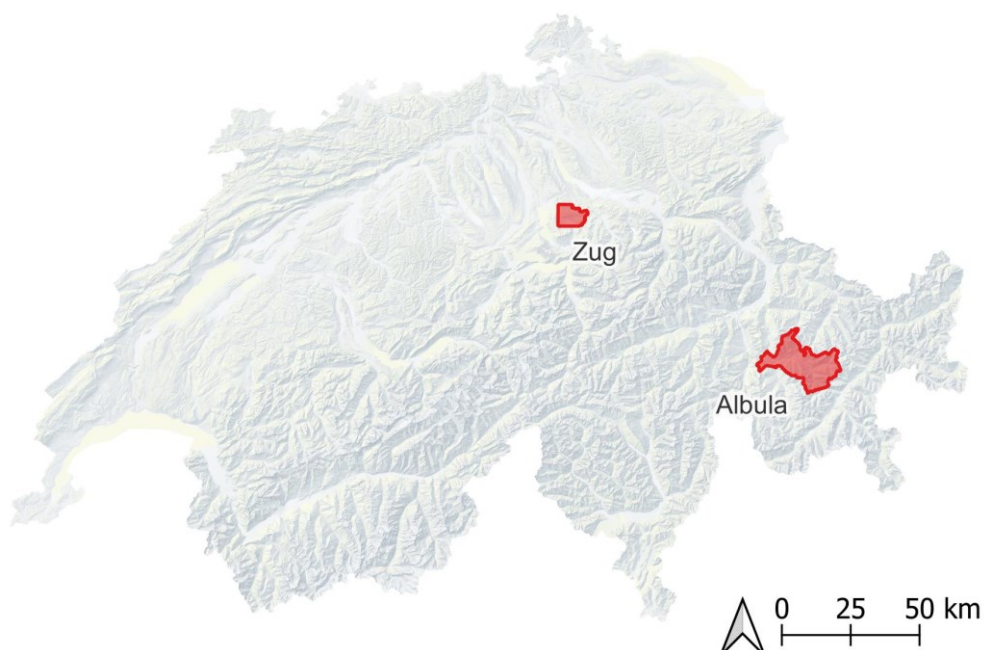


Abbildung 9: Lage der Fallstudiengebiete.

Testgebiet 1: Forstbetrieb Albula

Der Forstbetrieb Albula in Graubünden liegt mitten in den Alpen. Demensprechend werden die meisten Massnahmen auf der Betriebsfläche seilgestützt durchgeführt, was mit einer komplizierten Logistik und einer grossen Bedeutung der vorausschauenden Feinerschliessungsplanung einhergeht. Aus Sicht des Kantons sollen BWEs in Albula mindestens über mehrere Betriebsplanperioden hinweg bestehen bleiben und haben die Aufgabe, die operationelle Planung im schwierigen Gelände zu erleichtern. Perspektivisch verfolgt der Kanton mit den BWEs weitere Ziele:

- Nachhaltigkeitskontrolle: durch Revierfusionen werden die Planungsperimeter immer grösser. Durchschnittswerte (Holznutzung, gepflegt Fläche) ohne eine räumliche Komponente reichen für die Nachhaltigkeitskontrolle nicht mehr aus.
- Aktualisierung der Planungseinheiten (Seillinie durch mehrere Planungseinheiten); Berücksichtigung der Transportgrenzen.
- Feinerschliessungskonzept: Koordination von Massnahmen, Schaffung von Synergien, Vermeidung von Restflächen oder "blockierte" (zu grosse) Schutzwaldperimetern, in welche es zu viele Flächen mit einer geringeren Schutzwirkung und langen Verjüngungszeiten gibt.
- Langfristigkeit: Formulierung von Oberzielen, welche für mehrere Planungsperioden gültig sein müssen, um die waldbaulichen Ziele zu erreichen; zielgerichteter Mitteleinsatz mit einfacher Priorisierung im Fall von Schadereignissen.

Testgebiet 2: Staatswald Kanton Zug

Im Kanton Zug sollen BWEs als Unterstützung der Förster bei der Planung und Zusammenlegung von Holzschlägen dienen. Sie werden jedoch nicht als zwingend einzuhaltende Grenzen in der Bewirtschaftung verwendet. Das Gebiet um den Staatswald des Kantons Zug liegt im Voralpengebiet der Höhrnen. Schwere, rutschgefährdete und nasse Flysch - Böden, sowie teils sehr steile Hänge prägen hier die Landschaft. Vorwiegend wird seilgestützt bewirtschaftet, Teile des Gebiets sind aber von den Waldstrassen aus im Bodenzug (Seilwinde) erschlossen.

3 Ergebnisse

3.1 Definition und Ausscheidung von BWEs

3.1.1 Definition und Einsatzgebiet von BWEs

Eine Bewirtschaftungseinheit – BWE – ist eine Fläche, auf der die forstbetriebliche (Massnahmen-)Planung in sich abgeschlossen erfolgen kann.

In den Expertengesprächen mit den 12 Teilnehmenden des Workshops und drei weiteren Förstern (siehe Praxispartner im Impressum) stellte sich das Bedürfnis nach einer Hilfestellung bei Koordination, Kontrolle und Überblick in der Massnahmenplanung heraus (Abbildung 10). Dies vor allem auch vor dem Hintergrund der Digitalisierung der Planung. Die Ausscheidung von BWEs und die nachfolgende Massnahmenplanung sollen digital und GIS-unterstützt ablaufen. Von dem Einsatz der BWEs erhoffen sich die Anwendenden ausserdem ein effizienteres Arbeiten und dass auf Störungen besser reagiert werden kann (vgl. Pkt «Erhöhte Resilienz bei Störungen»). Teilweise werden die BWEs auch als Kompromiss zwischen Aufsichtsbehörde und der betrieblichen Freiheit in der Planung gesehen. Mit der Nutzung von BWEs soll den minimalen Anforderungen der Behörden Rechnung getragen werden, innerhalb der Einheiten steht es dem Betrieb frei, so zu planen wie er es für richtig hält.

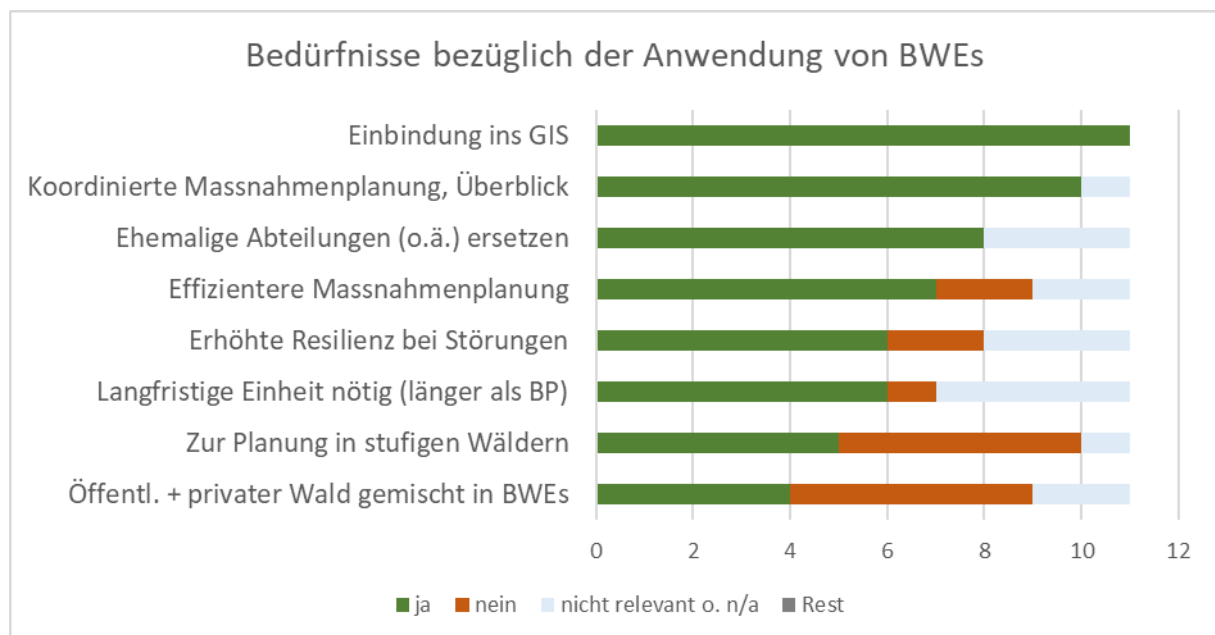


Abbildung 10: Zustimmung und Ablehnung der Planungsexperten aus der Praxis zu verschiedenen Aussagen bezüglich der Anwendung von BWEs.

Aus den Ergebnissen von Literaturrecherche, Workshop und Expertengesprächen konnten zwei hauptsächliche Anwendungen von BWEs herausgearbeitet werden: kleinflächig strategische und grossflächig technische (Abbildung 11, Rath et al. 2021). Darüber hinaus sind das Konzept und die Methode, die hier ausgearbeitet wurden, jedoch auch in allen Zwischenvarianten anwendbar.

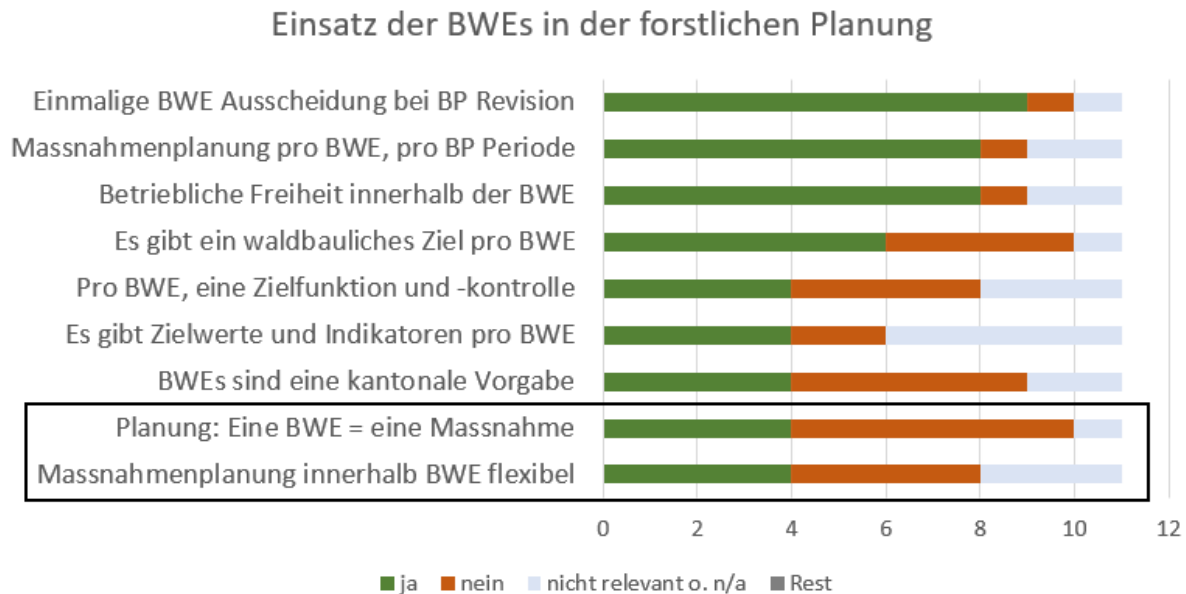


Abbildung 11: Antworten der Planungsexperten bezüglich der genaueren Verwendung von BWEs in der forstlichen Planung auf betrieblicher oder kantonomer Ebene.

Etwa die Hälfte der Befragten sieht die BWEs als Massnahmeneinheit, und als Alternative zur bestandesweisen Bewirtschaftung. Pro Betriebsplanperiode sollen BWEs in der Grösse eines Holzschlags ausgeschieden werden, die noch weitere Kriterien beachten, wie nur die Waldstruktur. So können auch im Dauerwald Massnahmenflächen definiert werden, oder Synergien in der Holzschlagorganisation zwischen Beständen genutzt werden. Bei dieser Art der Anwendung von BWEs ist häufig ein waldbauliches Ziel und das zugehörige Controlling mit der BWE verknüpft.

Die andere Hälfte der Befragten sieht die Stärke der BWEs in der grossflächigen und langfristigen Anwendung. BWEs sollen hier ihre Grundlage in der technischen Organisation von Holzschlägen haben. Diese Sichtweise ist vor allem in steilerem Gelände vorherrschend, in dem die Fixkosten für die Waldbewirtschaftung aufgrund der technisch aufwändigeren Holzerntemethoden hoch sind. BWEs sollen hier oft länger als eine Betriebsplanperiode bestehen bleiben, um auch dem längeren Bewirtschaftungssturnus gerecht zu werden. Hier kann die BWE gut viele einzelne Massnahmenflächen und mehr als eine waldbauliche Zielgrösse umfassen.

3.1.2 Übersicht Workflow Ausscheidung BWEs

BWEs sollten basierend auf objektiven Kriterien, möglichst automatisiert ausgeschieden werden können. Genauso ist der breite Einsatzbereich darauf angewiesen, dass die BWEs individuell auf die Bedürfnisse der jeweiligen Anwender (Betriebe, Regionen, Kantone) zugeschnitten werden können. Dementsprechend wurde ein automatisierter Workflow entwickelt, mit dem verschiedene Kriterien, die einen Einfluss auf den Grenzverlauf der BWEs haben, zu BWEs verarbeiten werden. Die Kriterien sind das Resultat aus der Literaturrecherche und Interviews im Rahmen der Masterarbeit (Rath et al. 2021), ergänzt mit Inputs und Rückmeldungen aus Workshop, Expertengesprächen und den Verantwortlichen der Fallstudiengebiete. In der jetzigen Form stehen 10, mit objektiven Daten quantifizierbare Kriterien für die Ausscheidung von BWEs zur Verfügung (Abbildung 12). Der Workflow basiert auf der Programmiersprache Python und ist je nach Bedarf in Zukunft mit weiteren Kriterien erweiterbar (Abbildung 13). Um den vielfältigen und individuellen Bedürfnissen bei der Ausscheidung und Verwendung von BWEs gerecht zu werden wurde der Workflow so programmiert, dass es viele Stellschrauben für den Anwender gibt. Aus der Gesamtheit der Kriterien kann der Anwender eine Selektion auswählen, die dann zur Bildung der BWEs herangezogen wird.



Abbildung 12: Set an Kriterien, das für die Ausscheidung der BWEs verwendet werden kann.

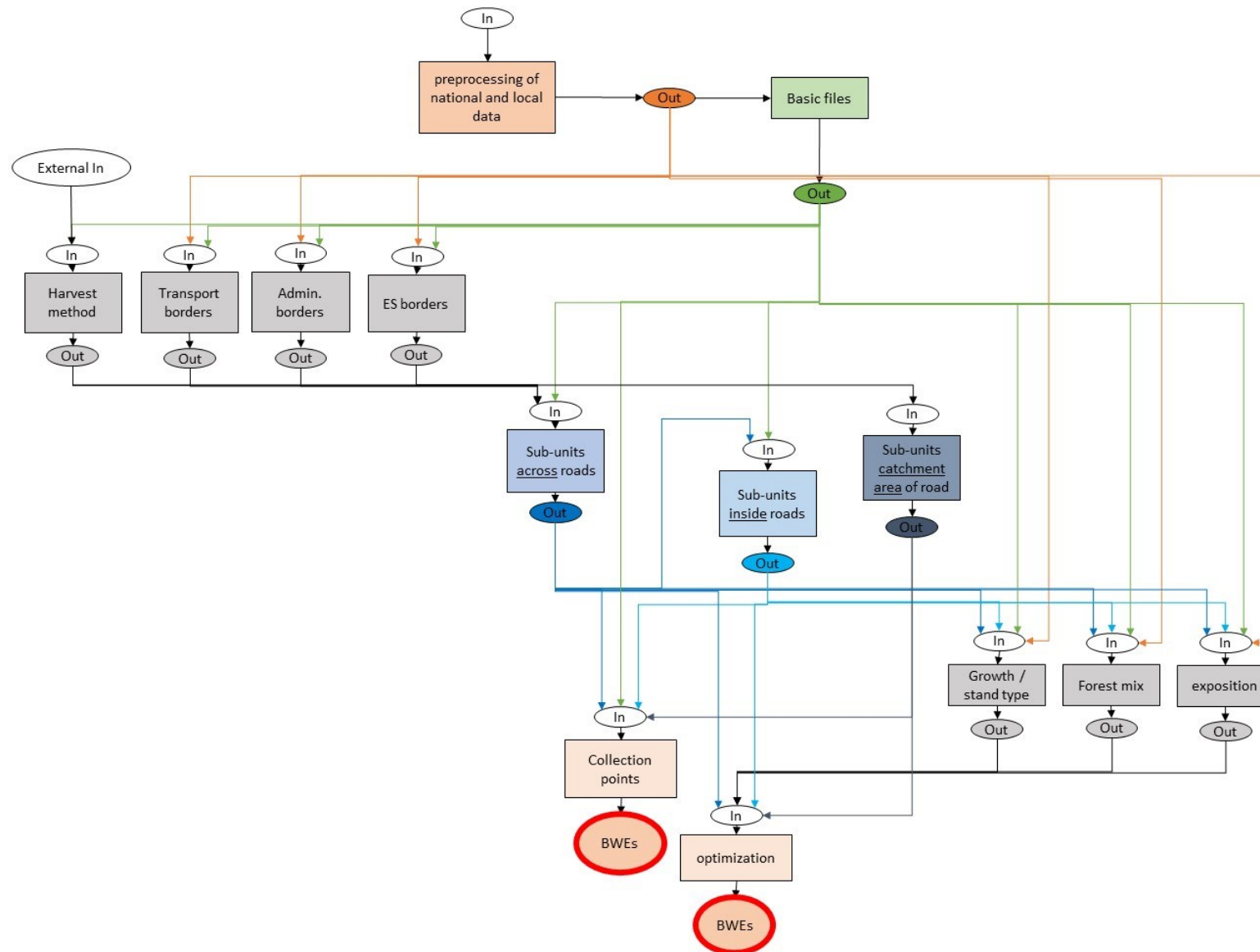


Abbildung 13: Workflow des Programm-Prototyps.

3.1.3 Bilden der Grundeinheiten

Grundeinheiten fassen das Waldgebiet zusammen, welches auf denselben Strassenabschnitt gerückt wird. Um die Grundeinheiten zu bilden, wird das Holzerntekonzept (boden-, seil- oder luftgestützte Holzernte) modelliert und innerhalb des jeweiligen Konzepts alle möglichen Rückewege simuliert (Fahrwege im befahrbaren Gebiet, Seillinien im Seilgebiet, Landepunkte im Gebiet für luftgestützte Holzernte). Während der Modellierung der Grundeinheiten können diverse Kriterien gewählt werden, die dann als harte Grenzen in die Modellierung einfließen (Abbildung 14). Rückewege dürfen diese Grenzen nicht überschreiten.

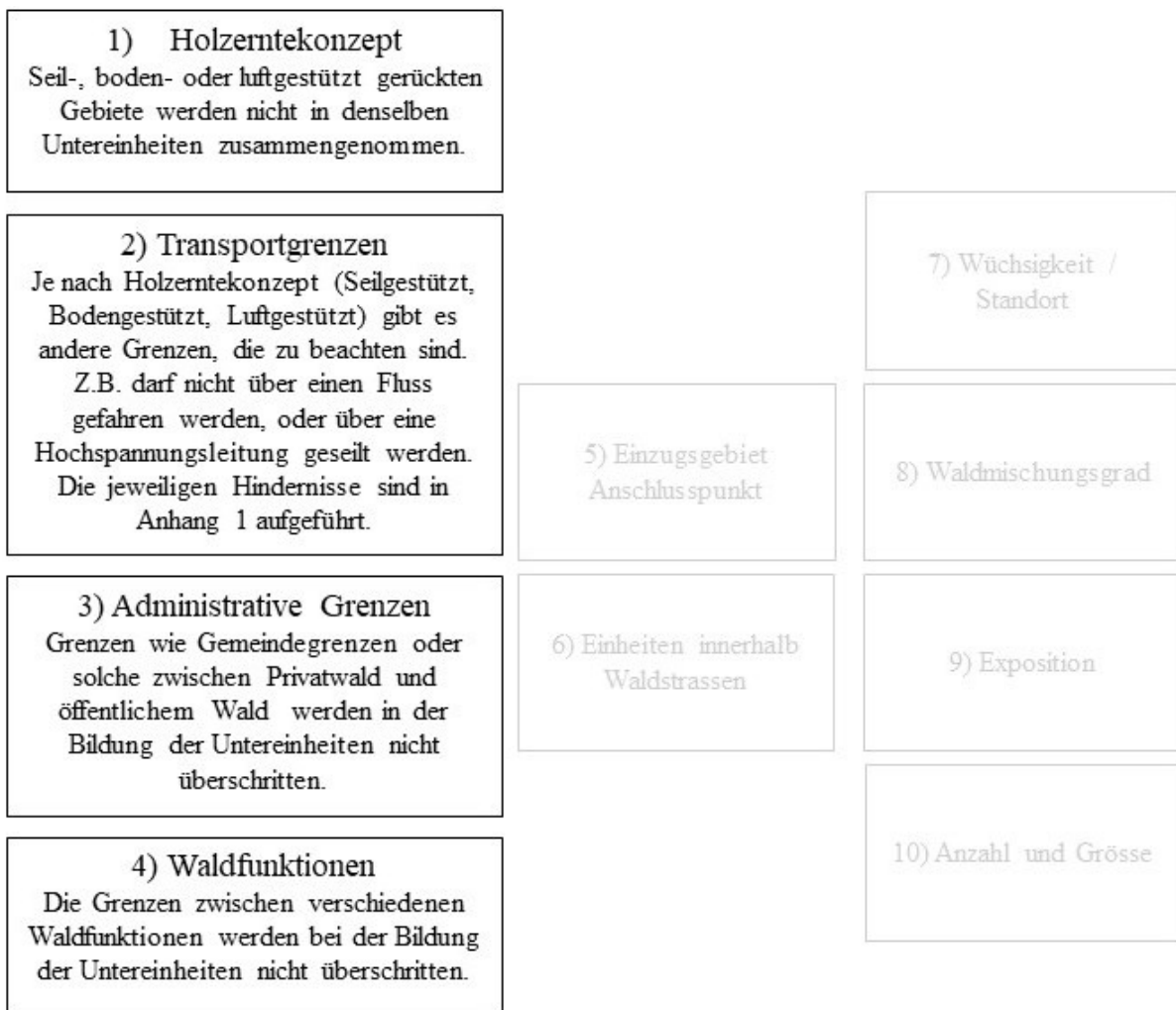


Abbildung 14: Kriterien, die als fixe Grenzen bei der Bildung von Grundeinheiten verwendet werden können.

3.1.4 Aggregation der Grundeinheiten zu Bewirtschaftungseinheiten

Die Grundeinheiten werden generell basierend auf ihrer Distanz zueinander zu BWEs zusammengefasst. Es können allerdings weitere Kriterien gewählt werden (Eigenschaften der Grundeinheiten), die zusätzlich zur Distanz, mit unterschiedlicher Priorität auch noch beachtet werden können (Abbildung 15). Die Aggregation der Grundeinheiten zu BWEs erfolgt in einer mathematischen Optimierung, die im nächsten Kapitel 3.1.5 beschrieben wird. Die Kriterien 2-4 (Transportgrenzen, Admin. Grenzen, Waldfunktionen) können als fixe Grenze zwischen BWEs gewählt werden, die

Kriterien administrative Grenzen und Waldfunktion können auch als «weiches» Kriterium (also als Ziel und nicht als Bedingung / Constraint) in die Aggregation einfließen.

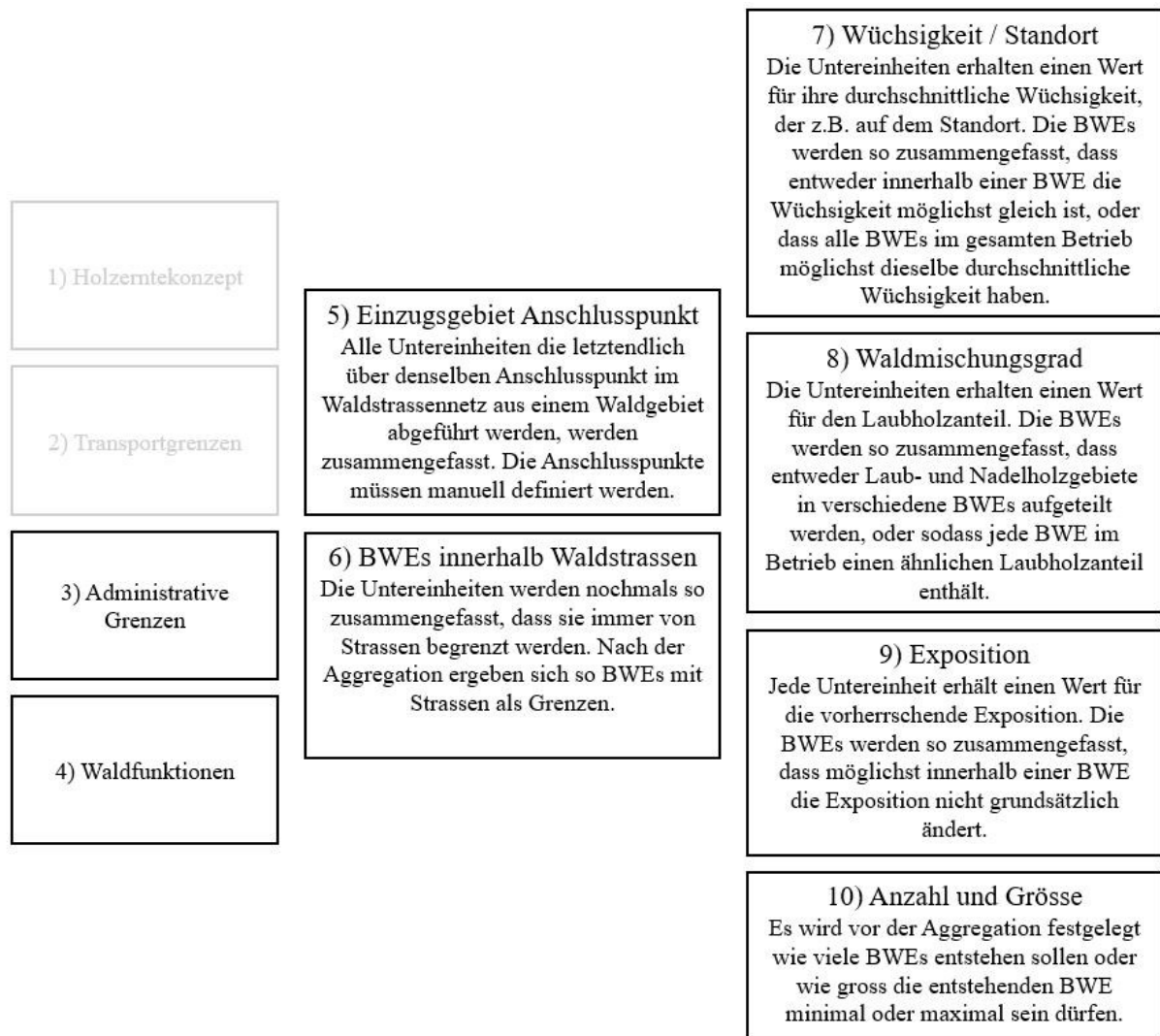


Abbildung 15: Kriterien, anhand denen die Grundeinheiten zu BWEs aggregiert werden können.

3.1.5 Mathematische Formulierung der Optimierung

Generell sollen Grundeinheiten zu BWEs von mehr oder weniger gleicher Grösse zusammengefasst werden. Sie sollen flächig zusammenhängend sein und «einheitlich». Einheitlich bedeutet je nach Betrieb z.B. ein einheitliches Holzerntekonzept für die BWE, eine einheitliche Exposition, eine gemeinsame Strasse der Erschliessung oder eine bereitgestellte Ökosystemleistung. Um die Grundeinheiten bezüglich der gewählten Kriterien optimal zu BWEs zusammenzufügen wurde ein räumlich expliziter Optimierungsalgorithmus entwickelt.

Mathematische Formulierung

Die Optimierungsmethode, die für die Aggregation der Grundeinheiten zu BWEs verwendet wurde, ist mit einem klassischen p-Median-Problem verwandt, das zu den so genannten Standortallokationsproblemen gehört. Das ursprünglich formulierte p-Median-Problem zielt darauf ab, die Standorte von p Einrichtungen zu finden, die die Summe der gewichteten Lieferentfernungen (Menge der Nachfrage multipliziert mit der Entfernung entlang des kürzesten Weges) minimieren. P-Median-Probleme sind vermutlich eine der bekanntesten Modellklassen unter den Standortallokationsproblemen und wurden ursprünglich von Hakimi (1964) definiert. ReVelle und Swain (1970)

stellten die erste ILP-Formulierung vor. Das p-Median-Problem basiert auf einem Graphen, respektive Netzwerk. Innerhalb eines gegebenen Netzwerks repräsentiert jeder Knoten eine bestimmte Nachfrage (Kunden) und gleichzeitig einen potenziellen Werksstandort. Jeder Kante ist eine Entfernung zugeordnet.

In unserem Fall verwendeten wir die folgenden Änderungen im Vergleich zum klassischen Zweck der Standortbestimmung von Einrichtungen: Jeder Knoten i , der ursprünglich einen Kunden repräsentierte, stellt eine Grundeinheit dar, aus der sich die BWEs zusammensetzen. Der Standort eines Werks wurde durch die BWE ersetzt (Abbildung 16). Wenn ein Knoten i als Standort ausgewählt wird, dann ist dieser Knoten j das "Zentrum" der BWE und alle Knoten, die von Knoten j "beliefert" wurden, werden dieser BWE zugeordnet. Dadurch wird die räumliche Kontiguität der FMUs sichergestellt.

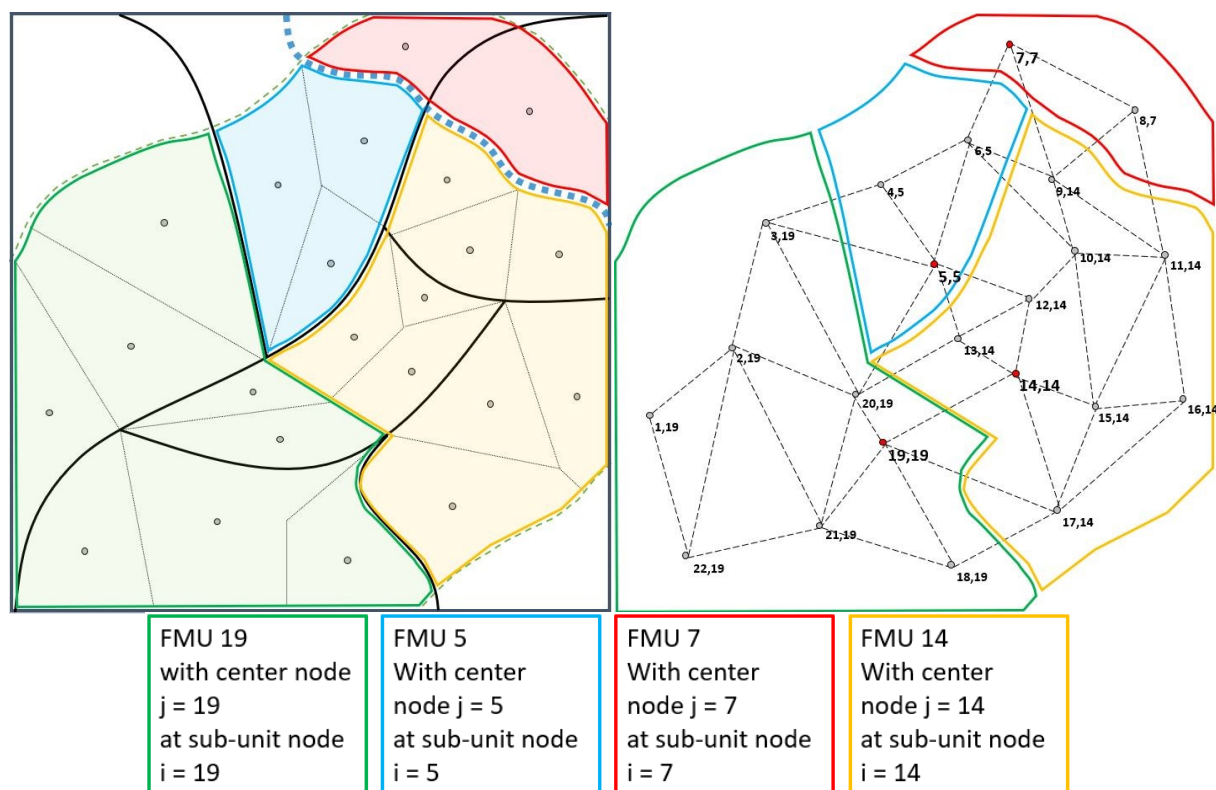


Abbildung 16: Links: Hintergrundkarte des Waldgebiets auf dem BWEs (= FMU, Forest Management Units) ausgeschieden werden sollen. Das farbige Gebiet ist der Wald, die schwarzen Linien sind Strassen. Die blau gestrichelte Linie ist ein Fluss. Jede Grundeinheit (Grundeinheit, innerhalb des farbigen Gebiets mit grauen Linien abgetrennt) wird durch einen Knoten repräsentiert. Rechts: Dieselbe Waldfläche, mit dem Netzwerk an Knoten (Grundeinheiten) und den möglichen Verbindungen zu benachbarten Grundeinheiten. Die unterschiedlichen Farben stellen die aggregierten BWEs dar.

Für die Optimierung ist die Definition einer Zielfunktion und Nebenbedingungen nötig. Im Fall der räumlichen Zuordnung von Grundeinheiten zu BWEs ist das Hauptziel, die Distanz aller Knoten innerhalb einer BWE zum Mittelpunkt der BWE zu minimieren.

Notation

- i, j Indizes, um einen Knoten zu beschreiben, i für Grundeinheiten und j für potentielle BWE Zentren; $i \in I$ und $j \in J$
- I Gesamtheit der Grundeinheiten i .
- J Gesamtheit der BWEs j mit Zentrum im Knoten j
- d_{ij} Entfernung (respektive eine Kombination der Ähnlichkeit und der Entfernung) zwischen Knoten i und j

- x_{ij} {1 falls die Grundeinheiten am Knoten i zu der BWE j mit Zentrum im Knoten j zugeordnet wird. Ansonsten 0}
- y_j {1 falls das Zentrum der BWE j im Knoten j liegt, ansonsten 0}
- p Anzahl der BWEs, die erstellt werden sollen

Zielfunktion

Minimiere die Summe der inneren Distanzen in einer BWE:

Min

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Nebenbedingungen (Constraint)

Jede Grundeinheit kann nur genau einer BWE zugeordnet werden:

Für jedes i

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

Die Anzahl der erstellten BWEs muss gleich p sein:

$$\sum_{j=1}^n y_j = p \quad (3)$$

Die Grundeinheiten mit Knoten i können nur zu den Knoten j hinzugefügt werden, die als Zentrum für eine BWE j ausgewählt wurden:

Für jedes i und j :

$$x_{ij} \leq y_j \quad (4)$$

Rahmenbedingungen für die Variablen:

$$\begin{aligned} 0 &\leq x \leq 1 \\ y_j &= \{0,1\} \end{aligned} \quad (5)$$

Diese Formulierung, angelehnt an das «klassische» p-Median Problem minimiert die Summe aller Distanzen zwischen dem Zentrum der BWE und den Zentren der zugeordneten Grundeinheiten. Ohne dass es explizit in der Zielfunktion niedergeschrieben werden muss, werden so zusammenhängende BWEs von ungefähr der gleichen Grösse erstellt.

BWEs mit einheitlichen Eigenschaften erstellen

Zusätzlich zur Vorgabe möglichst zusammenhängende, gleich grosse BWEs zu erstellen, soll in der Optimierung besondere Eigenschaften der Grundeinheiten beachtet werden. Indem die Zielfunktion um einen zweiten Teil erweitert wird, können BWEs gebildet werden, die «einheitlich» bezogen auf die ausgewählten Kriterien sind. Diese Einheiten können somit angepasst auf die Bedürfnisse eines Forstbetriebs unabhängig voneinander geplant und bewirtschaftet werden.

Eigenschaften der Grundeinheiten werden in der von uns entwickelten Optimierung als 'homogenous property unit' (**HPU**), oder Eigenschaftenkarte bezeichnet. Die HPU erstreckt sich über mehrere Grundeinheiten, die in der Optimierung eher zu eine BWE zusammengefasst werden sollen als Grundeinheiten in einer anderen BWE (Abbildung 17). Grundsätzlich kann eine beliebige Anzahl an HPU Grundlagen in die Optimierung mit eingebunden werden. Mit jeder Art der HPU erweitert sich die Zielfunktion um einen Baustein. Als HPU kann z.B. eine Karte verwendet werden, in der Flächen, die von derselben Strasse eingeschlossen werden, zusammengefasst werden. Ein weiteres Beispiel für HPUs sind Waldfunktionenkarten oder Waldstandortskarten.

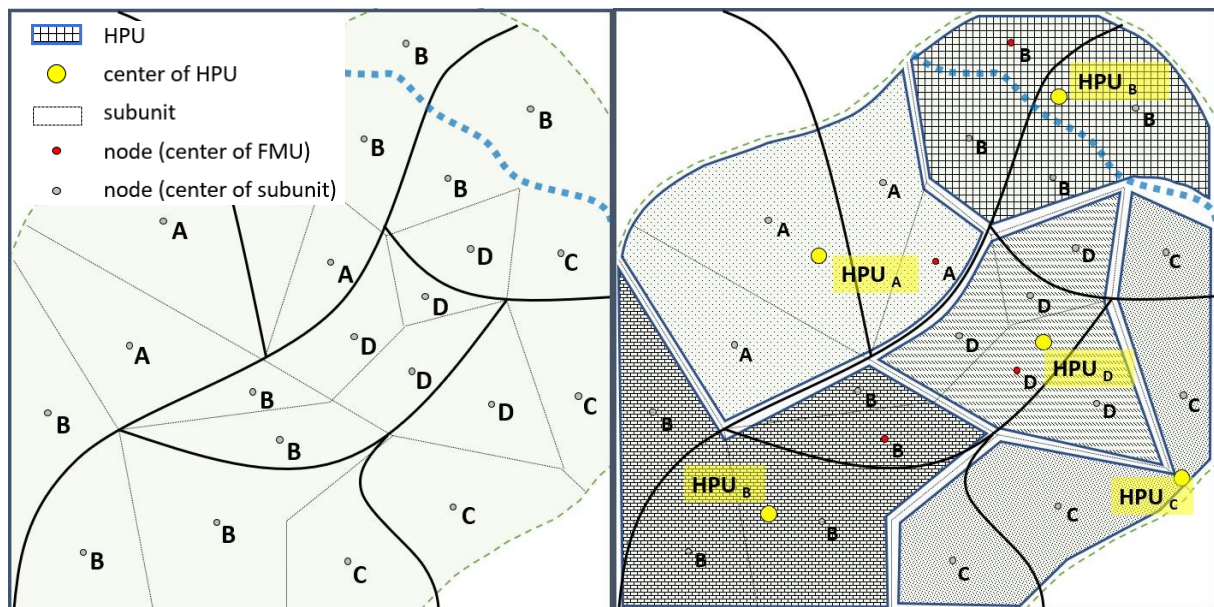


Abbildung 17: Left: Forest with subunits. Each subunit has a specific property L , here exemplified with letters. Right: The subunits with the same property are taken together and turned into an HPU with that property L . There can be more than one HPU with the same property. Links: Wald mit Grundeinheiten. Jede Untereinheit hat eine bestimmte Eigenschaft L , die hier mit Buchstaben veranschaulicht wird. Rechts: Die Untereinheiten mit derselben Eigenschaft werden zu einer HPU mit dieser Eigenschaft L zusammengefasst. Es kann mehr als eine HPU mit derselben Eigenschaft geben.

Unter Einbezug der HPUs wird die Zielfunktion folgendermassen angepasst. Idealerweise beinhaltet eine BWE nur Grundeinheiten, die Teil einer einzigen HPU sind. Um dies mathematisch darstellen zu können wird eine neue Variable r eingeführt, die die Ähnlichkeit zwischen zwei Grundeinheiten, basierend auf ihren Eigenschaften beschreibt.

Zusätzliche Notation

- l Index um eine HPU eines Attributs zu beschreiben, $l \in L$
- L Set aller HPUs mit derselben Eigenschaft
- l_i HPU mit Knoten i der Grundeinheit i
- c_{ij} 'Unterschied' zwischen Grundeinheiten, basierend auf den Eigenschaften. Je nach Eigenschaft wird der Unterschiedswert anders berechnet.

r_{ij} {1 falls eine oder mehrere der Grundeinheiten i der HPU I zu der BWE j mit Zentrum im Knoten j zugeordnet wird. Ansonsten 0}

λ Gewichtungsfaktor

Erweiterte Zielfunktion

Minimiere die Summe der inneren Distanzen in einer BWE, sowie die Summe der inneren Unterschiede innerhalb der Grundeinheiten einer BWE.

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} + \lambda \sum_{l \in L} \sum_{j \in Y} c_{lj} r_{lj} \quad (6)$$

Zusätzliche Nebenbedingungen:

Keine Grundeinheit i der HPU I kann einer BWE zugeordnet werden, wenn nicht die gesamte HPU I der BWE j zugeordnet ist.

Für jedes i und j :

$$x_{ij} \leq r_{ij} \quad (7)$$

Rahmenbedingungen für die Variablen:

$$0 \leq r \leq 1 \quad (8)$$

Eine HPU I kann zu mehreren BWEs j zugeordnet sein:

$$\sum_{l \in L} r_{lj} \geq 1 \quad (9)$$

3.1.6 BWEs im Forstbetrieb Albula

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Betriebsplanung des Kantons Graubünden wurden in mehreren Iterationen drei Varianten an Kriterien-Kombinationen zur Modellierung der BWEs ausgewählt (Abbildung 18). Während den Iterationen wurde ausserdem die Wahl der Kriterien Wüchsigkeit (in Graubünden die Betriebsklassen), Exposition und Waldfunktion evaluiert. Am Beispiel der **Betriebsklassen** konnte der Optimierungsalgorithmus sehr einfach geprüft werden. Wurden die Betriebsklassen miteinbezogen folgten die BWEs Grenzen grösstenteils den Betriebsklassen Grenzen. Praktisch ergaben sich jedoch daraus Hindernisse für die Holzernte, wenn ein Hang durch die Betriebsklassen in zwei Bereiche geteilt wurde, diese jedoch mit derselben Seillinie geerntet werden sollten. Das Kriterium wurde verworfen. Aus waldbaulicher Sicht sollte die **Waldfunktion** schon auf Ebene der Planung berücksichtigt werden. Für die lokale verantwortliche Person stellte sich die weitere Massnahmenplanung und auch das Controlling als einfacher heraus, wenn es nicht zu viele Zielvorgaben mit ähnlichen Flächenanteilen innerhalb einer BWE gab. Ein gewisser Spielraum wurde jedoch eingeräumt. Kleine Gebiete mit anderen Waldfunktionen innerhalb einer BWE waren tolerierbar, das Kriterium wurde beibehalten. Für die erste Feedbackrunde waren BWEs in **unterschiedlichen Grössen** erstellt worden. Zusätzlich konnten die Grundeinheiten und

Zwischenprodukte der Aggregation präsentiert werden. In den Augen der Planungsexperten stellen sämtliche Stufen der Aggregation wichtige und wertvolle Grundlageninformationen dar. Im Kanton Graubünden ist die Modellierung der BWEs als Hinweiskarte und Unterstützung für den Förster und die Regionalforstingenieure/-innen bei der finalen Ausscheidung von BWEs gedacht. Um die Modellierung der BWEs nachvollziehen zu können und in ihrem Entscheidungsprozess optimal zu berücksichtigen wünschen sich die Planungsexperten weiterhin eine Bandbreite an Aggregationsstufen für BWEs.



Abbildung 18: Varianten an Kriterien-Kombinationen für die Modellierung, jeweils mit leicht anderem Fokus. Variante 2 und drei unterscheiden sich durch die Gewichtung der Kriterien Holzerntekonzept und Transportgrenzen einerseits, und Waldfunktion andererseits.

Die Kriterien Holzerntekonzept und Transportgrenzen bleiben der Kern der Modellierung. Dies entspricht der ursprünglichen Absicht des Kantons, mit den BWEs die Planung besser auf die technischen Umstände der Bewirtschaftung abstimmen zu können. In den drei Varianten wird die Waldfunktion mit unterschiedlicher Gewichtung mit in der Ausscheidung von BWEs berücksichtigt. **Variante 1** berücksichtigt nur das **Holzerntekonzept und die Transportgrenze**. In **Variante 2** sind die Waldfunktionen mit **geringem Gewicht** an der Optimierung beteiligt und in **Variante 3** wird den Waldfunktionen ein **hohes Gewicht** bei der Optimierung gegeben. Für alle drei Varianten wurden die Grundeinheiten als Zwischenprodukt gewählt und als Grössenabstufung das Betriebsgebiet in **20, 40 und 80 BWEs** aufgeteilt.

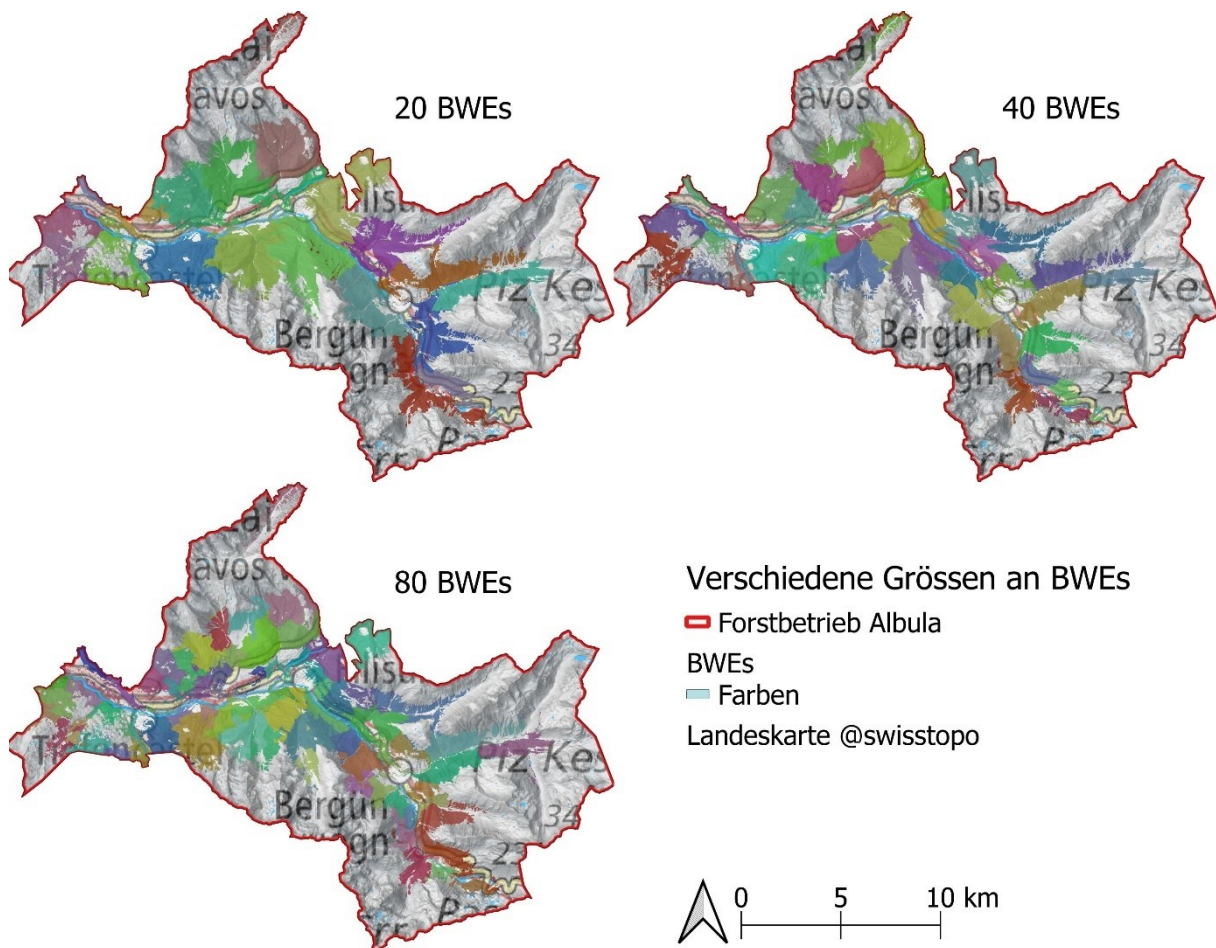
Variante 1: Transportgrenzen / Holzernteeinzugsgebiet

Abbildung 19: Ergebnisse der Optimierung für die Variante 1. Nur die kürzesten Distanzen innerhalb von Holzernteeinzugsgebieten und Transportgrenzen wurden beachtet. Die BWEs wurden in drei Grössenabstufungen modelliert. © swisstopo 2022.

Die Ausgangslage für den Kanton Graubünden, mit BWEs zu arbeiten ist die Koordination der Planung und technischen Ausführung von Holzerntemassnahmen. Ausserdem sollen die BWEs der Übersichtlichkeit dienen. Um eine Auswahl zur Verfügung zu stellen, die in der Praxis getestet werden kann wurde die Grundlagenvariante 1 mit 20, 40 und 80 BWEs modelliert (Abbildung 19). In allen drei Versionen ist ersichtlich, dass Transportgrenzen wie Hauptstrassen beachtet werden. Unterschiedliche Talseiten, die in der Realität waldbaulich und technisch unabhängig voneinander bewirtschaftet werden können, werden auch in den Resultaten der Optimierung in verschiedene BWEs aufgeteilt.

Die Grundeinheiten der Optimierung Variante 1 sind aus den kleinstmöglichen Holzernte-Einzugsgebieten zusammengesetzt. Diese Gebiete sind die kleinste Einheit, die waldbaulich und technisch zusammen bewirtschaftet werden muss. In Abbildung 20 sind die Grundeinheiten und ihre Aggregierung zu 40 BWEs gegenübergestellt. Während die Grundeinheiten unübersichtlich und nicht für eine effiziente Einsatzplanung im Forstbetrieb geeignet sind, können die BWEs als Anhaltspunkt für Synergien in der Bewirtschaftung dienen.

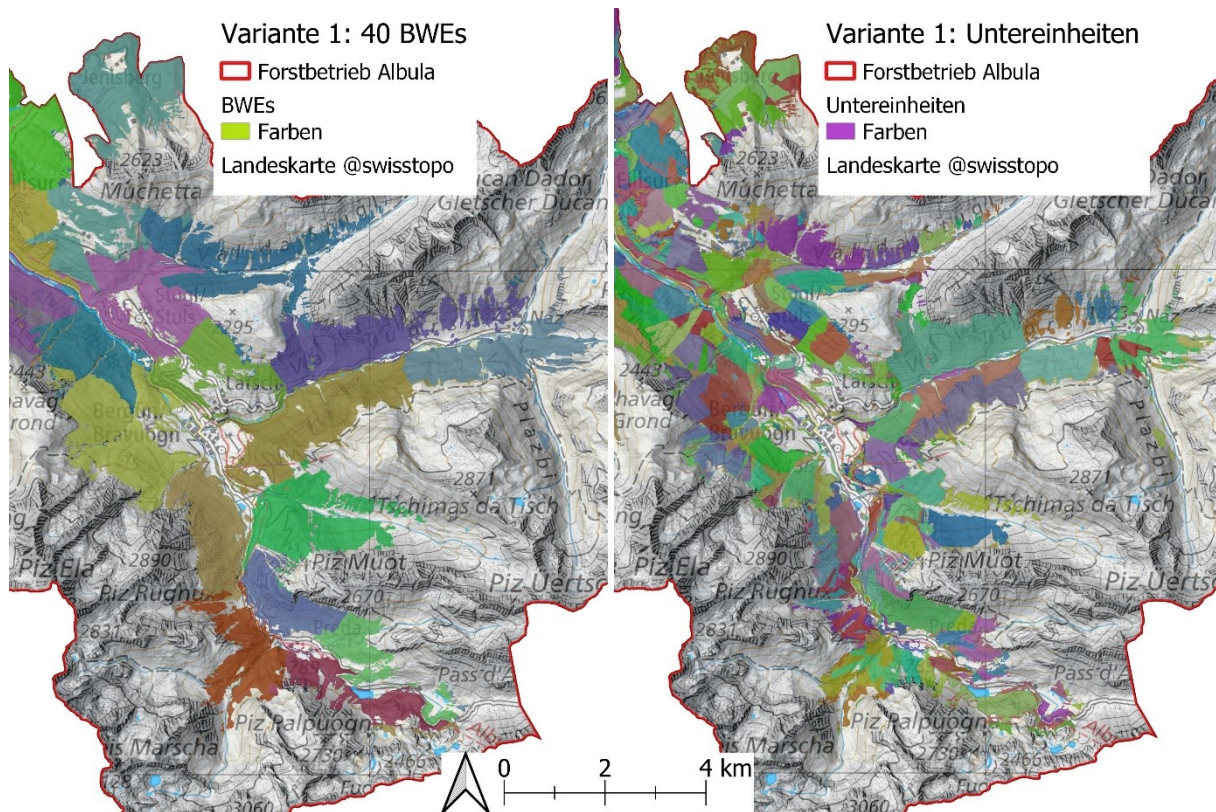


Abbildung 20: links: Modellierte BWEs der Variante 1, unter ausschliesslicher Berücksichtigung der Transportgrenzen und Holzernteeinzugsgebiete, mit 40 resultierenden BWEs. Rechts: Grundeinheiten (=Untereinheiten) vor der Aggregation zu BWEs bei der Variante 1. Die BWEs setzen sich aus den Grundeinheiten zusammen, es entstehen keine neuen Grenzen. © swisstopo 2022.

Varianten 2 und 3: Waldfunktion

Im Forstbetrieb Albula ist die Schutzfunktion des Waldes, die flächenmässig grösste und wichtigste Waldfunktion. Für die Bewirtschaftung sind aber auch grössere Naturschutzwaldflächen separat zu betrachten. Die Waldfunktion in der Ausscheidung von BWEs zu berücksichtigen, soll aber nicht dazu

führen, dass die Bewirtschaftung der einzelnen BWEs nicht mehr unabhängig voneinander erfolgen kann. Zwei Gewichtungen der Waldfunktion in der Optimierung wurden getestet (Abbildung 21).

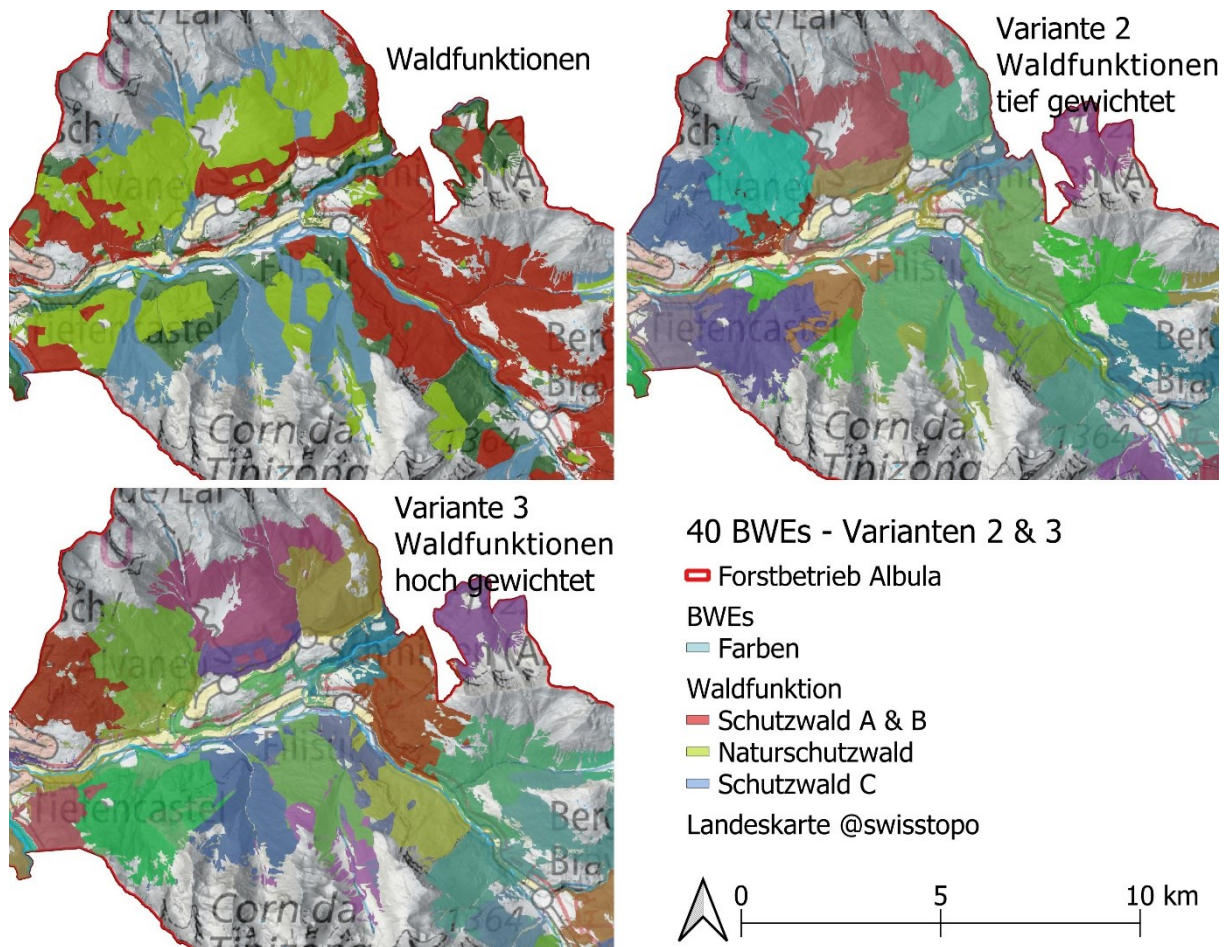


Abbildung 21: Vergleich der Varianten 2 und 3, bei denen die Waldfunktion mit verschiedenen Gewichtungen in die Optimierung mit einbezogen wird. © swisstopo 2022.

Sehr gut sichtbar ist der Unterschied der Gewichtungen am Beispiel des Naturschutzwaldes südlich von Filisur. Wird die Waldfunktion nur tief in der Bewirtschaftung gewichtet, wird nur der oberste Teil des Naturschutzwaldes in eine separate BWE eingeteilt (olivgrün). Der Rest der Naturschutzfläche wird mit dem umliegenden Schutzwald kombiniert. Die westliche Grenze der resultierenden BWE (hellgrün) folgt dann wieder der Grenze zwischen regulärem Wirtschaftswald und dem Schutzwald. Wird die Waldfunktion höher gewichtet, wird wieder der obere Teil des Naturschutzgebiets in einer separaten BWE zusammengefasst, diesmal jedoch gemeinsam mit den noch höher liegenden Naturschutzflächen (pink). Die umliegende BWE (hellgrün) folgt mit ihren Grenzen im Westen wie im Osten sehr genau der weiteren Grenze zwischen Naturschutz- und Schutzwald.

3.1.5 BWEs im Staatsforstbetrieb Zug

Während die Methodik der Ausscheidung von BWEs am Testgebiet des Forstbetriebs Albula entwickelt, überarbeitet und getestet wurde, diente der Staatsforstbetrieb Zug als 'unvorbehaftetes' Anwendungsbeispiel. Da die BWEs hier informativen Charakter für die theoretisch bestmögliche Organisation der Holzernte haben, sind das Ernteverfahren und die Rückewege die wichtigsten Eingangsparameter für die Modellierung (Abbildung 22). Besonders sollen administrative Grenzen explizit nicht beachtet werden, um Synergien zwischen verschiedenen Waldbesitzern erkennen zu können. Für das Testgebiet im Kanton Zug wurde nur eine Variante an BWEs modelliert.

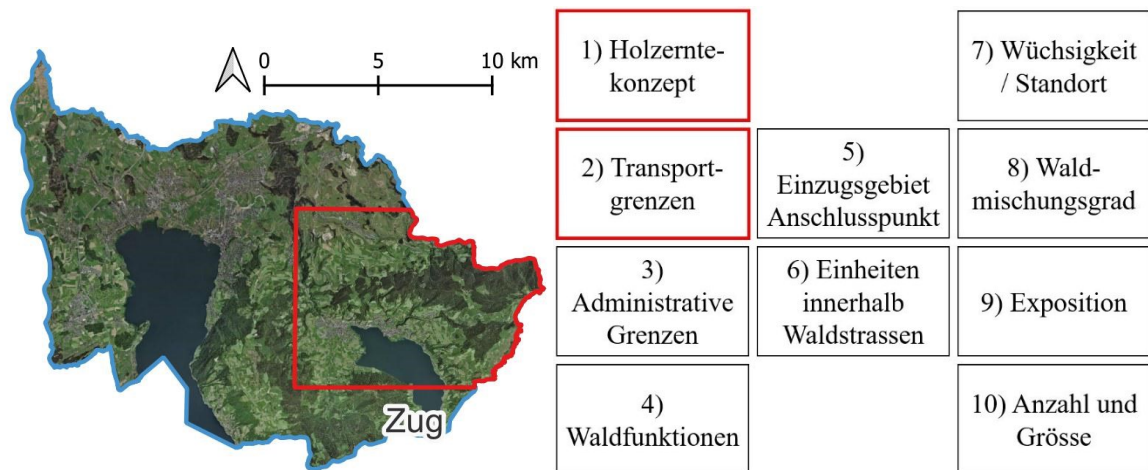


Abbildung 22: Lage des Staatswaldes im Kanton Zug, rechts die Auswahl der Kriterien für die Bildung von BWEs.

Für den Kanton Zug ist es wichtig, möglichst viele Synergien in der Holzernte erkennen zu können. Deshalb sind auch hier die Grundeinheiten, die im Grunde Feinerschliessungseinheiten darstellen, ein wichtiges Zwischenergebnis. In der Abbildung 23 sind die Grundeinheiten, sowie die aggregierten BWEs in zwei verschiedenen Grössen abgebildet.

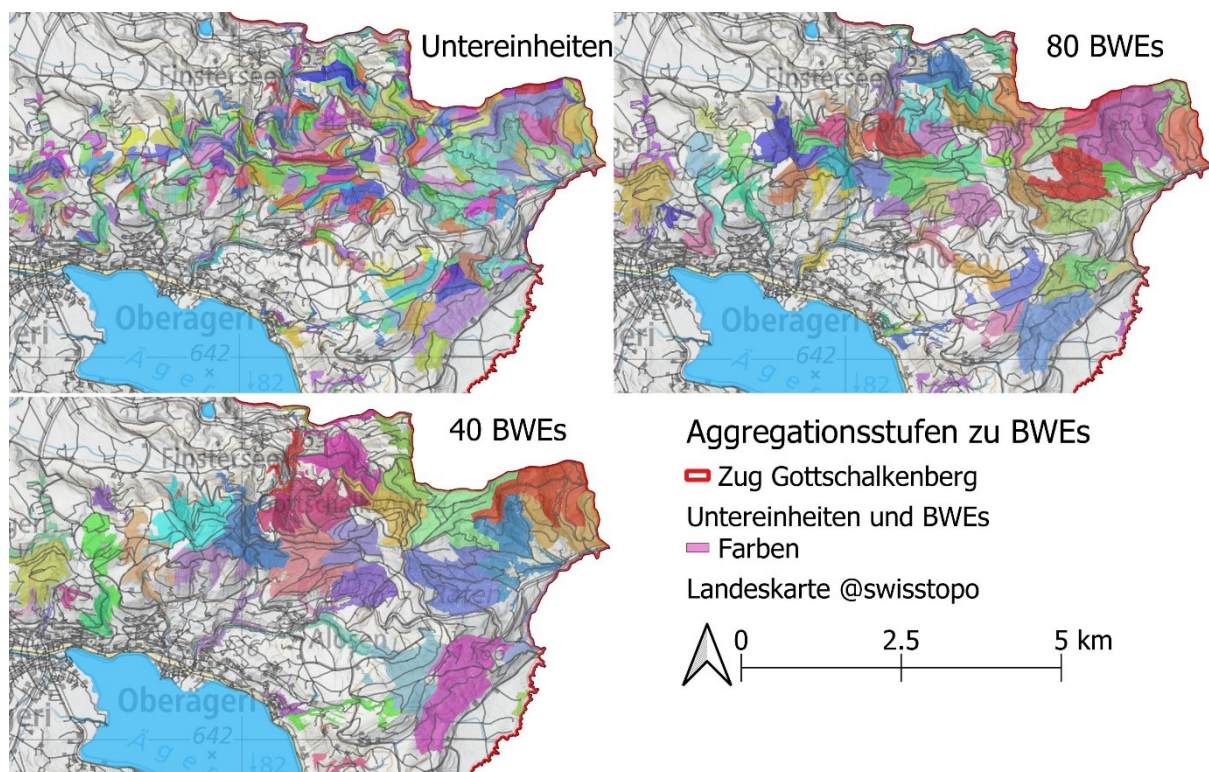


Abbildung 23: Oben links: Modellierung der Transportgrenzen und Feinerschliessungseinheiten. Oben rechts: Aggregierte BWEs mit 80 BWEs über dem gesamten Testgebiet. Unten links: Aggregierte BWEs mit 40 BWEs über dem gesamten Testgebiet. (Untereinheiten = Grundeinheiten) © swisstopo 2022.

Während das Waldstrassennetzwerk im Kanton Zug gut ausgebaut ist, erschweren die teils sehr steilen Gräben und schweren Böden dennoch die Holzernte. In diesem Zusammenhang ist gut ersichtlich, wie sich die BWEs an den Transportgrenzen, die durch die steile Topografie entstehen orientieren (Abbildung 24).

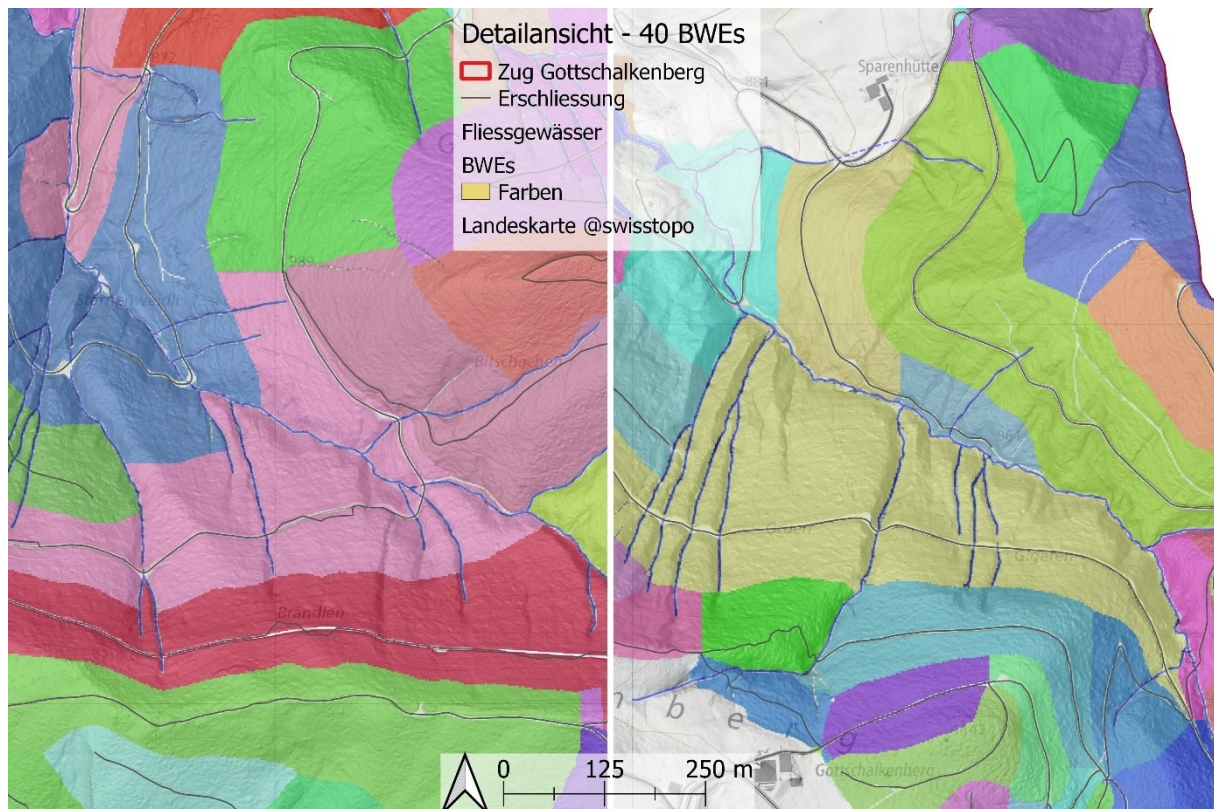


Abbildung 24: 2 Beispiele (links und rechts) mit Detailansicht der aggregierten BWEs im Gebiet des Gottschalkenbergs. Die Grenzen der BWEs orientieren sich an den Transportgrenzen, die teilweise durch steile Bacheinhänge gegeben sind. © swisstopo 2022.

In beiden Detailansichten ist deutlich sichtbar, dass die Grenzen der BWEs teilweise den Gräben und Bächen folgen, auch wenn die Distanz in Luftlinie zu einer anderen Strasse kürzer wäre.

3.2 Feinerschliessungseinheiten und Holzernteeinzugsgebiete

Um Feinerschliessungseinheiten zu modellieren, wurde zuerst die beste technisch mögliche Erntemethode modelliert. Dabei wurde zwischen befahrbarem Gebiet, Mobilseilkran kurz, Mobilseilkran lang, konventionellem Seilkran und Helikopterernte unterschieden. Zusätzlich zur technisch möglichen Rückemethode wurden die Holzernte-Einzugsgebiete modelliert. Die Methode ist in Kapitel 2 beschrieben.

3.2.1 Bodengestütztes Gelände

Die Modellierung der **Feinerschliessungseinheiten für befahrbare Standorte** wurde in der Programmiersprache Python implementiert und wurde sowohl als Grundlage zur Ausscheidung von Bewirtschaftungseinheiten verwendet als auch zur feineren Unterteilung dieser. Diese Ausscheidung basiert auf einer Netzwerkmodellierung (Dijkstra Algorithmus).

Die Ausscheidung lieferte plausible Ergebnisse in kurzer Zeit (wenige Sekunden). Abbildung 25 (links) zeigt die Rückedistanzen für das befahrbare Gelände an. Abbildung 25 (rechts) zeigt darauf basierend die Feinerschliessungseinheiten an. Die einzelnen Waldzellen wurden jenem Waldstrassensegment mit kürzester Rückedistanz zugeordnet. Die hier berechneten Ergebnisse sind nach Testeinsätzen sowohl im Aargau als auch in Graubünden im Rahmen von Planstufung genügend genau.

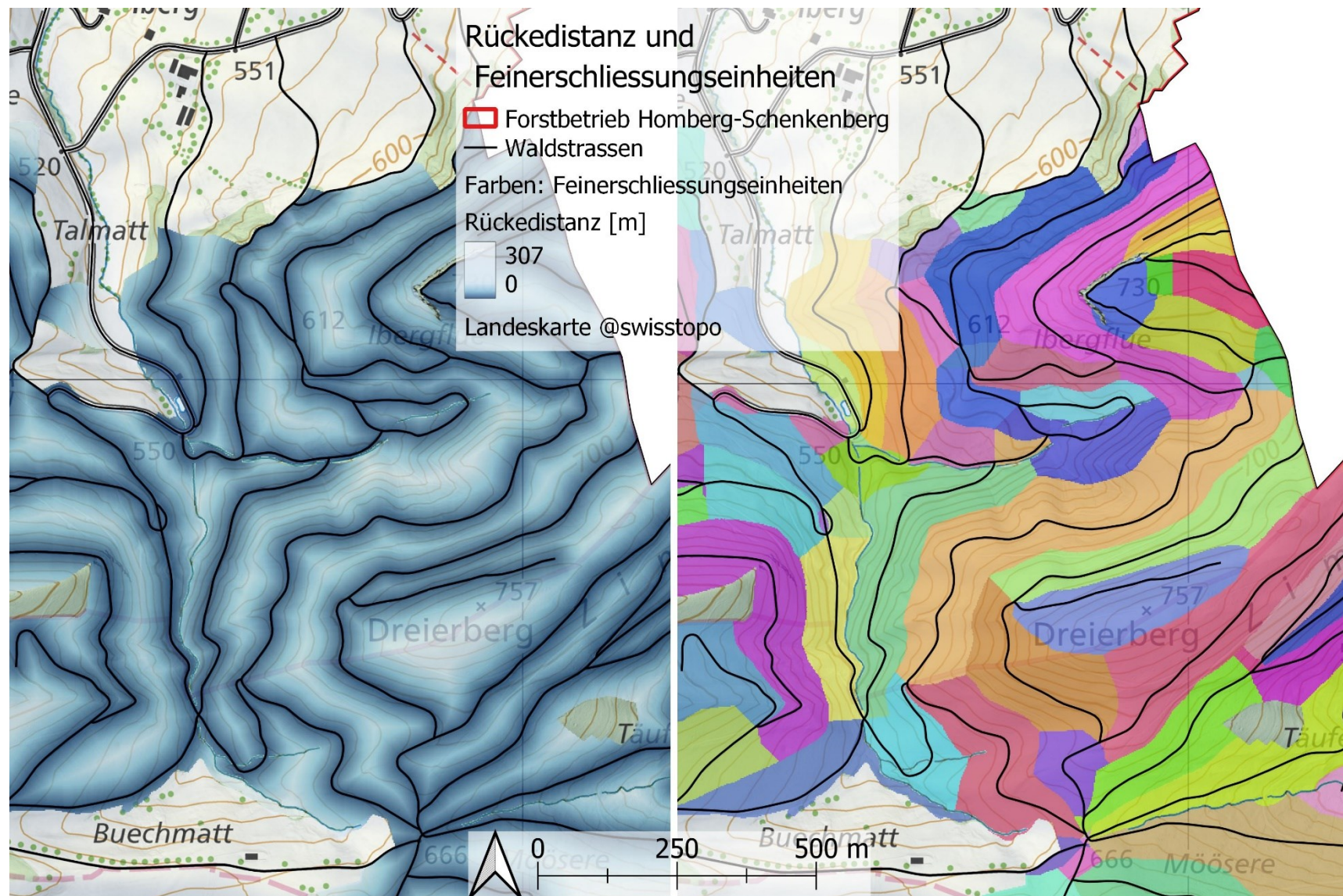


Abbildung 25: Links: Rückedistanzen für das befahrbare Gelände im Forstbetrieb Homberg-Schenkenberg, Kt. AG (Ausschnitt).. Je dunkler das blau, desto kleiner die Distanz zur Waldstrasse. Rechts: Feinerschliessungseinheiten für denselben Ausschnitt. © swisstopo 2022.

3.2.2 Seilgestütztes Gelände

Die Ausscheidung von **Feinerschliessungseinheiten für seilgestützte Standorte** erfolgte in Matlab, da einige grundlegende Skripte schon im Matlab vorhanden waren. Langfristig wird aber der komplette Workflow in der Programmiersprache Python angepeilt.

Die Modellierung der Feinerschliessungseinheiten für seilgestütztes Gelände ist anspruchsvoller als für bodengestütztes Gelände, weil mit mehr Unsicherheiten und einer grundsätzlich komplexeren Problemstellung umgegangen werden muss. Im laufenden Projekt sind insbesondere folgende Punkte aufgefallen:

- 1) **Datenqualität:** Bedingung für die Installation eines Seilkran (Kippmastgerät) ist unter anderem eine lastwagenbefahrbar Waldstrasse. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass auch auf Strassen, die nicht als lastwagenbefahrbar kategorisiert sind auch Kippmastgeräte aufgestellt wurden. Diese Strassen mussten separat vom Forstdienst erfasst werden.
- 2) **Unterschiedliche Seil Systeme:** In der Modellierung wurde eine scharfe Abgrenzung zwischen den Seilsystemen 'Mobilseilkran' und 'konventioneller Seilkran' implementiert. Es wurde angenommen, dass die effizienteren Mobilseilkran bis zu einer Linienlänge (Schrägdistanz) von 400 m eingesetzt werden können. In Realität existieren aber diverse Systeme von verschiedenen Herstellern, die alle unterschiedliche Linienlängen aufweisen, im Maximum bis zu 900m (Valentini)
- 3) **Technische vs. Ökonomische Machbarkeit:** Die technische Machbarkeit einer Seillinie entspricht nicht zwingend der ökonomischen Machbarkeit. Anstatt die ganze mögliche Länge einer Seillinie auszunutzen, kann es vorkommen, dass auch nur ein Teil der möglichen Länge realisiert wird und beim anderen Teil andere Verfahren zum Einsatz kommen, beispielsweise Helikopter (falls nur wenig Holz zu ernten ist)
- 4) **Hanglayout:** Ein Seillinienlayout muss für eine gesamte Feinerschliessungseinheit, also in der Regel einen ganzen Hang, ausgearbeitet werden. Es besteht aus mehreren Linien, die aufeinander abgestimmt sind, sich also zum Beispiel möglichst wenig überschneiden sollen.

Im Rahmen dieses Projektes konnten (aus zeitlichen Gründen) nicht alle diese Punkte (insbesondere 2 bis 4) gelöst werden, was jedoch für die Anwendung der Methode auch nicht nötig ist. Wichtig ist, dass sich der Benutzer dieser Limitierungen bewusst ist und die vorgeschlagene Lösung der BWEs dementsprechend modifiziert.

Abbildung 26 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Modellierung Feinerschliessungseinheiten für den Seilkran im Betrieb Albula sowie die hinterlegten Transportrichtungen. Insbesondere dieses Zwischenergebnis mit den hinterlegten Transportrichtungen zeigt sich als sehr nützlich, um im Ende auch die vorgeschlagenen BWEs zu beurteilen bzw. zu modifizieren.

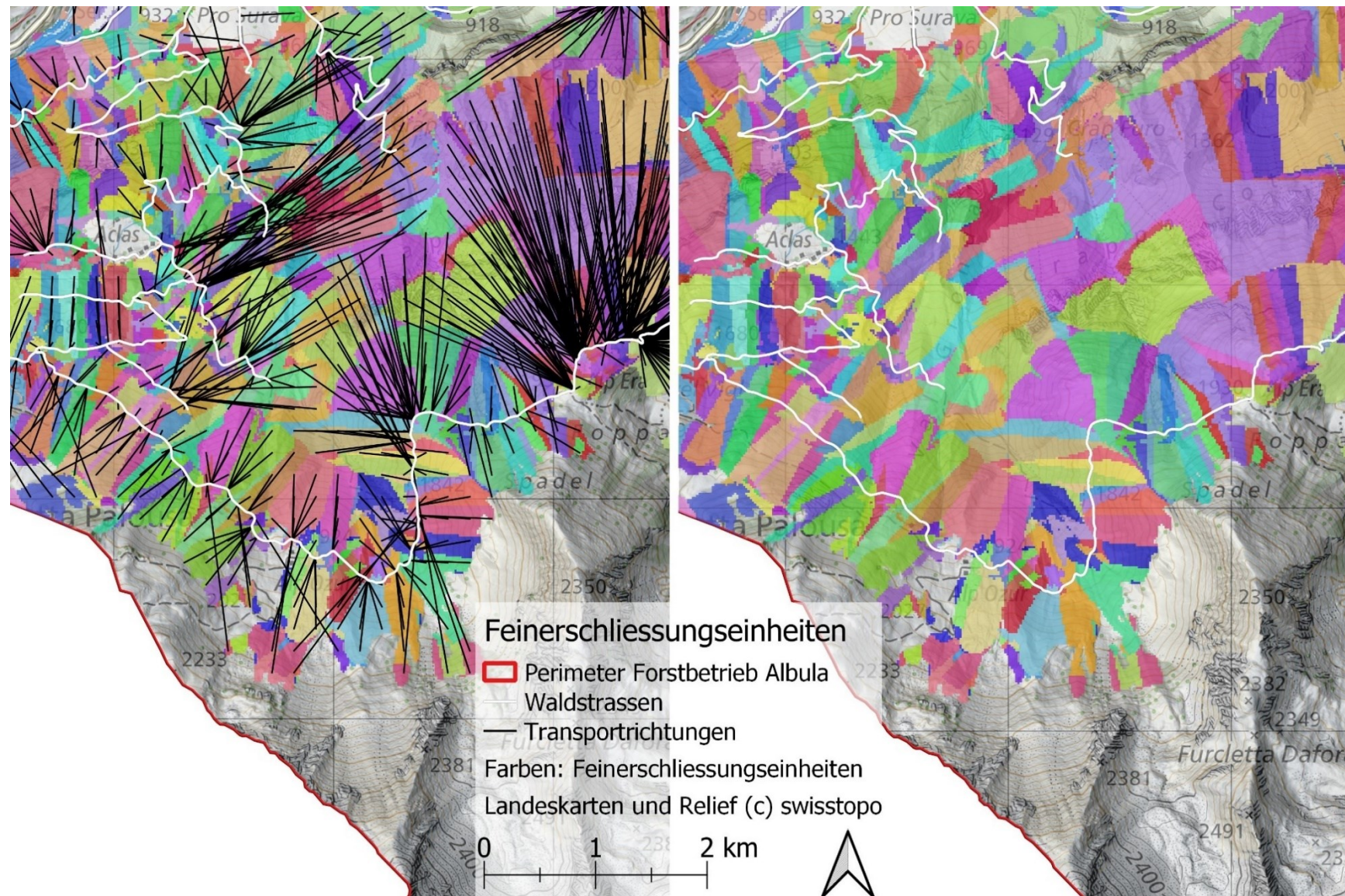


Abbildung 26: Rechts: Modellierung Feinerschliessungseinheiten für den Seilkran im Betrieb Albula. Links: Mit hinterlegten Transportrichtungen © swisstopo 2022.

3.2.3 Luftgestütztes Gelände

Die Ausscheidung der Feinerschliessungseinheiten für die luftgestützte Holzernte (Helikopter) erfolgte in Python. Abbildung 27 zeigt einen Ausschnitt für die modellierten Feinerschliessungseinheiten für die luftgestützte Holzernte. Da die Überwindung der Höhendifferenz im Vergleich zur Horizontalabstand mit einem Faktor 10 gewichtet wurde, sieht man als Resultat einige längliche Streifen entlang der Höhenkurven, was absolut plausibel ist.

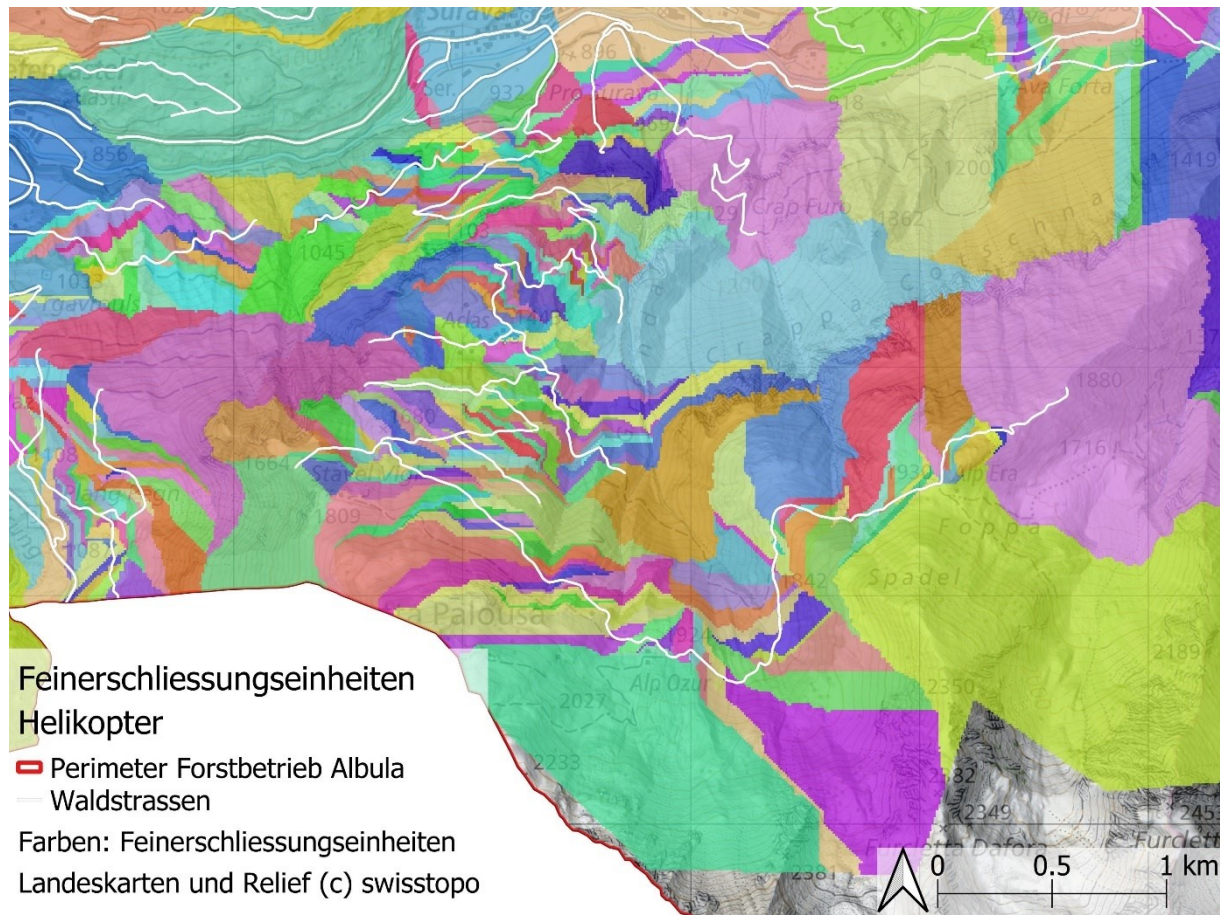


Abbildung 27: Modellierter Ausschnitt eines Geländes mit Feinerschliessungseinheiten für die Helikopter-bringung im Forstbetrieb Albula. © swisstopo 2022.

3.2.4 Holzernteeinzugsgebiete

Die Modellierung von **Holzernteeinzugsgebieten** wurde wie in Kapitel 2 beschrieben ausgeführt. Von besonderer Relevanz ist, dass die Grenzen von Holzernteeinzugsgebieten auch **Transportgrenzen** darstellen. Das heisst, dass diese in vielen Fällen aus Kreten, Flussläufen, wichtigen Strassen, Eisenbahnlinien oder auch Hindernissen wie überirdische Hochspannungsleitungen bestehen. 'Holzernteeinzugsgebiete' stellen in sich abgeschlossene 'Feinerschliessungseinheiten' dar und sind somit eine unabdingbare Grundlage für die Ausscheidung von BWEs.

Abbildung 28 zeigt die modellierten Holzernteeinzugsgebiete für den Betrieb Albula mit hinterlegten Transportrichtungen. Es ist gut erkennbar, dass die verschiedenen Holzernteeinzugsgebiete bei Kreuzungen getrennt werden. Im Weiteren fällt eine teilweise Fragmentierung der Holzernteeinzugsgebiete auf, denn diese sind nicht immer zusammenhängend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich zum Teil Seillinien überschneiden, die von unterschiedlichen Strassensegmenten ausgehen. Das bedeutet, dass es für das Modell schwierig ist klare Grenzen zu ziehen. In vielen Fällen ist es aber auch in Realität so, dass der Fall selbst für einen Förster nicht ganz klar ist. Das spricht dafür, wenn solche fragmentierten Flächen auftauchen, die BWEs nicht an den entsprechenden Stellen zu trennen.

Die Fragmentierung mag hier unschön erscheinen, auf das Endergebnis ist der Einfluss aber gering. Solche zerstückelten Flächen von Holzernteeinzugsgebieten haben in der Regel eine lange gemeinsame Grenze. Im Zuge des Zieles der Aggregation von möglichst kompakten Flächen, hat das Modell die Eigenschaft solche Flächen zu einer einzigen BWE zu aggregieren. Nichtsdestotrotz empfehlen wir, dieses Problem bei einer Weiterentwicklung der Methode noch genauer zu betrachten.

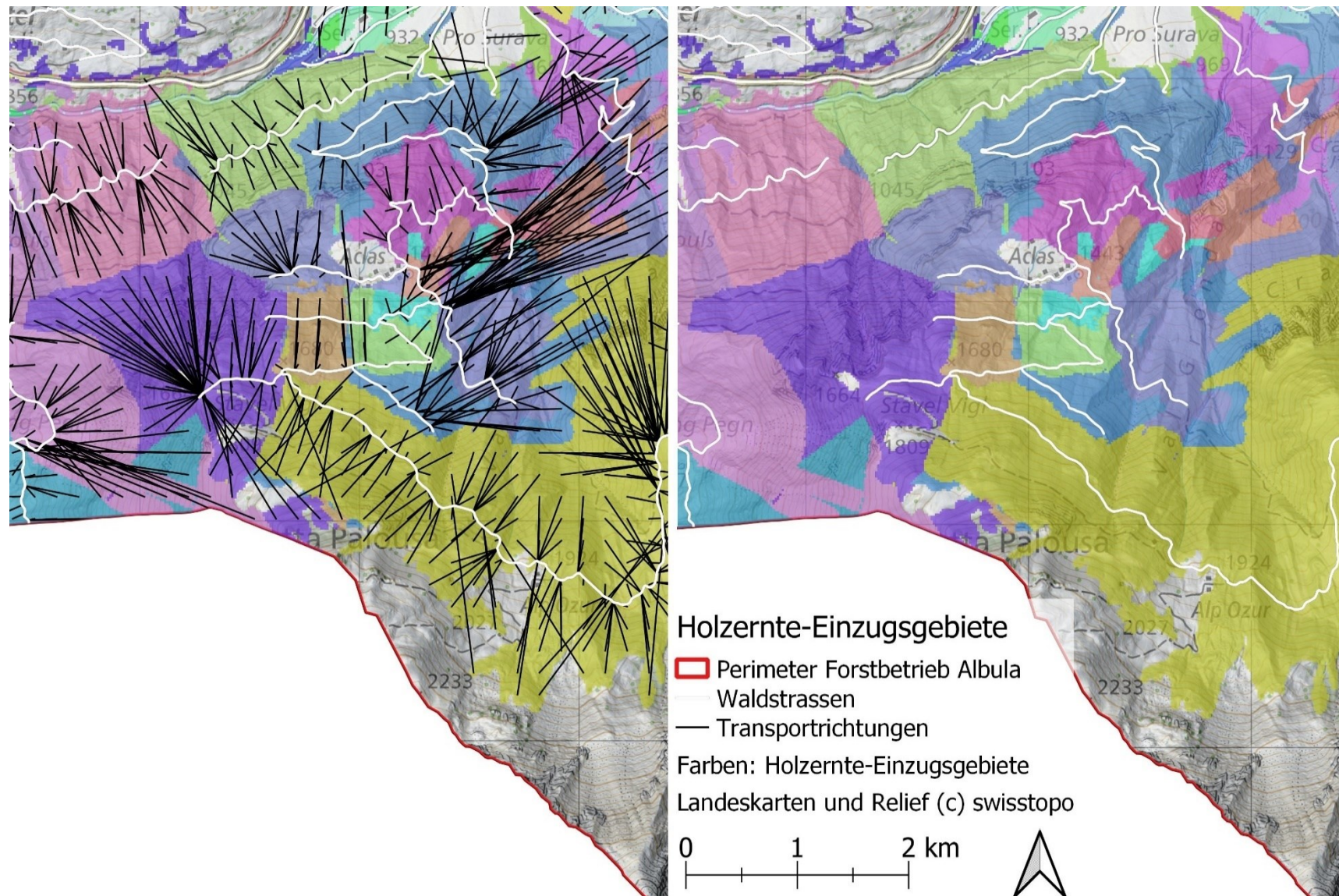


Abbildung 28: Rechts: Modellierung der Holzernteeinzugsgebiete für den Betrieb Albula (Ausschnitt). Links: Mit Transportrichtungen © swisstopo 2022.

3.3 Seillinienlayout und Ökosystemleistungen

3.3.1 Einteilung relevanter Ökosystemleistungen

Die Planungsexperten und -expertinnen, die im April 2022 zum Workshop zusammenkamen, erstellten eine Liste der Ökosystemleistungen, die auf betrieblicher und überbetrieblicher Planungsebene bei der Waldbewirtschaftung wichtig sind. Sie ordneten die Waldleistungen den drei übergeordneten Waldfunktionen **Nutzen**, **Schutz** und **Wohlfahrt** zu und beschrieben Einflussfaktoren, die einen Einfluss auf die Bereitstellung der jeweiligen Waldleistung haben. Da die Experten und Expertinnen aus der gesamten Schweiz kamen, ist die Liste nicht ausschliesslich auf Gebirgswälder und Gelände mit seilgestützter Holzerntemethode zugeschnitten. In Abbildung 29 sind die aufgeführten Waldleistungen, Waldfunktionen und Einflussfaktoren abgebildet. Interessanterweise stellten sich einige Einflussfaktoren heraus, die auf fast alle Waldleistungen einen Einfluss haben. Einer dieser Faktoren ist das die Erschliessung und damit zusammenhängend das Holzerntekonzept und die Feinerschliessung. Im Gebirge ist die Feinerschliessung (Layout der Seillinien) von besonderer Bedeutung.

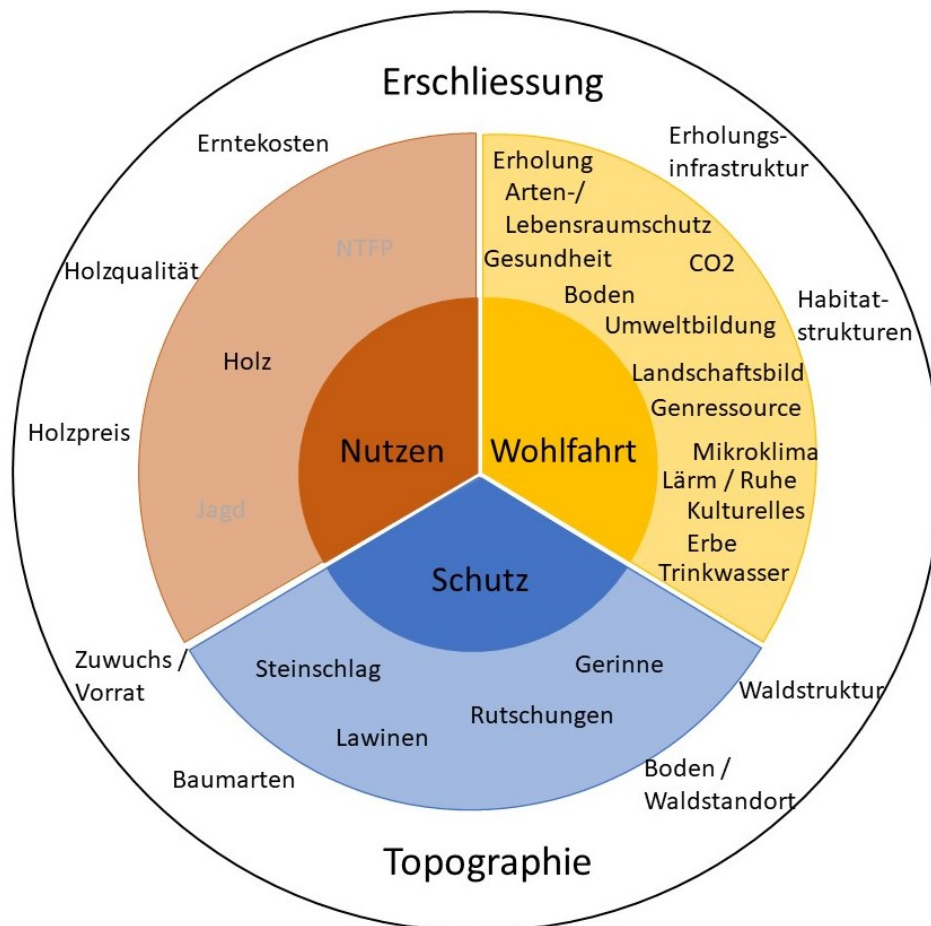


Abbildung 29: Die drei Waldfunktionen sind in der Mitte dargestellt, darum herum die jeweiligen Waldleistungen (nicht weiter betrachtete Leistungen in grau). Im äusseren Kreis sind die Einflussfaktoren auf die Waldleistungen abgebildet. Die Einflussfaktoren treffen auf alle Waldleistungen zu. Erschliessung und Topographie sind zentrale Einflussgrössen für fast alle Leistungen, die laut Planungsexperten und -expertinnen aus der Praxis auf betrieblicher Ebene in der Waldbewirtschaftung wichtig sind.

3.3.2 Einfluss des Seillinienlayouts auf Ökosystemleistungen

Das Seillinienlayout wird durch die **Dichte der Seillinien** (den Seillinienabstand), die **Ausrichtung** (der Winkel der Seillinie im Verhältnis zur Falllinie des Hangs), und die **Länge** der Seillinie beschrieben. Werden diese drei Grössen variiert, beeinflusst das verschiedene Kenngrössen im Wald, die wiederum einen Einfluss auf die Bereitstellung von Ökosystemleistungen haben (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Zusammenhang der Parameter im Seillinienlayout und Kenngrössen im Wald.

Seillinienlayout	beeinflusste Kenngrösse im Wald	Zusammenhang
Abstand der Seillinien (Dichte in [m/ha]) (Arbeitsfeldbreite)	Deckungsgrad oder Bestockungsgrad [%]	Je dichter die Seillinien, desto tiefer der Deckungs- / Bestockungsgrad.
Länge der Seillinien [m]	Lückengrösse in Falllinie [m]	Je länger die Seillinien, länger die potenziellen Lücken in Falllinie, insbesondere falls die Seillinien in Fallrichtung verlaufen.
Ausrichtung der Seillinien [Grad versetzt zur Falllinie]	Lückengrösse in Falllinie [m] Exposition der Lücke [N,S,W,O]	Je näher bei 0° versetzt zur Falllinie, desto länger die Lücke in Falllinie Exposition der Lücke hängt vom Zusammenspiel aus Hangexposition und Ausrichtung der Seillinie zusammen. Je näher bei 0° zur Falllinie die Ausrichtung ist, desto näher ist die Lückenexposition der Hangexposition.

Die Abhängigkeit der drei forstlichen Kenngrössen vom Seillinienlayout kann folgendermassen beschrieben werden:

Deckungs- / Bestockungsgrad

Durch das Anlegen der Feinerschliessung, also der Seiltrassen, entstehen unbestockte Gebiete im Wald. Die Fläche der Seiltrassen pro Hektare muss dementsprechend vom Deckungs- / Bestockungsgrad in Prozent abgezogen werden. Sie berechnet sich aus der durchschnittlichen Breite der Seiltrasse, multipliziert mit der durchschnittlichen Seillinienlänge über ein gesamtes Planungsgebiet hinweg. Es wird angenommen, dass Seillinien ausschliesslich auf bestocktem Gebiet eingerichtet werden.

t = Breite einer Seiltrasse [m]

L_D = Durchschnittliche Länge der Seillinien im Planungsgebiet [m]

A = Fläche des Planungsgebiets [m²]

d = Anzahl der Seiltrassen im Planungsgebiet

B = aktueller Deckungs- / Bestockungsgrad [%]

ΔB = Abzug vom aktuellen Deckungs- / Bestockungsgrad [%]

$$\Delta B = \frac{d * (t * L_D)}{A * B}$$

(10)

Lückenzlänge in Falllinie

Die Lückenzlänge in Falllinie ist sowohl abhängig von Winkel der Seiltrasse zur Falllinie als auch von der Länge der Seillinie. Liegt die Seiltrasse in der Falllinie, ist die Lücke so lang wie die Seillinie. Liegt die Seillinie genau hangparallel, ist die Lücke so lang wie die Seiltrasse breit ist.

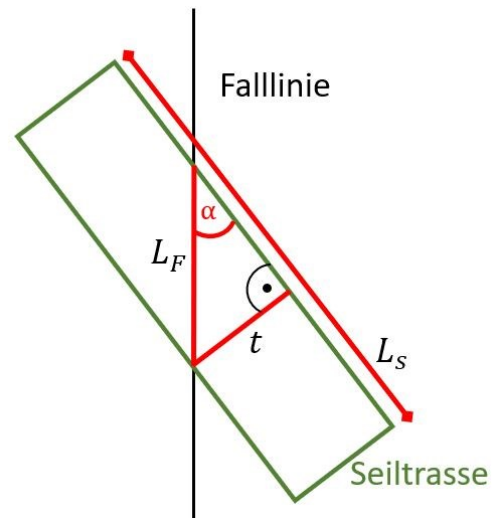
t = Breite einer Seiltrasse [m]

α = Winkel der Seillinie zur Falllinie

L_S = Länge der Seillinie

L_F = Länge der Lücke in Falllinie

$$L_F = \frac{t}{\sin \alpha} \quad \text{für } 0 < \alpha < 90 \quad (11)$$



Wenn $\alpha = 0$, dann $L_F = L_S$

Wenn $\alpha = 90$, dann $L_F = t$

Exposition der Lücke

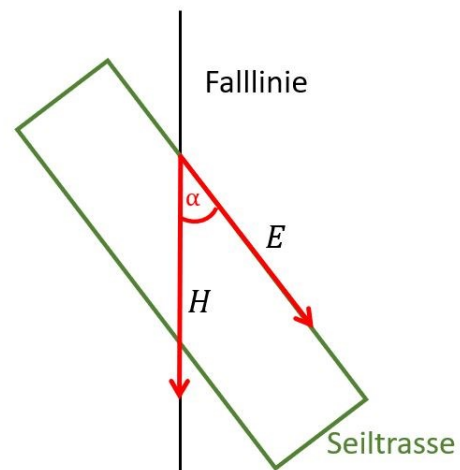
Die Haupt-Exposition der Lücke hängt nicht nur von der Ausrichtung der Seillinie ab, sondern hauptsächlich von der Exposition des Hangs. Deswegen wird die Exposition der Lücke abhängig von der Ausrichtung der Seillinie als Abweichung von der Hangexposition definiert. Wenn die Seillinie genau in Falllinie liegt, entspricht die Exposition der Lücke der Hangexposition. Liegt die Seiltrasse hangparallel, ist die Exposition der Lücke um 90° zur Hangexposition verschoben.

α = Winkel der Seillinie zur Falllinie

H = Hangexposition

E = Exposition der Lücke

$$E = H \pm \alpha \quad (12)$$



Bei der Literaturrecherche nach bestehenden Zusammenhängen zwischen dem Seillinienlayout und der Bereitstellung von Ökosystemleistungen, sowie Indikatoren für ESB wurde fokussiert nach solchen Zusammenhängen und Indikatoren gesucht, die sich ausschliesslich oder hauptsächlich auf die drei Kenngrößen: **Deckungs- /Bestockungsgrad**, **Lückengrösse in Falllinie** und **Lückensexposition** beziehen. Besonderes Augenmerk wurde ausserdem auf die Ökosystemleistungen Schutz vor Naturgefahren und Landschaftsbild gelegt. Als Ausgangspunkt dienten die etablierten Indikatorensets von Blattter et al.

(2017) und (2018), sowie Zusammenhänge, die im NaiS (Nachhaltigkeit im Schutzwald, Frehner et al. 2005) niedergeschrieben sind.

Alles in allem lässt sich sagen, dass es wenig Literatur gibt, die direkt die Auswirkungen des Seillinienlayouts auf Ökosystemleistungen beschreibt. Unter den Indikatoren für Ökosystemleistungen ist es praktisch unmöglich ein einziges Set an exakt geeigneten Indikatoren für jede Leistung und jede Situation zu finden (Gough et al. 2008). Im Umkehrschluss sind auch in diesem Fall die meisten Indikatoren nicht direkt durch das Layout von Seillinien beeinflusst. Den grössten Zusammenhang gibt es beim Deckungsgrad, der durch die Präsenz oder Absenz von Seillinien beeinflusst wird. Da der Grossteil der existierenden Indikatoren auf die ein oder andere Weise vom Deckungsgrad abhängt, wurde dieser hier nicht jedes Mal explizit berücksichtigt (Blatter et al. 2017; Temperli et al. 2020). Nur die Indikatoren oder Zusammenhänge, die konkreter mit Seillinien in Verbindung gebracht werden konnten werden hier aufgeführt. In Anhang 2 sind detaillierte Resultate der Literaturrecherche aufgeführt. Zu beachten ist, dass zwar generelle Aussagen über günstigere und ungünstigere Layouts getroffen werden konnten, eine Quantifizierung der Zusammenhänge in der vorhandenen Literatur jedoch schlicht nicht vorhanden ist.

Holzernte, Ökonomischer Gewinn, Arbeitssicherheit

Die ökonomische Beurteilung von Seillinien ist ausführlich in Bont et al. (2019) behandelt. Bei der Recherche zeigten sich noch weitere ökonomische Aspekte, die es beim Seillinienlayout zu beachten gilt (Tabelle 5). Generell stellte sich ein Trend heraus die Erschliessung eines Hanges mit diagonalen, parallelen Seillinien - wenn technisch möglich - einer sternförmigen Erschliessung, respektive einem parallelen, in Falllinie liegenden Layout zu bevorzugen (Aggeler 2002; Heinimann and Stampfer 2003; Heinimann 2003). Die Arbeitssicherheit ist ein kritischer Kontrapunkt zu der Ausrichtung in Falllinie, wobei bei einem Sternförmigen Layout die Übererschliessung an der Mitte des Sterns bemängelt wird (Frauenholz and Schwendt 1986; Wüthrich 1992).

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout, dem ökonomischen Gewinn und der Arbeitssicherheit

Diagonal-parallel > sternförmig > in Falllinie parallel

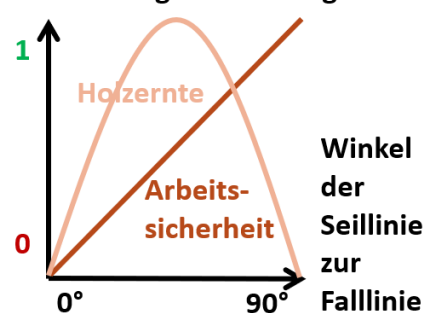
Mobilseilkran (leicht):	Abstand 30-40m
Mobilseilkran (mittel):	Abstand 40-70m
Konventioneller Seilkran:	Abstand 60-100m

Qualitativ beurteilter Zusammenhang zwischen der ökonomischen Leistung Holzernte und dem Seillinienlayout

1 = positiv

0 = negativ

Auswirkung auf Leistung



Schutz vor Naturgefahren

Zwischen dem Seillinienlayout und dem Schutz vor gravitativen Naturgefahren besteht ein sehr logischer Zusammenhang (Tabelle 6). Eine Lücke, die in einem Schutzwald in Falllinie ausgerichtet ist, ist anfällig gegen gravitative Prozesse. Bevorzugt sollen Seillinien also diagonal zum Hang und nicht in Falllinie verlaufen (Aggeler 2002). Etablierte Indices, wie sie in Blatter et al. (2018) (oder siehe auch Briner et al. 2013; Irauschek et al. 2017) Anwendung finden, setzen sich aus verschiedenen Einflussgrössen zusammen und werden nur indirekt über den Deckungsgrad vom Seillinienlayout beeinflusst. Quantifizierte Zusammenhänge lassen sich vor allem im NaiS (Nachhaltigkeit im Schutzwald, Frehner et al. 2005) finden. Dort werden die Anforderungsprofile an den Wald für den optimalen Schutz vor Naturgefahren mit Mindestanforderungen an Lückengrösse, Lückenhöhe in Falllinie und Deckungsgrad definiert (siehe Anhang 2). Für Lawinen, Rutschungen und Gerinneprozesse ist es wichtig, dass der Deckungsgrad dauernd und auch kleinflächig über 50% ist. In Gebieten mit Steinschlagprozessen spielt der Deckungsgrad nur indirekt eine Rolle, indem die bewaldete Hanglänge, sowie die Stammzahlen entscheidend sind. Bei Rutschungen und Gerinneprozessen, bei denen der Deckungsgrad eine grosse Rolle für die Schutzwirkung des Waldes spielt, sollte die maximale Lückengrösse bei gesicherter Verjüngung 12a nicht überschreiten, die ideale Lückengrösse liegt bei 4 - 6 a. Die Lückenhöhe in Falllinie ist wiederum bei Lawinen-, Steinschlag- und Gerinneprozessen zu beachten. Idealerweise ist eine Lücke in Falllinie für alle Prozesse nicht länger als 20m. In Abhängigkeit von der Hangneigung sollte sie bei Lawinenprozessen 60m nicht überschreiten, mit einer maximalen Breite von 5 - 15m. Gemäss Wüthrich (1992) sind Seiltrassen jedoch selten breiter als 2-4m sind, sollten diese Anforderungen auch bei diagonalen Anlage der Seillinie immer gegeben sein.

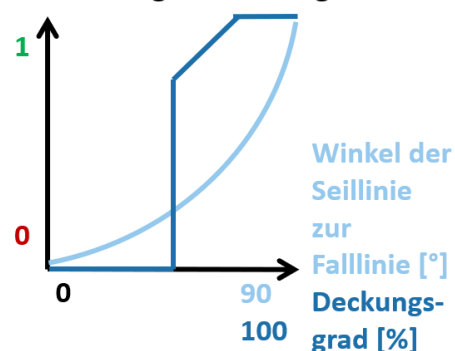
Tabelle 6: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und dem Schutz vor Naturgefahren

Qualitativ beurteilter Zusammenhang zwischen Schutz vor Naturgefahren und dem Seillinienlayout

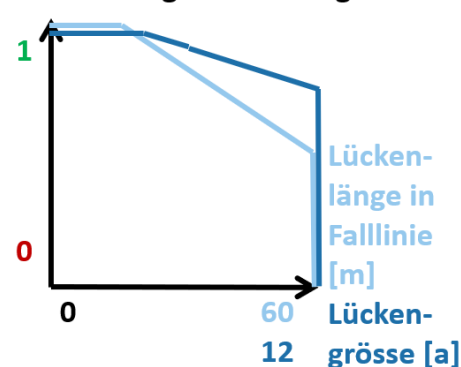
1 = positiv

0 = negativ

Auswirkung auf Leistung



Auswirkung auf Leistung



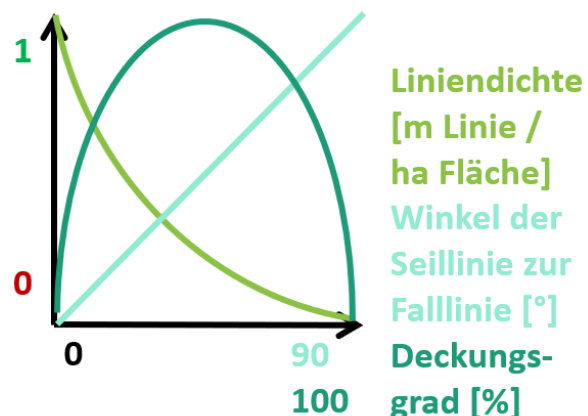
Landschaftsbild, Erholung

Es gibt wenig Studien, die konkrete Elemente der Landschaft oder des Waldes direkt mit der Erholungswirkung oder der Attraktivität der Landschaft verbinden. Existierende Untersuchungen können nur qualitative Aussagen treffen, keine quantitativen (Tabelle 7). Eine mögliche Ursache hierfür ist der oft nicht greifbare oder eindeutig zuordenbare Zusammenhang zwischen menschlichen Präferenzen in der Landschaft und den eigentlichen Landschaftselementen (Edwards et al. 2012a; Wartmann et al. 2021; Hegetschweiler et al. 2022). Oft genannt wird die visuelle Eindringtiefe in den Wald als ein wichtiger Faktor bei der Beurteilung von Wäldern aus Erholungsperspektive (Blatter et al. 2017). Der Mittelweg ist hier das Ziel, sowohl völlig durchsichtige Wälder, als auch undurchdringbare werden nicht gemocht (Edwards et al. 2012a; Hegetschweiler et al. 2022). Hier könnte man einen Zusammenhang zu Seillinien herstellen, indem Seillinien die visuelle Eindringtiefe erhöhen und teilweise kleine Öffnungen für eine gute Aussicht bieten (Edwards et al. 2012b). Grössere Kahlflächen, sowohl durch die Seiltrassen selbst als auch durch Landeplätze bei Sternförmiger Anlage von Seiltrassen sind jedoch zu vermeiden (Wüthrich 1992; Edwards et al. 2012a; Brang et al. 2017). In gleichem Zuge wird oft genannt, dass diagonal angelegte Seillinien das Landschaftsbild weniger beeinträchtigen als in der Falllinie angelegte, vor allem wenn sie auf exponierte Geländeformen hin zulaufen (Wüthrich 1992; Heinimann and Stampfer 2003). Hintergründe, Experimente oder Erklärungen zu diesen Aussagen, obwohl sie von mehreren Autoren wiederholt wurden, konnten jedoch nicht gefunden werden. Generell lässt sich sagen, dass geometrische Formen, wie z.B. auch Hochspannungsleitungen sie darstellen nicht besonders positiv im Landschaftsbild bewertet werden (Price 2003; Wartmann et al. 2021). Die reine Präsenz von Wegen, Strassen und Spuren der Bewirtschaftung wie Holzschläge oder Wegsperrungen haben jedoch zumindest in der Schweiz für über 50% der Bevölkerung keinen Einfluss auf die Erholung im Wald (Hegetschweiler et al. 2022).

Tabelle 7: Zusammenhang zwischen dem Landschaftsbild, der Erholungswirkung und dem Seillinienlayout

Qualitativ beurteilter Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und der Erholungswirkung und Landschaftsbild

Auswirkung auf Leistung



Resilienz des Waldes, Verjüngung

Bei der Recherche tauchte ausser den bestehenden Waldleistungen noch das Thema der Resilienz des Waldes, spezifisch der Schutz der Verjüngung und des verbleibenden Bestandes auf. Das Layout der Seillinien im Gelände kann einen bedeutenden Einfluss auf beides haben, da Schäden an der bestehenden Verjüngung oder am verbleibenden Bestand durch den Zuzug von Stämmen zur Seillinie entstehen (Tabelle 8). Der Zuzug sollte somit immer möglichst kurz gehalten werden (Wüthrich 1992, Anhang 2). Bei der Ausrichtung der Seillinie sind sich die Autoren jedoch nicht ganz einig. Die meisten Autoren bevorzugen ein diagonales Anlegen der Seillinie, damit der Zuzug in Falllinie erfolgen kann

(Wüthrich 1992; Aggeler 2002; Heinimann und Stampfer 2003; Heinimann 2003). In einem Experiment konnte jedoch kein direkter Zusammenhang der Ausrichtung der Seillinie mit den Schäden am verbleibenden Bestand festgestellt werden (Limbeck-Lilienau 2003). Ein anderer Einfluss der Ausrichtung auf die Verjüngung konnte jedoch beziffert werden. Neue Verjüngung in der entstehenden Lücke durch die Seiltrasse wird stark durch die Exposition der Lücke beeinflusst. Lücken in nördlicher Exposition bieten tendenziell zu wenig Sonneneinstrahlung für eine erfolgreiche Verjüngung, während in Südausrichtung die Austrocknungsgefahr hoch ist (Heinimann and Stampfer 2003; Brang et al. 2017). Auf Standorten mit viel Konkurrenzvegetation muss besonders auf die Sonneneinstrahlung und die Lückengrösse geachtet werden, da bei Lücken über 0.25ha die Verjüngung Mühe hat sich durchzusetzen (Kalt et al. 2021). Bei Lücken in Südausrichtung mit maximaler Sonneneinstrahlung erhöht sich ausserdem das Risiko für einen folgenden Borkenkäferbefall (Netherer and Nopp-Mayr 2005).

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und der Resilienz des Waldes

Qualitativ beurteilter Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und der Resilienz des Waldes (v.a. Verjüngungsgunst und Schäden am verbleibenden Bestand)

1 = positiv

0 = negativ

Auswirkung auf Leistung



- ➔ Tendenziell eher diagonal damit der der Zuzug nicht schädigt
- ➔ Am besten in NO/SO oder NW/SW Ausrichtung.

Biodiversität und Lebensraum

Es lässt sich kein allgemeiner direkter Zusammenhang zwischen der sehr breit gefassten Biodiversität und dem Seillinienlayout feststellen. Aus Sicht des Bodenschutzes und der Störungsempfindlichkeit gewisser Biotope ist es wünschenswert, die Anzahl und Dichte der Seillinien so klein wie möglich zu halten (Jandl et al. 2007). Auf der anderen Seite ist in Bezug auf Bodenschutz der Seilkran bodengestützten Verfahren vorzuziehen (Schweier et al. 2022). Weiter kann der Lebensraumschutz zum Erhalt der Biodiversität auch spezifische Eingriffe in Form von Lücken einer bestimmten Ausrichtung und Länge nötig machen, was mit Seillinien zu erreichen ist.

Unter bestimmten Zielsetzungen gilt also:

Min

$$D_S = \frac{M}{F}$$

(13)

D_S = Laufmeter Seillinie pro Hektar Einsatzfläche

M = Laufmeter Seillinie auf der Betrachtungsfläche in [m]

F = Einsatzfläche, Betrachtungsfläche in [ha]

Unter wieder anderen Zielsetzungen muss der Zusammenhang individuell abgeklärt werden.

Kohlenstoffspeicher

Die Kohlenstoffsinkenleistung des Waldes wird durch das Management von Wäldern beeinflusst (Thrippleton et al. 2021). Interessant ist hier der Ansatz, die Wirkung des Managements zu beziffern, indem der Ausstoss an fossilem CO_2 pro produziertem Kubikmeter Holz berechnet wird (Jasinevičius et al. 2017). Nach diesem Ansatz ist ein solches Seillinienlayout zu bevorzugen, bei dem möglichst viel Holz pro Seillinie anfällt, damit der relative CO_2 Ausstoss minimiert wird. Dies ist eher bei diagonal angelegten Linien gegenüber solchen, die in Falllinie liegen (Heinimann and Stampfer 2003). Diese Regel wird jedoch schon in der ökonomischen Beurteilung der Seillinie miteinbezogen und hier nicht mehr extra aufgeführt.

Synthese

Die oben ausgeführte Literaturanalyse bestätigt die Aussage aus Bont et al. (2019), dass beim Anlegen der Seillinie, die **relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie** ein sehr wichtiges Kriterium bezüglich Arbeitssicherheit, Schutz vor Naturgefahren, Verjüngungsgunst und Landschaftsästhetik darstellt. Dieses Kriterium kann zudem auch gut bereits über das Layout der Feinerschliessung gesteuert werden und damit auch über die Grenzen der Bewirtschaftungseinheiten gesteuert werden. Als zweites Kriterium wurde auch mehrmals die **Linienbreite (Arbeitsfeldbreite)** bzw. der Abstand zwischen benachbarten Seillinien erwähnt. Dieses Kriterium spielt jedoch auf unserer betrachteten Flughöhe, also für das Layout der Feinerschliessungseinheiten bzw. die daraus abgeleiteten BWEs, eine untergeordnete Rolle. Der definitive Verlauf einer einzelnen Linie inklusive deren Abstand zueinander wird erst in der operativen Ausführung festgelegt und hängt unter anderem von verfügbaren Stützenbäumen, Ankerelementen und den Bestandeseigenschaften ab. Infolgedessen wurde nur das Kriterium '**relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie**' in die Modellierung der Seillinien integriert.

Im Rahmen einer Optimierung empfehlen wir die Integration des Kriteriums '**relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie**' entsprechend einer gemäss Abbildung 30 und Tabelle 9 aufgeführten Zielfunktion zu implementieren. Die in Tabelle 9 aufgeführten Werte machen unserer Einschätzung nach für den Betrieb Albula Sinn, müssen aber für andere Betriebe überprüft werden.

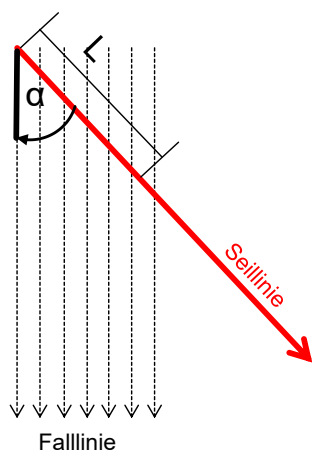


Abbildung 30: relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie.

Tabelle 9: Penalty Werte für die relative Ausrichtung der Seillinie im Vergleich zur Falllinie.

Winkel (α)	Penalty
0 – 10°	$L * 0.5$
10 – 35°	0
35 – 45°	$L * 0.5$
45 – 90°	$L * 2$

3.3.3 Modellierung möglicher Seillinien

Aufbauend auf vorangehendem Kapitel (vgl. Synthese) wurden die Indikatoren in die Modellierung der Seillinien integriert, indem für alle Linien auch die Abweichung der Richtung der Seillinie zur Falllinie geprüft wurde. Die Schwierigkeit war hierbei ein Kriterium zu finden, das auch auf inhomogenes Terrain anwendbar ist. Es wurden mehrere Kriterien definiert, von denen jeweils eines erfüllt sein musste, damit die Seillinie als solche zulässig war.

Variablennamen

d_{aspect} :	Abweichung der Richtung von der Seillinie von der Falllinie; wurde entlang der Seillinie alle 10m evaluiert (Vektorvariable) [0..90°]
d_{grenz}	Festgelegter Grenzwert der Abweichung der Richtung von der Seillinie von der Falllinie [°]
$anteil_{innerhalb}$:	Anteil der Längenanteile der Seillinie, bei welcher die Abweichung (d_{aspect}) unterhalb des Grenzwertes (d_{grenz}) sind [0..1]
$l_{innerhalb}$:	Länge der Seillinie, bei welcher die Abweichung (d_{aspect}) unterhalb des Grenzwertes (d_{grenz}) liegt [m]
d_{mean} :	Mittlere Abweichung (d_{aspect}) [°]

Die Seillinie wird als solche als zulässig betrachtet, falls [I] $anteil_{innerhalb} > 0.5$ oder [II] $d_{mean} < d_{grenz}$ oder [III] $l_{innerhalb} > 200m$

Wenn bei langen Seillinien die Kriterien nicht erfüllt waren, wurden sie fortlaufend gekürzt und dann geprüft, ob bei diesen kürzeren Linien die Anforderungen gegeben sind. Die obenstehenden Kriterien wurden gutachtlich aufgestellt, ebenso wurde $d_{grenz} = 20^\circ$ gutachtlich festgelegt. Sie haben sich dennoch in unserer Studie bewährt, denn es wurden plausible Resultate erzielt. Abbildung 31 zeigt den Einfluss der Begrenzung der Abweichung der Richtung Seillinien im Vergleich mit der Falllinie (Val Tasna bei Ftan). Die Transportrichtungen ergeben mit einer Begrenzung der Abweichung der Richtung der Seillinien im Vergleich mit der Falllinie mehr Sinn (Abbildung 31, rechts). Wir empfehlen jedoch bei einer Weiterführung der Arbeiten, die erwähnten Kriterien und Werte noch zu verfeinern.

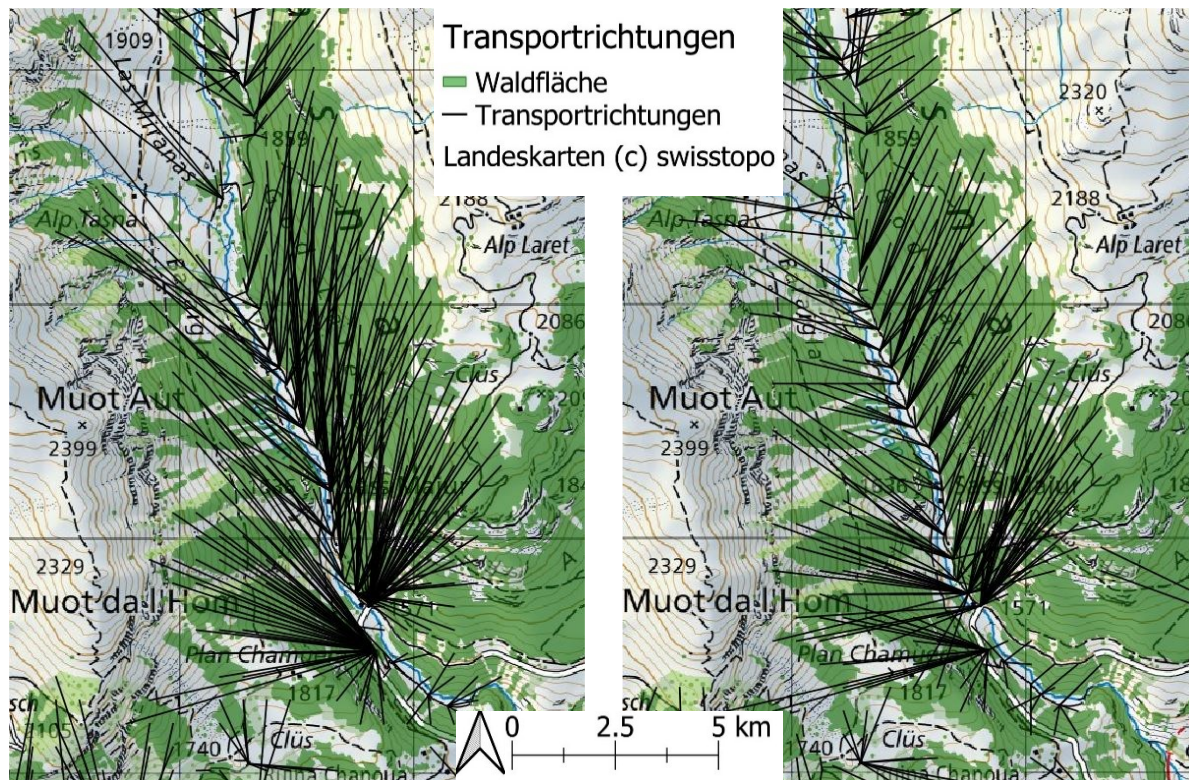


Abbildung 31: Die Abbildungen zeigen den Einfluss der Begrenzung der Abweichung der Richtung Seillinien im Vergleich mit der Falllinie (Val Tasna bei Ftan). Links: Ohne Begrenzung; Rechts: Begrenzung auf 20° ($d_{\text{grenz}} = 20^\circ$). Die Transportrichtungen ergeben mit einer Begrenzung der Abweichung der Richtung der Seillinien im Vergleich mit der Falllinie mehr Sinn.

3.4 Umgang mit Störungen und Klimawandel

Von verschiedenen Seiten wurde die Notwendigkeit geäußert, dass BWEs im Sinne einer kontinuierlichen Waldplanung langfristig Bestand haben sollen. Darauf wurde in der Ausarbeitung des Projektes das Hauptaugenmerk gerichtet. Der Klimawandel und die damit verbundenen grossflächigen Störungen werden sicher eine grosse Herausforderung in der künftigen Waldplanung darstellen.

Der Umgang sollte auf zwei Ebenen erfolgen: [I] Prävention und [II] Reaktion

- Im Sinne der **Prävention** geht es darum, Hot-Spots zu identifizieren, also Flächen in denen prioritär eingegriffen werden muss. Wichtig in der Betrachtung ist die Frage, wo die knappen Ressourcen (finanziell aber auch Arbeitskraft) am effizientesten eingesetzt werden können.
- Die **Reaktion** geht der Frage nach, was nach einem grossen Störungsereignis (Windwurf inkl. Käfer, Waldbrand), die effizientesten Massnahmen sind, um eine möglichst rasche Bereitstellung der Waldleistungen wieder zu ermöglichen. Dies umfasst ebenfalls Kosten-Nutzen Abwägungen.

In beiden Fällen eignen sich BWEs als Grundlage für die räumliche Entscheidung. Für die Prävention macht es unserer Meinung Sinn, eine «Hot-Spot Karte» als zusätzliches Kriterium zur Ausscheidung von Einheiten heranzuziehen (Abbildung 32). Da es sich bei BWEs eher um eine langfristige Planung handelt, der Einbezug von «Hot-Spots» aber eher einen kurzfristigen Zustand darstellt, sind die Einheiten (je nach Philosophie des Kantons) nicht zwingend BWEs. Die Ableitung einer grossflächigen Hot-Spot Karte wird das Hauptprodukt des laufenden WSL Projektes MountEx (<https://www.wsl.ch/de/projekte/mountex.html>) sein, welches noch bis Ende 2024 läuft.

Holzerntekonzept	Feinerschliessung (Einzugsgebiete oder Strassen als Grenzen)	Eigentümergegrenzen	Hot-Spot Karte
Ökosystemleistungen	Laub- / Nadelholz	Wüchsigkeit	
Transport-grenzen	Fläche / Anzahl	Exposition	

Abbildung 32: Kriterien der Ausscheidung von (Bewirtschaftungseinheiten, mit dem neuen Kriterium «Hot-Spot Karte».

Im Sinne der **Reaktion** kann es nötig sein, die Planung sowie auch die Feinerschliessungsplanung an die neuen Gegebenheiten anzupassen.

Indikator zur optimalen Abdeckung der Risikogebiete (Hot-Spots) / Schadensflächen

Nach einem grossen Störungsereignis ist es wichtig die Feinerschliessung im Seilgelände dementsprechend anzupassen, damit ein möglichst effizienter Ressourceneinsatz möglich ist. Aus unserer Meinung ist ein Layout vorteilhaft, welches mit möglichst wenigen Linien einen grossen Teil der dringenden Eingriffsflächen abdeckt.

Um dies zu beurteilen, schlagen wir einen Indikator vor, der misst, welcher Anteil der dringenden Eingriffsflächen durch möglichst wenige Linien abgedeckt wird.

Abbildung 33 zeigt das Prinzip des Indikators. Die BWE ist grün aufgezeichnet, die dringenden Eingriffsflächen in Gelb. Die gestrichelten Linien stellen die Seillinien dar. Der Indikator misst für jede Seillinien die «dringende Eingriffsfläche», welche erreichbar ist. Die Zahlen werden für alle Linien kumuliert. Im Beispiel aus Abbildung 33 lässt sich beispielsweise herauslesen, dass mit 4 Seillinien 100% der «dringenden Eingriffsfläche» abgedeckt ist, mit 3 Linien ist 90% abgedeckt (90% Percentil). Existieren mehrere Möglichkeiten der Feinerschliessung kann eine Bewertung / Vergleich anhand dieses Indikators erfolgen. Wir empfehlen den Gebrauch des 90% Percentils. Dieser Indikator eignet sich ebenfalls zum Einbau in die automatische Optimierung (als eigenständiges Ziel) gemäss Bont et al. (2019).

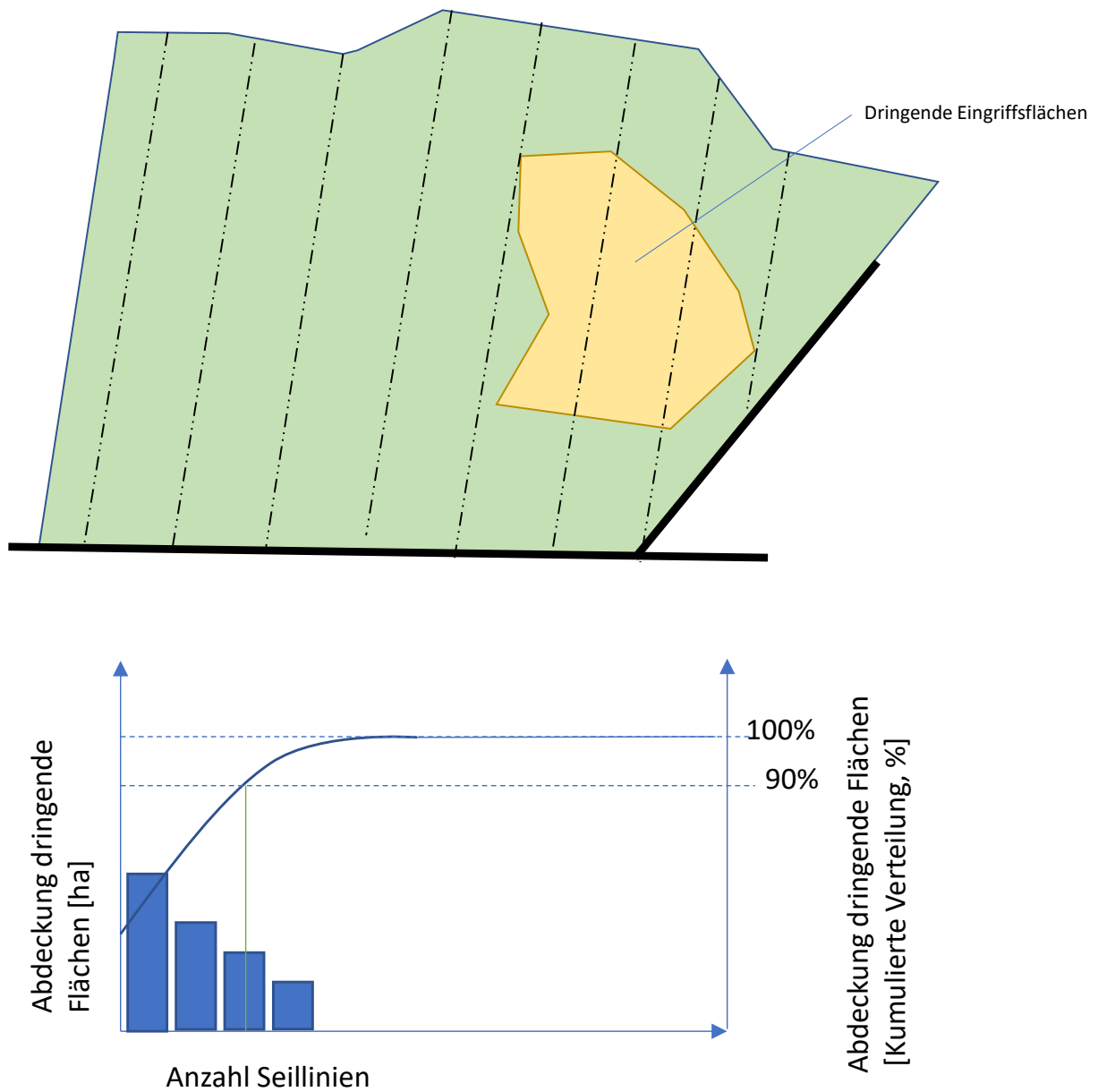


Abbildung 33: Illustration des Indikators zur Messung der Abdeckung der Risikogebiete durch möglichst wenige Seillinien.

4 Diskussion

Die klassische Einteilung in Bestände erfolgt in der Regel nach rein waldbaulichen Gesichtspunkten, daher eignen sich Bestände nur bedingt als Grundlage für eine effiziente betriebliche und operationelle Planung. So macht es grundsätzlich Sinn, Maschineneinsätze bestandesübergreifend zu planen, beispielsweise indem ein Seilkran nicht nur für ein oder zwei Seillinien, sondern für die Holzurückung in einem ganzen Hang installiert wird.

Ziel der Waldplanung ist es also, den Wald so in BWEs zu unterteilen, dass nicht nur waldbaulichen Aspekten, sondern auch der technischen Ausführung und der Kontrolle Rechnung getragen wird, was insbesondere in stufigen Wäldern und dem Gebirgswald von besonderer Bedeutung ist.

In diesem Projekt wurde infolgedessen ein neuer Rahmen skizziert und implementiert. Mit dem Ziel das Konzept der Bewirtschaftungseinheiten in der Praxis einzuführen und zu etablieren.

4.1 Hauptergebnisse

Folgende Hauptergebnisse resultieren aus diesem Projekt:

1. Konzeptionelles Modell und Implementation zur Ausscheidung von Bewirtschaftungseinheiten

In Zusammenarbeit mit den Kantonen GR, AG und ZG wurde eine Methode erarbeitet um teilautomatisiert Bewirtschaftungseinheiten (BWE) ausscheiden zu können. Die Methode wurde an einem eigens von der WSL und mit der WAPLAMA organisierten Workshop (7. April 2022) auch mit zahlreichen anderen Vertretern und Vertreterinnen (Betriebe, Försterschulen, Kantone, Ingenieurbüros) diskutiert und entwickelt. In der Schlussphase konzentrierte sich die Zusammenarbeit auf den Kanton Graubünden mit dem Testgebiet Forstbetrieb Albula. An einer Konferenz mit Vertretern des RFI sowie dem Kanton Graubünden wurden die Resultate (automatisierte Ausscheidung der BWEs) präsentiert (29.9.2022). Der Kanton zeigte sich sehr zufrieden mit den Ergebnissen.

2. Feinerschliessungseinheiten und Holzernteeinzugsgebiete

Eine wichtige und unabdingbare Grundlage für die Ausscheidung der BWEs stellt die Modellierung der Feinerschliessungseinheiten, in dessen Rahmen folgendes resultierte:

- Ausscheidung von auf der Feinerschliessung basierten **Eingriffseinheiten für befahrbare Standorte**. Diese Methode wurde in der Programmiersprache Python implementiert und wurde sowohl als Grundlage zur Ausscheidung von BWEs verwendet als auch zur feineren Unterteilung von Bewirtschaftungseinheiten. Diese Ausscheidung basiert auf einer Netzwerkmodellierung (Dijkstra Algorithmus).
- Ausscheidung von auf der Feinerschliessung basierten **Eingriffseinheiten für seilgestützte Standorte**. Die Implementation dieser räumlichen Optimierung erfolgte in Matlab und dient als Grundlage für die Ausscheidung von BWEs sowie deren Feinunterteilung.
- Ausscheidung von **Eingriffseinheiten für die luftgestützte Holzernte (Helikopter)**. Die Implementation dieser räumlichen Optimierung erfolgte in Python.
- Modellierung von **Holzernteeinzugsgebieten**. Basierend auf oben erwähnten Punkten wurde Holzernteeinzugsgebiete modelliert. Es hat sich im Laufe des Projektes gezeigt, dass die 'Holzernteeinzugsgebiete' in sich abgeschlossene 'Feinerschliessungseinheiten' darstellen und eine unabdingbare Grundlage für die Ausscheidung von BWEs sind.

3. Erweiterung der räumlichen Zielfunktion zur Messung von Ökosystemleistungen in Abhängigkeit des Holzerntelayouts

Das räumliche Holzerntelayout hat vor allem bei der seilgestützten Holzernte einen Einfluss auf die Ökosystemleistungen. Es wurde das bestehendes Indikatorenset aus Bont et al. (2019) erweitert und bei der Modellierung der Seillinien berücksichtigt.

4. Die ganze Methodik wurde entsprechend aufgebaut, so dass ein flexibles Kriterienset definiert werden kann, welches es ermöglicht beispielsweise nach Störungen innert kurzer Zeit gegebenenfalls neue BWEs zu berechnen. Zusätzlich wurde ein Störungsindikator entwickelt, welcher zusätzlich zu den bestehenden Indikatoren eine gesamtheitliche Feinerschliessungsplanung unter Berücksichtigung von Dringlichkeiten (z.B. nach einem Sturm) ermöglichen soll.

4.2 Haupterkenntnisse

Die Methodik wurde mit den Praxispartnern ausführlich getestet. Mit dem Kanton Graubünden bestand der grösste Austausch. Darauf erfolgend können folgende Haupterkenntnisse abgeleitet werden:

1. Durch BWEs werden Planung, Ausführung und Kontrolle der Waldbewirtschaftung aufeinander abgestimmt. Für die Planung sind vor allem vom Kanton festgelegten vorrangigen Waldfunktionen wichtig. Für die Ausführung spielt dagegen eine effiziente Feinerschliessung eine grössere Rolle. Das gilt ganz besonders für das Gebirge (Seillinienlayout).
2. Die teilautomatisierte Methodik erlaubt ein zielgerichtetes und objektives Vorgehen bei der Ausscheidung von Bewirtschaftungseinheiten. Durch die automatisierte Berechnung der BWEs können mehrere Varianten direkt verglichen werden. Im Fall des Forstbetriebs Albula wurde der Einfluss verschiedener Gewichtungen der beiden Kriterien, sowie unterschiedlich grosser BWEs verglichen.
3. Als «Zwischenprodukt» zur Ausscheidung der BWEs entstehen weitere Karten, die von der Praxis ebenfalls als sehr hilfreich empfunden wurden. So gibt es unter anderem eine Karte der möglichen Erntemethoden, eine Karte der Grundeinheiten, sowie Karten von technisch möglichen Seillinien und Rückewegen.
4. Die Modellierung mit unterschiedlichen Parametern hat gezeigt, dass die IT-basierte Berechnung unter verschiedenen Bedingungen zuverlässig und korrekt abläuft. Dennoch kann eine Modellierung nie die ganze Realität abbilden. Die Resultate hängen stark von der Qualität der berücksichtigten Eingangsdaten ab. Zentral ist dabei der Datensatz der Walderschliessung, welcher die Befahrbarkeits- und Tragfähigkeitslimiten der Waldstrassen korrekt wiedergeben muss.
5. Zusammenspiel von Modell und Experten: Für die Verwendung der Modellergebnisse sind das Fachwissen und die Lokalkenntnisse der Förster unersetzlich, sie prüfen die BWEs und integrieren Aspekte, welche das Modell nicht berücksichtigen konnte. Es kann nicht erwartet werden, dass die Modelllösung 1:1 übernommen werden kann. Vielmehr ist die Modelllösung ein bereits weit entwickelter Lösungsvorschlag, auf welchem die definitive Lösung erarbeitet werden kann. Somit können die Lösungen in kürzerer Zeit erarbeitet werden. Wichtig ist sich folgendes zu merken: **Resultate können auch Fehler enthalten, sind aber trotzdem hilfreich, die Modelllimitationen müssen aber bekannt sein.** Für den Kanton Graubünden es ist wichtig, eine objektive, einheitliche Grundlage für alle Reviere zu haben, sodass die BWEs im ganzen Kanton einheitlich ausgeschieden werden.
6. Eine gute und realistische Modellierung der Holzernteeinzugsgebiete ist der wichtigste Baustein für gut abgegrenzte BWEs. Je besser die Holzernteeinzugsgebiet, desto besser wird das Endresultat und desto kleiner wird der Aufwand für das manuelle Nachbearbeiten der vorgeschlagenen Lösungen.

7. Die Datenlage für Indikatoren von Ökosystemleistungen ist sehr dürftig. Bezüglich der Implementation gab es nur wenig neue Erkenntnisse im Vergleich zu früheren Arbeiten.
8. Lokale Daten wurden zusätzlich zu schweizweiten frei verfügbaren verwendet. Obwohl der Aufwand für die Datenverarbeitung dadurch hoch war, werden die Ergebnisse auch präziser und liegen oft näher an der Realität. Für das Endergebnis ist es extrem wichtig, dass die Daten sauber ausgewählt und prozessiert sind und dass möglichst keine Datenlücken existieren.

4.3 Kritische Reflexion und Empfehlungen für künftige Arbeiten

Die Waldplanung ist sehr umfassend. Es wurden Schwerpunkte gelegt, um ein abgerundetes Gesamtergebnis zu bekommen. Bei zukünftigen Projekten sollte unter anderem an folgendem weitergearbeitet werden:

Modellierung Holzernteeinzugsgebiete

Die Modellierung der Holzernteeinzugsgebiete hat sich in grossen Teilen bewährt, in einigen Fällen sind aber noch bessere Resultate möglich (vgl. auch Kapitel Resultate). Beispielsweise wird bei der Modellierung der Seillinien nur die technische Machbarkeit geprüft, nicht aber die ökonomische Effizienz. So kann es bei einem nur geringen Holzanfall (häufig nahe der Waldgrenze) auch günstiger sein, einen Helikopter einzusetzen, anstatt eine Seillinie zu installieren. Obwohl der Einfluss auf das Endergebnis wohl nicht gross ist, sollte auch die teilweise Fragmentierung der Holzernteeinzugsgebiete (vgl. Resultate) noch besser gelöst werden.

Optimierung

Für grosse zusammenhängende Gebiete stösst die Optimierung an Grenzen bezüglich Rechenzeit. Im vorliegenden Projekt wurden deshalb nicht alle möglichen Optimierungen im Code implementiert. Beispielsweise sind mit einer Methodik wie BEAMR deutlich geringere Rechenzeiten möglich (Church 2008). Für grosse Gebiete könnte auch der Einsatz einer Heuristik geprüft werden.

Ausgabeformat

Die Ausgabe erfolgt momentan als Raster, benutzerfreundlicher wäre eine Ausgabe als Vektor, mit vereinfachter Geometrie, denn bei Vektordaten lassen sich Geometrien bearbeiten.

Analyse Tool zur Bewertung von manuellen Lösungen

Der Workflow ist momentan so gedacht, dass das Optimierungsmodell eine Lösung ausgibt und die Zielerreichung bei dieser Lösung bewertet. Danach folgt die manuelle Nachbearbeitung der BWEs im GIS. Bei dieser kann momentan die Zielerreichung nicht gemessen werden.

Benutzerfreundliches Tool

Momentan ist die selbstständige Berechnung von BWEs schon für Spezialisten mit ausreichenden IT-Kenntnissen möglich. Unser langfristiges Ziel ist es, ein breit anwendbares Tool für die Forstpraxis zu erstellen. Das Konzept der BWEs, verschiedene Ansprüche von der technischen Bewirtschaftung hin zu den waldbaulichen Kriterien zusammenzubringen, kann schon jetzt von jedem verwendet werden.

4.4 Ausblick

4.4.1 WSL-Projekt Mountex

Im WSL Projekt MountEx (<https://www.wsl.ch/de/projekte/mountex.html>), welches noch bis Ende 2024 läuft, werden Leitlinien und Instrumente für die Bewirtschaftung von fichtendominierten Gebirgswäldern unter dem Einfluss von bisher undenkbaren, extremen Störungen entwickelt. Über verschiedene räumliche Skalen und Ansätze hinweg und in enger Zusammenarbeit mit Interessensgruppen wird dieses Projekt zu einer verbesserten Entscheidungshilfe für

Managementprioritäten und -strategien im Zusammenhang mit zukünftigen extremen Störungen im fichtendominierte Gebirgswälder beitragen. Bewirtschaftungseinheiten sind in diesem Projekt die Grundlage für die Modellierung und die betriebliche Umsetzung. Die Ableitung einer grossflächigen Hot-Spot Karte wird ein anderes Hauptprodukt sein und fliesst als Grundlage in die Modellierung mit ein.

4.4.2 Projekt mit Graubünden

Der Kanton Graubünden würde gerne selbständig die Bewirtschaftungseinheiten für die einzelnen Forstbetriebe berechnen können und möchte deshalb einen massgeschneiderten Python-Programmcodes (im Folgenden Skript genannt).

4.4.3 Individuelle Beratungen

Wir wurden von einigen Forstbetrieben angefragt, ob wir ihnen bei der Ausscheidung von BWEs rechnen können. Der Code könnte dort angewendet werden, wodurch er robuster und seine Ergebnisse präziser werden. Eine entsprechende Anfrage für die Förderung eines Umsetzungsprojektes wurde ans BAFU gestellt.

5 Umsetzung der Ergebnisse

5.1 Code

Seit Beginn der Arbeiten wurde der Code zur Optimierung von BWEs konstant weiterentwickelt. Zuerst wurde im Rahmen der Masterarbeit eine funktionierende Version für mehrheitlich befahrbare Gebiete entwickelt. Daraufhin wurde in Zusammenarbeit mit dem Kanton Graubünden der Code für Seilkrangebiete angepasst, sowie die Optimierung weiterentwickelt.

5.2 Publikationen

- Rath, L. (2021). Waldplanung im stufigen Wald - Individuell anpassbare Bewirtschaftungseinheiten basierend auf einem Set an objektiven Kriterien, Masterarbeit ETHZ.
- Rath, L., Bont, L., & Schweizer, J. (2021). Bewirtschaftungseinheiten als Grundlage für die betriebliche Planung stufiger Wälder. Infoblatt Arbeitsgruppe Waldplanung und -management, 21(2), 2-5.
- Rath, L., Schweizer, J., Abbas, H., Griess, V., & Bont, L. (2022). Was es braucht, um den Wald effizient zu bewirtschaften. Wald und Holz, 104(10), 14-17.
- Rath, L., Schweizer, J., Abbas, H., Griess, V., & Bont, L. (2022). Surfaces de référence futures: une conquête complexe. La Forêt, 75(10), 18-21.
- Eingereicht: Rath, L., Griess, V.C., Schweizer, J., Bont, L. (2023). Effizienz im Forstbetrieb – Mit Bewirtschaftungseinheiten die Planung, Ausführung und Kontrolle optimal aufeinander abstimmen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen.
- In Arbeit: Bont, L.; Rath, L.; Schweizer, J. – Automatic design of forest management units
- Effiziente Planung im stufigen Wald – Waldwissen: Beitragserstellung ist in Bearbeitung
- Effiziente Planung im stufigen Wald – Planfor Link: <https://www.planfor.ch/articles/672>

5.3 Lehre/Vorträge

Die Resultate der Masterarbeit wurden den beteiligten Projektvertretern der Kantone Aargau, Graubünden und Zug, der AG WaPlaMa und des BAFU bei einer abschliessenden Präsentation im Herbst 2021 vorgestellt.

Im Verlauf des Projekts ergab sich ausserdem eine Zusammenarbeit mit der ETH-Professur für Forstliches Ressourcenmanagement von Prof. Dr. Verena Griess. Mit Ihrer Gruppe beschäftigten wir uns im Besonderen mit der programmiertechnischen Umsetzung.

Mit Vertretern der Försterschule Maienfeld wurde der Nutzen eines automatisierten Programms für Planungsübungen in der Lehre 2023 besprochen.

6 Bedeutung für Praxis und Forschung

Für die Forschung sind die Ergebnisse des Projekts auf zwei Ebenen relevant. Bisherige Entscheidungsunterstützungssysteme mit IT-Unterstützung im Forstbereich basieren auf komplexen Simulationen von Beständen und deren Entwicklung. Solche Simulationen benötigen detaillierte Inputdaten und sind nur dort möglich, wo sich Bestände im Wald abgrenzen lassen. Mit dem Konzept der BWEs existiert nun ein wissenschaftlicher Ansatz zur Verbesserung der forstlichen Planung, der auch in stufigen Beständen wie den in der Schweiz wichtigen Gebirgswäldern anwendbar ist. Weiter stellen die Modellierungen im Projekt eine Weiterentwicklung eines räumlich expliziten Optimierungsalgorithmus dar. Die hier verwendete Methode kann auch komplexe Optimierungen mit mehreren Nebenbedingungen in vertretbarer Rechenzeit lösen. Sämtlicher Code, der im Projekt entwickelt wurde, steht Forschenden und Vertretern der Praxis zur Verfügung. Er kann von einer Person mit guten IT-Kenntnissen auf beliebige Flächen angewendet werden. Dies wird z.B. im WSL-Projekt MountEx geschehen, in dem optimale Bewirtschaftungsstrategien unter erhöhtem Risiko durch den Klimawandel im Gebirgswald untersucht werden. Genau steht der Code zur Weiterentwicklung der räumlichen Optimierung auch in anderen Bereichen als dem Forst zur Verfügung.

Für die Praxis stellt das Konzept der BWEs und deren IT gestützte Berechnung ein wertvolles Tool zur Effizienzsteigerung im Forstbereich dar. Die Bewirtschaftung der stufigen Wälder wird nicht mehr über die Bestandesmodellierung des schlagweisen Hochwaldes mit «Anteile pro Entwicklungsstufe» beplant. Stattdessen werden sie hauptsächlich nach Dringlichkeit, Ökosystemleistung und Wiederkehrdauer bewirtschaftet. Die Betriebsleiter oder Waldplaner könnten sich zukünftig bei der Betriebsplanung auf sinnvolle 'Bewirtschaftungseinheiten' abstützen und die Förster dadurch Betriebspläne erhalten, in denen die Ausscheidung der Bewirtschaftungseinheiten mit der Holzernteplanung abgestimmt ist. Dadurch wird (1) der Planungsaufwand reduziert, (2) die Chance erhöht, dass Planungen tatsächlich auch umgesetzt werden können und (3) die Umsetzung multipler Zielsetzungen vereinfacht. Holzschläge können besser geplant und effizienter ausgeführt werden (Koordination verschiedener Schläge) was zu reduzierten Holzerntekosten und einer potentiellen Mehrbereitstellung anderer Ökosystemleistungen führt und damit ein Beitrag dazu leistet die Wettbewerbsfähigkeit der Forstwirtschaft und der nachgelagerten Holzverarbeiteten Industrie zu erhöhen. Wie relevant das Thema der effizienten, umsetzungsorientierten Planung ist, zeigt auch das Interesse aus der Praxis an den Ergebnissen des Projekts. Auf die verschiedenen Kommunikationen an die Öffentlichkeit aus dem Projekt hin, kamen mehrere Anfragen aus der Praxis. Von Seiten der Försterschulen wurde vorgeschlagen das Projekt in eine Praxisübung zu integrieren. Weiter wird Planstufig ein zentraler Bestandteil einer Weiterbildungsveranstaltung des Schweizerischen Forstvereins im Juni 2023 sein. Letztendlich haben mehrere Forstbetriebe direkt angefragt, ob für Ihren Betrieb Bewirtschaftungseinheiten mit der Methode des Projekts berechnet werden können.

7 Literatur

- Aggeler, R. 2002. Lehrmittel Seilkrantechnik. iBW Maienfeld.
- Assmann, E. 1956. Natürlicher Bestockungsgrad und Zuwachs. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt München.
- BAFU. 2018. Waldmischungsgrad LFI. Abteilung Wald, Bundesamt für Umwelt. Available from <https://opendata.swiss/de/dataset/waldmischungsgrad-lfi>.
- BFS. 2000. Bodeneignungskarte der Schweiz, Geodaten. BFS. Available from <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/13147140/master>.
- Blattert, C., Lemm, R., Thees, O., Hansen, J., Lexer, M.J., and Hanewinkel, M. 2018. Segregated versus integrated biodiversity conservation: Value-based ecosystem service assessment under varying forest management strategies in a Swiss case study. *Ecological Indicators* **95**: 751–764. doi:10.1016/j.ecolind.2018.08.016.
- Blattert, C., Lemm, R., Thees, O., Lexer, M.J., and Hanewinkel, M. 2017. Management of ecosystem services in mountain forests: Review of indicators and value functions for model based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators* **79**: 391–409. doi:10.1016/j.ecolind.2017.04.025.
- Bont, L.G., Maurer, S., and Breschan, J.R. 2019. Automated Cable Road Layout and Harvesting Planning for Multiple Objectives in Steep Terrain. *Forests* **10**(8): 687. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/f10080687.
- Brang, P., Nikolova, P., Gordon, R., and Zürcher, S. 2017. Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs. Schlussbericht des Projektes Eingriffsstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald. ETH Zurich. doi:10.3929/ETHZ-B-000184480.
- Briner, S., Elkin, C., and Huber, R. 2013. Evaluating the relative impact of climate and economic changes on forest and agricultural ecosystem services in mountain regions. *Journal of Environmental Management* **129**: 414–422. doi:10.1016/j.jenvman.2013.07.018.
- Church, R.L. 2008. BEAMR: An exact and approximate model for the p-median problem. *Computers & Operations Research* **35**(2): 417–426. Elsevier.
- Edwards, D., Jay, M., Jensen, F.S., Lucas, B., Marzano, M., Montagné, C., Peace, A., and Weiss, G. 2012a. Public preferences for structural attributes of forests: Towards a pan-European perspective. *Forest Policy and Economics* **19**: 12–19. doi:10.1016/j.forpol.2011.07.006.
- Edwards, D.M., Jay, M., Jensen, F.S., Lucas, B., Marzano, M., Montagné, C., Peace, A., and Weiss, G. 2012b. Public Preferences Across Europe for Different Forest Stand Types as Sites for Recreation. *E&S* **17**(1): art27. doi:10.5751/ES-04520-170127.
- Frauenholz, O., and Schwendt, F. 1986. Seilgelände - Verfahren, Organisation. *Holzernte in der Durchforstung*, Wien. p. 113.
- Frehner, M., Wasser, B., and Schwitter, R. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. BUWAL.
- Gough, A.D., Innes, J.L., and Allen, S.D. 2008. Development of common indicators of sustainable forest management. *Ecological Indicators* **8**(5): 425–430. doi:10.1016/j.ecolind.2007.03.001.
- Hakimi, S.L. 1964. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research* **12**(3): 450–459. informs.
- Hegetschweiler, T., Salak, B., Wunderlich, A.C., Bauer, N., and Hunziker, M. 2022. Das Verhältnis der Schweizer Bevölkerung zum Wald. : 162.
- Heinimann, H., and Caminada, L. 1996. Helicopter logging in Switzerland, analysis of selective logging operations. *In Proc. of a Joint Symp. of IUFRO*. pp. 13–16.
- Heinimann, H.R. 2003. Holzerntetechnik zur Sicherstellung einer minimalen Schutzwaldpflege: Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). ETH Zurich. doi:10.3929/ETHZ-A-004616120.
- Heinimann, H.R., and Stampfer, K. 2003. HARVEST LAYOUT PLANNING FOR HIGH-ALTITUDE PROTECTION FORESTS. : 13.

- Irauschek, F., Rammer, W., and Lexer, M.J. 2017. Can current management maintain forest landscape multifunctionality in the Eastern Alps in Austria under climate change? *Reg Environ Change* **17**(1): 33–48. doi:10.1007/s10113-015-0908-9.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K., and Byrne, K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* **137**(3–4): 253–268. doi:10.1016/j.geoderma.2006.09.003.
- Jasinevičius, G., Lindner, M., Verkerk, P., and Aleinikovas, M. 2017. Assessing Impacts of Wood Utilisation Scenarios for a Lithuanian Bioeconomy: Impacts on Carbon in Forests and Harvested Wood Products and on the Socio-Economic Performance of the Forest-Based Sector. *Forests* **8**(4): 133. doi:10.3390/f8040133.
- Kalt, T., Nikolova, P., Ginzler, C., Bebi, P., Edelkraut, K., and Brang, P. 2021. Kurzes Zeitfenster für die Fichtennaturverjüngung in Gebirgsnadelwäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **172**(3): 156–165. doi:10.3188/szf.2021.0156.
- Limbeck-Lilienau, B. 2003. RESIDUAL STAND DAMAGE CAUSED BY MECHANIZED HARVESTING SYSTEMS. : 11.
- Netherer, S., and Nopp-Mayr, U. 2005. Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management—rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. *Forest Ecology and Management* **207**(1–2): 99–107. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.020.
- Price, C. 2003. Quantifying the aesthetic benefits of urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening* **1**(3): 123–133. doi:10.1078/1618-8667-00013.
- Rath, L. 2021, September 31. Waldplanung im stufigen Wald - Individuell anpassbare Bewirtschaftungseinheiten basierend auf einem Set an objektiven Kriterien. Master's Thesis, ETH, Zürich.
- Rath, L., Bont, L.G., and Schweizer, J. 2021. Bewirtschaftungseinheiten als Grundlage für die betriebliche Planung stufiger Wälder. *WaPlaMa Infoblatt* **21**(2): 2–5.
- Rath, L., Schweizer, J., Griess, V., Abbas, H., and Bont, L.G. 2022. Was es braucht, um den Wald effizient zu bewirtschaften. *Wald und Holz* **104**(10): 14–17.
- ReVelle, C.S., and Swain, R.W. 1970. Central facilities location. *Geographical analysis* **2**(1): 30–42. Wiley Online Library.
- Schweizer, J., Werder, M., and Bont, L.G. 2022. Timber Provision on Soft Soils in Forests Providing Protection Against Natural Hazards: A Productivity and Cost Analysis Using the Koller 507 in the Horizontal Yarding Direction in Switzerland. *Small-scale Forestry*: 1–31. Springer.
- Sessions, J., and Chung, W. 2003. An approach to optimizing helicopter logging operations. *In Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the Eighth Symposium, held September 27–30, 2000, Snowmass Village, Colorado, USA*. Springer. pp. 81–86.
- Temperli, C., Blattert, C., Stadelmann, G., Brändli, U.-B., and Thürig, E. 2020. Trade-offs between ecosystem service provision and the predisposition to disturbances: a NFI-based scenario analysis. *For. Ecosyst.* **7**(1): 27. doi:10.1186/s40663-020-00236-1.
- Thrippleton, T., Blattert, C., Bont, L.G., Mey, R., Zell, J., Thürig, E., and Schweizer, J. 2021. A Multi-Criteria Decision Support System for Strategic Planning at the Swiss Forest Enterprise Level: Coping With Climate Change and Shifting Demands in Ecosystem Service Provisioning. *Front. For. Glob. Change* **4**: 693020. doi:10.3389/ffgc.2021.693020.
- Wartmann, F.M., Stride, C.B., Kienast, F., and Hunziker, M. 2021. Relating landscape ecological metrics with public survey data on perceived landscape quality and place attachment. *Landscape Ecol* **36**(8): 2367–2393. doi:10.1007/s10980-021-01290-y.
- Wüthrich, W. 1992. Die Feinerschliessung von Waldbeständen - Planung, Anlage und Benützung. : 87.

8 Anhang

Anhang 1 Datengrundlagen und Verarbeitung

Kriterium	Input	Verarbeitung	Output
Holzerntekonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Waldstrassen - Waldfläche - Digitales Höhenmodell <p>Transportgrenzen (siehe Kriterium 2)</p>	<p>Anhand des DHM wird die Waldfläche in befahrbar und nicht befahrbar eingeteilt. Das Gebiet für den Bodenzug zur Strasse hin wird mit einem Puffer berechnet, der hangaufwärts 80m und hangabwärts 30m breit ist. Auf dieselbe Art wird ein Puffer um das befahrbare Gebiet herum festgelegt, das den Bereich für den Bodenzug zu befahrbarem Gebiet hin beschreibt. Die Flächen für die Holzernte mit dem Helikopter werden ebenfalls anhand des DHM festgelegt. Im restlichen Bereich für seilgestützte Rückeverfahren wird eine Netzwerkanalyse durchgeführt. So wird von jedem Waldpixel ein möglicher Weg zum nächstgelegenen Strassenabschnitt gesucht, wobei Transportgrenzen beachtet werden. Anhand der so gefundenen Rückedistanz wird das Gelände in konventionellen und Mobilseilkran eingeteilt. Die genaue Methode ist in Bont et al. (2019) zu finden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Holzerntemethode» klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet. Der Waldbereich wird in die folgenden 6 Holzerntemethoden klassifiziert: Seilkran konventionell, Mobilseilkran, Helikopter, Bodenzug an Strasse, Bodenzug zu befahrbarem Gebiet, befahrbares Gebiet. - Raster «Landepunkte» <p>klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet. Jedem Punkt im Waldgebiet ist die Nummer des Strassenabschnitts zugewiesen, zu dem von diesem Punkt aus das Holz gerückt wird. So ergeben sich Gebiete, die vom selben Strassenabschnitt erschlossen werden.</p>

Transportgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> - TLM Datensätze zu: Bodenbedeckung, Einzelobjekte, Punkt und Linien Versorgungsbauten, Strassen, Bahnlinien, stehende und Fliessgewässer, Trockenmauern und Verbauungen 	<p>Alle Linien- und Punktobjekte wurden mit einem 2m Puffer versehen, um sie im Raster sichtbar zu machen.</p> <p>Folgende Datensätze wurden als Hindernisse für bodengestützte Rückeverfahren zu einem Layer vereint:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bodenbedeckung: Fels, Feuchtgebiet und Fels locker - Einzelobjekte: Quelle, Wasserfall, Wasserversorgung - Versorgungsbauten: Antennen, Windturbinen - Bahnlinien: nur Bahnlinien in Betrieb, Brücken (mit und ohne Galerie, gedeckt und ungedeckt), Galerien, Staudämme, Wehre, Unterführungen, Normalspuren, Schmalspuren und Kleinbahnen - Fliessgewässer: alle oberirdischen Fliessgewässer, Suonen und Druckleitungen - Stehende Gewässer: Seen - Mauern: alle Trockenmauern - Verbauungen: Gewässer- und Lawinenverbauungen <p>Als Hindernisse für die seilgestützten Rückeverfahren wurden Fliessgewässer und die Bodenbedeckung nicht beachtet. Dafür wurde folgende Daten zu den Hindernissen hinzugefügt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Versorgungsbauten: Hochspannungsleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Transportgrenzen» <p>klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet. Transportgrenzen sind unterteilt in 'nur für seilgestützte Rückeverfahren', 'nur für bodengestützte Rückeverfahren' und 'Hindernis für alle Rückeverfahren'</p>
------------------	--	---	--

Kriterium	Input	Verarbeitung	Output
		Weitere Bahnlinien: alle Objekte in Betrieb von Luftseilbahnen, Gondelbahnen, Sesselbahnen, Transportseilen, Förderbändern, Skiliften und sonstigen Liften	
Administrative Grenzen	<ul style="list-style-type: none"> - swissBOUNDARIES3D Hoheitsgebiet lokale Daten zum Waldeigentümer	<p>Der Layer der Gemeindegebiete wird in ein Linienlayer nur der Umrisse umgewandelt und diese mit einem 2m Puffer versehen. Dann wird der Layer auf das Betrachtungsgebiet zugeschnitten und in ein Raster umgewandelt.</p> <p>Der Layer der Waldeigentümer muss je nach Gebiet unterschiedlich verarbeitet werden. Generell wird ein Polygonlayer erstellt und neu in die verschiedenen Eigentümergruppen klassiert. Dabei werden Bund, Kanton, Gemeinden, sonstige Organisation und private Eigentümer unterschieden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Admin Grenzen» klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet in dem die Gemeindegrenzen dargestellt sind. - Raster «Waldeigentümer» klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet. Die Waldfläche ist flächig in die verschiedenen Eigentümergruppen klassifiziert.
Waldfunktion	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale oder kantonale Daten zu Schutzwaldflächen, Erholungswaldflächen und Waldnaturschutzgebieten 	Die Daten werden von Vektordaten zu klassifiziertes Rasterdaten umgewandelt. Multifunktionaler Wald, Schutzwald, Erholungswald und Biodiversitätswald werden speziell unterschieden. Weiter werden Doppelfunktionen von Schutzwald, Erholungswald und Biodiversitätswald entsprechend gekennzeichnet.	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «ES Grenzen» klassifiziertes Raster über das Betrachtungsgebiet. Die Waldfläche ist flächig in ihre prioritäre Waldfunktion (Schutzwald, Erholungswald und Biodiversitätswald) klassifiziert, Doppelfunktionen sind speziell gekennzeichnet.

Kriterium	Input	Verarbeitung	Output
Einzugsgebiet / Anschlusspunkt	<ul style="list-style-type: none"> - Layer mit Anschlusspunkten, Polterplätzen oder ähnlichem, die manuell vom zuständigen Förster ausgewiesen wurden - Strassen und Feinerschliessung <p>Grundeinheiten der BWEs</p>	Wird das Kriterium Einzugsgebiet / Anschlusspunkt gewählt, werden nach diesem Schritt fertige BWEs ausgegeben (siehe <i>Abbildung 13</i>). Die vorher gebildeten Grundeinheiten der BWEs, die entweder innerhalb der Strassen, oder über Strassen hinweg gehen, sind jeweils einem Strassenabschnitt zugeordnet. Nun wird eine Netzwerkanalyse durchgeführt, die jeden Strassenabschnitt mit dem am nächsten gelegenen Sammelpunkt verbindet. Die ID dieses Sammelpunktes wird dann allen Grundeinheiten zugeordnet, die mit dem jeweiligen Strassenabschnitt verknüpft sind. So werden die Grundeinheiten zu BWEs aggregiert.	<ul style="list-style-type: none"> - BWEs <p>Ein klassifiziertes Raster über die gesamte Waldfläche im Betrachtungsgebiet hinweg, in dem den verschiedenen BWEs eine unterschiedliche Kennung zugewiesen ist. Ausserdem gibt es zu jeder BWE einen Sammelpunkt mit derselben Kennung.</p>
Einheiten innerhalb Waldstrassen	<ul style="list-style-type: none"> - Strassen und Feinerschliessung <p>Grundeinheiten der BWEs</p>	Mit dem Kriterium Einheiten innerhalb Waldstrassen werden die Rückeeinheiten, die aus der ersten Netzwerkanalyse entstehen zu grösseren Grundeinheiten zusammengefasst, die jeweils von einer Waldstrasse begrenzt sind. Weiter werden Transportgrenzen und der Waldrand als Begrenzung dieser Grundeinheiten verwendet.	<ul style="list-style-type: none"> - Grundeinheiten innerhalb der Strassen <p>Ein klassifiziertes Raster über die Waldfläche im Betrachtungsgebiet, mit Grundeinheiten, die von Strassen begrenzt sind. Diese Grundeinheiten werden im weiteren Verlauf zu BWEs aggregiert.</p>

Kriterium	Input	Verarbeitung	Output
Wüchsigkeit / Standort	<ul style="list-style-type: none"> - Standortkartierung <p>Lokale Daten zu Wüchsigkeit, Ertragsklassen</p>	<p>Als Proxy für das verfügbare Holzvolumen wird für dieses Kriterium die potenzielle Wüchsigkeit des Waldbodens verwendet. Dies hängt vor allem mit einer unzureichenden flächigen Datengrundlage zum Vorrat zusammen. Ausserdem wird versucht möglichst langfristig gültige Datengrundlagen zu verwenden, die von der aktuellen Bestockung unabhängig sind. Der Waldstandort, die damit verbundene Wüchsigkeit und diverse Einteilungen in Ertragsklassen der Kantone stellen eine gute Grundlage dafür dar. Je nach Betrachtungsgebiet werden dementsprechend Grundlagen verwendet. Für den Kanton Aargau wurde die Wüchsigkeitsklassierung des Kantons verwendet, genauso wie die Ertragsklassen des Kantons Graubünden. Im Kanton Zug gibt es eine Zuweisung einer Bonität zu den vorkommenden Standorten, die als Wüchsigkeitsklassierung verwendet wurde</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Growth» <p>Ein klassifiziertes Raster über die Waldfläche im Betrachtungsgebiet, klassiert in Wüchsigkeitsklassen. Die Klassenskala variiert je nach Datengrundlage.</p>
Waldmischungsgrad	LFI Datensatz Waldmischungsgrad	Der LFI Datensatz zum Waldmischungsgrad wird auf den Betrachtungsperimeter zugeschnitten und an die Zellgrösse und -verteilung der anderen Raster angepasst. Die Klassifizierung wird original belassen (BAFU 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Forest mix» <p>Ein klassifiziertes Raster über die Waldfläche im Betrachtungsgebiet.</p>
Exposition	swissALTI3D, Digitales Höhenmodell der Schweiz (2m Auflösung)	Das digitale Höhenmodell wird auf den Betrachtungsperimeter zugeschnitten (©swisstopo). Mit dem GDAL package wird die Exposition in Grad berechnet.	<ul style="list-style-type: none"> - Raster «Exposition» <p>Ein klassifiziertes Raster über die Waldfläche im Betrachtungsgebiet.</p>

Anhang 2 Zusammenfassung Literaturrecherche: Einfluss des Seillinienlayouts auf Ökosystemleistungen

Ökosystem-dienstleistung	Indikator / Zusammenhang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Holzernte, Arbeitssicherheit, Ökonomischer Gewinn					
Holzproduktion	Stand Density Index	Assmann 1956	Der Holzvorrat wird anhand des Bestockungsgrads geschätzt	Deckungsgrad	je weniger Seillinien pro ha, desto höher ist der Bestockungsgrad
Ökonomisch	Diagonale Linien	Heinimann und Stampfer 2003	Mit diagonalen Linien kann denselben Hang mit weniger Linien abdecken. Man hat mehr Holz pro Linie, es wird produktiver und günstiger pro m ³	Ausrichtung	
Ökonomisch	Parallel anstatt Sternförmig	Wüthrich 1992	Bei Paralleler Anlage gibt es keine Übererschliessung. Bei Sternförmiger Anlage ist der Teil an dem alle Linien zusammenlaufen übererschlossen	Ausrichtung	
Arbeitssicherheit	Diagonal	Frauenholz und Schwendt 1986 Heinimann und Stampfer 2003 Aggeler 2002	Bei diagonalen Linien werden Arbeiter weiter unten nicht von Steinen oder anderen Sachen, die weiter oben anfallen getroffen.	Ausrichtung	
Ökonomisch		Bont et al. (2019)	Gleichungen für die Holzerntekosten		

Ökosystem- dienstleistung	Indikator / Zusammenh ang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Schutz					
Lawinen	Avalanche Protection Index Gravitationa l Hazards Protection Index	Blattert et al. (2017), (2018) und Temperli et al.(2020), Briner et al. (2013)	KEIN Zusammenhang der Indikatoren mit irgendwelchen Kenngrössen die direkt vom Seillinienlayout beeinflussbar sind		
Lawinen		NaiS, Frehner et. al. (2005)	Lückengrösse < 5-15m und Deckungsgrad >50%	Lückenbreite, Deckungsgrad	Vor allem auf Hängen über 30% und mit NO bis NW Exposition:
Steinschlag	Diagonal	Aggeler (2002)	Risiko durch einen Steinschlag, der durch die Arbeit ausgelöst wird, jemanden zu gefährden ist bei diagonalen Linien kleiner	Ausrichtung	
Steinschlag	Rockfall Protection Index Gravitationa l Hazards Protection Index	Blattert et al. (2017), (2018) und Temperli et al. 2020, Briner et al. (2013)	KEIN Zusammenhang der Indikatoren mit irgendwelchen Kenngrössen die direkt vom Seillinienlayout beeinflussbar sind		
Steinschlag	Stand Density Index	Brändli und Herold (2001)	Im LFI dient der stand density index der Beurteilung der Schutzwirkung gegen Steinschlag	Deckungsgrad	

Steinschlag		NaiS, Frehner et. al. (2005)	Ansonsten: KEINE Lücken über 40m, sonst wird Schutzwirkung des Waldes potenziell irrelevant. Am besten keine Lücken über 20m	Lückenzahl in Falllinie	Vor allem die Stammzahl und die Länge des bewaldeten Hangs sind wichtig! Auch in der Seillinie sollte es hohe Stöcke und quergelegte Bäume geben.
Rutschungen	Landslide Protection Index	Irauschek et al. (2015)	Grobes Indiz für Schutz gegen Rutschungen. Je höher der Deckungsgrad desto besser	Deckungsgrad	
Rutschungen		NaiS, Frehner et. al. (2005)	Deckungsgrad dauernd mindestens 40%, Lückengrösse maximal 6-12 a	Lückengrösse, Deckungsgrad	Keine Kahlflächen
Gerinneprozesse		NaiS, Frehner et. al. (2005)	Deckungsgrad über 50%, Lückenzahl in Falllinie maximal 30m, Lückengrösse maximal 12a	Lückengrösse, Lückenzahl, Deckungsgrad	

Ökosystem- dienstleistung	Indikator / Zusammenh ang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Landschaftsbild, Erholung					
Erholung	Visuelle Attraktivität	Blattert et al. (2017)	Visuelle Attraktivität ist ein aus einzelnen Metriken zusammengesetzter Index. Unter anderem wird der Deckungsgrad und die Sichtweite innerhalb des Bestandes berücksichtigt.	Deckungsgrad (in Gleichaltrigen Beständen nach Reinecke), Lückenzahl	

Erholung	mittlere Kahlfächen	Edwards (2012a), WAMOS 3: Hergetschweiler et al. (2022)	Kahlschlag hat einen schlechten Erholungswert. Auch wichtig bei der Erholung ist die visuelle Durchdringbarkeit des Waldes. Hier sollte es aber weder zu durchdringbar, noch gar nicht durchdringbar, sondern die Mitte sein.	Lückengrösse, Deckungsgrad	Visuelle Durchdringbarkeit ist nur indirekt mit den Seillinien verbunden. Sie lichten den Bestand auf, was ihn durchdringbarer macht, zu viele Seillinien können aber als Kahlschläge wahrgenommen werden.
Erholung	Aussicht	Edwards (2012b)	Attraktiv sind teils jüngere Bestände, weil man bessere Aussicht hat. Bewirtschaftete Wälder werden gutgeheissen, weil sie aufgeräumter aussehen.	Deckungsgrad, Lückengrösse	Interpretation ist: Seillinien sind Lücken die Aussicht bieten Interpretation: Seillinien sind Spuren von Management und werden eventuell somit gut konnotiert.
Landschaftsbild	Diagonal	Price (2003)	Geometrische Formen werden in der Landschaft nicht als positiv wahrgenommen.	Ausrichtung	Kommentar: Seillinien sind immer geometrische Formen, egal ob parallel, diagonal oder Sternförmig. Gewisse Formen sieht man aber besser.
Landschaftsbild	Diagonal	Heinimann und Stampfer (2003) Wüthrich (1992)	Diagonale Seillinien sind in der Landschaft weniger sichtbar	Ausrichtung	
Landschaftsbild	Diagonal	Wüthrich (1992)	Sternförmige Seillinienanlage nur dann, wenn der Landeplatz gross genug und im Offenland ist. Sonst wird er als Kahlschlag wahrgenommen, was nicht positiv ist. Ausserdem sollen die Linien, egal in welcher Ausrichtung nicht auf exponierte Gebiete zulaufen	Ausrichtung	

Landschaftsbild	Kleine Lücken	Brang et al. (2017)	Grosse Lücken beeinträchtigen das Landschaftsbild	Lückengrösse	
Landschaftsbild	Wenig Seillinien	LABES: Wartmann et al. (2021)	Hochspannungsleitungen werden als negativ für das Landschaftsbild gesehen.	Präsenz / Absenz	Seillinien können ähnliche Trassen im Wald darstellen wie diese Leitungen. Es kommt Aber hier nicht auf das Layout an sich an, sondern nur auf Präsenz oder Absenz von Linien
Erholung	Erschliessung	WAMOS 3: Hergetschweiler et al. (2022)	Wegsperrungen, Anzahl von Wegen und Strassen, Baumfällungen sind über 50% der Bevölkerung egal. Gleicher Anteil sagt Bewirtschaftung ist wichtig	Präsenz / Absenz	Interpretation: Seillinien als Anzeichen der Bewirtschaftung und als Weg im Wald sehen mindestens 50% der Menschen in der Schweiz als irrelevant für die Erholung

Ökosystem-dienstleistung	Indikator / Zusammenhang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Resilienz des Waldes / Verjüngung					
Schäden am Bestand		Limbeck-Lilienau (2002)	Es gibt keinen signifikanten Unterschied an den Schäden im Bestand durch die Ausrichtung der Seillinie	Ausrichtung	Im Gegensatz zu den Publikationen, die eine Diagonale Ausrichtung bevorzugen, weil der Zuzug in Falllinie ist
Schäden am Bestand	Diagonal	Heinimann und Stampfer (2003)	Bei diagonalen Seillinien wird der verbleibende Bestand weniger geschädigt, da in Falllinie zugezogen wird.	Ausrichtung	Im Gegensatz zur Studie von Limbeck Lilienau, die sagt es spielt keine Rolle!
Schäden am Bestand	Abstand	Wüthrich (1992)	Zuzüge sollen klein gehalten werden, da es sonst in dichten Beständen zu Schäden kommt. MSK klein: 30-40m, MSK gross: 40-70m, HSK: 60-100m	Abstand	

Schäden am Bestand	Diagonal	Heinimann (2003) Aggeler (2002)	Verjüngung kann durch den Zuzug geschädigt werden, Bei diagonalen Linien ist der Zuzug kürzer und in Falllinie, was die Verjüngung weniger schädigt	Ausrichtung	
Risikominimierung	Kleine Lücken	Brang et al. (2017)	Kleine Lücken bergen ein kleineres Risiko wie grössere Lücken.	Lückengrösse	
Verjüngung	Kleine Lücken	Kalt et al. (2021)	Auf Standorten mit viel Konkurrenzvegetation sollten die Lücken möglichst klein gehalten werden. Auf Standorten mit weniger Konkurrenzvegetation können sie teils auch etwas grösser ausfallen. Selten übersteigt die Lückengrösse durch Eingriffe 0.25ha und das sollte auch so bleiben.	Lückengrösse	
Verjüngung	SO, oder SW Schlitze	Heinimann und Stampfer (2003)	Eingriffe sollten in Schlitzen nach Morgen- oder Abendsonne ausgerichtet sein (SE oder SW an Nordexponierten Hängen). Sonst hat die Verjüngung zu wenig Licht.	Ausrichtung	
Verjüngung	Nicht gegen S	Brang et al. (2017)	Lücken sollten nicht nach Süden ausgerichtet sein, da dort die Gefahr der Austrocknung, besonders für die Fichtenverjüngung sehr hoch ist.	Ausrichtung	
Verjüngung	Nicht nach S	Netherer und Nopp-Mayr (2005)	Die Anfälligkeit für Borkenkäferbefall nimmt zu, wenn die Sonneneinstrahlung und Wärme direkt im Bestand zunehmen. Besonders in Lücken, wenn die Sonne auf die Stämme scheint.	Ausrichtung	

Ökosystem-dienstleistung	Indikator / Zusammenhang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Biodiversität, Lebensraum					
Supporting Biodiversity	Soil Degradation	OneForest Projekt	Supporting Biodiversity wird unter anderen daran gemessen wie degradiert der Boden in einem Gebiet ist.	Präsenz / Absenz, Abstand	Seillinien sind eine bodenschonendere Art zu bewirtschaften als andere. Es kommt ausserdem darauf an wie viele Seillinien. Je weniger Meter Seillinien pro ha desto besser.
Prozessschutz	Kein Managemen t		Bei Prozessschutz ist jegliche Störung ungewünscht	Präsenz / Absenz, Abstand	Je weniger Meter Seillinie pro Hektare desto besser
Spezifischer Lebensraum- / Artenschutz			Je nach gewünschtem Ergebnis sind alle Arten des Seillinienlayouts gewünscht oder nicht. Als Beispiel, beim Lebensraumschutz für das Auerhuhn sind längere Schneisen als Öffnungen für Flug, Licht und Tannenverjüngung sehr erwünscht.	Präsenz / Absenz, Abstand	Sehr abhängig vom spezifischen Ziel.

Ökosystem-dienstleistung	Indikator / Zusammenhang	Quelle	Beschreibung	basierend auf:	Bemerkung
Kohlenstoffspeicher					
Bodenspeicher	Resilienz	Jandl et al. (2017)	Kohlenstoffspeicher kann durch das Management nur bedingt beeinflusst werden, hauptsächlich durch den schonenden Umgang mit dem Boden.	Präsenz / Absenz	Seillinien sind bodenschonender als befahrene Gebiete.

Kohlenstoffbilanz	Holzanfall pro Linie	Jasinevičius et al. (2017)	Der Beitrag der Bewirtschaftung als Kohlenstoffspeicher lässt sich am besten beziffern, indem man berechnet wie viel fossiler Kohlenstoff pro Produktion m ³ Holz freigesetzt wurde.		Es ist kein weiterer direkter Einfluss des Seillinienlayouts vorhanden. Man soll es schlecht so gestalten dass möglichst viel Holz pro Linie geerntet werden kann, damit möglichst wenig fossiles CO ₂ bei der Ernte ausgestossen wird.
-------------------	----------------------	----------------------------	---	--	--

Anhang 3 Auszüge aus NaiS – Anforderungsprofile der Naturgefahren

2.1 Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Entstehungsgebiet	Gross	Gefüge horizontal Hangneigung Lückenlänge² in Fallinie	Gefüge horizontal Hangneigung Lückenlänge² in Fallinie
Subalpine und hochmontane Nadelwälder	In Lärchenwäldern ab 30° (58 %) Hangneigung In immergrünen Nadelwäldern ¹ ab 35° (70 %) Hangneigung	$\geq 30^\circ$ (58 %) → kleiner als 60 m $\geq 35^\circ$ (70 %) → kleiner als 50 m $\geq 40^\circ$ (84 %) → kleiner als 40 m $\geq 45^\circ$ (100 %) → kleiner als 30 m Falls Lückenlänge ² grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 15 m sein Deckungsgrad > 50 % Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	$\geq 30^\circ$ (58 %) → kleiner als 50 m $\geq 35^\circ$ (70 %) → kleiner als 40 m $\geq 40^\circ$ (84 %) → kleiner als 30 m $\geq 45^\circ$ (100 %) → kleiner als 25 m Falls Lückenlänge ² grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 15 m sein Deckungsgrad > 50 % Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
Entstehungsgebiet	Mittel	Gefüge horizontal Hangneigung Lückenlänge² in Fallinie	Gefüge horizontal Hangneigung Lückenlänge² in Fallinie
Ober- und untermontane Laub- und Mischwälder	ab 35° (70 %) Hangneigung	$\geq 35^\circ$ (70 %) → kleiner als 50 m $\geq 40^\circ$ (84 %) → kleiner als 40 m $\geq 45^\circ$ (100 %) → kleiner als 30 m Falls Lückenlänge ² grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 5 m sein Deckungsgrad > 50 % Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	$\geq 35^\circ$ (70 %) → kleiner als 40 m $\geq 40^\circ$ (84 %) → kleiner als 30 m $\geq 45^\circ$ (100 %) → kleiner als 25 m Falls Lückenlänge ² grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 5 m sein Deckungsgrad > 50 % Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt

Abbildung 34: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen. Quelle: Frehner et al. 2005

3.1 Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen, Erosion und Murgängen

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Entstehungsgebiet	Gross bei flachgründigen Rutschungen (Rutschhorizont bis 2 m tief) und bei Oberflächenerosion	Gefüge horizontal Lückengrösse ³ max. 6a, bei gesicherter Verjüngung ¹ max. 12a. Gefüge horizontal Deckungsgrad ² dauernd $\geq 40\%$ Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt Mischung Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben	Gefüge horizontal Lückengrösse ³ max. 4a, bei gesicherter Verjüngung ¹ max. 8a. Gefüge horizontal Deckungsgrad ² dauernd und kleinflächig $\geq 60\%$ Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt Mischung Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben Stabilitätsträger keine schweren und wurfgefährdeten Bäume
	Mittel bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts beeinflusst werden kann	Gefüge horizontal Deckungsgrad ² dauernd $\geq 30\%$ Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Gefüge horizontal Deckungsgrad ² dauernd $\geq 50\%$ Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
Infiltrationsgebiet	Gering bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts nur wenig beeinflusst werden kann	Verjüngung nachhaltige Verjüngung gesichert	Verjüngung nachhaltige Verjüngung gesichert Anforderungen auf Grund des Standortstyps ideal erfüllt

Abbildung 35: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen, Erosion, Murgängen Quelle: Frehner et al. 2005

4.1 Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Steinschlag

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Entstehungsgebiet	Mittel	Stabilitätsträger Keine instabilen, schweren Bäume	
Transit-, Auslauf-, Ablagerungsgebiet	Gross	Stammzahl und Grundfläche Ziel-Grundfläche (ab 8 cm BHD) und die dazugehörigen Stamm-Zahlen pro BHD-Klasse gemäss dem Internet-Tool: http://www.gebirgswald.ch/de/anforderungen-steinschlag.html Diese Beurteilung muss über die ganze bewaldete Hanglänge erfolgen.	
		Bei Öffnungen¹ - Stammabstand in der Falllinie < 40 m - Bei Öffnungen grösser als 20 m: hohe Stöcke (ca. 1.30 m) sowie alle 10 Meter mindestens 2 liegende Stämme mit Durchmesser ≥ Steindurchmesser und schräg zur Falllinie	
		Liegendes Holz und hohe Stöcke (ca. 1.3 m) als Ergänzung zu stehenden Bäumen	
		Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt

Abbildung 36: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Steinschlag. Quelle: Frehner et al. 2005

Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Gerinneprozessen⁽¹⁾

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen aufgrund der Naturgefahr minimal	Anforderungen aufgrund der Naturgefahr ideal
Abflussbereich Murgang / Hochwasser (Zone 1)	Gross bis sehr gering	Wald- und Wasserbauverantwortliche definieren gemeinsam die Ziele, leiten die wirksamen und verhältnismässigen Massnahmen her und richten sie auf die relevanten Schwachstellen ⁽²⁾ aus.	
Gerinneeinhang (Zone 2) ⁽³⁾	Gross bis gering	Lückenzahl in Falllinie max. 30 m ⁽⁴⁾ Lückengrösse max. 12 a ⁽⁵⁾ Deckungsgrad dauernd über 50 % ⁽⁶⁾ Höchstens wenig mobilisierbare Bäume und rutschgefährdetes Holz Minimale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt	Lückenzahl in Falllinie max. 20 m ⁽⁴⁾ Lückengrösse max. 6 a ⁽⁵⁾ Deckungsgrad dauernd über 60 % ⁽⁶⁾ Keine mobilisierbaren Bäume und kein rutschgefährdetes Holz Ideale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt

Abbildung 37: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Gerinneprozessen. Quelle: Frehner et al. 2005

Anhang 4 Vergleich der Anlage einer parallelen Seillinienerschliessung in Falllinie und schräg

Anlage senkrecht in Falllinie	Anlage schräg zur Falllinie
Seillinienlänge, Erschliessungseffekt	
Die senkrechte Anlage erfordert bei gleicher Flächengrösse mehr, dafür kürzere Seillinien. Die Fläche wird gleichmässiger erschlossen.	Die schräge Anlage erlaubt grösseren Seillinienabstand und weniger Seillinien, was zu einem insgesamt geringeren Installationsaufwand führen kann. Die Länge aller Seillinien zusammen ist annähernd gleich wie bei senkrechter Anlage. Die Erschliessung ist weniger flächendeckend
Rückedistanz, Zuzugsdistanz	
Die Rückedistanz auf dem Seil ist insgesamt kürzer, die Zuzugsdistanz vom Fäll- und Zuzugswinkel abhängig.	Zuzugs- und Lastfahrdistanzen sind generell grösser.
Holzanfall, Lagerplätze	
Pro Seillinie fällt weniger Holz an. Die Holzmenge verteilt sich auf mehr Lagerplätze, sofern solche bei jeder SL vorhanden sind, oder das Holz nicht laufend zu einem zentralen Aufarbeitungs- und Lagerplatz gerückt wird.	Der Holzanfall pro Seillinie ist grösser, die Lagerplatzkapazität muss ebenfalls grösser sein, wenn das Holz nicht laufend zu einem zentralen Aufarbeitungsplatz weiter gerückt wird.
Rückeschäden	
Je steiler der Hang ist, desto mehr Rückeschäden entstehen am Bestand durch den schrägen Zuzug des Holzes zum Trageil.	Der Zuzug des Holzes erfolgt in der Falllinie. Damit lässt sich trotz talseitig längeren Zuzügen bestandschonend arbeiten. Bergseitig kann das Holz unter das Trageil gereistet werden. Die Seillinie wird so angelegt, dass 2/3 des Holzes zugezogen und 1/3 zugereistet werden können.
Kopfhochrücken, Erosionsschäden	
Hochschleppverfahren verursachen im Seiltrasseeboden Schürfungen, die durch grosse Niederschlagsmengen bei empfindlichen Böden (Flysch) zu Erosionsrillen führen.	Durch Hochschleppverfahren entstehen entlang der Seiltrassees viele Stammverletzungen. Ohne Schutzmassnahmen (Astpakete, Bäume verlegen) darf dieses Verfahren nicht angewendet werden.
Gefährdung Personal und Maschinen	
Bei talseitigen Absenk- und Lagerplätzen stellen allenfalls abgleitende Stämme und Steine eine Gefährdung für das dort arbeitende Personal dar.	In steilem Gelände wird durch schräg angelegte Seillinien diese Gefährdung vermindert. Die Gefahr, dass talseitig aufgestellte Mobilseilkräne beschädigt werden wird ebenfalls vermindert.

Abbildung 38: Vergleich einer parallelen Seilerschliessung in Falllinie oder schräg. Quelle: (Aggeler 2002).