

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 164 (2013)

Heft: 11

Artikel: Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände

Autor: Bont, Leo

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097634>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände

Leo Bont ETH Zürich, Institut für terrestrische Ökosysteme (CH)*

Designing an optimal cable road layout for harvesting in steep terrain

Cable-based technologies are a backbone when designing harvesting systems for steep slopes. However, layout and placement of the cable roads are challenging. To guarantee that harvesting costs are minimized and that the process has the least environmental impact on the remaining forest, one must carefully locate both cable towers and cable roads. Our study objectives were to 1) develop an approach of mixed integer linear programming for planning an optimal harvesting and cable road layout and 2) test this methodology on a specific site, then observe its behaviour with single- and multi-objective alternatives and evaluate its practicality. In doing so, we determined that fitting the model to terrain units up to 35 ha provided the best results and within a reasonable timeframe. The approach presented here is the first to consider both environmental and economic objectives, and can determine the optimal cable road layout within the shortest time.

Keywords: cable-based harvesting, cable road layout, mixed integer linear programming

doi: 10.3188/szf.2013.0321

* Universitätstrasse 16, CH-8092 Zürich, E-Mail leo.bont@env.ethz.ch

Die gebräuchlichste Art des Holzurückens in steilem, nicht befahrbarem Gelände besteht darin, temporäre Seilbahnen für den Holztransport (Seilkräne) einzusetzen. Seilkräne werden dort gebaut, wo einerseits eine genügende Erschliessung vorhanden und andererseits ein bestimmter minimaler Holzanfall gegeben ist. Falls die geerntete Holzmenge keinen wirtschaftlichen Seilkraneinsatz erlaubt oder die Erschliessung ungenügend ist, kommt auch eine Holzernte mittels Helikopter infrage.

Ein wichtiger Schritt beim Planen eines Holzschlages besteht darin, das Seillinienlayout festzulegen. Das Seillinienlayout wird in der Regel für eine längere Zeitperiode oder einen Turnus von circa 20 bis 30 Jahren festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass in dieser Zeit auf der gesamten Fläche einmal eingegriffen wird, wobei sich die Intensität des Eingriffs an der waldbaulichen Zielsetzung orientiert. Ein Seillinienlayout für eine Fläche besteht also aus mehreren einzelnen Seillinien, welche nacheinander in regelmässigen Zeitabständen innerhalb der Turnuszeit gebaut und abgearbeitet werden. Das Seillinienlayout beinhaltet die Linienführung der einzelnen Seillinien, d.h., der Aufarbeitungs- und

Installationsplatz, die Position, an welcher die Seillinie im Gelände endet, und die dazu benötigten Zwischenstützen sind zu definieren. Im Weiteren muss für jede Parzelle entschieden werden, mit welcher Technik geerntet wird (Seilkrane oder Helikopter).

Beim Ausarbeiten eines Seillinienlayouts müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Einerseits soll die Holzernte möglichst kostengünstig erfolgen, und andererseits sollen die Ernteschäden am Bestand und an der bestehenden Verjüngung minimiert und günstige Wuchsbedingungen geschaffen werden. Daneben spielen auch Arbeitssicherheit und Ästhetik eine Rolle. Ein auf diese Faktoren ausgerichtetes Layout bietet zwar noch keine Gewähr, ist jedoch eine Grundlage, um die Holzernte kostengünstig und mit einer geringen schädlichen Wirkung auf die Umwelt auszuführen.

Das Seillinienlayout wird bis anhin in Mitteleuropa von Experten aufgrund von Faustregeln und Erfahrungswissen festgelegt. Faustregeln dazu werden beispielsweise in Heinemann (2003) formuliert. Automatische Methoden (Optimierungsmethoden) zur Lösung dieses Problems wurden in Ländern wie den USA oder Chile bereits formuliert (Dykstra & Riggs 1977, Chung 2002, Epstein et al 2006). Diese



Abb 1 Installations- und Aufarbeitungsplatz eines Seilschlags.

sind jedoch auf die Kahlschlagwirtschaft ausgerichtet, gehen von einer anderen Erntetechnik aus und berücksichtigen keine ökologischen Ziele, sondern sind nur auf eine möglichst kostengünstige Bewirtschaftung ausgelegt. Deshalb sind solche Ansätze für die Waldbewirtschaftung in der Schweiz nicht brauchbar. Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Methodik zu entwickeln, mit welcher ein optimales Seillinienlayout für multifunktional bewirtschaftete Wälder im Alpenraum berechnet werden kann (Abbildung 1). Das Ziel der Optimierung lag darin, 1) die Erntekosten und 2) die ökologischen Schäden am Bestand und an der Verjüngung zu minimieren. Im vorliegenden Artikel wird die Methodik vorgestellt und anhand eines Beispiels über mögliche Einsatzgebiete sowie Grenzen dieses Ansatzes diskutiert.

Modellentwicklung

Benötigte geografische Informationen

Im Modell wird der Holzernteprozess und -transport vom stehenden Baum im Bestand bis zum liegenden Stamm auf einem Polter an der Waldstrasse betrachtet. Als kleinste Einheit, welche geerntet werden kann, betrachten wir die Holzerntezelle. Sie ist eine quadratische Fläche mit der Auflösung des entsprechenden Rasters von zum Beispiel 5×5 m oder 10×10 m. Folgende geografische Informationen müssen als Raster vorliegen: 1) digitales Höhenmodell, 2) Karte mit dem zu erntenden Volumen, 3) Hindernisse, über welche keine Seillinie gebaut werden kann (z.B. Siedlungen, Starkstromleitungen), 4) Karte der geeigneten Installationsplätze für das Seilgerät und optional: 5) Karte der Bäume, welche

als Tragseilstützen verwendet werden können. Die Karte mit dem zu erntenden Volumen enthält dabei das Volumen, welches im Planungsgebiet während der Planungsperiode geerntet werden soll. Dadurch wird vermieden, dass Jungwuchs- oder Stangenholz-Bestände erschlossen werden. Für die Karte der geeigneten Installationsplätze für das Seilgerät können geeignete Plätze beispielsweise aufgrund einer Feldbegehung ausgeschieden werden. Es ist grundsätzlich auch möglich, das gesamte Strassennetz als geeigneten Installationsplatz zu definieren. Punkt 5) hat zum Ziel, die Stützen möglichst dort zu bauen, wo geeignete Stützenbäume verfügbar sind. Dies reduziert die Installationskosten erheblich.

Evaluation der machbaren Erntesysteme

Im Modell kann eine Holzerntezelle entweder mittels Seilkran (auch verschiedene Typen von Seilkränen sind möglich, z.B. Mobilseilkran oder konventioneller Seilkran) oder mit einem alternativen System (z.B. Helikopter oder Bodenseilzug) geerntet werden. Die technischen Parameter der Seilsysteme können detailliert spezifiziert werden und umfassen das Gewicht der Last inklusive Laufwagen, Gewicht, Querschnittsfläche und E-Modul des Tragseils, die maximal zulässige Seilzugkraft und das Gewicht des Zugseils. Um zu verhindern, dass die Last am Boden nachschleift, kann ein minimal einzuhaltender Abstand zwischen der Lastwegkurve und dem Boden vorgegeben werden.

Um die Holzernte mit dem Seilkran zu modellieren, müssen zuerst die möglichen Seillinien evaluiert werden (Abbildung 2 illustriert das Vorgehen). Dazu werden ausgehend von jedem Installationsplatz 32 (oder 64) radial gerichtete Linien ausgelegt,

die maximale mögliche Länge der Seillinie berechnet und die Seillinie in Abschnitte (Sektionen) unterteilt. Für jede mögliche Seillinie mit den dazugehörigen Längsoptionen wird die kostenminimale Anordnung der Zwischenstützen berechnet (Bont & Heinimann 2012). Die Anordnung der Zwischenstützen dient als Grundlage für die Berechnung der Installationskosten einer Seillinie. Zum Schluss wird evaluiert, welche Holzerntezellen von welchen Sektionen der Seillinien erreichbar sind. Holzerntezellen, die innerhalb des Arbeitsfeldes liegen, gelten als von der Seillinie erreichbar. Die Arbeitsfeldbreite kann als konstant oder abhängig von Geländeeigenschaften (Hangneigung) definiert werden.

Die «alternativen Erntesysteme» stellen Erntemöglichkeiten für Zellen dar, für welche sich eine Ernte mit Seilkran nicht lohnt, diese kann zum Beispiel per Helikopter oder mittels Seilzug erfolgen. Es kann angenommen werden, dass mittels Helikopter alle Zellen erreicht werden können. Mit Seilzügen (integrierte Winden in Traktoren) können in der Regel Bäume hangaufwärts bis zu 50 m Distanz von einer Strasse und hangabwärts bis zu 80 m gerückt werden.

Schätzung der Holzerntekosten

Ein Ziel beim Planen eines Seillinienlayouts besteht darin, den erntekostenfreien Erlös zu maximieren. Da wir davon ausgehen, dass die Zellen, wel-

che geerntet werden müssen, sowie auch das darin enthaltene Volumen gegeben sind, können wir auch sagen, dass wir die Holzerntekosten minimieren müssen. Dazu müssen alle Kostenelemente der Holzernte geschätzt werden. Diese bestehen aus fixen Kosten wie jenen der Installation der Seillinie und aus variablen Kosten. Die Kosten für die Installation der Seillinie werden mit einem österreichischen Modell (Stampfer et al 2006) geschätzt. Diese umfassen das Aufbauen der Seillinie inklusive der Montage der Stützen. Die variablen Kosten enthalten das Fällen des Baumes, den seilgestützten Transport bis zur Waldstrasse und das Bearbeiten des Stammes (Entasten und Einschneiden). Wir gehen davon aus, dass beim Bergauftransport nach dem Vollbaumprinzip gearbeitet wird und beim Bergabtransport nach dem Sortimentsprinzip. Diese Prozesse werden ebenfalls mit den aktuellsten Produktivitätsmodellen aus Österreich abgebildet (Stampfer et al 2003, Stampfer 2002, Stampfer & Daxner 1998). Für die alternativen Erntesysteme (Helikopter, Seilzug) fallen keine fixen Kosten an, wir müssen daher nur die variablen Kosten, bestehend aus Fällen, Rücken und Aufarbeiten, berücksichtigen.

Schätzung der Umweltwirkungen

In Regionen wie den Alpen, in welchen Wälder sowohl Güter (Holz) wie auch Dienstleistungen (z.B. Schutz vor Naturgefahren) produzieren, gelten für die Holzernte besondere Restriktionen. Das Ziel der Waldpflege und damit jedes Eingriffes liegt darin, den Wald in einem dauerhaft stabilen Zustand zu erhalten und die Verjüngung zu fördern. Deswegen müssen die negativen Auswirkungen der Holzernte auf die Verjüngung und den verbleibenden Bestand minimiert werden. In vielen Fällen ist dieser Umweltaspekt wichtiger als eine kostengünstige Holzernte.

Unser Modell enthält folgende zwei Indikatoren, welche geeignet sind, einen Zusammenhang zwischen dem Seillinienlayout und dem potenziellen ökologischen Schaden darzustellen:

1) Die Länge der Seillinie in der Falllinie steiler als 25°. Ab einer Hangneigung von 25 bis 30° beginnen zahlreiche gravitative Naturgefahren aktiv zu werden, wie beispielsweise Steinschlag, Schneekriechen oder Lawinen (Frehner et al 2005). Treten diese Gefahren auf, ist es deutlich schwieriger, die Verjüngung aufzubringen – dies gelingt oft nur mit teuren technischen Massnahmen. Wird für den Bau der Seillinie eine Schneise, welche in Falllinie verläuft und steiler als 25° ist, in den Wald geschlagen, muss mit Naturgefahrenprozessen gerechnet werden. Deshalb soll die Länge der Seillinie in Richtung Falllinie bei mehr als 25° Hangneigung möglichst minimiert werden. Im Weiteren hat eine diagonal zur Hangneigung verlaufende Seillinie weitere Vorteile, wie zum Beispiel die geringere Sichtbarkeit (Land-

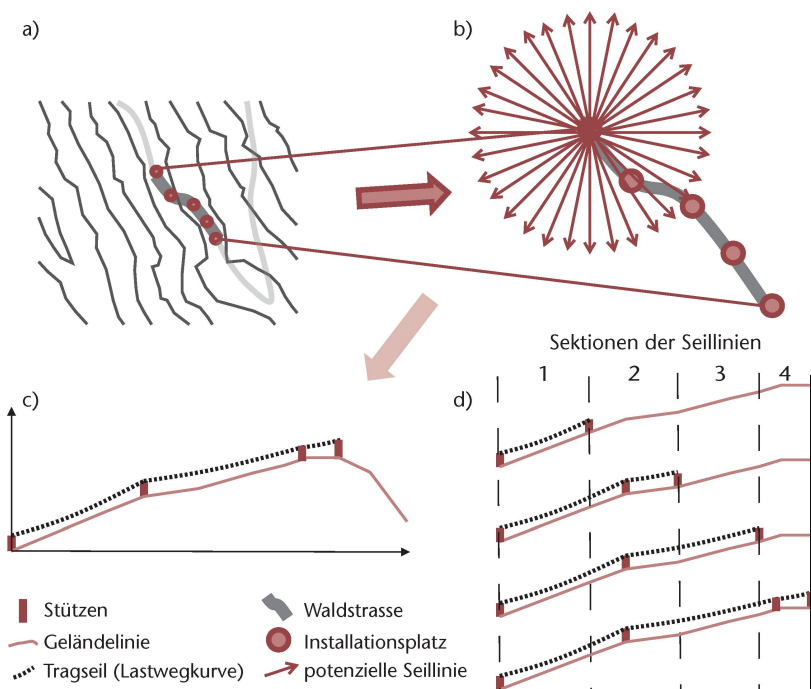


Abb 2 Generierung und Machbarkeitsanalyse möglicher Seillinien. a) Auf potenziell geeigneten Abschnitten entlang der Waldstrasse werden die Installationsplätze der Seillinien festgelegt, die Dichte der Installationsplätze richtet sich nach der Auflösung des Rasters. b) Von jedem Installationsplatz werden in radialer Richtung Linien ausgelegt. c) Für jede dieser Linien wird aufgrund des Geländes und seilmechanischer Kennwerte ermittelt, wie weit eine Seillinie maximal gebaut werden kann. d) Um verschiedene Längsoptionen zu haben, wird die Seillinie in mehrere Sektionen unterteilt, für jede mögliche Längsoption wird das optimale Stützenlayout berechnet.

schaftsästhetik), kleinere Bestandsschäden bei der Holzernte und die Erhöhung der Arbeitssicherheit (Heinimann 2003).

2) Die Länge der Seillinie, auf welcher das Holz bergab transportiert werden soll. Der Bergabtransport von Bäumen, insbesondere von Vollbäumen, erhöht das Risiko von Bestandsschäden im Vergleich mit dem Bergauftransport (Limbeck-Lilienau 2002, Stampfer 2002). Ab einer Neigung von -10° wird von Abwärtstransport gesprochen.

Optimierungsmethodik

Bei der vorliegenden Fragestellung handelt es sich um ein komplexes kombinatorisches Problem. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel einer Planungseinheit von 13 ha Grösse. Hier sind insgesamt 2800 Seillinien (inkl. verschiedener Sektionen) machbar. Die Einheit enthält 5300 Holzerntezellen bei einer 5-m-Raster-Auflösung. Dies ergibt insgesamt 128 000 Kombinationsmöglichkeiten, um die Holzerntezellen den Seillinien zuzuordnen. Dieses Beispiel zeigt, dass bei solchen kombinatorischen Problemen sehr schnell sehr grosse Datenmengen entstehen. Um solche Probleme zu lösen, braucht es deshalb ausgeklügelte mathematische Optimierungstechniken. Dazu haben wir eine gemischt ganzzahlige lineare Programmierung (Mixed Integer Linear Programming Model) formuliert. Diese kann mit kommerziellen Solvern gelöst werden und findet das mathematische Optimum. Nähere Informationen zur Optimierungstechnik sind in Bont (2012) zu finden.

Optimierung nach mehreren Zielen

Unser Problem kann nach drei verschiedenen Zielgrössen optimiert werden: 1) minimale Kosten,

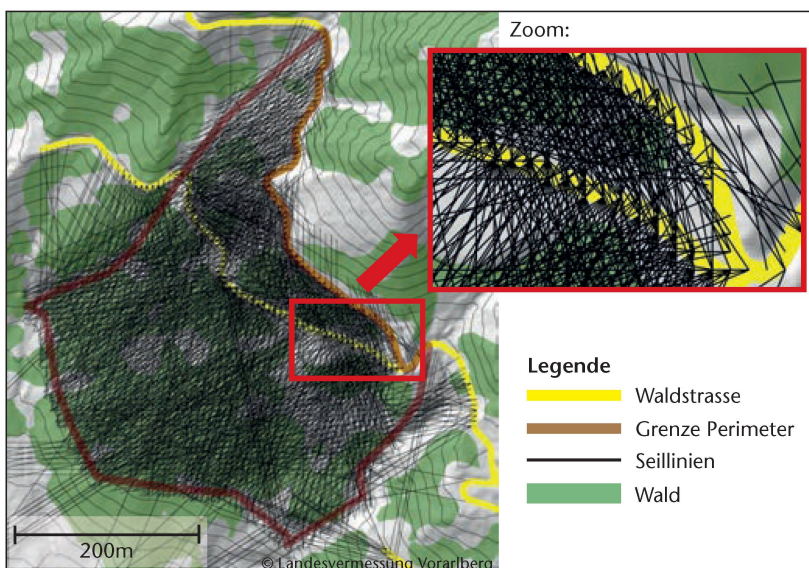


Abb 3 Planungseinheit mit 13 ha Grösse. Bei einer Rasterauflösung von 5 m wurden 2800 Seillinien und 5300 Holzerntezellen generiert. Insgesamt existieren 128 000 Kombinationsmöglichkeiten, um die Holzerntezellen den Seillinien zuzuordnen.

2) minimale Seillänge in Falllinie steiler als 25° und 3) minimale Seillänge, welche für den Bergabtransport bestimmt ist. Die Zielfunktion setzt sich zusammen aus den drei einzelnen Zielen. Damit die drei einzelnen Ziele zu einer Zielfunktion kombiniert werden können, müssen sie in etwa die gleiche Größenordnung aufweisen. Es wird daher ein Skalierungsfaktor für die Teilziele eingeführt, welcher sich auf der Grundlage der durchschnittlichen Umweltwirkungs- und Kostenwerte berechnet. Bei einer Optimierung nach mehreren Zielen spielt auch die subjektive Gewichtung eine wichtige Rolle. Dies fließt mit dem Faktor λ ein und wird für jedes einzelne Ziel mittels der Faktoren λ_C (C für Kosten), λ_{SL} (SL für Falllinie) und λ_{DH} (DH für Bergabtransport) festgelegt. Es gilt: $\lambda_C + \lambda_{SL} + \lambda_{DH} = 1$. Eine Gewichtung von $\lambda_C = 0$, $\lambda_{SL} = 1$ und $\lambda_{DH} = 0$ bedeutet, dass eine Lösung gesucht wird, in welcher die Seillinienlänge in der Falllinie minimiert wird, die Kosten und der Bergabtransport werden hierbei nicht berücksichtigt. $\lambda_C = 1/3$, $\lambda_{SL} = 1/3$ und $\lambda_{DH} = 1/3$ bedeutet, dass alle Ziele zu gleichen Teilen berücksichtigt werden.

Anwendung und Resultate

Der Problemlösungsprozess wird anhand eines Beispiels vorgestellt. Anschliessend wird anhand der Erfahrungen aus diesem Beispiel über mögliche Einsatzgebiete und Grenzen dieses Ansatzes diskutiert. Als Testgebiet wurde eine Fläche in St. Gallenkirch (Vorarlberg/Österreich, UTM-Koordinaten: 47.000890, 9.988933) ausgewählt. Das Gebiet liegt in steilem Gelände mit einer durchschnittlichen Hangneigung von mehr als 30° , und an den Wald bestehen diverse Ansprüche vonseiten der Gesellschaft (Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren). Da keine Daten dazu vorhanden sind, welche Bäume sich als Stützen eignen, treffen wir die Annahme, dass die Kosten für das Aufstellen der Stützen unabhängig vom Aufstellungsort sind. Wir nehmen an, dass nur ein Seilkransystem zur Verfügung steht, ein Gebirgsharvester mit einer Tragseillänge von 600 m. Falls in anderen Gebieten mehrere Seilsysteme zur Verfügung stehen, können diese berücksichtigt werden. Die Breite des Arbeitsfeldes wird mit 55 m als konstant angenommen. Die Fläche beträgt 35.5 ha und enthält 14 194 Holzerntezellen bei einem 5-m-Raster und 3430 Holzerntezellen bei einem 10-m-Raster. Für den Holzanfall wurde angenommen, dass nur jene Zellen geerntet werden, die einen Vorrat von mehr als $300 \text{ m}^3/\text{ha}$ aufweisen, und dass in diesen ein Drittel des Vorrats entnommen wird.

Optimierung nach einem Ziel

1-Ziel-Optimierungen entsprechen einer Wahl des Gewichtungsfaktors λ_C , λ_{SL} oder $\lambda_{DH} = 1$. Im Testgebiet wurde sowohl das kostenminimale, das

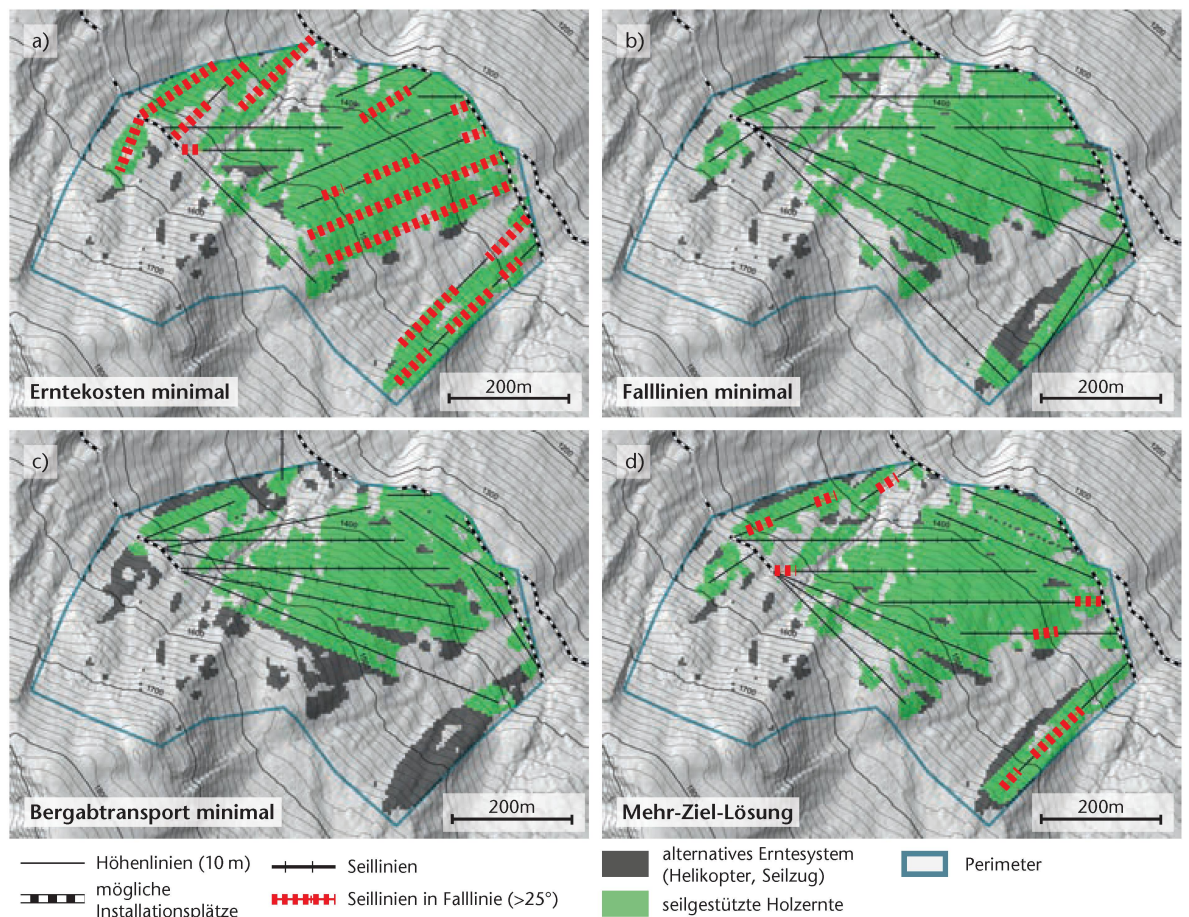


Abb 4 Holzerte- und Seillinienlayouts für verschiedene Zielgewichtungen. a) Erntekosten minimal, b) Falllinien minimal, c) Bergabtransport minimal und d) Mehr-Ziel-Lösung mit Gewichtung $\lambda_C = 0.5$ (Kosten), $\lambda_{SL} = 0.25$ (Falllinie), $\lambda_{DH} = 0.25$ (Bergabtransport). Kartengrundlage © Landesvermessung Vorarlberg

falllinienminimale wie das bergabtransportminimale Layout berechnet (5-m-Raster-Auflösung; Abbildung 4 a–c; Tabelle 1). Das kostenminimale Layout dient dabei als Referenz für die Vergleiche. Die falllinienminimale Lösung führte zu 8% höheren Kosten als die kostenminimale Lösung, die Länge der Seillinie in der Falllinie (>25°) konnte auf null reduziert werden, die Länge des Bergabtransports wurde auf 74% reduziert. Die bergabtransportminimale Lösung erhöhte die Kosten um 22%, der Transport in der Falllinie wie auch bergab konnten jedoch auf 0 m reduziert werden.

Die Rechenzeit war abhängig von der Gewichtung. Die kostenminimale Alternative benötigte 11.7 Stunden, wohingegen die bergabtransportminimale Alternative nur 46 Sekunden beanspruchte (5-m-Raster-Auflösung). Bei einer Rasterauflösung von 10 m konnte die Rechenzeit auf 23 Minuten beziehungsweise 0.5 Sekunden reduziert werden, allerdings sind dabei die Resultate etwas weniger gut als mit der 5-m-Auflösung (Bont 2012). Hier ist noch anzumerken, dass Optimierungen nach nur einem Ziel keine praktische Relevanz haben. Kaum jemand wird einen Schutzwald nur nach einem Ziel bewirtschaften.

Alternative	Erntekosten (EUR/m ³)	Falllinie (>25°) (m)	Bergabtransport (m)	Rechenzeit (h)
Erntekosten minimal	40.3	1390	2898	11.70
	100%	100%	100%	100%
Falllinien minimal	43.7	0	2152	6.07
	108%	0%	74%	52%
Bergabtransport minimal	49.2	0	0	0.01
	122%	0%	0%	0.1%
Mehr-Ziel-Lösung, $\lambda_C = 0.5, \lambda_{SL} = 0.25, \lambda_{DH} = 0.25$	42.4	160	1432	4.34
	105%	12%	49%	37%

Tab 1 Zielfunktionswerte und Rechenzeit für verschiedene Zielgewichtungen (5-m-Raster). Mehr-Ziel-Lösung mit Gewichtung $\lambda_C = 0.5$ (Kosten), $\lambda_{SL} = 0.25$ (Falllinie), $\lambda_{DH} = 0.25$ (Bergabtransport).

Optimierung nach mehreren Zielen

In Realität wird wohl eine Optimierung nach mehreren Zielen erfolgen. Ein Beispiel ist in Abbildung 4d dargestellt ($\lambda_C = 0.5, \lambda_{SL} = 0.25$ und $\lambda_{DH} = 0.25$). Die Gewichtung ist jedoch subjektiv, und es ist im Voraus nicht immer klar, welche Gewichtung wohl am geeignetsten ist. Um eine Grundlage für die Wahl der Gewichtung zu erhalten, kann man die Pareto- oder Trade-off-Kurve ausrechnen. Eine Pareto-optimale Lösung definiert Ehrgott (2000) wie folgt: Eine machbare Lösung für ein Optimierungsproblem mit mehreren Zielen wird als Pareto Optimal be-

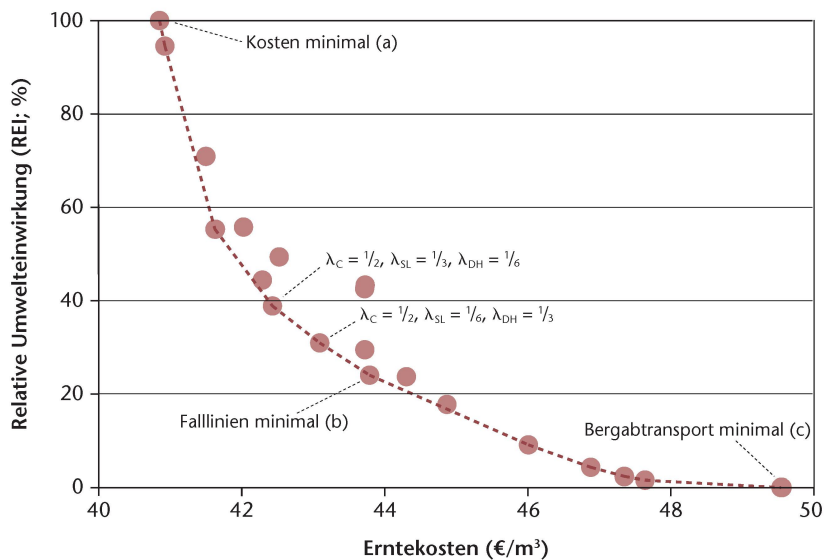


Abb 5 Pareto-optimale Lösungen und Pareto-Kurve der Ziele Erntekosten und relative Umweltwirkung. Gewichtung mit den Faktoren λ_C Kosten, λ_{SL} Falllinie, λ_{DH} Bergabtransport.

trachtet, falls kein Ziel verbessert werden kann ohne ein anderes zu verschlechtern. Zum Berechnen der Pareto-Kurven wurden die Gewichtungen der einzelnen Ziele variiert (λ_C , λ_{SL} und λ_{DH}), und zwar mit den Werten $\{0, 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 1\}$, was insgesamt 28 mögliche Kombinationen ergab. Die Zielfunktionswerte, «minimale Erntekosten» und «minimale Umweltwirkungen», wurden in Abbildung 5 eingezeichnet und daraus die Pareto-Kurve abgeleitet. Um eine zweidimensionale Pareto-Kurve darstellen zu können, wurden die beiden Ziele der Umweltwirkung «Falllinie» und «Bergabtransport» als relative Umwelteinwirkung (REI) zusammengefasst. Ein REI von 100% entspricht der Umwelteinwirkung beim kostenminimalen Layout. Der Pareto-Kurve ist zu entnehmen, dass bereits durch geringfügig höhere Erntekosten eine deutliche Reduktion des REI möglich ist. Um den REI zu halbieren, muss mit um 1 EUR/m³ höheren Erntekosten gerechnet werden. Um den REI auf einen Viertel zu reduzieren, müssen 3 EUR/m³ mehr aufgewendet werden. Eine deutliche Erhöhung der Erntekosten ist notwendig, um den REI auf null zu reduzieren, hier im Beispiel von 40.9 auf 49.6 EUR/m³.

Eine Pareto-Kurve eignet sich hervorragend, um aufzuzeigen, welche Kosten aufgewendet werden müssen, um die Umwelteinwirkungen zu reduzieren, und bildet somit eine objektive Entscheidungshilfe bei der Wahl der Gewichtungsparemeter. Je nach Prioritäten des Bewirtschafters beziehungsweise Waldeigentümers kann daraus die Gewichtung der Ziele abgeleitet werden. Folgendes Vorgehen scheint daher zur Berechnung des optimalen Seillinienlayouts angebracht:

- 1) Berechnung der Pareto-Kurve. Da hier viele Rechenschritte ausgeführt werden müssen, empfiehlt sich eine grobe Rasterauflösung (10 m)
- 2) Wahl der Gewichtung der verschiedenen Ziele aufgrund der Interpretation der Pareto-Kurve

- 3) Berechnung des Seillinienlayouts für die gewählte Gewichtung anhand einer kleineren Rasterauflösung (5 m)

Die Fläche einer Planungseinheit sollte nicht zu gross gewählt werden, da die Rechenzeit mit zunehmender Grösse exponentiell steigt. In vernünftiger Rechenzeit lösbar sind Planungen für Flächen von 20 bis 40 ha. Grössere Planungseinheiten müssen unterteilt werden.

Diskussion

In diesem Artikel wurde eine Methode vorgestellt, mit welcher ein optimales Seillinienlayout für eine Waldfläche in steilem Gelände automatisch berechnet werden kann. Die Ziele sind einerseits minimale Holzerntekosten und andererseits minimale negative Umweltwirkungen durch die Holzernte auf den Bestand. Bei den Holzerntekosten werden die Kosten fürs Seilen und für die Installation der Seillinien inklusive des Baus der Stützen berücksichtigt. Die Umweltwirkungen werden mit zwei Indikatoren abgebildet, der Länge der Seillinie in der Falllinie in einem Hang steiler als 25° und der Länge der Seillinien, auf welchen das Holz abwärts geseilt wird. Es können ein oder auch mehrere Seilsysteme berücksichtigt werden. Das zu entnehmende Volumen muss vom Benutzer mittels Volumenkarte definiert werden. Mittels einer ganzzahligen linearen Programmierung wird aus einer Menge von machbaren Seillinien und der alternativen Erntemethoden (Seilzug, Helikopter) die mathematisch optimale Lösung berechnet.

Es konnte Folgendes festgestellt werden:

- 1) Für Flächengrössen bis 40 ha findet unsere Methode optimale Resultate in vernünftiger Rechenzeit. Für eine Optimierung mit mehreren Zielen auf einer 35 ha grossen Fläche betrug die Rechenzeit 4.3 Stunden bei einer 5-m-Raster-Auflösung und 8 Minuten bei einer 10-m-Raster-Auflösung. Da die Rechenzeit exponentiell zur Problemgrösse wächst, ist nicht davon auszugehen, dass Probleme für wesentlich grössere Flächen gelöst werden können. Grössere Einheiten sollten daher in kleinere Einheiten unterteilt werden.
- 2) Optimierungen nach nur einer Zielgrösse sind nicht praktikabel. Realistische Lösungen sollten sowohl die Holzerntekosten wie auch die Umweltwirkungen berücksichtigen. Die Gewichtung der einzelnen Ziele hängt dabei von den Präferenzen des Bewirtschafters ab und ist ein subjektiver Vorgang. Mithilfe von Pareto- oder Trade-off-Kurven kann jedoch die Gewichtung der Ziele auf objektive Kriterien abgestützt werden. Zur Herleitung der Pareto-Kurve liefert ein grob aufgelöstes Raster (10 m) genügend genaue Werte. Damit kann die Rechenzeit erheblich reduziert werden.

Die hier vorgestellte Methode ist der erste Ansatz, welcher sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele berücksichtigt und innert nützlicher Zeit für nicht allzu grosse Flächen die mathematisch optimale Anordnung der Seillinien findet. Bisher eingesetzte Optimierungsalgorithmen waren rechnerisch ineffizient und konnten nur für sehr kleine Flächen innert nützlicher Zeit Lösungen finden oder nur mit dem Einsatz von ungenauen Heuristiken.

Praktiker können von diesem Ansatz profitieren, indem die Planung von Seillinienlayouts automatisiert und zielgerichteter erfolgen kann. Der Fokus der Forschung lag bisher auf der Entwicklung einer Methode, mit der solche Probleme überhaupt gerechnet werden können. Tests an tatsächlichen Holzschlägen sind zurzeit im Gange, jedoch liegen noch keine publizierbaren Resultate vor. Forschungsbedarf besteht bezüglich der Indikatoren der Umwelteinwirkung. Dafür den Abwärtstransport und die Länge der Seillinie in der Falllinie zu minimieren, tönt plausibel und lässt sich wissenschaftlich begründen. Es kann aber durchaus sein, dass es andere, je nach Standort geeignetere Indikatoren gibt. Im Weiteren gibt es noch keine Grundlagen dazu, wie die potenziellen Schäden zu quantifizieren sind. Hier müsste beispielsweise auch die Frage geklärt werden, ob die potenzielle Schadengrösse linear oder gar quadratisch mit zunehmender Länge der Schneise in der Falllinie ansteigt. Da das Schadenausmass immer auch davon abhängt, wie der Holzschlag ausgeführt wird, ist es sehr schwierig, dazu eine Metrik zu erstellen. Im Weiteren muss man sich immer bewusst sein, dass durch ein gut angelegtes Holzernetzlayout nur die Grundlage gegeben ist, um die Holzernte umweltschonend und effizient durchführen zu können, dass dieses aber noch keine Gewähr dafür bietet, dass der Holzschlag dann auch tatsäch-

lich so erfolgt. Ebenso sind Anstrengungen bei den nachfolgenden Produktionsschritten nötig. ■

Eingereicht: 8. Juli 2013, akzeptiert (mit Review): 5. September 2013

Literatur

- BONT L (2012)** Spatially explicit optimization of forest harvest and transportation system layout under steep slope conditions. Zürich: ETH Zürich, PhD thesis. 139 p.
- BONT L, HEINIMANN HR (2012)** Optimum geometric layout of a single cable road. *Eur J For Res* 131: 1439–1448.
- CHUNG W (2002)** Optimization of cable logging layout using a heuristic algorithm for network programming. Corvallis: Oregon State Univ, PhD thesis. 222 p.
- DYKSTRA DP, RIGGS JL (1977)** An application of facilities location theory to the design of forest harvesting areas. *AIIE Trans* 9: 270–277.
- EHRGOTT M (2000)** Multicriteria optimization. Berlin: Springer. 243 p.
- EPSTEIN R ET AL (2006)** A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. *Oper Res* 54: 1017–1027.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 564 p.
- HEINIMANN HR (2003)** Holzernetztechnik zur Sicherstellung einer minimalen Schutzwaldpflege. Zürich: ETH Zürich, forstl Ingenieurwesen. 44 p.
- LIMBECK-LILIENAU B (2002)** Hochmechanisierte Holzernte mit schräger Seiltrasse. Wien: Univ Bodenkultur, MSc thesis. 56 p.
- STAMPFER K (2002)** Optimierung von Holzernetzsystemen im Gebirge. Wien: Univ Bodenkultur, Habilitationsschrift. 96 p.
- STAMPFER K, DAXNER P (1998)** Ein Produktivitätsmodell für ein selbstfahrendes Seilgerät Typ «Woodliner». *Cent.bl ges Forstwes* 4: 249–260.
- STAMPFER K, LIMBECK-LILIENAU B, KANZIAN C, VIERTLER K (2003)** Baumverfahren im Seilgelände, Verfahrensbeispiele. Wien: Univ Bodenkultur, Inst alpine Naturgefahren forstl Ingenieurwesen. 27 p.
- STAMPFER K, VISSER R, KANZIAN C (2006)** Cable corridor installation times for European yarders. *Int J For Eng* 17: 71–77.

Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände

Seilgestützte Erntesysteme sind das Rückgrat der Holzernte in steilem Gelände. Das Ausarbeiten eines Holzernte- und Seillinienlayouts ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da einerseits möglichst tiefe Holzerntekosten und andererseits möglichst kleine Bestandesschäden durch die Holzernte resultieren sollten. Die Ziele unserer Studie waren 1) ein gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsprogramm zu entwickeln, um die Planung des Seillinienlayouts zu automatisieren, und 2) diese Methodik in einem Testgebiet auf Tauglichkeit hin zu prüfen, sowohl mit der Optimierung nach einem Ziel wie auch nach mehreren Zielen. Für zusammenhängende Flächen bis 35 ha konnten in nützlicher Zeit mathematisch optimale Resultate gefunden werden. Die hier vorgestellte Methode ist der erste Ansatz, welcher sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele berücksichtigt und innert nützlicher Zeit die mathematisch optimale Anordnung der Seillinien findet.

Esquisse d'un schéma de câblage optimal pour la récolte du bois en terrain escarpé

Les systèmes de débardage par câble forment la colonne vertébrale de la récolte du bois en terrain escarpé. L'élaboration d'un schéma de câblage est une tâche délicate qui doit minimiser d'une part les coûts et d'autre part les dommages causés au peuplement. Les objectifs de ce travail sont: 1) le développement d'un programme d'optimisation linéaire en nombres entiers en vue de l'automatisation de la planification d'un schéma de câblage, 2) la validation de cette méthode dans un cas pratique avec une ou plusieurs fonctions cible. Pour des surfaces d'un seul tenant jusqu'à 35 ha il est possible d'obtenir une solution mathématique optimale dans un temps de calcul acceptable. La méthode proposée est la première approche qui prend en compte des objectifs aussi bien économiques qu'écologiques et trouve le réseau de câblage mathématiquement optimal dans un temps acceptable.