



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**D-USYS**  
**Professur für Forstliches Ingenieurwesen**

ETH Zürich  
Dr. J. Breschan  
Projektleiter  
CHN K73.1  
Universitätsstrasse 22  
8092 Zürich

Telefon +41 44 632 69 17  
Telefax +41 44 632 11 46  
jochen.breschan@usys.ethz.ch  
www.lue.ethz.ch

## **Automatisierte Seillinienlayout-Planung**

Fallstudie für den Perimeter Gotschna  
in der Gemeinde Klosters-Serneus

---

### Technischer Bericht

#### **INHALTSVERZEICHNIS**

1. Problemstellung und Ziele .....	1
2. Methode .....	1
3. Datengrundlage.....	3
4. Resultate der Anwendung auf den Perimeter Gotschna .....	6
5. Ausblick – Implementierung und Forschungsbedarf.....	9
LITERATUR.....	12
ANHANG .....	13

# Impressum

## ***Auftraggeber***

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald, CH-3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr,  
Energie und Kommunikation (UVEK).

## ***Auftragnehmer***

ETH – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
D-USYS, Professur für Forstliches Ingenieurwesen

## ***Autoren***

Dr. Jochen Breschan (Projektleiter)  
Sabrina Maurer (Projektbearbeitung)

## ***Begleitung BAFU***

Roberto Bolgè, BAFU Abt. Wald

## ***Hinweis***

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt  
(BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer  
verantwortlich.

## ***Fachliche Beratung***

Dr. Leo Bont

# 1 Problemstellung und Ziele

Dieses Projekt zeigt anhand des Fallbeispiels Gotschna (Klosters-Serneus, Kanton GR) die Möglichkeiten auf, welche mit der automatisierten Herleitung eines Seillinienlayouts für vordefinierte Eingriffsflächen aufgrund von Fernerkundungsdaten und objektivierten Entwurfszielen entstehen. Dabei wurden die folgenden Ziele verfolgt:

1. Herleitung räumlich-expliziter Seillinienlayouts inklusive Schätzung der Holzerntekosten.
2. Herleitung einer Pareto-Menge optimaler Layout-Varianten in Abhängigkeit der Gewichtung ökonomischer Entwurfsziele und Entwurfszielen zur Vermeidung von Naturgefahrenprozessen
3. Analyse der Veränderung des Seillinienlayouts und der Holzerntekosten in Abhängigkeit der Nutzungsintensität
4. Ausblick zur Nutzbarmachung des Modells für die Praxis.

Dieser Bericht erklärt folgend das konzeptionelle Modell und dessen Implementierung, präsentiert und diskutiert im Anschluss die Resultate der Anwendung auf den Perimeter Gotschna, gibt den Ausblick für eine webbasierte Umsetzung für die Praxis und schliesst mit Verbesserungsvorschlägen für das jetzige Modell.

Neben diesem Bericht stellen wir auch die Grundlagenkarten und die resultierenden Seillinienlayouts als ArcMap-Projekte zur Verfügung (ArcGIS Version 10.2, Details siehe Anhang A). Die Daten wie auch der Technische Bericht stehen auf dem Internet unter folgendem Link bereit:

<https://www.polybox.ethz.ch/index.php/s/I8NBK6gzDVo9TzR> [Passwort: Taxus4ever]

## 2 Methode

Die folgenden Abschnitte haben zum Ziel, die Nachvollziehbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Hierbei werden das konzeptionelle Vorgehen und die Implementierung aus «grosser Flughöhe» erläutert. Für eine detaillierte Beschreibung der Methode verweisen die Autoren auf die Publikationen von Leo Bont (2012, 2013, 2014).

### 2.1 Konzeptionelles Modell

Abbildung 1 beschreibt das konzeptionelle Modell bei der automatischen Herleitung eines Seillinienlayouts für einen Perimeter von praxisrelevanter Grösse. Dieses ist in folgende fünf Schritte unterteilt:

- [I] Aufbereitung der planungsrelevanten Geoinformationen (a) Erschliessung inklusive Maschinenstandorte, (b) Topographie, (c) Hindernisse und (d) Holzanfall.
- [II] Einteilung in Prozessierungsflächen: Der Perimeter ist in kleinere Prozessierungsflächen einzuteilen, um die Rechenzeit zu reduzieren. Letztere steigt überproportional mit der prozessierten Fläche, was zu Rechenzeiten in der Grössenordnung von Tagen führen kann. Die Einteilung erfolgt in der Regel in Rücksicht auf Transportgrenzen (bspw. Strasse) und Hindernisse (bspw. Starkstromleitung). Wo trotz Rücksicht auf die vorgenannten Elemente zu grosse Flächen resultieren, erfolgt eine künstliche Trennung in kleinere Teilgebiete. Hierbei werden zusätzliche künstliche Grenzen hinzugefügt, die sich an der Falllinie orientieren.

In jeder Prozessierungsfläche kommen anschliessend die Schritte [III] und [IV] zur Anwendung:

- [III] Erstellen potentieller Seillinien: Auf Basis der potentiellen Maschinenstandorte und der Topographie wird eine Menge machbarer Seillinien automatisch berechnet. Dabei werden von jedem Maschinenstandort aus potentielle Seillinien in verschiedene Richtungen und verschiedener Länge automatisch geplant. Die automatische Planung

identifiziert dabei in Rücksicht auf die Bodenfreiheit die optimale Stützausteilung. Die Beschreibung der Seilmechanik basiert auf dem Pestal-Verfahren, das sich der geringen Rechenzeit wegen anbietet.

[IV] Herleitung des Seillinienlayouts: Aus der zuvor erstellten Menge der machbaren Seillinien wird automatisch die Teilmenge jener Seillinien ausgewählt, welche die Flächen mit Holzanfall optimal abdecken. Dabei wird die abgedeckte Fläche einer Seillinie mit Hilfe der Arbeitsfeldbreite bestimmt. «Optimal» bedeutet, dass die Entwurfsziele für das Seillinienlayout bestmöglich erfüllt sind. Eine nähere Erläuterung der Entwurfsziele folgt weiter unten. Neben dem Rückemittel Seilkran stehen zudem der Bodenseilzug und der Helikopter zur Auswahl. Sie kommen dort zum Einsatz, wo sich die Entwurfsziele besser als mit dem Seilkran erfüllen lassen. Der Helikopter deckt zudem die mit dem Seilkran unerreichbaren Flächen ab.

[V] Zusammenfassen der Seillinienlayouts: Die in Schritt [IV] hergeleiteten Seillinienlayouts für die Prozessierungsflächen werden über den ganzen Perimeter zusammengefasst.

Das Modell lässt sich mit einer Reihe von Eingabemöglichkeiten an die lokalen Bedingungen anpassen. Eine detaillierte Aufstellung hierzu ist in Tabelle 2 (S. 7) gegeben. Mit Variation der Eingabeparameter ist es zudem möglich, die Auswirkungen auf das Seillinienlayout zu studieren. Nachfolgend werden die Aspekte «Holzanfall» und «Entwurfsziele und deren Gewichtung» näher erläutert, da sie für die Nachvollziehbarkeit der Resultate unverzichtbar sind.

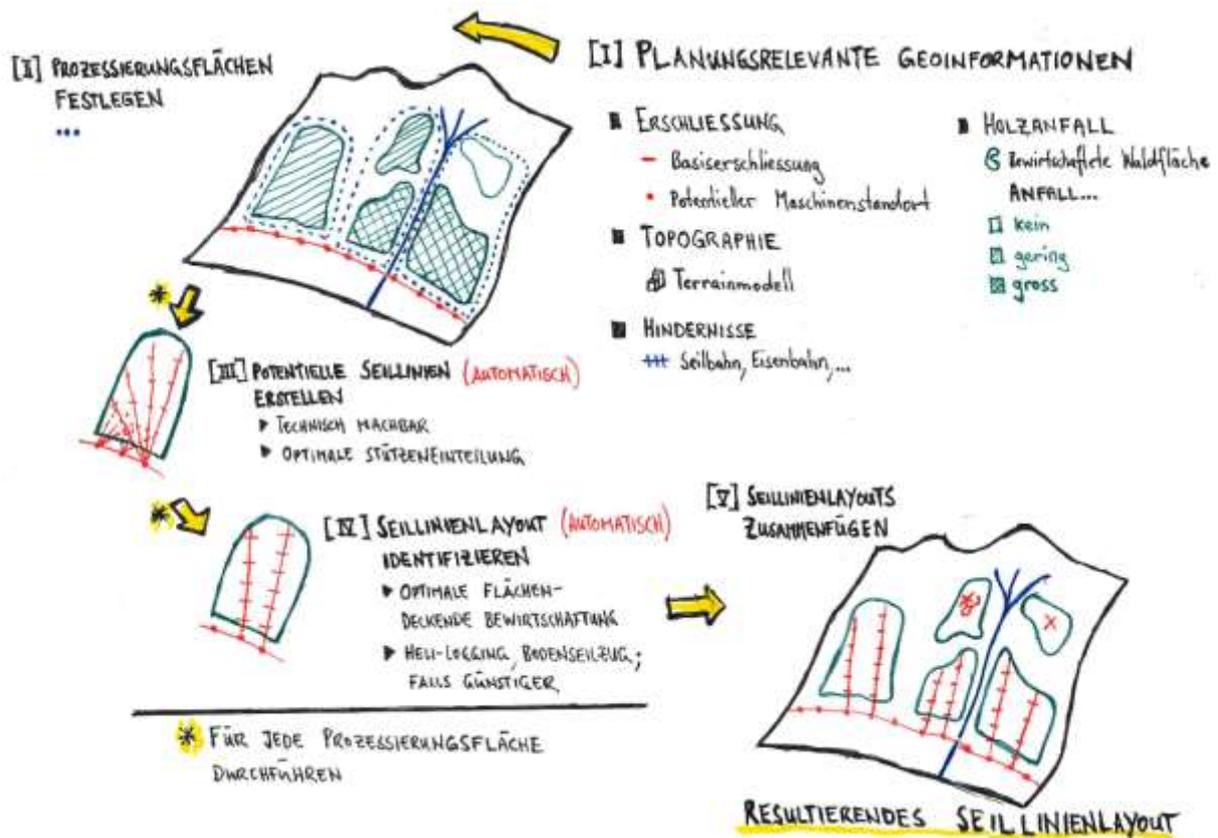


Abbildung 1 – Konzeptionelles Modell für die automatische Herleitung des Seillinienlayouts.

Der Holzanfall ist eine Grösse, die sich aus den waldbaulichen Zielen ergibt. Er wird räumlich-explizit als Raster repräsentiert, wobei die einzelne Rasterzelle den Wert des Holzanfalls in  $m^3$  über die gesamte Lebensdauer der Basiserschliessung schätzt. Dabei besteht die Möglichkeit, nicht zu nutzende Waldflächen auszuklammern (beispielsweise bei zu geringen Vorräten oder Schutzgebieten). In dieser Studie wird der Holzanfall  $v_{k,t}$  in einer Rasterzelle  $k$  auf Grundlage einer LiDAR-basierten Vorratskarte (Hill 2014) für ein quadratisches Raster mit Kantenlänge  $l$  wie folgt geschätzt:

$$v_{ernte}(k) = (v(k) \cdot s + i \cdot u) \cdot \frac{t^2}{10000} \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

Hierbei wird der Vorrat in der Rasterzelle  $v(k)$  [m<sup>3</sup>/ha] mit der Eingriffsstärke  $s$  [skalar, normalerweise zwischen 20-25%] multipliziert und der über die Lebensdauer der Basiserschliessung  $u$  [a] kumulierte Zuwachs  $i$  [m<sup>3</sup>/ha/y] addiert; letzterer unter der Annahme der Nutzung des gesamten Zuwachses. Die Eingriffsstärke ist in diesem Modell die Stellschraube zur Veränderung der Nutzungsintensität.

Die Auswahl des optimalen Seillinienlayouts ist durch die Minimierung von Entwurfszielen gesteuert. Die Minimierung des «negativen erntekostenfreien Erlöses»  $C_{ernte}$  [CHF] ist das ökonomische Entwurfsziel. Der Wert entspricht den Erntekosten nach Abzug des Holzerlöses. In Rücksicht auf gravitative Naturgefahrenprozesse und der Ergonomie bei der Holzernte sind bei der Anlage von Seillinien Abweichungen von der Falllinie von 25-35° besonders erwünscht. Mit der Minimierung von ungünstigen Seillinienmetern  $L_{ungünstig}$  [m] ausserhalb dieses Wertebereiches wird diesem Ziel Rechnung getragen. Mathematisch lässt sich die Optimierung nach obigen Zielen wie folgt formulieren:

$$MIN Z = \lambda_C \cdot C_{ernte} + \lambda_L \cdot L_{ungünstig} \quad (2)$$

Mit den Parametern  $\lambda_C$  und  $\lambda_L$  erfolgt die Zielgewichtung und  $Z$  gibt das Total der gewichteten Ziele an. Die automatisierte Herleitung eines Seillinienlayouts bietet die Möglichkeit, optimale Seillinienlayout-Varianten für verschiedene Zielgewichtungen zu berechnen und als Pareto-Menge darzustellen (Beispiel siehe Abbildung 4, S. 9). Die Pareto-Menge beschreibt eine Schar optimaler Varianten bei sich konkurrierenden Entwurfszielen. Sie haben die Eigenschaft, dass die Verbesserung des einen Ziels nur mit der Verschlechterung des anderen erreichbar ist. Zwischen den Zielen existiert somit eine Austauschbeziehung, welche besser unter dem Englischen Begriff «Trade-off» bekannt ist. Damit erhält der Entscheidungsträger die Grundlage, um Trade-offs zwischen Varianten zu vergleichen und einen guten Kompromiss zu identifizieren.

## 2.2 Implementierung

Der in Abbildung 1 dargestellte Workflow wurde mit den Programmen ArcGIS und MATLAB implementiert. ArcGIS diente hierbei sowohl (1) zur Vorbereitung der in die Berechnungen einflussenden Geodaten als auch (2) dem Zusammenfügen der Teilergebnisse. Die in Matlab implementierten Module (1) erzeugen in jeder Prozessierungsfläche eine Menge machbarer Seillinien und (2) bestimmen das optimale Seillinienlayout. Bei der Implementierung war der Anspruch, innert möglichst kurzer Zeit eine Pareto-Menge optimaler Varianten zu erzeugen. Dabei beschränkten wir erstens die Varianten mit dem Non-Inferior Set Estimation Verfahren (NISE, Cohon 1979) auf jene, welche den Trade-off zwischen den Entwurfszielen ausreichend beschreiben. Zweitens wurden die Rechenjobs für die einzelnen Prozessierungsflächen parallelisiert und dem Hochleistungsrechner EULER an der ETH Zürich zur Bearbeitung übergeben.

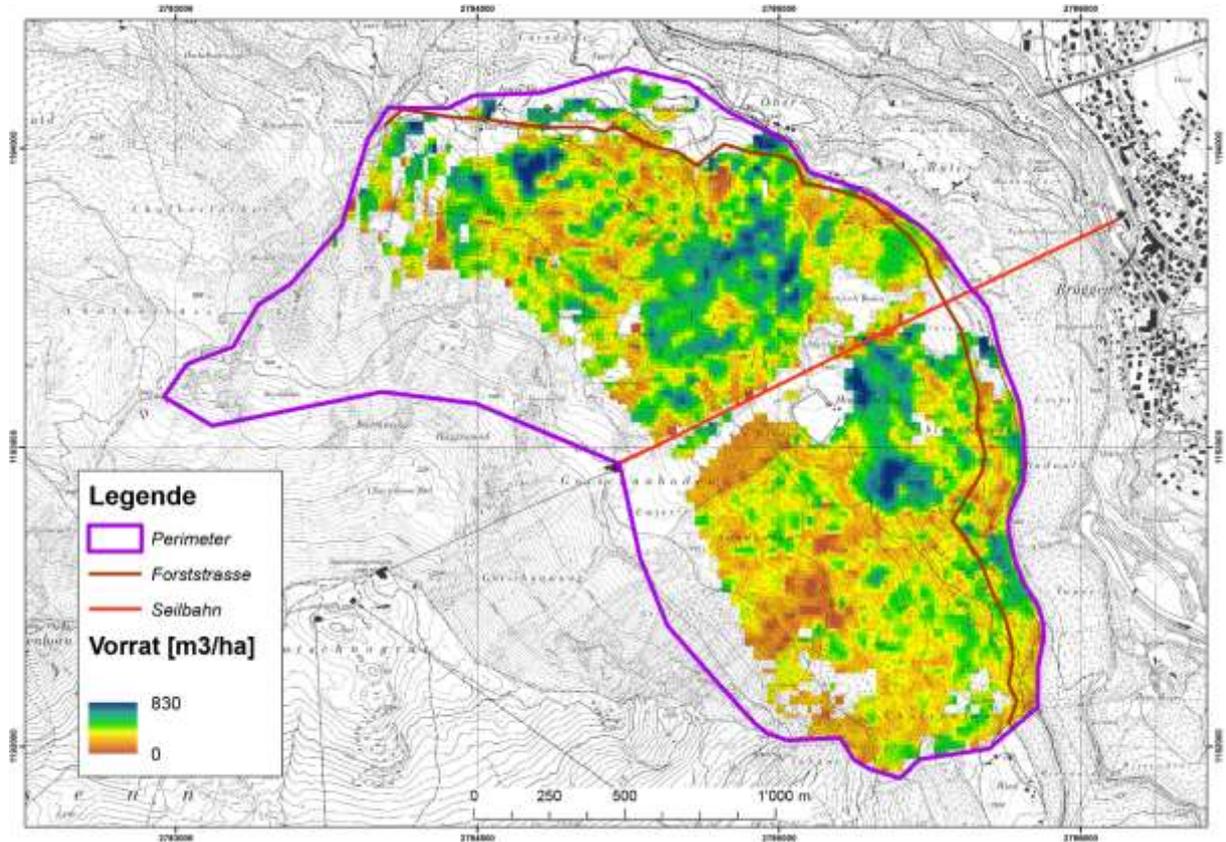
## 3 Datengrundlage

Die folgenden Abschnitte beschreiben die benötigte Datengrundlage für den Testperimeter Gotschna (350ha) in der Gemeinde Klosters-Serneus. Dies schliesst die Beschreibung (I) der planungsrelevanten Geoinformationen und (II) der Holzernteverfahren ein.

### 3.1 Planungsrelevante Geoinformationen

Die Karte in Abbildung 2 beschreibt den Perimeter mit den für die Planung wichtigsten Geoinformationen. Die untere Grenze des Perimeters bildet die Eisenbahntrasse der RhB. Die Vorratskarte (Hill 2014) beschreibt sowohl die Waldausdehnung und als auch die Vorräte. Der Wald erstreckt sich in der Fläche über 227 Hektaren und in der

Meereshöhe von 1'350 bis 1'800m. Die 3'700m lange LKW-befahrbare Forststrasse im unteren Bereich des Perimeters bildet die Basiserschliessung. Die Seilbahn auf den Gotschnaboden ist ein zu berücksichtigendes Hindernis. Alle räumlichen Elemente wurden für die Berechnung des Seillinienlayouts als 15x15m Raster repräsentiert. Diese Rasterauflösung ist Resultat eines Kompromisses zwischen räumlichem Detail und Rechenzeit. Die Geoinformationen sind nachfolgend im Detail beschrieben.



*Abbildung 2 - Übersicht zum Untersuchungsperimeter auf Grundlage des Übersichtsplans (UP, Kanton Graubünden, 2015)*

### 3.1.1 Topographie

Das Gelände wurde mit einem Digitalen Terrainmodell (DTM) als 15x15m Raster beschrieben. Das Raster wurde aus dem DTM der LiDAR-Befliegung 2010 via Downsampling erzeugt (Quelle: Gemeinden Klosters/Davos, Amt für Wald und Naturgefahren (GR), Remote Sensing Laboratories Uni ZH; 2010).

### 3.1.2 Holzanfall

Für die Schätzung des Holzanfalls wurde Formel (1) in Kombination mit einer Vorratskarte (Hill 2014) verwendet. Letztere wurde von einer 25x25m in eine 15x15m Rasterkarte umgerechnet. Räumlich wurde der Holzanfall auf Wälder mit Vorräten  $\geq 300$  m<sup>3</sup>/ha beschränkt. Der jährliche Zuwachs wurde auf 4 m<sup>3</sup>/ha/y geschätzt und auf eine Lebensdauer der Forststrasse von 40 Jahren hochgerechnet. Die Auswirkung der Eingriffsstärke auf das Seillinienlayout wurde mit Werten im Bereich 20-35% untersucht. Diese Werte orientieren sich an den Angaben des Försters und den Unterlagen der Fachstelle für Gebirgswaldpflege (GWP 2009), wobei Eingriffsstärken von 35% als Resultat «maximaler Eingriffe» zu interpretieren sind. Tabelle 1 stellt den Holzanfall exemplarisch für die Vorräte 300 und 600 m<sup>3</sup>/ha dar.

**Tabelle 1** - Holzanfall in Abhängigkeit des Vorrats und der Eingriffsstärke. Die weiteren Berechnungen erfolgten mit der Eingriffsstärke 25% (rot hervorgehoben).

	EINGRIFFSSTÄRKE [%]			
	20	25	30	35
Vorrat 300 m <sup>3</sup> /ha				
Holzanfall				
... in m <sup>3</sup> pro Rasterzelle (fett)	<b>4.95</b>	<b>5.29</b>	<b>5.63</b>	<b>5.96</b>
... in m <sup>3</sup> /ha (Klammer)	(220)	(235)	(250)	(265)
Vorrat 600 m <sup>3</sup> /ha				
Holzanfall				
... in m <sup>3</sup> pro Rasterzelle (fett)	<b>6.30</b>	<b>6.98</b>	<b>7.65</b>	<b>8.33</b>
... in m <sup>3</sup> /ha (Klammer)	(280)	(310)	(340)	(370)

### 3.1.3 Erschliessung

Die Basiserschliessung entspricht der im Rahmen des Projektes «Gotschna» geplanten und gebauten Forststrasse. Der Abschnitt Ried-Cavadürli weist einige eingerichtete Lagerplätze auf, die sich als Maschinenstandorte eignen würden. Nach Aussage des Försters wäre prinzipiell überall auf der Forststrasse eine Maschine platzierbar. Daher wurde jede Rasterzelle in der 15x15m Repräsentation der Forststrasse als potentieller Maschinenstandort interpretiert. Daraus resultierten 311 Maschinenstandorte im Abstand von 15m.

### 3.1.4 Hindernisse

Hindernisse wurden in der vorliegenden Arbeit auf zweierlei Weise berücksichtigt. Die Trasse der RhB diente als untere Systemgrenze. Die Trasse der Gotschna-Seilbahn wurde als Hindernis erfasst, d.h., es darf nicht durch eine Seillinie gequert werden.

### 3.1.5 Prozessierungsflächen

Es wurden sieben Prozessierungsflächen zwischen 22 und 81ha manuell ausgeschieden (Karte siehe Anhang B2). Die Abgrenzung bezog die Elemente (1) Forststrasse, (2) Seilbahn und (3) Geländebrüche ein. Die aufgrund dieser Elemente resultierenden Flächen waren teilweise zu gross. Darum wurde eine weitere Unterteilung aufgrund künstlich gezogener Grenzen vorgenommen. Die Prozessierungsflächen überlappen sich. Dies reduziert Randeffekte bei der Optimierung der Seillinienlayouts in den einzelnen Flächen.

## 3.2 Beschreibung der Holzernteverfahren

Die automatische Herleitung des Seillinienlayouts erfolgte auf Basis der Rückemittel Seilkran, Helikopter und Bodenseilzug. Dem Seilkranmodell wurde dabei besonders Rechnung getragen. Die Berechnung des Lastseildurchhangs erfolgte der geringen Rechenzeit wegen nach dem Pestal-Verfahren für ein Trageil mit Laufmetergewicht 0.0228 kN/m und Anfangsseilzugkraft (Grundspannung) 100 kN, auf dem der Transport einer Last von 25 kN angenommen wurde. Die Parameter zur Seilliniengeometrie und -kosten sind in Tabelle 2 aufgeführt. In Abhängigkeit der schrägen Länge [m] und Längsneigung [%] der Seillinie wurde entweder der Konventionelle Seilkran (KSK, >600m, >15%), der Mobilseilkran (MSK, ≤600m, >15%) oder der Mobilseilkran mit selbstfahrendem Laufwagen (≤600m, ≤15%) zugewiesen. Mit der Zuweisung des KSKs oder MSKs sind unterschiedliche Installations- und Erntekosten verbunden (siehe Tabelle 2). Der Bodenseilzug kommt dort zum Einsatz, wo die Waldfläche über die maximale Zuzugsdistanz erreichbar ist. Der Helikopter wird auf jenen Flächen zugewiesen, die entweder mit dem Helikopter günstiger als mit dem Seilkran zu bewirtschaften sind oder nur mit dem Helikopter erreichbar sind. Die Erntekosten für den Seilkran wie auch für die anderen Rückemittel basieren auf der Schätzung des Försters. Anhand einer repräsentativen Seillinie mittlerer Länge wird anschliessend das Kostenmodell mit dieser Schätzung kalibriert.

*Tabelle 2 - Parameter zur Beschreibung der Rückemittel.*

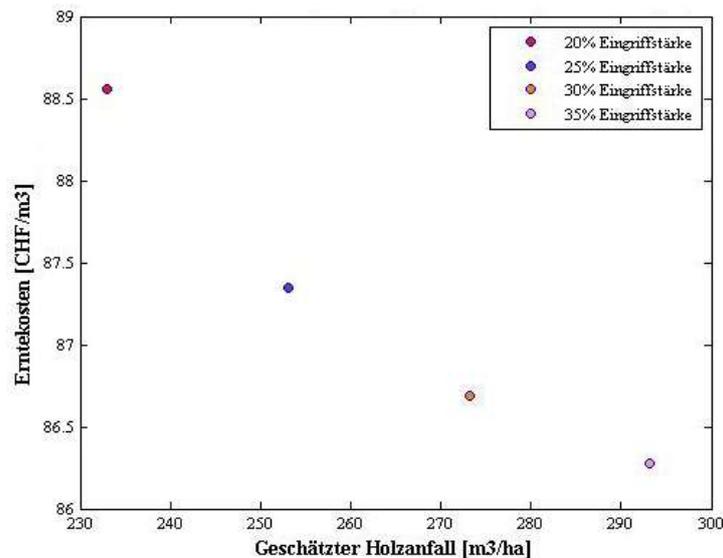
<b>Rückemittel</b>	<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>	<b>Werte</b>
Seilkran	Minimale schräge Länge Seillinie (alle)	m	100
	Maximale schräge Länge Seillinie (MSK/KSK)	m	600/800
	Mittlere schräge Länge (für Kalibrierung benötigt)	m	500
	Arbeitsfelddbreite	m	60
	Minimaler Bodenabstand Trageil unter Last	m	8
	Wertebereich günstige Abweichung von Falllinie	°	25-35
	Installationskosten (MSK/KSK)	CHF	200/800
	Erntekosten: Fällen, Aufarbeiten und Rücken (MSK/KSK)	CHF/m <sup>3</sup>	72/87
Bodenseilzug	Maximale Zuzugsdistanz bergauf	m	60
	Maximale Zuzugsdistanz bergab	m	0
	Erntekosten: Fällen, Aufarbeiten und Rücken	CHF/m <sup>3</sup>	45
Helikopter	Erntekosten: Fällen, Aufarbeiten und Rücken	CHF/m <sup>3</sup>	135
Alle	Durchschnittlicher Holzerlös	CHF/m <sup>3</sup>	65

## 4 Resultate der Anwendung auf den Perimeter Gotschna

Die Datengrundlage für den Perimeter Gotschna wurde dem Seillinienlayout-Tool zur Berechnung auf dem Hochleistungsrechner EULER übergeben. Zuerst wurde in den einzelnen Prozessierungsflächen (22-81ha) jeweils eine Menge machbarer Seillinien berechnet. Die Anzahl variierte zwischen 9'350 und 20'935 Seillinien. Die Rechenzeiten für die anschliessende Herleitung der Seillinienlayouts betragen zwischen 2-230 Minuten. Wegen der parallelisierten Berechnung der Einheiten war für diesen Rechenschritt nur der Maximalwert (sprich: 230 Minuten) massgebend. Das Tool wurde zur Beantwortung zweier Aufgaben angewendet. Die erste Aufgabe hatte zum Ziel, die Auswirkung der Eingriffsstärke auf das Seillinienlayout und die Erntekosten zu untersuchen. Die zweite Aufgabe hatte zum Ziel, auf Basis der Eingriffsstärke 25% eine Pareto-Menge optimaler Varianten herzuleiten. Die Resultate zu diesen Aufgaben werden nachfolgend präsentiert und diskutiert.

### 4.1 Auswirkung der Eingriffsstärke auf das Seillinienlayout

Die Eingriffsstärke wurde für Werte zwischen 20 und 35% variiert. Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem geschätzten mittleren Holzanfall je Hektare [m<sup>3</sup>/ha] und den durchschnittlichen Erntekosten [CHF/m<sup>3</sup>] für die einzelnen Eingriffsstärken-Werte auf. Bei einer Erhöhung der Eingriffsstärke um 15% steigt der Holzanfall um rund 60m<sup>3</sup>/ha und die durchschnittlichen Erntekosten verringern sich um rund 2.50 Franken pro Kubikmeter. Zudem werden zusätzliche 3.25% der Gesamtfläche mit dem Seilkran bewirtschaftet.



**Abbildung 3** - Zusammenhang zwischen dem geschätzten Holzanfall und den Erntekosten für vier Eingriffsstärke-Szenarien.

Die Erntekosten pro Kubikmeter sinken mit steigendem Holzanfall, weil die Fixkosten der Seilkraninstallation auf ein grösseres Volumen umgelegt werden. Auf die variablen Kosten der Holzernte (d.h. Fällen, Aufrüsten, Rücken) hat der Holzanfall keinen Einfluss. Mit steigendem Holzanfall nähern sich die Erntekosten asymptotisch den variablen Erntekosten je Kubikmeter an. Dieser Trend zeigt sich auch in Abbildung 3.

Eine Veränderung der Eingriffsstärke von 20 auf 35% zieht nicht einen Anstieg des Holzanfalls im selben Masse nach sich. Statt um den Faktor 1.75 ( $=35/20$ ) steigt der Holzanfall nur ungefähr um den Faktor 1.25. Dies ist auf das in Abschnitt 2 eingeführte Berechnungsmodell zurückzuführen. Die Reduktion der Erntekosten in Abhängigkeit der Eingriffsstärke ist somit unter diesen Vorzeichen zu interpretieren.

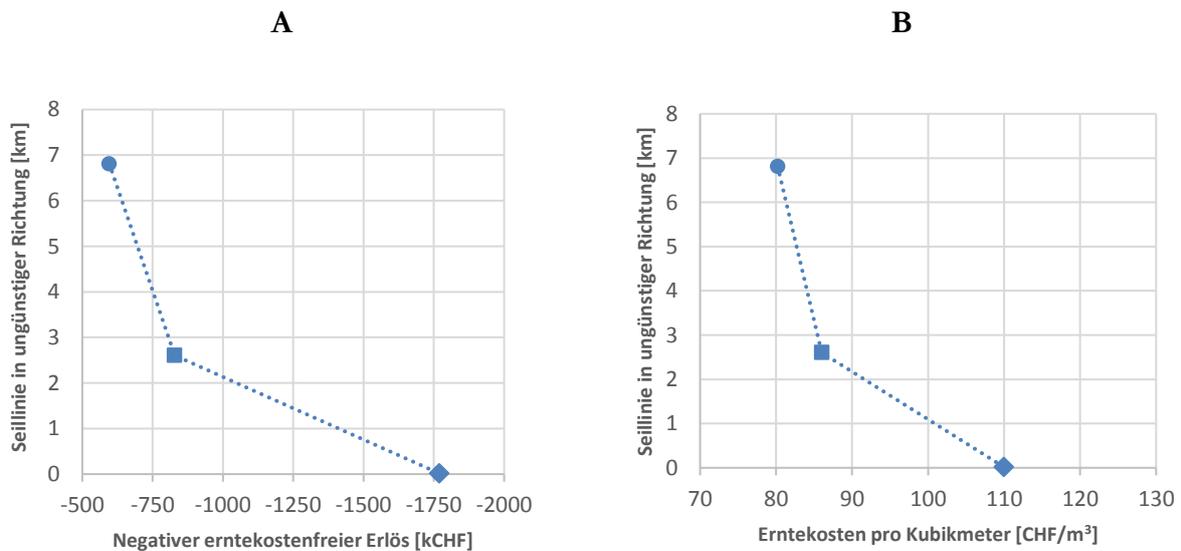
## 4.2 Herleitung einer Pareto-Menge auf Basis der Entwurfsziele

Die Herleitung der Pareto-Menge startete mit der Berechnung zweier Extremvarianten. Hierbei wurde jeweils das Gewicht des einen Ziels auf «eins» und jenes des anderen auf «null» gesetzt. Daraus resultierten die Varianten «Minimale Erntekosten» (MIN-EK) und «Minimale Seillinienlänge in ungünstiger Richtung» (MIN-UR). Die im Anschluss berechnete Variante MIX basierte auf einer mit dem NISE-Verfahren berechneten Zielgewichtung. Die drei Varianten sind unten sowohl tabellarisch (Tabelle 3) als auch grafisch (Abbildung 4) beschrieben. Abbildung 4-A stellt die Varianten in Abhängigkeit der Entwurfsziele (1) negativer Erntekostenfreier Erlös und (2) Seillinienlänge in ungünstiger Richtung dar. Abbildung 4-B beschreibt die Varianten in Abhängigkeit der intuitiver fassbaren Grösse «Erntekosten pro Kubikmeter» [CHF/m³]. Zur Illustration ist die Karte zu Variante MIX in Abbildung 5 dargestellt. Die weiteren Karten befinden sich im Anhang C. Der Trade-off zwischen den Entwurfszielen lässt sich mit dem Wandern von einer Variante zur nächsten analysieren. Das Wandern von Variante MIN-EK zur Variante MIX reduziert die Seillinienlänge in ungünstiger Richtung um rund 4'200m zu zusätzlichen Erntekosten von rund 6 CHF/m³. Das Wandern von MIX zu MIN-UR reduziert die Seillänge um weitere 2'600m zu zusätzlichen Erntekosten von rund 24 CHF/m³. Aufgrund Abwägung dieser Beziehungen kann der Entscheidungsträger nun eine Variante aus dieser Pareto-Menge auswählen.

**Tabelle 3** – Kennwerte der mit unterschiedlichen Zielgewichten  $\lambda_C$  und  $\lambda_L$  berechneten Seillinienlayouts.  $C_{ernte}$  beziffert den negativen erntekostenfreien Erlös und  $L_{ungünstig}$  die Seillinienlänge in ungünstiger Richtung.

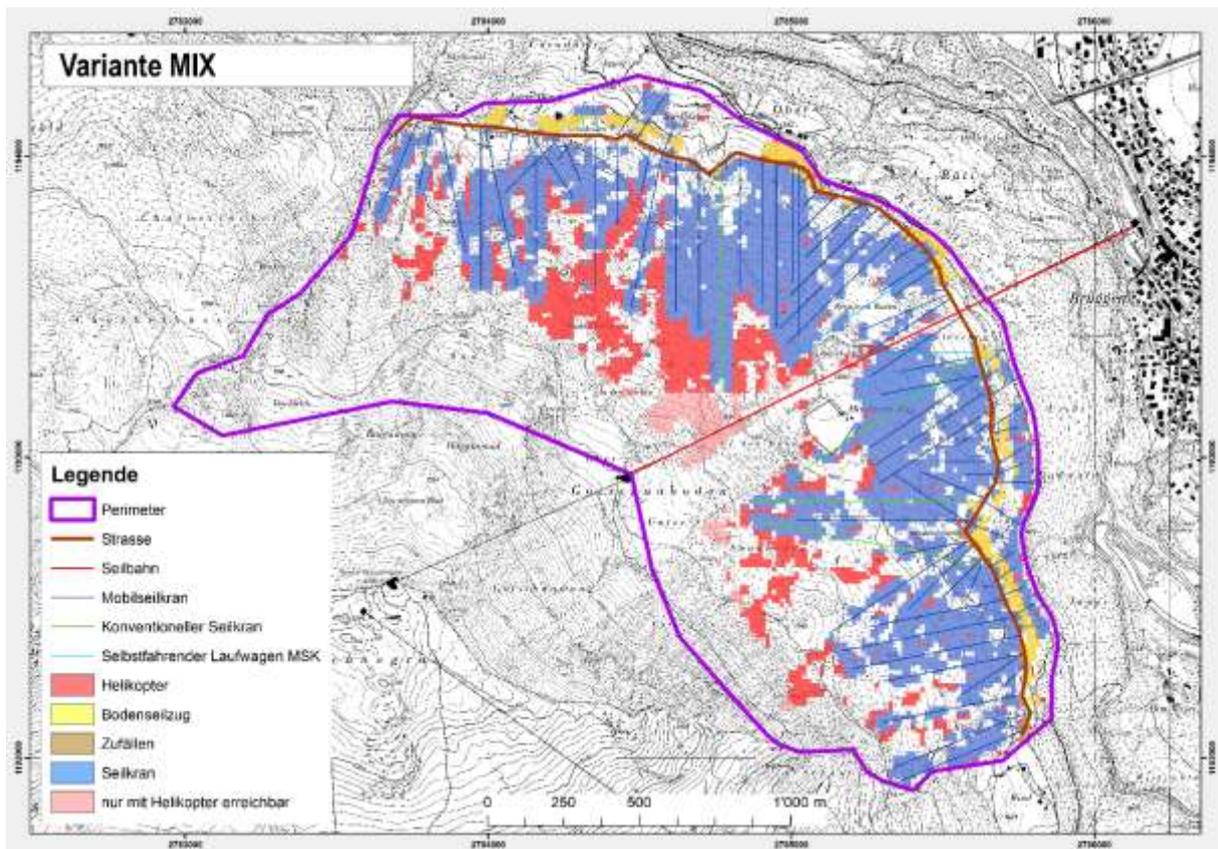
Variante	MIN-EK	MIN-UR	MIX
$C_{ernte}$ [kCHF]	-596	-1790	-828
$L_{ungünstig}$ [km]	6.815	0.015	2.605
$\lambda_C$	1	0	0.21
$\lambda_L$	0	1	0.79
Anteil Seilkran [%]	88.2	33.8	75.6
Anteil Helikopter [%]	11.2	65.2	23.7
Anteil Bodenseilzug [%]	0.6	1.0	0.7

Die Berücksichtigung des Kriteriums «Seillinienlänge in ungünstiger Richtung minimieren» führt zu einem Anstieg des Helikopter-Anteils (siehe Tabelle 3). Die Gründe hierfür sind zweierlei Natur. Erstens wird durch die Einschränkung der Richtung die Chance verringert, Seillinien mit grossem Holzanfall zu identifizieren, was den Helikopter attraktiver macht. Zweitens verkleinert sich die per Seilkran erreichbare Fläche, wenn die Seillinien bei gegebener maximaler Reichweite nicht parallel zur Falllinie geführt werden dürfen.



**Abbildung 4** - Pareto-Menge bestehend aus den Varianten MIN-EK (Kreis), MIN-UR (Raute) und MIX (Quadrat). Grafik [A] charakterisiert die Varianten nach dem negativen erntekostenfreien Erlös und der Seillinie in ungünstiger Richtung zur Falllinie. Grafik [B] charakterisiert die Varianten alternativ nach den durchschnittlichen Erntekosten pro Kubikmeter.

Bei genauerer Betrachtung der Seillinienlayout-Karten fallen zwei Dinge auf: (1) Die überlappenden Bereiche der Berechnungseinheiten (Karte siehe Anhang B2) sind doppelt mit Seillinien überdeckt. Dies, weil bei der automatischen Optimierung für die Prozessierungsflächen jeweils die ganze Fläche abzudecken war. (2) Zudem gibt es für den Bodenseilzug ausgeschiedenes Gelände, das ebenso durch Seillinien abgedeckt ist. Mit dem Ziel minimaler Erntekosten ist dieses Resultat plausibel. Denn der Bodenseilzug ist bedeutend günstiger.



*Abbildung 5 - Seillinienlayout für die Variante MIX.*

## 5 Ausblick – Implementierung und Forschungsbedarf

Diese Fallstudie zeigte am Beispiel eines Perimeters von praxisrelevanter Grösse die Möglichkeiten einer automatisierten Seillinienlayout-Planung auf. Diese ermöglicht die Auswahl eines Layouts aus einer Menge optimaler Varianten, welche durch das wiederholte Lösen eines Optimierungsproblems mit unterschiedlichen Gewichtungen für die Entwurfsziele «negativen erntekostenfreien Erlös minimieren» und «Seillinie in ungünstiger Richtung zur Falllinie minimieren» zustande kommen. Mit dem Abweichen von der Falllinie wird auch den potentiellen Auswirkungen auf gravitative Naturgefahren Rechnung getragen. Zudem ermöglicht der Ansatz die Sensitivitätsanalyse entscheidender Parameter, wie es am Beispiel «Eingriffsstärke» aufgezeigt wurde. Dieser Abschnitt skizziert die Implementierung dieses Werkzeugs für die praktische Nutzung und identifiziert Lücken mit weiterem Forschungsbedarf.

### 5.1 Implementierung

Mit der Anwendung des Tools auf einen Perimeter von praxisrelevanter Grösse haben wir gelernt, dass sich nur mit dem Parallelisieren von Rechenoperationen Resultate innert nützlichem Zeitraum zur Verfügung stellen lassen. Bei einer allfälligen Implementierung für die Praxis raten wir daher vor einer Desktop-Lösung ab und empfehlen stattdessen die Nutzung von Rechendiensten auf Hochleistungsrechnern. Da auf diesen Rechnern in der Regel auch die verwendeten kostenpflichtigen Programme installiert sind, entfallen deren Beschaffungskosten. Es wird nur die geleistete Rechenarbeit verrechnet. Im Falle des Seillinienlayout-Tools konnten wir bei der Nutzung des Rechners EULER auf MATLAB und den Gurobi-Solver (eine Top-Software zum Lösen von Optimierungsproblemen) zurückgreifen.

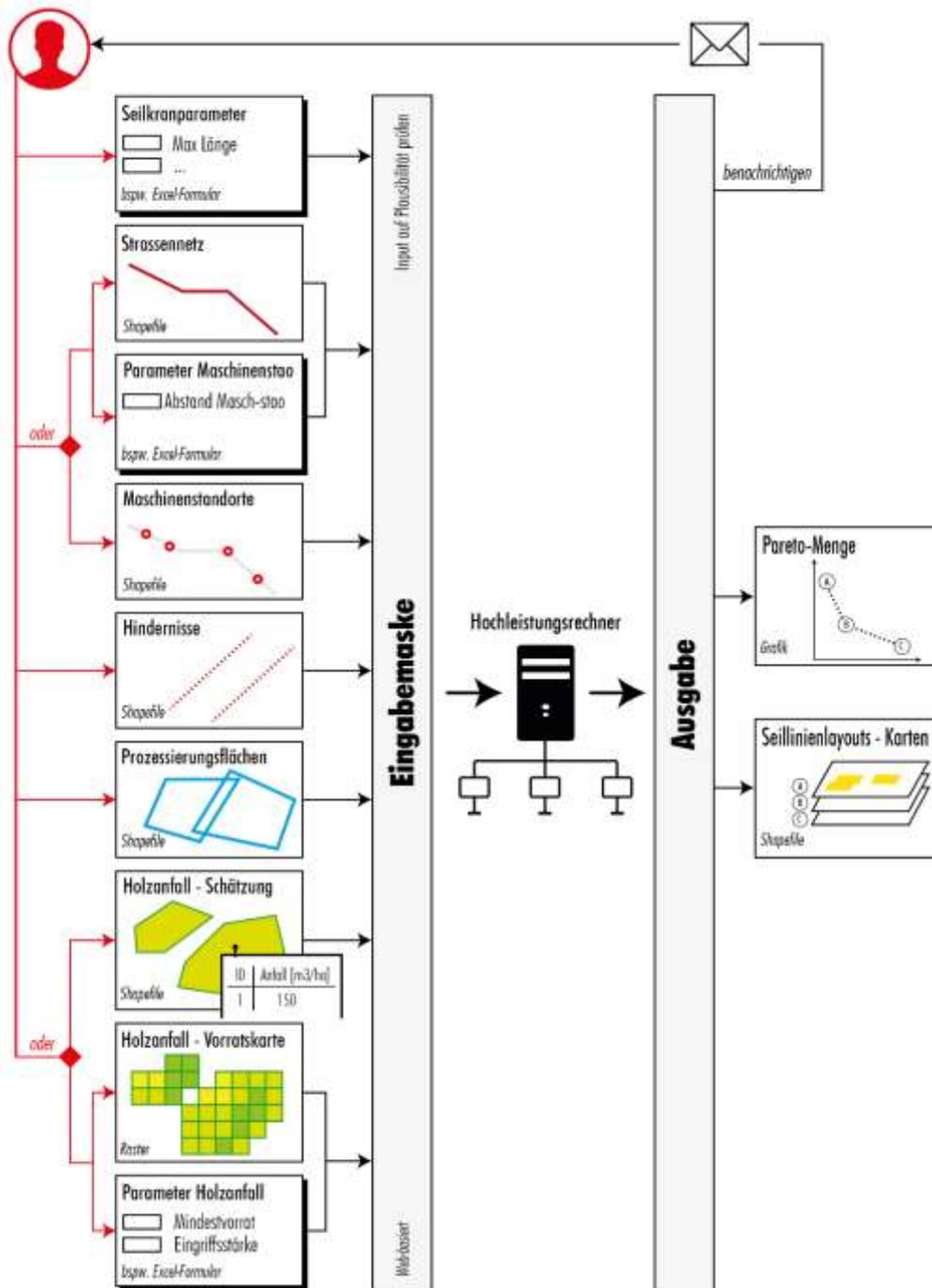


Abbildung 6 - Schema der Benutzerschnittstelle für die praktische Umsetzung des Seillinienlayout-Tools.

Das Schema in Abbildung 6 beschreibt eine webbasierte Eingabemaske, wie sie zur Bereitstellung der Eingangsdaten für den Hochleistungsrechner zum Einsatz kommen könnte. Vor Ausführung des Rechenjobs würden die Geodaten und Parameter auf Plausibilität geprüft, um unnötige Wartezeiten für fehlerhafte Resultate zu vermeiden. Da sich die Rechenzeiten auch zukünftig im Stundenbereich bewegen, würde der Nutzer nach Abschluss des Rechenjobs via Email zum Download der Resultate aufgefordert. Bei der Beschreibung des Untersuchungsperimeters hat der Nutzer nach Festlegung des Perimeters folgende Optionen:

**Seilkranparameter:** Analog zu Tabelle 2 (S. 7) lassen sich die Seilkranparameter beispielsweise in einem Excel-Formular anpassen. Formularvorlagen für typische Seilsystems wären denkbar. Im Formular lassen sich zudem die Parameter für die anderen Rückemittel sowie der Holzerlös anpassen.

**Maschinenstandorte:** Die Information zu Maschinenstandorten lässt sich auf zweierlei Weise übergeben. Entweder werden die potentiellen Maschinenstandorte direkt als Shapefile übergeben oder anhand eines Abstandkriteriums automatisch entlang der Forststrasse erzeugt. Letztere ist als Shapefile zu übergeben.

**Hindernisse:** Es können linienförmige Hindernisse aller Art als Shapefiles übergeben werden (bspw. Seilbahnen, Starkstromleitungen und grössere Fließgewässer). Sollen Seillinien nicht durch ungenutzte Waldflächen (bspw. Reserve) führen, können diese mit einem geschlossenen Polygonzug abgegrenzt werden. Die verschiedenen Hindernisse werden im Anschluss automatisch in ein Hindernis-Shapefile zusammengeführt.

**Holzanfall:** Die räumlich-explizite Information zum Holzanfall lässt sich auf zwei Arten übergeben. Der Nutzer kann entweder ein Polygon-Shapefile mit seinen manuell festgelegten Flächen und Schätzungen des Holzanfalls übergeben oder stattdessen Regeln (1) für die Ausscheidung genutzter Flächen sowie (2) für die Schätzung des Holzanfalls festlegen, die im Anschluss auf eine Vorratskarte angewendet werden. Zur Berücksichtigung von Flächen ohne Holzanfall wie Reservatsflächen wird dort der Wert auf «Null» gesetzt.

**Prozessierungsflächen:** Als Polygon-Shapefile werden die Prozessierungsflächen übergeben. Es ist denkbar, zukünftig aufgrund der Strassen-, Hindernis- und Holzanfall-Information Flächenvorschläge automatisch zu erzeugen und nach einer allfälligen manuellen Anpassung zu übergeben.

Das digitale Höhenmodell zur Beschreibung der Topographie wird bereitgestellt, weil die Nutzer dieses in der Regel nicht besitzen. Nach der Berechnung des Seillinienlayouts liegen alle Informationen für die Planung eines Seillinienprojektes vor. Es wäre denkbar, das resultierende Seillinienlayout mit einem Planungs-Tool wie SEILAPLAN (Moll und Bont, 2015) zu verknüpfen. Beispielsweise könnte per Klick auf die Seillinie von Interesse der Export des entsprechenden Geländeprofiles als Input für SEILAPLAN starten.

Einer wie oben skizzierten Implementierung müsste eine grundlegende Revision des Programmiercodes vorangehen. Der jetzige Code ist im Rahmen einer Dissertation gewachsen und nicht spezifisch auf eine effiziente Anwendung ausgerichtet. Daher müsste der Programmiercode besser auf die Problemstellung zugeschnitten und nach Möglichkeit Operationen parallelisiert werden. Eine Implementierung in der oben skizzierten Form erfordert das Poolen der Ressourcen und könnte forschungsseitig von der Professur forstliches Ingenieurwesen (ETH) und der Gruppe Forstliche Produktionssysteme (WSL) getragen werden.

## 5.2 Forschungsbedarf

Bei der Anwendung des Seillinienlayout-Tools auf das Gebiet Gotschna haben wir festgestellt, dass in den Aspekten (1) Überlappung von Prozessierungsflächen, (2) Zuweisung von Bodenseilzug-Gelände und (3) Schätzung des Holzanfalls Verbesserungsbedarf besteht.

Mit der Überlappung von Prozessierungsflächen entstehen Artefakte in den überlappenden Flächen. Diese Flächen sind durch Seillinien doppelt abgedeckt. Diesem Problem lässt sich zukünftig auf zweierlei Arten begegnen: (1) Mit der zunehmenden Rechenleistung ist anzunehmen, dass die Ausscheidung von Prozessierungsflächen alleine aufgrund von Transportgrenzen (Forststrassen, Kreten) und Hindernissen (bspw. Seilbahn, grössere Gewässer) unabhängig von der Flächengrösse möglich sein wird. Aufgrund dieser klaren Grenzen aus Sicht der Holzernte wäre die Überlappung auf ein vernachlässigbar kleines Mass reduzierbar. (2) Alternativ liesse sich mit einem weiteren Optimierungsschritt für die überlappenden Flächen das optimale Seillinienlayout aus der Menge der überlappenden Seillinien bestimmen.

Es gibt für Bodenseilzug ausgeschiedenes Gelände, welches ebenso durch Seillinien abgedeckt ist. Die betreffenden Seillinien werden für die weiter von der Strasse entfernten Flächen geplant. Dies ist die kostenminimale Flächenaufteilung nach Rückemittel. Wenn der Seilkran sowieso aufzustellen ist, so könnte man argumentieren, auch gerade das Bodenseilzug-Gelände damit zu bewirtschaften. Dies bedarf einer einfachen Modifikation des Modells.

Die Schätzung des Holzanfalls erfolgte räumlich-explizit anhand einer Vorratskarte und einem einfachen Holzanfall-Modell in Funktion der Eingriffstärke und des Zuwachses. Zurzeit ist der Einfluss der räumlichen Variabilität des Holzanfalls auf das Seillinienlayout nicht abschätzbar. Es wäre in dem Moment zu untersuchen, inwiefern sich das

Seillinienlayout in der Annahme eines in der Fläche homogenen Holzanfalls vom jetzigen Resultat unterscheidet. Für zukünftige Schätzungen des Holzanfalls empfehlen wir realitätsnähere Annahmen. Die Argumentation mit der Eingriffsstärke muss an einen Eingriffsturnus gekoppelt sein. In Abhängigkeit der Lebensdauer der Forststrasse wäre damit je nachdem eine zweimalige Nutzung der Seillinien denkbar. Der entstehende Holzanfall wäre mit einem Waldwachstumsmodell zu schätzen.

## LITERATUR

Bont L (2012) Spatially explicit optimization of forest harvest and transportation system layout under steep slope conditions. Zürich: ETH. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-007558027>

Bont L (2013) Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 164(11): 321-327.

Bont L, Heinemann HR, Church RL (2014) Optimizing cable harvesting layout when using variable-length cable roads in central Europe. Canadian Journal of Forest Research 44(8): 949-960.

Cohon JL, Church RL, Sheer DP (1979) Generating multiobjective trade-offs: An algorithm for bicriterion problems. Water Resources Research, 15(5), 1001-1010.

Fachstelle für Gebirgswaldpflege GWP (2009) Waldbauliche Eingriffsstärke – Unterlagen zu den Kursen 2009 GR. [http://www.gebirgswald.ch/tl\\_files/gebirgswald/de/03\\_Exkursionen\\_Kurse/Eingriffsstaerke\\_GR\\_2009.pdf](http://www.gebirgswald.ch/tl_files/gebirgswald/de/03_Exkursionen_Kurse/Eingriffsstaerke_GR_2009.pdf)

Hill A, Breschan J, Mandallaz D (2014) Accuracy Assessment of Timber Volume Maps Using Forest Inventory Data and LiDAR Canopy Height Models. Forests 5(9): 2253-2275. <http://www.mdpi.com/1999-4907/5/9/2253>

Moll P, Bont L (2015) Seilaplan - Seilkran Layout Planer. Plugin für QGIS. <https://github.com/piMoll/SEILAPLAN>

# ANHANG

## A Geodatenätze

Es stehen die ArcMap-Projekte (Version 10.2) Grundlagenkarten und Seillinienlayouts zur Verfügung.

<b>ArcMap-Projekt</b>	<b>Daten</b>
<b>Grundlagenkarten</b> (Kapitel 3)	GeodatenGK.gdb\ ..PERIMETER ..WALDSTRASSE ..SEILBAHN* ..VORRATSKARTE** ..UP*** ..DTM** ..PROZESSIERUNGSFLÄCHEN
<b>Seillinienlayouts</b> (Kapitel 4)	GeodatenSL.gdb\ ..Layout_X_Linien (X = MIN_EK, MIN_UR, MIX) ..Layout_X_Flächen (X = MIN_EK, MIN_UR, MIX) ..PERIMETER ..WALDSTRASSE ..SEILBAHN* ..UP*** ..PROZESSIERUNGSFLÄCHEN

\* ©2016 swisstopo (JD100042)

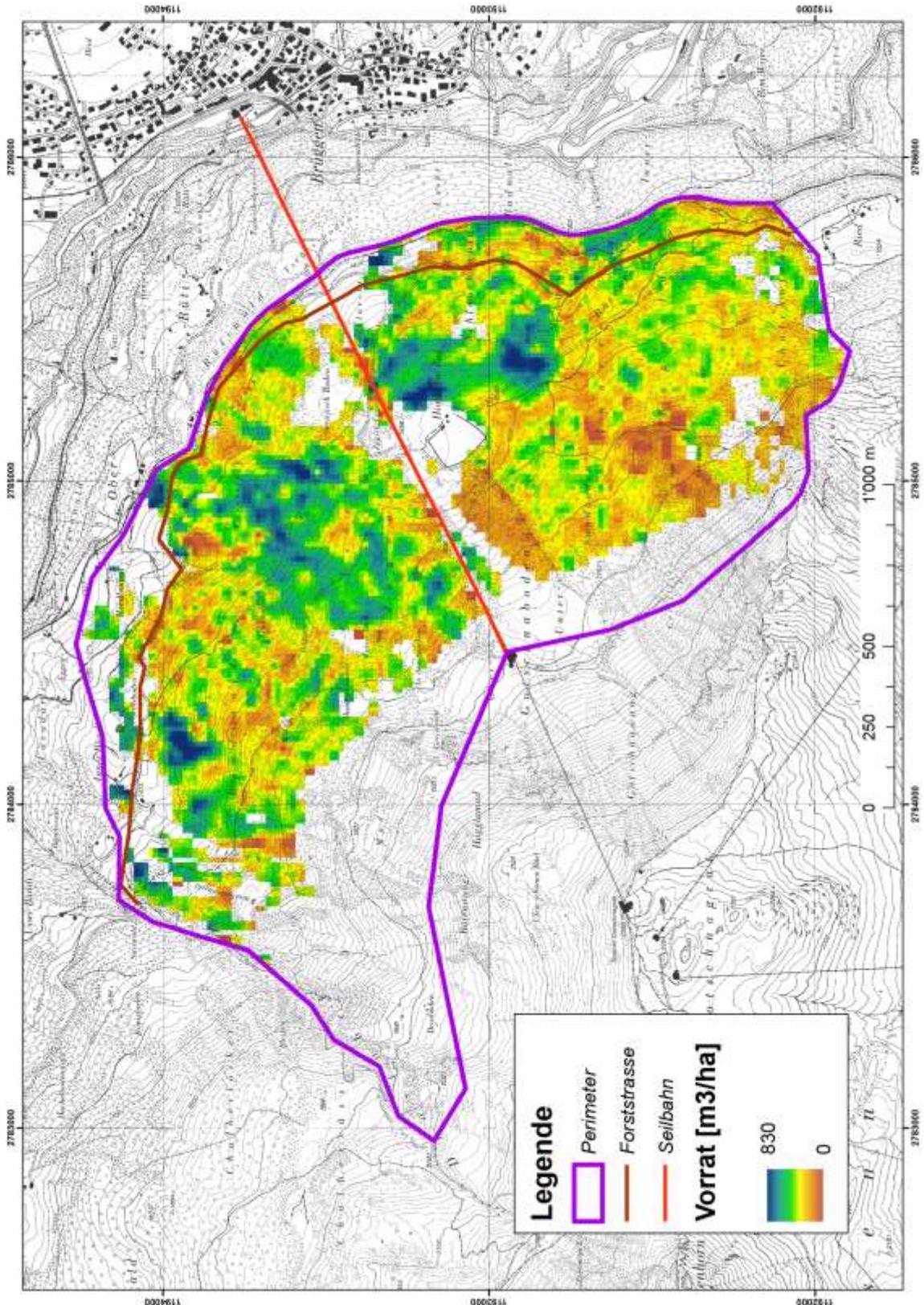
\*\* LiDAR-DOM/DTM, Gemeinden Klosters/Davos, Amt für Wald und Naturgefahren (GR), Remote Sensing Laboratories Uni ZH, 2010

\*\*\* Übersichtsplan (UP), Kanton Graubünden, 2015

## B Kartengrundlagen

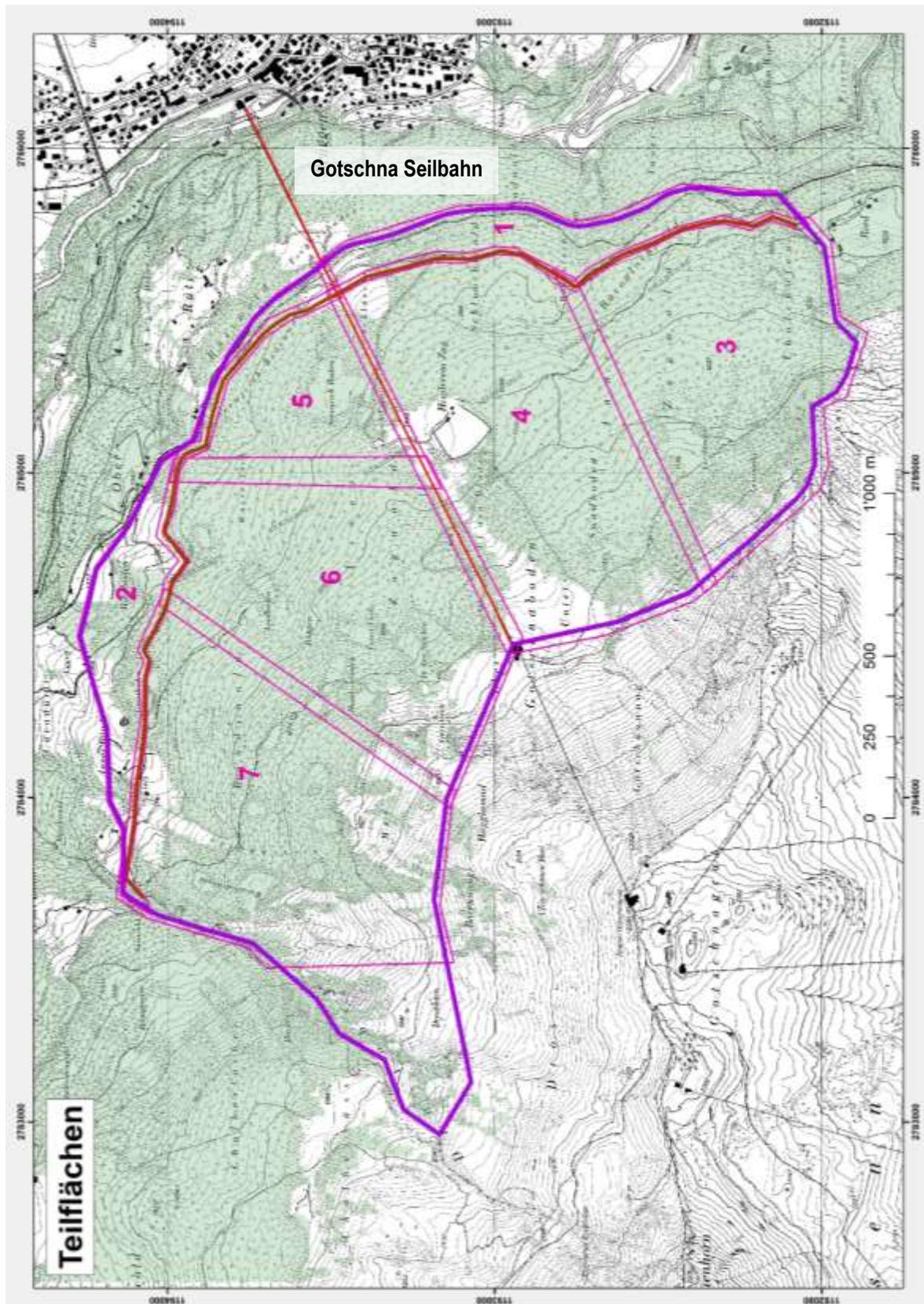
### B1 Vorratskarte

Die Vorratskarte wurde durch Kombination des verdichteten Bündler LFI-Stichprobennetzes mit den LiDAR-Daten berechnet (Hill 2013).



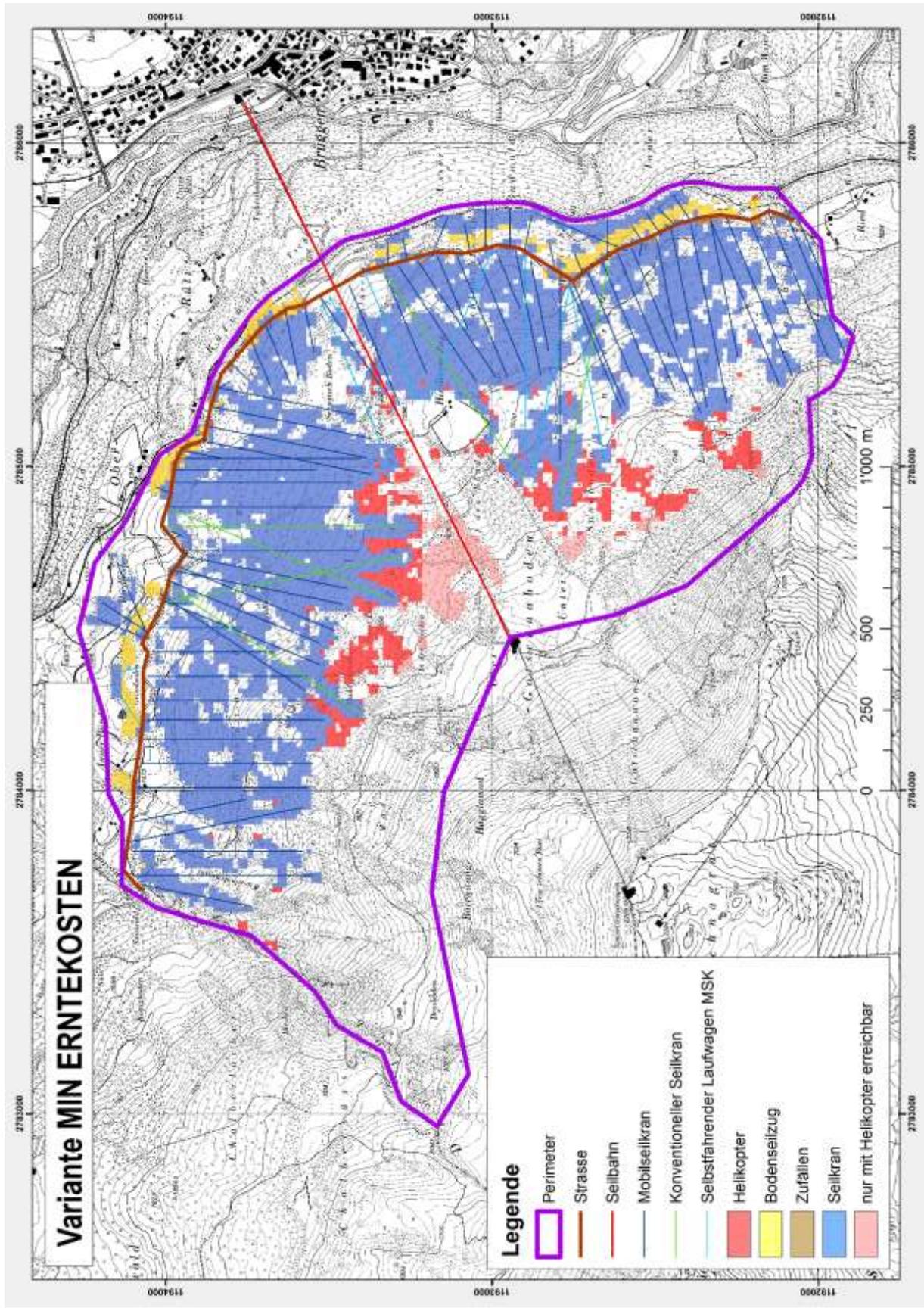
## B2 Prozessierungsflächen

Die Berechnungseinheiten wurden von Hand ausgediehen. Massgebend waren dabei Transportgrenzen (d.h., Forststrasse) und Hindernisse (bspw. Gotschna Seilbahn).



# C Karten Seillinienlayouts

## C1 Variante MINIMALE ERNTEKOSTEN (MIN-EK)



C2 Variante MINIMALE SEILLINIENLÄNGE IN UNGÜNSTIGER RICHTUNG (MIN-UR)

