

Diss. ETH No. 20515

**Spatially explicit optimization of forest harvest and
transportation system layout under steep slope conditions**

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Leo Gallus Bont

dipl. Forsting. ETH Zürich

born July 27, 1979

citizen of Oberriet-Eichenwies (SG), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hans Rudolf Heinemann, examiner

Prof. Dr. Richard L. Church, co-examiner

Zurich, 2012

Summary

In central Europe, even mountainous areas such as the Alps are densely populated. Here, the land-use pattern has been formed through centuries of human activity. While settlements and farmland are found mainly on flat terrain, forested areas occur on steeper terrain that cannot be cultivated otherwise. Because of dense settlement and cultural heritage, people have placed several demands on forests, such as timber production, assurance that human life and important assets will be protected against natural disasters, and preservation for their enjoyment as close-to-nature ecosystems and sources of recreation. Because personnel must deal with all of these multi-functional requirements as well as difficult topography, forest supervision in the Alps is a challenging task.

Most Alpine forests are managed to provide protective services against gravitationally driven natural hazards. The aim is to maximize sustained mechanical stability. This usually implies a forest structure pattern that comprises, within a small space, various age classes and a mix of species. For this, planners utilize group- or single-tree selection systems for harvesting.

The choice of harvesting operations has an important impact on economic and environmental efficiency. Several steps are involved, including cutting, removing and processing the timber, then shipping it to an intermediate pile or directly to a sawmill. In areas of steep terrain, the backbone of wood transportation involves either cable-borne or air-borne technologies, the former requiring a basic road network.

When optimizing the harvest process, one important issue lies in the design of the transportation system. By creating a smart road network and adequate cable road layout, planners lay the foundation for economic and ecologically efficient management.

The objective of this thesis was to provide optimization methods for the automatic design of harvesting and transportation systems within different spatial and temporal scales. The following tasks were considered:

- 1) **Identifying the optimum geometric layout of a single cable road.** The objective was to find an optimum layout for intermediate supports that minimizes the set-up and dismantling costs of a cable road (i.e., minimizes the number and height of those supports)
- 2) **Designing an optimum harvesting and cable road layout for a given road network.** This involved producing a detailed stratification of ground-based, cable, and air-borne terrain units so that one could locate cable roads and assign timber parcels to them.

- 3) **Concurrently optimizing harvesting and road network layouts.** The objective was to develop a road network that minimizes the costs for both road construction and the harvesting operation simultaneously.

The solving strategies and main findings from this study are listed consecutively.

Optimum geometric layout of a single cable road

European yarding technology features a skyline that is anchored at both ends. In contrast to weight-suspended skylines, one main drawback is that the mechanical behavior of a fixed skyline must be modeled using non-linear equations that can be solved only through numerical iterative approaches. Therefore, simplified linearized equations must be applied (corresponding to weight-suspended skyline behavior) that describe such behavior. Here, evaluating the feasibility of solutions that resulted from this task included verifying that the allowable stresses and strains were not exceeded in the skyline, that a minimum ground clearance was given, and, when a gravity-driven carriage was employed, that the skyline followed a minimum falling gradient. This problem was modeled as a graph and solved with a shortest path algorithm. Because accurate and sufficient real-cost functions were not available, the best solution had to contain the fewest necessary intermediate supports and a minimum height for those supports.

This method is the first to optimize a layout for intermediate supports while concurrently including a skyline fixed at both ends. Compared with older approaches that assume a weight-suspended skyline, this new strategy stipulates lower heights for intermediate supports and a longer span. Although one can now consider this task to be solved, software that is more user-friendly must be created for broad applications.

Optimum harvesting and cable road layout for a given road network

Although accurate tools that tackle this problem do not truly exist, some methods have been developed for addressing related tasks within plantation systems. However, none has proven suitable for harvesting layouts and road networks under the terrain conditions found in the European Alps. For example, they do not incorporate an objective for minimizing any negative impacts on the residual stand, but are geared only toward reducing harvesting costs. These earlier models also are not adapted to European yarding technology, for which one can neglect the costs of tower installations compared with those of cable road setup and dismantling. By contrast, this new model has been designed for European operations, and is aimed at minimizing both harvesting cost and the

negative impact of logging on the remaining trees. Based on a mixed integer linear programming (MILP) formulation, the algorithm searches among a set of feasible cable-road and helicopter-logging options for the optimal solution. For harvesting areas up to 0.5 km^2 , one can obtain the best solutions 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. Existing model formulations are computationally inefficient and cannot find those solutions to real-size problems either within a reasonable period or if only heuristics are used. As a result of this research, one can now consider this task to be solved. Nevertheless, future work on this problem should involve the concurrent optimization of layouts for silvicultural treatment and cable roads in forest stands at high elevations. For the approach utilized here, silvicultural treatments were given. Relevant design parameters that could be applied when conducting further studies should follow those already proposed by Heinimann and Stampfer (2003).

Concurrent optimization of harvesting and road network layouts

Identifying a road network that concurrently minimizes the cost of road construction and the cost of the harvesting process is one of the most challenging problems in forest engineering. Up to now, several approaches have been presented that either address only part of the problem or else can be solved only by the use of heuristics. The new model formulation presented here is based on MILP, which performs as well as or better than state-of-the-art methods. In the current analysis, the expenses of hauling logs along a harvest road network were not factored in because they were relatively independent of layout. Therefore, one might take into account an error of no more than 1%. That assumption, although not restrictive within the context of the system under study, was very efficacious to model development. Problems could be solved to optimality for areas up to 5 km^2 . In this model, the solution was generated semi-automatically, i.e., the location of nodes still had to be set manually. Those nodes represented potential junctions and terminals for the road network. However, further developments that utilize this approach should automate that step of “node setting”.

Zusammenfassung

In Mitteleuropa sind sogar Gebirgsgegenden wie beispielsweise die Alpen dicht besiedelt. Die Landnutzung ist hier geprägt durch eine über Jahrhunderte fortgeschrittene Siedlungsgeschichte. Während sich die Siedlungs- und die landwirtschaftlichen Flächen vor allem in flachem Gelände befinden, wachsen die Wälder vielerorts an steilen Hängen, die anderweitig kaum genutzt werden konnten. Aufgrund der dichten Besiedlung und des kulturellen Erbes werden vielfältige Ansprüche an den Wald gestellt, wie Holzproduktion, Schutz der Infrastruktur vor Naturgefahren, Naturschutz oder Erholung. Diese vielfältigen Ansprüche an den Wald, sowie die anspruchsvolle Topographie machen die Waldbewirtschaftung in den Alpen zu einer herausfordernden Aufgabe.

Die allermeisten Wälder in den Alpen werden als Schutzwälder bewirtschaftet, mit dem Ziel langfristig möglichst stabile und widerstandsfähige Wälder zu haben. Vereinfacht gesagt, versucht man daher waldbaulich ein Wald-Mosaik anzustreben auf dem sich auf möglichst kleiner Fläche Bäume verschiedener Altersstufen und Arten wiederfinden. Dies ist nur durch eine gezielte Einzel- oder Gruppenbaumweise Bewirtschaftung möglich.

Ein wichtiger Faktor, sowohl bezüglich Kosten als auch bezüglich Umweltbelastung, stellt die Holzernte dar. Hier geht es darum die Bäume zu fällen, zu bearbeiten und vom Bestand zu einem Lagerplatz oder in die Sägerei zu transportieren. Die Holzernte im Gebirge erfolgt in der Regel mit Seilkran und LKW oder Helikopter.

Die Optimierung der Holzernte fängt bei der Gestaltung des Transportsystems an. Mit einer intelligenten Anlage des Strassennetzwerks und geschicktem Anlegen der Seillinien im Gelände werden die Grundlagen für eine umweltschonende und effiziente Bewirtschaftung gelegt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, mittels mathematischen Optimierungsmodellen optimale Holzernte- und Transportsysteme auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen zu gestalten. Dazu werden folgende Aufgaben betrachtet:

- 1) **Optimale Positionierung von Zwischenstützen bei einer einzelnen Seillinie.** Hier geht es darum die Zwischenstützen so auszuwählen und zu platzieren (Höhe und Position), dass die Installationskosten minimal werden.
- 2) **Optimales Holzerntekonzept und Anordnung mehrerer Seillinien für ein gegebenes Strassennetzwerk.** Hier geht es darum für die verschiedenen Zellen einer Schlagfläche die optimale Erntemethode zu wählen und für die Zellen, welche mit Seiltechnik erschlossen werden, die optimalen

Seillinien zu identifizieren. Es werden einerseits minimale Kosten und andererseits minimale Schäden am verbleibenden Bestand angestrebt.

- 3) **Gleichzeitige Optimierung der Anlage des Strassennetzwerkes und des Holzerntelayouts.** Hier geht es darum ein Strassennetzwerk zu entwerfen, welches gleichzeitig die Kosten für die Strasseninfrastruktur und die Kosten für die Holzernte minimiert.

Die gewählten Lösungsansätze sowie die Hauptkenntnisse werden untenstehend für die verschiedenen Aufgaben separat aufgelistet:

Optimale Positionierung von Zwischenstützen bei einer einzelnen Seillinie:

Europäische Seilkräne für den Holztransport weisen ein Tragseil auf, das an beiden Enden fix verankert ist. Im Vergleich zu gewichtsgespannten Tragseilen hat dies den Nachteil dass die Lastwegkurve mittels nicht linearen Gleichungen beschrieben werden muss, und sich diese Gleichungen nur mit iterativen Methoden lösen lassen. Deshalb wurde bis anhin mit vereinfachten linearisierten Annahmen (was dem Verhalten eines gewichtsgespannten Tragseils entspricht) gerechnet um das Verhalten des Tragseils zu modellieren. Wir verwenden für unsere Berechnungen der Lastwegkurve die nichtlinearen Kettenlinien Formeln, was die ganze Problemrepresentation und Optimierungstechnik wesentlich anspruchsvoller macht. Bei der Berechnung der Machbarkeit der Seillinie wurde darauf geachtet, dass 1) die maximal zulässigen Spannungen im Tragseil nicht überschritten werden, 2) ein minimaler Abstand zwischen dem Tragseil und dem Untergrund gegeben ist und 3) bei einem Einsatz eines Gravitationssystems eine minimale Neigung im Tragseil gegeben ist. Das Problem wurde als Graph modelliert und mit einem kürzesten Weg Algorithmus gelöst. Da aktuelle Modelle fehlen, welche die Installationskosten in angemessener Genauigkeit beschreiben, wurde diejenige Lösung gesucht, welche in erster Priorität eine minimale Anzahl an Stützen aufweist und in zweiter Priorität die gewählten Stützen eine minimale Höhe aufweisen. Die vorgestellte Methode ist die erste, welche von einem fix verankerten Tragseil ausgeht und gleichzeitig das mathematische Optimum identifiziert. Im Vergleich mit Berechnungsmethoden, die ein gewichtsgespanntes Tragseil annehmen, erzielt unsere Methode realistischere Lösungen mit längeren Seilfeldern und tieferen Stützenhöhen. Dieses Teilproblem kann als gelöst betrachtet werden. Für eine breite Anwendung muss jedoch noch ein benutzerfreundliches Programm geschrieben werden.

Optimales Holzerntekonzept und Anordnung mehrerer Seillinien für ein gegebenes Strassennetzwerk:

Bestehende Modelle die ähnliche Probleme (Holzerntelayouts) lösen sind für reine Holzproduktionsplantagen entwickelt worden. Deswegen werden andere Holzerntetechniken, v.a. technisch einfache Seilanlagen mit wenigen teuren Installationsplätzen und davon ausgehend radialen Seillinien und ausschliesslich ökonomische Ziele modelliert. In den Alpen werden vor allem Kippmastgeräte eingesetzt, d.h. die Installation des Masts auf der Waldstrasse geht sehr schnell, was sich in tiefen Kosten niederschlägt und neben den ökonomischen Zielen muss auch darauf geachtet werden, dass die Bestandesschäden bei der Holzernte klein gehalten. Wir haben ein Modell entwickelt, welches auf die europäische Holzerntetechnik zugeschnitten ist. Einerseits werden die Holzerntekosten und andererseits die Schäden am zurückbleibenden Bestand minimiert. Mittels einer ganzzahligen linearen Programmierung wird aus einer Menge von machbaren Seillinien und der Option Helikopterrücken die optimale Lösung ausgewählt. Für Schlagflächen bis 0.5 km^2 Grösse können innert nützlicher Zeit mathematisch optimale Seillinienlayouts berechnet werden. Die vorgestellte Methodik ist der erste Ansatz, welcher sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele berücksichtigt und innert nützlicher Zeit für realistische Problemgrössen die optimale Anordnung der Seillinien findet. Bisherige eingesetzte Optimierungsalgorithmen waren rechnerisch ineffizient und konnten keine realistische Problemgrössen innert nützlicher Zeit lösen, oder nur mit Einsatz von ungenauen Heuristiken. Das Problem kann so weit als gelöst betrachtet werden. Bei zukünftigen Arbeiten macht es Sinn, gleichzeitig das Holzerntelayout und die waldbaulichen Eingriffe zu optimieren. In unserem Modell wurde der Waldbau als vorgegeben betrachtet. Dazu relevante Entwurfsparameter werden von Heinemann und Stampfer (2003) beschrieben.

Gleichzeitige Optimierung der Anlage des Strassennetzwerkes und des Holzerntelayouts.

Das Finden eines Strassennetzwerkes, welches gleichzeitig die Kosten für die Strasse und die Holzernte minimiert ist eines der herausforderndsten Probleme im forstlichen Ingenieurwesen. Bis anhin wurden zahlreiche Lösungsansätze präsentiert, die jedoch immer nur einen Teilaspekt optimierten oder nur mittels Heuristik gelöst werden konnten. Wir präsentieren eine neuartige Problemformulierung, welche auf ganzzahliger linearer Programmierung basiert, welche bessere Lösungen findet als bisherige „state-of-the-art“ Techniken. Indem wir die Transportkosten auf den Waldstrassen nicht berücksichtigen nehmen wir einen Fehler von maximal einem Prozent in Kauf, können jedoch dadurch die ganze

Formulierung viel effizienter gestalten, was uns erlaubt für realistische Problemgrößen (bis 5 km²) optimale Lösungen zu errechnen. In unserem Modell müssen die Knoten, d.h. potentielle Kreuzungen und Endpunkte des Strassennetzwerkes, von Hand gesetzt werden, so dass die Lösung halb-automatisch generiert wird. Weiterentwicklungen dieses Modells sollten daher auch den Schritt des „Knoten setzen“ automatisieren.