

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 167 (2016)
Heft: 5

Artikel: Optimales Layout einer Walderschliessung
Autor: Bont, Leo
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097452>

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: 01.05.2026

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

Optimales Layout einer Walderschliessung

Leo Bont Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*

Optimales Layout einer Walderschliessung

Die Walderschliessung mit lastwagenbefahrbaren Waldstrassen ist das Rückgrat der Holzernte. Eine wichtige Frage beim Erarbeiten oder Überarbeiten einer Erschliessung ist die Gestaltung des Layout, das heisst der räumlichen Anordnung der Strassen im Gelände und das Festlegen des Ausbaustandards der Strassen. Im Beitrag werden einerseits Neuerschliessungen in Gebieten, in denen noch keine lastwagenbefahrbaren Strassen vorhanden sind, und andererseits Anpassungen von bestehenden Erschliessungen an heutige Anforderungen (Reengineering) betrachtet. Für beide Problemstellungen wird eine Methode präsentiert, um automatisch optimale Erschliessungs- und Holzerntekonzepte zu identifizieren. Ziel ist es, ein Strassennetzwerk zu entwerfen, bei welchem gleichzeitig die Kosten für Holzernte, Strassenbau und -unterhalt sowie Holzabtransport über den Lebenszyklus einer Strasse minimiert werden und welches ökologische Anliegen berücksichtigt. Die Methode wird anhand von zwei Fallbeispielen vorgestellt und diskutiert. Der Hauptnutzen von solchen Optimierungsmodellen besteht in einer zielgerichteten Planung, bei welcher in kurzer Zeit verschiedene Szenarien und Zielsetzungen geprüft und verglichen werden können. Die Rückmeldungen aus der Praxis aufgrund der beiden Fallbeispiele waren sehr positiv: Einerseits wird ein genereller und grossflächiger Einsatz der Methode und andererseits die Weiterentwicklung des Optimierungstools vom derzeitigen Prototyp zu einer bedienerfreundlichen Expertensoftware gewünscht.

Keywords: road network planning, optimization models, forest engineering, road upgrade, forest harvest planning

doi: 10.3188/szf.2016.0294

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail leo.bont@wsl.ch

Um einen Wald effizient bewirtschaften zu können, braucht es eine zeitgemässe Erschliessung mit Waldstrassen. Das Strassennetzwerk dient dabei der Holzernte (Arbeitsplatz, Installation von Maschinen, z.B. Seilkränen), dem Holzabtransport und Pflegeeinsätzen (Personen- und Materialtransporte). Zusätzlich werden Walderschliessungen auch für zahlreiche andere Zwecke, insbesondere die Freizeit- und Erholungsnutzung gebraucht.

In der Schweiz wurde der Grossteil der Waldstrassen zwischen 1950 und 1980 gebaut, ausgerichtet auf die damaligen Verhältnisse mit anderer Holzerntetechnik und anderen finanziellen Voraussetzungen als heute. So ist aktuell der Fall häufig anzutreffen, dass ein Waldgebiet zwar dicht mit Strassen erschlossen ist, die Strassen jedoch aufgrund der Geometrie oder der Dimensionierung die Anforderungen einer modernen Holzernte nicht er-

füllen. Verursacht durch das dichte Strassennetz sind oft auch die Unterhaltskosten sehr hoch. Spätestens wenn das Ende der Lebensdauer erreicht wird, stellt sich daher verbreitet die Frage, wie sich das bestehende Strassennetzwerk anpassen lässt: Welche Strassen sollen die zukünftige Basiserschliessung bilden und benötigen eine Aufwertung, wo sind allenfalls neue Strassenstücke erforderlich und welche Strassen werden für die Basiserschliessung nicht mehr gebraucht? Neben diesem Layout-Problem, bei dem es um die räumliche Anpassung von bestehenden Erschliessungen an aktuelle Anforderungen geht (wir sprechen im Artikel auch von «Reengineering»), gibt es mit der Neuerschliessung von Wäldern noch ein weiteres Layout-Problem. Folgende Fragen spielen hier eine Rolle: Welche Linieneinführung soll die Strasse aufweisen, und in welchen Teilen der Wälder ist eine Erschliessung überhaupt sinnvoll?

Um herauszufinden, ob Erschliessungen noch den aktuellen Anforderungen genügen, wird oft mit Indikatoren gearbeitet. Im Landesforstinventar (LFI) wird beispielsweise die Erschliessungsdichte verwendet. Aber welche Aussagekraft haben diese Indikatoren? Kann man aus den theoretischen Zahlen für die Erschliessungsdichte (z.B. Alpensüdseite: 6.5 m/ha, Mittelland: 59.6 m/ha im LFI3; Brändli 2010) ableiten, dass gewisse Gebiete über- oder untererschlossen sind? Oder falls in einem Gebiet nur 50% der Waldflächen mit boden- oder seilgestützten Verfahren erreichbar sind: Heisst dies nun, dass dieses Gebiet untererschlossen ist?

In jüngerer Zeit wurden an der Professur forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich zahlreiche Arbeiten zu diesen Themen durchgeführt (Stückelberger et al 2006a, 2006b, 2007; Stückelberger 2008; Bont et al 2015; Bont 2012). In erster Linie wurden mathematische Optimierungsmodelle entwickelt, mit denen eine automatisierte bzw. halbautomatisierte Planung eines Erschliessungs- und Holzernte-Layouts erfolgen kann.

In diesem Artikel geht es darum, 1) die mathematischen Modelle vorzustellen, mit welchen das optimale Layout einer Erschliessung identifiziert werden kann, 2) aufzuzeigen, wie das Layout einer optimalen (Basis-) Erschliessung aussieht und welche Faktoren und Rahmenbedingungen diese optimale (Basis-)Erschliessung beeinflussen, sowie 3) zu illustrieren, inwiefern Indikatoren wie die Erschliessungsdichte (Strassendichte) oder die erschlossene Waldfläche Aussagen über die Optimalität und Qualität einer Erschliessung zulassen.

Modellbeschreibung

Eine Waldstrasse wird am stärksten durch die Holzernte und den Holzabtransport beansprucht. Diese beiden Tätigkeiten sind auch massgebend für die Anforderungen bezüglich Dimensionierung und Geometrie einer Strasse. Es ist daher sinnvoll, für das Layout einer Erschliessung zuerst die Bedürfnisse der Holzernte und des Holzabtransports zu berücksichtigen und die Basiserschliessung dementsprechend auszugestalten. Aufbauend auf der Basiserschliessung können die weiteren Nutzungen berücksichtigt werden. Die Ausführungen und Überlegungen unserer Modelle beschränken sich daher auf das Layout der Basiserschliessungen.

Es geht darum, ein Strassennetzwerk zu entwerfen, welches gleichzeitig die Kosten für die Holzernte (Fällen, Aufarbeitung und Rücken), den Strassenneubau, -ausbau und -unterhalt sowie den Holzabtransport über den ganzen Lebenszyklus minimiert. Weitere Zielgrössen wie Anforderungen vonseiten des Naturschutzes oder im Gelände zu erreichende Fixpunkte fliessen als Nebenbedingungen

mit ein. Die Optimierung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus der Erschliessung von 40 Jahren. Kosten, die zu unterschiedlichen Zeiten anfallen, werden mit einem Zinssatz von 2% diskontiert.

Die kleinste Betrachtungseinheit, in welcher Holz geerntet werden kann, wird in den Modellen als «Parzelle» bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine quadratische Fläche mit der Auflösung von zum Beispiel 5 × 5 m oder 10 × 10 m. Für jede Parzelle muss das über den Lebenszyklus der Strasse zu erntende Holzvolumen definiert werden.

Für die zwei Layout-Probleme «Neubau» und «Reengineering» werden unterschiedliche Modelle benutzt, wobei es sich bei beiden um Optimierungsmodelle handelt, die auf einer gemischt ganzzahligen linearen Programmierung (Mixed Integer Linear Programming, MILP) beruhen. Die Herausforderung bei der Entwicklung dieser Modelle besteht darin, die Modelle einfach zu halten und trotzdem die relevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Tiefergehende Informationen sind in der Literatur zu finden, die in der Einleitung zitiert wird. Projektberichte zu den Fallbeispielen werden in Kürze auf der Internetseite der Fachstelle für forstliche Bautechnik (FOBATEC)¹ aufgeschaltet oder können beim Autor bezogen werden.

Modell «Neuerschliessung»

Grundlage zur Konstruktion eines möglichen Strassennetzwerkes bilden die Knoten (Abbildung 1). Die Knoten stellen mögliche Kreuzungen oder Endpunkte dar. Zwischen den Knoten befinden sich die möglichen Strassen. Je nachdem, welche Strassen realisiert werden und je nach Geländeneigung müssen in den Knoten noch Wendepfannen gebaut werden. Jedes mögliche Strassenstück gilt als Schnittstelle für die Holzbringung: Von einer Strasse kann mittels Seilkran (Bergauf- oder Bergabtransport, Mobilseilkran [bis 1000 m], konventioneller Seilkran [bis 1500 m]) oder Schlepper das Rücken des Holzes erfolgen. Die Erreichbarkeit der Parzellen mit den Rückemitteln wird mittels Geländeanalysen evaluiert. Das Rücken mittels Helikopter ist ebenfalls möglich und wird bei Parzellen berücksichtigt, welche nicht per Rückefahrzeug oder Seilkran erreichbar sind oder bei welchen es sich aufgrund des geringen Holzvolumens nicht lohnt, eine teure Strasse zu bauen. Die Schätzung der Erntekosten stützt sich auf Produktivitätsmodelle ab. Die Strassenkosten, die vom geforderten Ausbaustandard, der Topografie und dem geotechnischen Untergrund abhängig sind, werden mit dem Modell von Stückelberger (2008) geschätzt.

Das Modell wählt das Erntesystem für jede Parzelle und definiert, zu welchem Strassenstück die Rückung erfolgt. Es bestimmt die zu bauenden Strassenstücke und in welchen Knoten eine Wendepfanne

¹ www.fobatec.ch (29.6.2016)

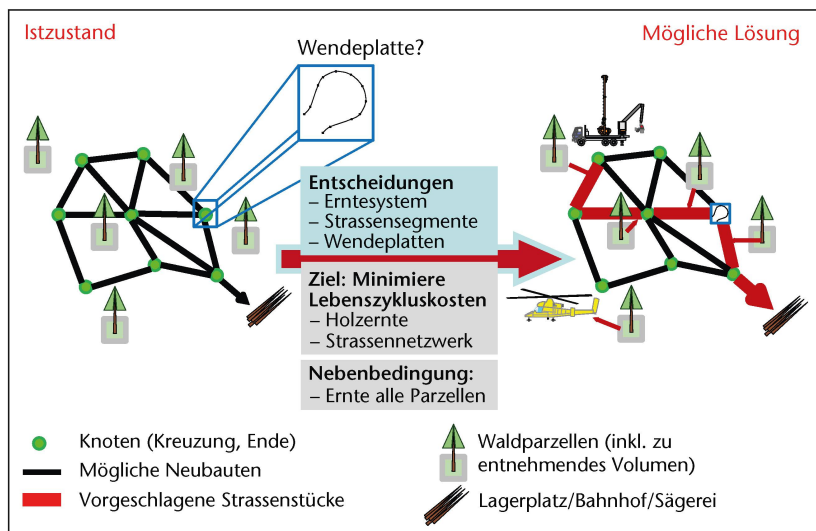


Abb 1 Konzeptionelles Modell für die Neuerschliessung.

benötigt wird. Da es sich um eine Neuerschliessung handelt, ist der Standard (Geometrie, Dimensionierung) der Strassenstücke überall gleich und in der Regel auf 5-Achs-Lkw ausgerichtet (Fahrzeuge mit 40 t Gesamtgewicht). Um das Modell so einfach wie möglich zu formulieren, werden beim Modell «Neuerschliessung» die Kosten des Holzabtransports nicht berücksichtigt. Dies ermöglicht es erst, die Optimierung für die in der Realität anzutreffenden grossen Erschliessungspereimeter durchzuführen. Trotz dieser Vereinfachung hält sich der Fehler in Grenzen, wie der nachfolgende Vergleich der Transportkosten bei sehr hoher und sehr tiefer Strassendichte zeigt: Die Lösung mit sehr hoher Strassendichte hat zum Beispiel eine durchschnittliche Transportdistanz innerhalb des Projektgebietes von 2 km, diejenige mit sehr tiefer Strassendichte eine solche von 6 km zur Folge. Daraus ergeben sich Transportkosten innerhalb des Perimeters von 1 bzw. 3 CHF/m³ (Annahme: 0.5 CHF/[km × m³]) für die beiden Varianten. Die Differenz beträgt 2 CHF/m³ und

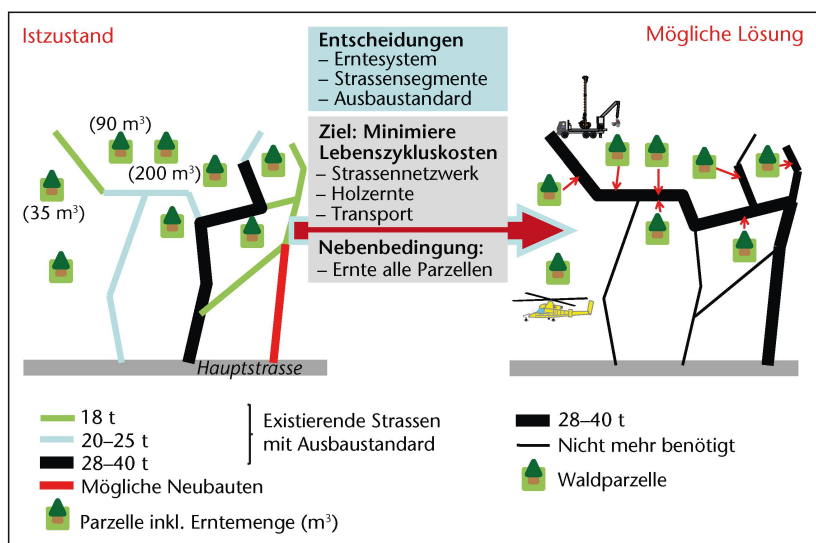


Abb 2 Konzeptionelles Modell für das Reengineering.

ist damit klein im Vergleich zu den Investitionskosten für die Strasse und zu den Holzerntekosten, für welche zusammen mit 100 CHF/m³ und mehr gerechnet werden muss. Die Modellvereinfachung ist allerdings nur möglich, da mit einem einzigen Strassenstandard gerechnet wird. Die rechte Seite von Abbildung 1 zeigt eine mögliche Lösung. Die rot markierten Strassensegmente werden zum Bauen vorgeschlagen.

Modell «Reengineering»

Das Modell «Reengineering» basiert in weiten Teilen auf den gleichen Grundlagen wie das Modell für die Neuerschliessung. Daher wird in diesem Abschnitt vor allem auf die Unterschiede der beiden Modelle eingegangen. In Abbildung 2, links, ist die Ausgangslage, das bestehende Strassennetzwerk, abgebildet, für welches die Dimensionierung und die Geometrie der einzelnen Strassen bekannt sind. Definiert wurde ausserdem ein möglicher Neubau. Auch beim Modell «Reengineering» besteht das Ziel darin, die Verbundkosten aus Holzernte, Strassenerschliessung und Holzabtransport über den Lebenszyklus der Erschliessung zu minimieren. Im Gegensatz zum Modell «Neuerschliessung» wird der Holzabtransport berücksichtigt, da das Reengineering-Modell verschiedene Strassenstandards umfassen kann. Bei 50 km Distanz zum Sägewerk ergeben sich mit einem 18-t-Lkw Kosten von rund 64 CHF/m³, bei einem 40-t-Lkw hingegen von rund 27 CHF/m³. Dies zeigt, dass die Transportkosten unter diesen Umständen doch sehr variieren können.

Das Modell wählt auch hier das Erntesystem für jede Parzelle und definiert, zu welchem Strassenstück die Rückung erfolgt, es sucht die benötigten Strassenstücke aus und weist jedem Strassenstück einen Ausbaustandard zu. Für die Schätzung der Baukosten wird hingegen neben dem geforderten Ausbaustandard, der Topografie und dem geotechnischen Untergrund auch der bereits vorhandene Strassenkörper berücksichtigt. Eine mögliche Lösung ist auf der rechten Seite von Abbildung 2 zu finden. Hier wurde den ausgewählten Strassenelementen ein Standard von 28 bis 40 Tonnen zugewiesen.

Anwendung

Fallbeispiel «Neuerschliessung»

Das Modell «Neuerschliessung» wird anhand einer Studie, welche im Jahr 2014 in der Gemeinde Bergell durchgeführt wurde, illustriert (oberhalb Weiler Muntac, Koordinaten: 764 000/136 000). Das Untersuchungsgebiet (Abbildung 3) ist rund 5.5 km² gross und umfasst rund 200 ha Wald, auf welchem in den nächsten 40 Jahren insgesamt 28 052 m³ Holz genutzt werden sollen. Das zu entnehmende Holzvolumen ist in der Mitte des Hanges am höchsten.

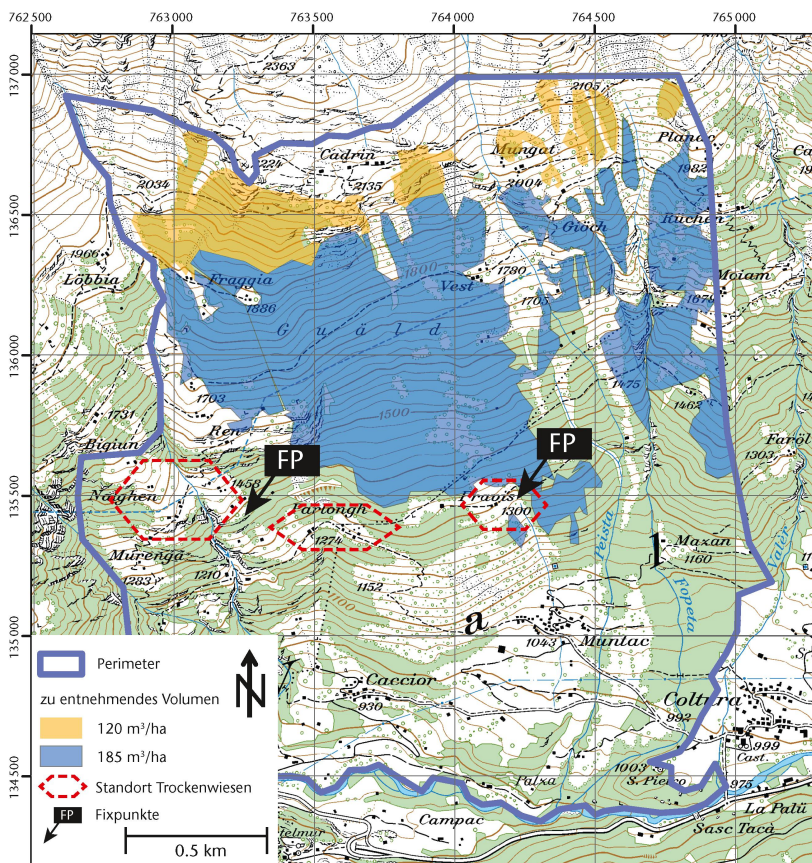


Abb 3 Abschätzung des zu nutzenden Holzvolumens in den nächsten 40 Jahren.

Datenquelle: Kanton Graubünden, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100120)

Im Perimeter existieren Strassen im unteren Teil des Perimeters als Zufahrt zu den Siedlungen Muntac und Caccior, diese sind jedoch für die Forstwirtschaft aufgrund der mangelnden Tragfähigkeit von Brücken, der schwachen Dimensionierung des Oberbaus und der Geometrie nicht brauchbar. Der ganze Perimeter muss also neu erschlossen werden. Neben dem Wald sollen Trockenwiesen erschlossen werden. Diese befinden sich auf einer Höhe von 1300 bis 1400 m ü.M. Mit der Erschliessung werden folgende Ziele verfolgt: 1) Verbundkosten der Holzbereitstellung minimieren, 2) Beeinträchtigung der natürlichen Umwelt minimieren. In der Studie wurden verschiedene Varianten berechnet und verglichen:

1. Minimierung der Verbundkosten der Holzbereitstellung (Kosten für Holzernte sowie Bau und Unterhalt des Strassennetzwerks).

2. Optimierung der forstlichen und der Naturschutzbedürfnisse: Hier geht es darum, die Holzbereitstellungskosten zu minimieren sowie die Erschliessung der Trockenwiesen zu gewährleisten. Dazu werden Fixpunkte definiert (Abbildung 3), die zwingend mit einer Strasse erschlossen werden müssen.

3. Minimierung der Verbundkosten der Holzbereitstellung mit 65% Subventionierung der Strassenbaukosten: wie Variante 1, jedoch mit Subventionierung.

4. Expertenlösung: Die Lösung wurde im Voraus durch den Kreisförster und ein Ingenieurbüro ausgearbeitet, sie wurde dem Autor jedoch erst nach Ablieferung der Modellierungen gezeigt. Gleiche Zielsetzung wie bei Variante 2.

Der Kanton als Auftraggeber ist an einer Variante, die die Naturschutzbedürfnisse berücksichtigt, interessiert (Varianten 2 und 4, Variante 4 ist die Expertenlösung). Variante 1 und 3 dienen zur Illustration, wie sich das System unter anderen Rahmenbedingungen verhält.

Bei Variante 1, die die Minimierung der Holzbereitstellungskosten zum Ziel hat, wird keine neue Strasse gebaut, das Holz wird mittels Helikopter geerntet (Abbildung 4a). Einerseits ist das Gelände steil und anspruchsvoll, weshalb ein Strassenbau entsprechend teuer wäre. Andererseits ist das zu erntende Holzvolumen gering. Bei einem Strassenbau wäre also mit sehr hohen Kosten pro Holzvolumen zu rechnen ($\text{CHF}/[\text{m} \times \text{m}^3]$). Bei der Variante 2 mit Erschliessung der Trockenwiesen wird als optimale Lösung eine Strasse vorgeschlagen, welche die beiden geforderten Fixpunkte erschliesst und so liegt, dass möglichst viel Holz mittels Seilkran geerntet werden kann (Abbildung 4b). Die Kosten dieser Variante sind deutlich höher als bei Variante 1 (Tabelle 1). Wenn die Gemeinde beim Strassenbau lediglich die Restkosten übernehmen muss, weil Bund und Kanton diesen zu 65% subventionieren, wie das bei Variante 3 der Fall ist, besteht die optimale Lösung darin, die Strasse soweit den Hang hinaufzuziehen, dass fast der ganze Wald per Seilkran erreichbar ist (Abbildung 4c). Aus Sicht der Gemeinde ist dies die günstigste Lösung, denn damit belaufen sich die Verbundkosten der Holzbereitstellung auf «nur»

Variante	Kosten Holzernte, Strasse und Anteil Lkw-Transport bis zum Anschluss (CHF/m ³)	Jährliche Kosten Holzernte und Strasse (1000 CHF/Jahr)	Kosten Holzernte (CHF/m ³)	Kosten Strasse (CHF/m ³)
1) Minimierung Verbundkosten	201	141	201	0
2) Optimierung forstliche und Naturschutz-Bedürfnisse	244	171	107	134
3) Minimierung Verbundkosten, mit Subventionen	157	110	92	62
ohne Subventionen	272	191	92	176
4) Expertenlösung	240	169	114	124

Tab 1 Kennzahlen zu den vier Varianten. Erläuterung der Varianten siehe Text.

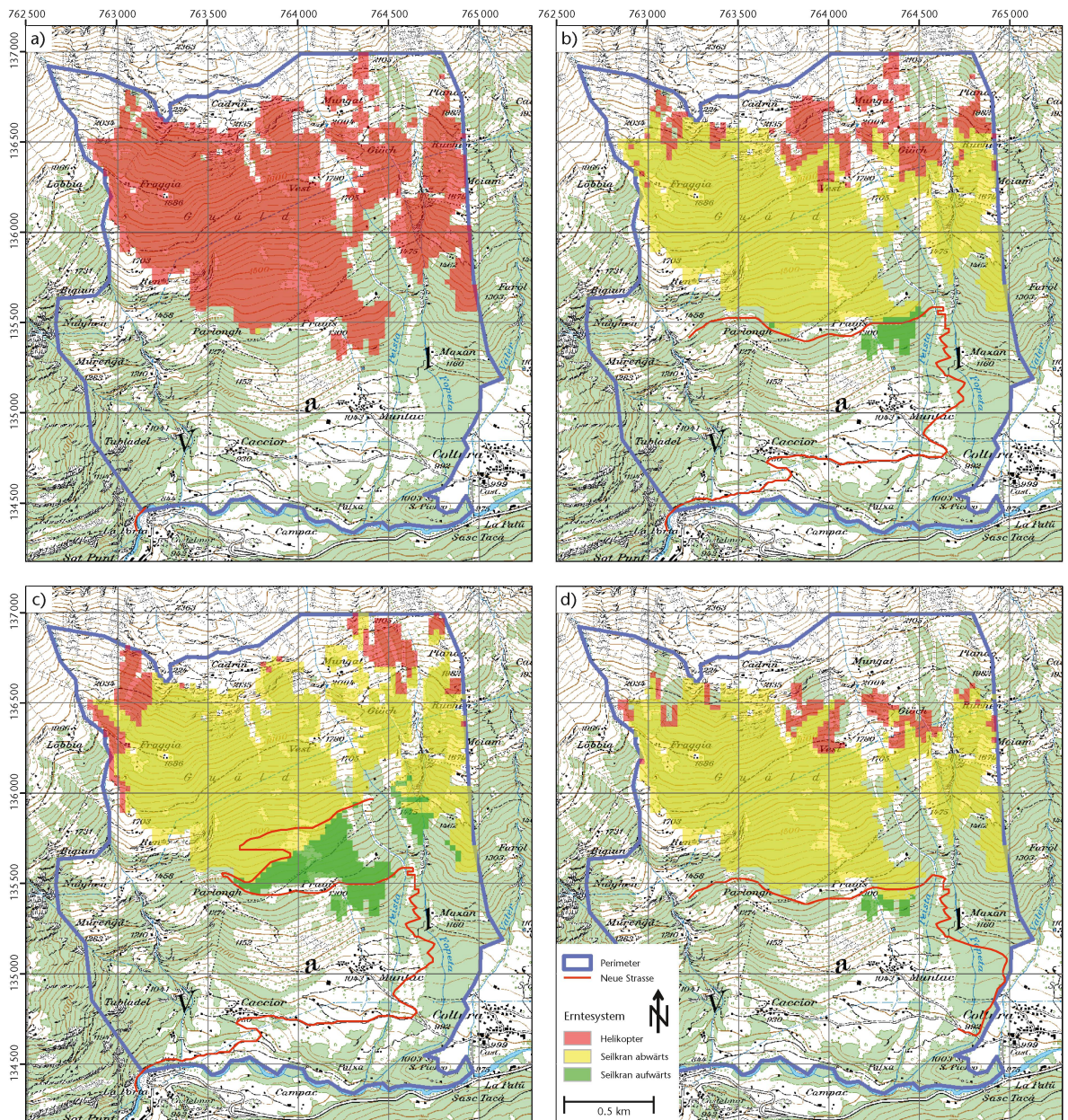


Abb 4 Erschließungs- und Holzerntekonzepte für die Varianten 1) Minimierung der Verbundkosten der Holzbereitstellung (a), 2) Optimierung der forstlichen und der Naturschutz-Bedürfnisse (b), 3) Minimierung der Verbundkosten der Holzbereitstellung mit Subventionierung der Strassenbaukosten (c) und 4) Expertenlösung für die Optimierung der forstlichen und der Naturschutzbedürfnisse (d). Datenquelle: Kanton Graubünden, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100120)

157 CHF/m³ (Tabelle 1). Rechnet man jedoch mit den realen Strassenbaukosten, betragen die Verbundkosten 272 CHF/m³, was die teuerste Variante darstellt. Die Expertenlösung (Variante 4) sieht ähnlich aus wie die Variante 2, die Kosten sind dagegen leicht niedriger (Abbildung 4d; Tabelle 1). Bei der Expertenlösung wurde ein kurzes Teilstück der Strasse mit 18% Längsneigung gebaut, womit eine Wendepalte eingespart werden konnte. Bei der automatisierten Lösungssuche (Variante 2) wurde die maximale Längsneigung hingegen auf 14% limitiert. Es ist zu sehen, dass die Linienführung des Modells in etwa derjenigen der Expertenlösung entspricht. Deshalb darf man davon ausgehen, dass das Modell die Linienführung auch in steilem Gelände korrekt modelliert.

Fallbeispiel Reengineering

In der Gemeinde Zernez sind weite Teile des Waldes mit Strassen erschlossen. Auf einigen Strassen existieren jedoch Gewichtslimiten, sodass trotz zum Teil dichter Erschließung keine Bewirtschaftung mit Maschinen auf dem Stand der Technik möglich ist.

Für die Optimierung wurde das Gemeindegebiet in drei Teilperimeter unterteilt, die durch natürliche Grenzen (Kreuzen, Flussläufe) voneinander getrennt sind. Eine vertiefte Betrachtung erfolgt nachfolgend für Perimeter 2. Wichtig ist auch, das zu erntende Holzvolumen zu kennen. Dieses wurde aufgrund von Stichproben geschätzt. Das Optimierungsmodell identifiziert aus dem bestehenden Strassennetzwerk sowie aus den möglichen Neubau-

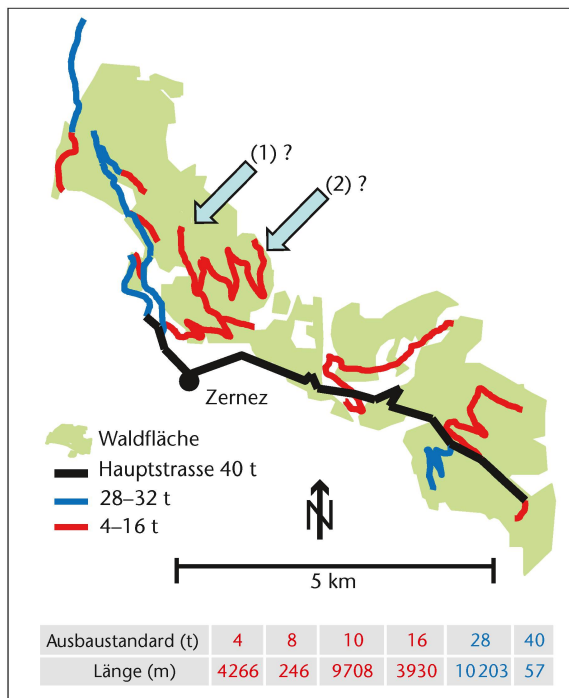


Abb 5 Istzustand der Erschliessung im Perimeter 2 nördlich von Zernez. Hier stellt sich u.a. die Frage, ob Strassenast 1 oder 2 ausgebaut werden soll. Datenquelle: Kanton Graubünden

ten automatisch die benötigten Strassen und weist diesen einen Ausbaustandard zu. Zur Auswahl stehen 18 t, 28 t und 40 t.

In Perimeter 2 des Untersuchungsgebiets sind Strassen mit Gewichtslimiten zwischen 4 und 40 t vorhanden (Abbildung 5). Bis zu einer Limite von 18 Tonnen gelten die Strassen als nicht lastwagenbefahrbar. Ein grosser Teil der Wälder gilt daher als

unzureichend erschlossen. Vonseiten des Forstdienstes besteht kein Zweifel daran, dass ein Ausbau nötig ist, hingegen ist unklar, bei welchen Strassen ein Ausbau sinnvoll ist. Beispielsweise stellt sich die Frage, ob Ast 1 oder Ast 2 ausgebaut werden soll, um die Hänge nordöstlich von Zernez zu erschliessen.

Die Modellberechnung ergibt das in Abbildung 6 dargestellte Erschliessungs-Layout mit dem Vorschlag, den Ast 1 und nicht den Ast 2 auszubauen. Die grünen Punkte zeigen die Flächen, die per Seilkran oder mit bodengestützten Systemen erschlossen werden, die roten diejenigen, die nur per Helikopter erreicht werden. Die Länge des vorgeschlagenen Strassennetzwerks beträgt 12 968 m, was einer Strassendichte von 12 m/ha entspricht. 94% des Holzvolumens können von der Waldstrasse aus per Seilkran oder mit bodengestützten Systemen geerntet werden. Bei der Modellierung wurde davon ausgegangen, dass von den kantonalen Hauptstrassen aus kein Holz geerntet werden kann, weswegen einzelne Stichprobenpunkte nahe den Hauptstrassen dem Erntesystem Helikopter zugeordnet sind.

Ein Vergleich aller drei Perimeter führt zu sehr unterschiedlichen Werten für die Strassendichte. (Tabelle 2). Dies ist eine Folge der unterschiedlichen Topografie und der Eigenschaften (Volumenverteilung) der Wälder.

Diskussion

In diesem Artikel wurde der Einsatz von Optimierungsmodellen für den Entwurf von Erschliessungen vorgestellt, wobei hierfür zwischen «Neuererschliessung» und «Reengineering» unterschieden wurde.

Im Vergleich zur klassischen Planung von Erschliessungsnetzen müssen beim Einsatz eines Optimierungsmodells die Ziele und die Rahmenbedingungen des Strassennetzwerks als mathematische Zielfunktion definiert werden. Beispielsweise kann als Ziel die Minimierung der Verbundkosten von Holzernte, Strassen und Holzabtransport angestrebt werden oder die Minimierung der Tangierung von sensiblen Zonen wie Naturschutzgebieten oder Wildlebensräumen. Als Rahmenbedingungen müssen Fixpunkte der Erschliessung, aber auch der Holzanfall in den verschiedenen Parzellen berücksichtigt werden.

Das klassische Vorgehen bei der Erschliessungsplanung bestand bisher darin, Varianten vorzuschlagen und anhand von Indikatoren zu bewerten. Da das Ausarbeiten einer Variante viel Zeit beansprucht, gab man sich in den meisten Fällen mit einer oder zwei Varianten zufrieden. Oft wurden auch die Ziele der Varianten nicht genau definiert, und auf die Prüfung verschiedener Szenarien (Sensitivitätsanalyse) wurde verzichtet. Bei einer mo-

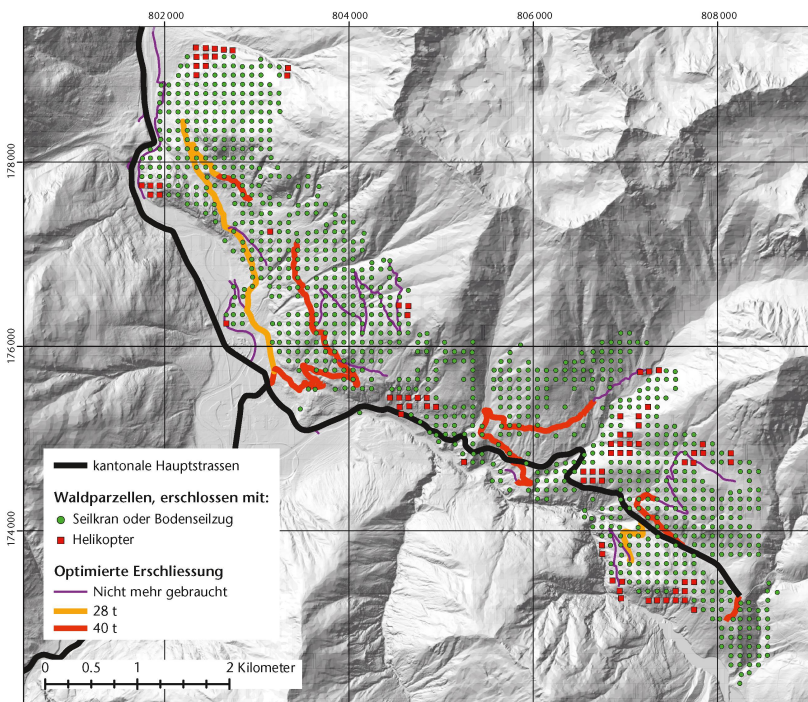


Abb 6 Modellergbnis für ein optimales Erschliessungs- und Holzerntekonzept für den Perimeter 2 nördlich von Zernez. Datenquelle: Kanton Graubünden

Kenngrösse	Einheit	Perimeter 1	Perimeter 2	Perimeter 3
Erntevolumen				
Gesamt	m ³	65 164	101 359	83 389
Bringung mit Helikopter, absolut	m ³	2 430	5 765	1 173
Anteil	%	4	6	1
Bringung mit boden- oder seilgestützten Verfahren	m ³	62 733	95 595	82 217
Strassenkennwerte				
Länge Waldstrassen	m	8 702	12 968	14 683
Strassendichte (m pro ha Wald)	m/ha	9	12	18
Kennwerte Strassenneubau				
Länge	m	2 019	0	0
Kosten, absolut	CHF	1 233 167	0	0
pro m	CHF/m	611	0	0
Kennwerte Strassenausbau und -unterhalt				
Länge	m	6 683	12 968	14 683
Kosten (über 40 Jahre), absolut	CHF	1 303 896	3 084 591	1 900 355
pro m	CHF/m	195	238	129
Kosten Holzbereitstellung				
Totale Kosten (Holzernte, Holzabtransport und Strassen)	CHF/m ³	120	105	98
Strassenkosten	CHF/m ³	40	32	23
Kosten Holzernte und Holzabtransport	CHF/m ³	80	73	74

Tab 2 Kennwerte zu den optimierten Lösungen in den verschiedenen Teilperimetern.

dellgestützten Lösungssuche kann aus einer fast unendlichen Anzahl von Kombinationen innert kurzer Zeit zielgerichtet eine optimale Lösung berechnet werden. Ziele und Rahmenbedingungen können abgeändert und somit auch die Robustheit einer Lösung geprüft werden. Dies ermöglicht es zum Beispiel, genau zu quantifizieren, welche Zusatzkosten bestimmte Forderungen verursachen. Im Beispiel der Neuerschliessung im Bergell führt die Erschliessung der Trockenwiesen zu zusätzlichen Kosten von 30 000 Franken pro Jahr. Kann dies so aufgezeigt werden, hat man eine gute Diskussionsgrundlage für Abgeltungen. Gian Cla Feuerstein, der früher zuständige Regionalforstingenieur für Erschliessungen im Engadin und in Südbünden, hat den Nutzen der Optimierungsmethoden aufgrund der beiden Fallbeispiele wie folgt zusammengefasst: *Als oberstes Ziel jeder Überprüfung eines generellen Erschliessungskonzeptes sollte ein möglichst effizienter Mitteleinsatz mit Fokus Holzernte sein. Die klassische Methode sieht keine Überprüfung der Erschliessung mit der Feinerschliessung, zumindest nicht automatisiert und schon gar nicht im Sinne iterativer Schritte vor. Die Variantenwahl erfolgt zwar nach zusätzlichen, mutmasslich objektiven Kriterien (Nutzwertanalyse), die aber nicht unbedingt viel mit einer optimierten Holzernte gemeinsam haben. Mit dem Einsatz neuer Holzernteverfahren und aufgrund des neuen Wissenstandes sollten sämtliche «alten» generellen Erschliessungspläne überprüft werden, insbesondere dann, wenn grössere Investitionen anstehen. Ohne Au-*

tomatisierung wird dies nicht flächendeckend und schon gar nicht nach rein holzertentechnischen und objektiven Kriterien erfolgen können!

Ein Optimierungsmodell ersetzt nicht den Experten mit Fachwissen, sondern dient dem Experten als Hilfsmittel für den Layout-Entwurf. Bei Einsatz eines Optimierungsmodells müssen die Ziele festgelegt und die Eingangsparameter definiert werden, auch muss die Lösung auf Plausibilität geprüft und allenfalls angepasst werden, dazu ist der Experte gefragt.

Allgemein gültige Aussagen, wie eine optimale (Basis-)Erschliessung aussieht und durch welche Faktoren diese beeinflusst wird, sind sehr schwierig zu machen. Die optimale Lösung hängt stark von den Zielen und den Rahmenbedingungen ab. Das Beispiel im Bergell hat gezeigt, dass bei einer Optimierung nach rein forstlichen Zielen keine Strasse vorgeschlagen wird, bei Berücksichtigung der Naturschutzanliegen die Erschliessung mittels Strasse hingegen die optimale Lösung darstellt. Auch die Topografie und das vorhandene Holzvolumen im Wald haben entscheidenden Einfluss. Je mehr Holz geerntet wird, desto eher lohnt es sich, eine Strasse zu bauen. Schwierige Topografie verteuert den Strassenbau, weshalb in schwierigem Gelände eher weniger Strassen gebaut werden. Es kann einzig festgehalten werden, dass die Basiserschliessung einen minimalen Standard bezüglich Geometrie und Dimensionierung aufweisen soll, welcher den Einsatz von 5-Achs-Lkw (40-Tönnner) oder in Ausnahmefällen von 4-Achs-Lkw (28-Tönnnern) erlaubt.

Der Indikator der Strassen- bzw. Erschliessungsdichte sagt wenig über die Qualität der Erschliessung aus. Im Beispiel von Zernez variierte die Bandbreite der optimalen Strassendichte zwischen 9 und 18 m/ha. Wichtiger ist hier, dass die Basiserschliessung einen genügenden Standard bezüglich Geometrie und Dimensionierung aufweist und räumlich gut verteilt ist. Möchte man die Qualität einer Erschliessung beurteilen, wird man wohl jeden Fall einzeln untersuchen müssen, insbesondere bei anspruchsvoller Topografie und bei inhomogenen Wäldern. Auch für den Indikator der erschlossenen Waldfläche gilt Ähnliches. Ist ein Gebiet nur zu 50% mit Seilkran oder bodengestützten Systemen erreichbar, heisst dies nicht, dass die Fläche untererschlossen ist. Es kann sich auch schlicht und einfach nicht lohnen, zur Nutzung einer geringen Holzmenge eine teure Strasse zu bauen, wie das Beispiel im Bergell gezeigt hat. In einem dicht erschlossenen Wald kann es aber auch sinnvoll sein, einzelne Strassenstücke neu zu bauen.

Für die Optimierung von Erschliessungs-Layouts wurde ein Programm entwickelt. Dieses existiert zurzeit in Form eines Prototyps. Wünschbar für die Praxis wäre ein Programm, welches von Spezia-

listen in der Verwaltung oder in Ingenieurbüros bedient werden könnte. Der Wert der Wiederbeschaffung der Waldstrassen in der Schweiz beträgt zwischen 6 und 10 Milliarden Franken, jährlich werden zwischen 60 und 100 Millionen Franken in die Erhaltung des Strassennetzwerks investiert. Wenn durch den Einsatz eines solchen Programms auch nur ein kleiner Prozentsatz der Kosten eingespart werden kann, dann lohnt sich der Aufwand zur Erarbeitung eines benutzerfreundlichen Programms. Auch die Subventionierung von Waldstrassen liesse sich mit der vorgestellten Methodik zielgerichteter steuern und effizienter gestalten. ■

Eingereicht: 23. März 2016, akzeptiert (mit Review): 5. Juli 2016

Dank

Ich bedanke mich bei Gian Cla Feuerstein, Regionalforstingenieur der Region 5, Südbünden, für seine engagierte Mitarbeit, insbesondere für das Zurverfügung-Stellen von geeigneten Problemstellungen und die viele wertvollen Kommentare und Anregungen aus der Sicht eines Praktikers. Ein weiterer Dank gebührt Hans Rudolf Heinimann, Professor für forstliches Ingenieurwesen an der ETH Zürich, der über Jahre dafür gesorgt hat, dass dieser Forschungs-

bereich in der Schweiz Fuss fassen konnte, und dafür die notwendigen Ressourcen zur Verfügung gestellt hat.

Literatur

- BONT LG (2012)** Spatially explicit optimization of forest harvest and transportation system layout under steep slope conditions. Zürich: Eidgenöss Techn Hochschule, Dissertation 20515. 139 p.
- BONT LG, HEINIMANN HR, CHURCH RL (2015)** Concurrent optimization of harvesting and road network layouts under steep terrain. *Ann Oper Res* 232: 41–64.
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010)** Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 312 p.
- STÜCKELBERGER JA (2008)** A weighted-graph optimization approach for automatic location of forest road networks. Zürich: VDF. 127 p.
- STÜCKELBERGER JA, HEINIMANN HR, BURLET E C (2006A)** Modeling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads. *Eur J For Res* 125: 377–390.
- STÜCKELBERGER JA, HEINIMANN HR, CHUNG W, ULBER M (2006B)** Automatic road-network planning for multiple objectives. In Chung W, Han HS, editors. Council on Forest Engineering Conference, Coeur d'Alene, Idaho. pp. 233–248.
- STÜCKELBERGER JA, HEINIMANN HR, CHUNG W (2007)** Improved road network design models with the consideration of various link patterns and road design elements. *Can J For Res* 37: 2281–2298.

Le layout optimal d'une desserte forestière

Une desserte de base avec un standard suffisant pour les camions est la prémisses pour une récolte de bois économique. Les évolutions technologiques en matière de récolte et transport du bois, les options stratégiques de gestion de l'espace forestier ainsi que les impératifs d'entretien et financiers appellent à une réflexion sur l'adéquation du patrimoine existant et l'adaptation des réseaux de desserte. Une question importante pour cette tâche est de définir le tracé des routes dans l'espace ainsi que le standard minimal des routes (problèmes de layout). Dans cet article, on considère deux cas de problèmes de layout. La construction des nouvelles routes dans un territoire sans desserte et l'adaptation d'une desserte existante. Pour les deux problèmes, on présente une méthode qui détecte automatiquement la technique de récolte optimale associée à un réseau de desserte optimal. Le but est d'identifier un réseau de desserte optimal pour lequel les coûts du cycle de vie sont minimaux. Cela inclut les coûts pour la récolte de bois, la construction et la maintenance des routes ainsi que pour le transport de bois et des aspects écologiques. La méthode sera illustrée à l'aide de deux exemples. L'avantage principal d'un tel modèle numérique est une planification ciblée. De cette façon, on peut tester rapidement et facilement des scénarios et des objectifs différents. Les réactions des forestiers étaient positives. Une utilisation plus répandue de la méthode est souhaitée ainsi qu'un logiciel pour les experts du canton ou des bureaux ingénieurs.

Optimal layout of a forest road network

The road network is the backbone of forest management. When creating or redesigning a forest road network, one important question is how to shape the layout, this means to fix the spatial arrangement and the dimensioning standard of the roads. We consider two kinds of layout problems. First, new forest road network in an area without any such development yet, and second, redesign of existing road network for actual requirements. For each problem situation, we will present a method that allows to detect automatically the optimal road and harvesting layout. The method aims to identify a road network that concurrently minimizes the harvesting cost, the road network cost (construction and maintenance) and the hauling cost over the entire life cycle. Ecological issues can be considered as well. The method will be presented and discussed with the help of two case studies. The main benefit of the application of optimization tools consists in an objective-based planning, which allows to check and compare different scenarios and objectives within a short time. The responses coming from the case study regions were highly positive: practitioners suggest to make those methods a standard practice and to further develop the prototype to a user-friendly expert software.