Diss. ETH No. 17366

A weighted-graph optimization approach for automatic location of forest road networks

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Jürg Andreas Stückelberger,
dipl. Forsting. ETH Zurich

born September 24, 1972
citizen of Basel (BS) and Winterthur (ZH), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hans Rudolf Heinimann, examiner
Prof. Dr. Woodam Chung, co-examiner
Prof. Dr. Angelika Steger, co-examiner

Zurich, 2007

Summary

In most regions that support forestry activities, roads are the backbone of efficient management. Planning of a road network is still a challenging task, whether the goal is to design new routes or to improve or reduce existing systems. Automatic road network planning is a very complex locational problem that involves elevation, the geotechnical subsoil, different types of harvesting systems, and ecological effects.

Most existing optimization tools for such planning do not work well in steep terrain due to various shortcomings: (1) the assumption that road construction costs are homogenous over the entire project area, (2) neglect of the turning constraints for a road centerline and limited road directions, and (3) optimization of a road network for one objective only. The goal of the thesis presented here was to remedy these shortcomings and provide a model framework so that planners could automatically locate an optimal forest road network in mountainous areas of up to 50 km^2, and at a resolution of 10 m.

This problem is mapped here on a mathematical weighted graph. A graph (G) consists of a set of vertices (V, i.e., nodes) and a set of edges (E, i.e., road links) between two vertices. The weight (w) of an edge represents road costs or the ecological impact of a link. If one supposes that the mandatory access points are known, the situation can be formulated as a Steiner Minimum Tree problem (SMT). For example, if the weight of the edges represents construction costs, the SMT produces a cost-minimal network between given mandatory access points. There is most probably no exact algorithm that can solve this within a polynomial time deterministically; thus, the problem is $\mathcal{NP}$-hard. My thesis, therefore, presents some intelligent heuristics for finding near-optimal solutions to this problem.

In the first step, we try to identify the cost-minimal network. Our focus is on road life-cycle costs, which comprise expenses for construction and maintenance over the life-cycle period. To solve this problem, we require good models that can give accurate cost estimates (cf., Chapter 1) as well as a useful model representation for forest road alignment (cf., Chapter 2). In our second step, we incorporate other objectives, including harvesting-attractiveness and penalties for negative ecological impacts. These bi- and tri-objective problems call for multi-criteria optimization (cf., Chapter 3). Several optimal alternatives are made available, depending on the preferences of the stakeholders for different objectives. For example, a conservationist may prefer a road with no ecological disturbance whereas the forest landowner would rather have a cost-minimal solution. A solution is deemed *Pareto-optimal* if it is not possible to decrease one objective without increasing another. We call the set of all Pareto-optimal solutions the Pareto set or Pareto frontier. Depending on the shape of the trade-off between different objectives, there is a subset of Pareto-optimal solutions located on the convex hull in the criterion space. The mathematical formulation for this specific subset of Pareto-optimal solutions is described in Chapter 4. For practical applications, these solutions can be considered the most interesting. Whereas in Chapter 3 we attempt to find Pareto-optimal solutions for bi-objective functions, in Chapter 4 we also examine tri-objective functions.

The model framework was tested in different project areas over steep terrain. We assumed the mandatory access points for the road network were known, and we limited our focus to harvesting via cable-yarding. Only two penalties were applied for ecological disturbance: to capercaillie, an endangered breeding bird (*Tetrao urogallus*), and to rare ecotypes (marshland). The following are our major findings:

(1) A cost-estimating procedure that incorporates slope gradient and geotechnical properties of the subsoil results in an optimal road network that incurs about 25% less in construction costs.

However, its total length is about 10% longer compared with state-of-the-art models where construction costs are assumed to be homogenous over the entire project area. Furthermore, a model that includes slope gradient but neglects the geotechnical subsoil results in 17% higher costs compared with our newly proposed model. (2) The representation of a forest road is the crucial qualification for accurate network planning. The steeper the terrain, the more important it is to choose a model that is able to handle turning constraints and several different road directions. State-of-the-art models, which have a limited set of directions and do not map turning constraints, cannot find a feasible solution in areas where the average slope gradient is >35%. Furthermore, models that do include different road directions but neglect turning constraints will project network costs that are about 50% over the optimum.

(3) Using our methods, we have found it possible to determine Pareto-optimal solutions. The criteria of these solutions are located on a convex trade-off surface, as predicted by the multi-criteria optimization theory. These evaluations show that not only do economic objectives interact with ecological goals but also different ecological goals operate inversely. In one test area, a road network that can minimize one of our two ecological impacts encumbers two to three times higher costs, and increases other ecological disturbances by 20% to 40%.

The preferences for various objectives (i.e., weighting factors of the objective function) by the stakeholders greatly influence these solutions. Even relatively small changes in those preferences may cause the decision to jump from one Pareto solution to a completely different one. Knowing the trade-offs associated with these individual objectives helps the stakeholders make the final Pareto-optimal decision.

Our approach for solving the road network problem through a graph representation and SMT is very favorable when the graph is static and the weight of an edge (road link) can be assigned by a weighted sum of the different objectives. This is indisputably correct for road construction costs. For our two chosen ecological impacts, those assumptions seem to be reasonable as well. However, they are no longer valid when we incorporate forest harvesting-attractiveness. If a particular road link is chosen, the attractiveness for neighboring links may decrease. Applying our approach has one large shortcoming in that we are unable to handle the dynamic weights of a graph. Nonetheless, for low-weighting factors of harvesting-attractiveness, this model produces reasonable and nearly optimal solutions.

Zusammenfassung

In fast allen Waldgebieten, in welchen aus ökonomischen oder ökologischen Gründen, oder zur Abwehr von Naturgefahren eingegriffen wird, sind Forststrassen die Grundvoraussetzung für eine effiziente Bewirtschaftung. Die Planung eines forstlichen Erschliessungsnetzes ist nach wie vor eine herausfordernde Aufgabe, beispielsweise für den Entwurf eines neuen Strassennetzes, für den Ausbau bestehender Strassen oder für den Rückbau von Teilen des existierenden Strassennetzes. Computergestützte, vollautomatische Strassennetzwerkplanung ist ein sehr komplexes räumliches Problem, welches die Topographie, den geotechnischen Untergrund, verschiedene Holzerntesysteme und die Auswirkungen auf die Umwelt einschliessen muss.

Die meisten existierenden Optimierungsprogramme für die Planung forstlicher Erschliessungen sind ungeeignet für die Anwendung im steilen Gelände, da sie folgende Schwächen aufweisen: (1) die Annahme, dass die Baukosten im gesamten Projektgebiet gleich sind, (2) Vernachlässigung der massgebenden Restriktionen für Richtungsänderungen der Strassenlinie und stark limitierte mögliche Strassenrichtungen und (3) Optimierung des Strassennetzwerkes für nur eine Zielgrösse. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, diese Schwächen zu beheben und stellt ein Komponentenmodell vor, welches für ein Projektgebiet von bis zu 50 km^2 vollautomatisch ein optimales forstliches Erschliessungsnetz mit einer Genauigkeit von 10 m entwerfen kann.

Das Problem wird auf einem mathematischen gewichteten Graphen abgebildet. Ein Graph (G) besteht aus einer Menge von Knoten (V, Punkte) und einer Menge von Kanten (E, Strassenabschnitte) zwischen zwei Knoten. Jede Kante wird mit einem positiven Wert gewichtet, der beispielsweise den Baukosten oder dem ökologischen Einfluss eines Strassenabschnittes entspricht. Angenommen, die positiven Fixpunkte einer Strasse sind bekannt, so kann das Problem als minimaler Steinerbaum (engl. Steiner Minimum Tree, SMT) formuliert werden. So führt beispielsweise ein SMT mit dem Gewicht "Baukosten" zum kostenminimalen Strassennetzwerk, welches alle Fixpunkte verbindet. Leider ist kein Algorithmus bekannt, welcher dieses Problem in polynomialer Zeit deterministisch lösen könnte, das Problem ist daher $\mathcal{NP}$-hart. Die vorliegende Arbeit zeigt intelligente heuristische Ansätze, wie das Problem nahezu optimal gelöst werden kann.

In einem ersten Schritt wird versucht, ein baukostenminimales Strassennetzwerk zu finden. Es werden die gesamten Lebenszykluskosten einer Strasse betrachtet, welche die Baukosten im ersten Jahr sowie die laufenden und periodischen Unterhaltskosten der gesamten Lebensdauer der Strasse umfassen. Um das Problem zu lösen, ist ein Modell erforderlich, welches sowohl diese Kosten zuverlässig schätzen kann (vgl. Kapitel 1) als auch die Linienführung der Strasse korrekt abbildet (Kapitel 2). In einem zweiten Schritt wird versucht, weitere Zielgrössen, wie die Güte für die Holzernte und Straffunktionen für negative ökologische Einflüsse zu berücksichtigen. Multikriterielle Optimierungstechniken erlauben, diese Zwei- und Dreizielprobleme zu lösen (vgl. Kapitel 3). Je nach den Prioritäten der Entscheidungsträger resultieren unterschiedliche optimale Lösungen. Beispielsweise bevorzugt ein Naturschützer eine Strasse mit möglichst geringem negativen Einfluss auf die Umwelt, während eine Waldbesitzerin eine kostengünstige Strasse bevorzugt. Eine Lösung ist *Pareto optimal*, wenn es nicht mehr möglich ist, eine Zielgrösse zu verbessern, ohne andere Zielgrössen zu verschlechtern. Die Menge aller Pareto optimalen Lösungen wird Paretomenge oder Paretogrenze genannt. Abhängig von der Form der Wechselwirkung dieser Zielgrössen gibt es eine Untermenge der Paretomenge, die auf einer konvexen Hülle der Zielmenge liegt. Die mathematische Formulierung für diese Paretomenge ist in Kapitel 4 beschrieben. Für praktische Anwendungen sind fast immer nur Lösungen dieser Paretomenge von Interesse. In Kapitel 3 wird versucht, die Paretomenge zwischen zwei Zielgrössen zu finden, in Kapitel 4 werden zusätzlich die optimalen Lösungen zwischen drei Zielgrössen

untersucht.

Das Komponentenmodell wurde in verschiedenen Projektgebieten im steilen Gelände angewandt. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Fixpunkte bekannt sind und nur ein Holzerntesystem mit Seilkran zur Anwendung kommt. Zudem werden nur zwei negative ökologische Auswirkungen betrachtet: (1) das vom aussterben bedrohte Auerhuhn (*Tetrao urogallus*) und (2) seltene Feuchtgebiete.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Haupterkenntnisse ableiten:

(1) Eine Baukostenfunktion welche die Hangneigung und die geotechnischen Eigenschaften des Bodens berücksichtigt führt zu einem optimalen Strassennetzwerk, welches etwa 25% kostengünstiger jedoch etwa 10% länger ist, verglichen mit herkömmlichen Modellen, welche die Strassenbaukosten im Projektgebiet als konstant voraussetzen. Ein Modell, welches nur die Hangneigung berücksichtigt, jedoch den geotechnischen Untergrund vernachlässigt, führt zu einer Lösung mit etwa 17% höheren Kosten, verglichen mit dem neu entwickelten Modell.

(2) Die Art und Weise, wie eine Forststrasse in einem Modell abgebildet wird, ist der entscheidende Faktor für die Güte der daraus resultierenden Erschliessungsplanung. Je steiler das Gebiet, desto entscheidender ist es, ein Modell zu wählen, welches Richtungsänderungen und mehrere verschiedene Strassenrichtungen abbilden kann. Herkömmliche Modelle, welche nur eine beschränkte Anzahl möglicher Richtungen aufweisen und Richtungsänderungen nicht korrekt berücksichtigen, sind nicht in der Lage, machbare Lösungen in Projektgebieten mit durchschnittlichen Hangneigungen von über 35% zu finden. Modelle, welche viele verschiedene Strassenrichtungen einschliessen, jedoch die Richtungsänderungen vernachlässigen, führen zu Lösungen, welche 50% über den optimalen Kosten liegen.

(3) Mit den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Methoden ist es möglich, Pareto optimale Lösungen zu finden. Die Zielgrössen der Paretomenge liegen auf einer konvexen Hüllkurve, so wie dies in der multikriteriellen Optimierungstheorie vorhergesagt wird. Die Auswertung zeigt, dass nicht nur ökonomische Ziele gegenläufig zu ökologischen Zielen sind, sondern dass sich auch verschiedene ökologische Ziele gegenseitig konkurrenzieren. Im vorliegenden Untersuchungsgebiet führt ein Strassennetz, welches eine der zwei Zielgrössen minimiert, zu zwei- bis dreimal höheren Kosten und erhöht die negative Auswirkung der anderen ökologischen Zielgrösse um 20% bis 40%.

Die Lösung ist stark abhängig von den Prioritäten der Entscheidungsträger für die einzelnen Zielgrössen (d.h. die Gewichtung der einzelnen Zielfunktionen). Eine kleine Änderung der Zielgewichtung kann zu völlig unterschiedlichen optimalen Lösungen führen. Die Lösung springt an jener Stelle von einem Pareto Optimum zu einem völlig andern Pareto Optimum. Sind die Wechselwirkungen verschiedener Zielgrössen bekannt, so ist es für die Entscheidungsträger viel einfacher, die gewünschte Pareto optimale Lösung auszuwählen.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz, das Strassennetzwerkproblem mit Hilfe eines Graphen und eines SMT zu lösen, ist sehr vorteilhaft, wenn es sich dabei um statische Gewichte der Kanten (Strassenabschnitte) handelt, die mittels einer gewichteten Summenfunktion verschiedener Zielfunktionen hergeleitet werden können. Für Strassenbaukosten ist dieser Ansatz zweifelsfrei korrekt. Für die ökologischen Auswirkungen scheint dieser Ansatz ebenfalls vernünftig zu sein. Dieser Ansatz ist jedoch nicht mehr gültig, wenn die Attraktivität für die Holzernte abgebildet wird. Wenn ein Strassenabschnitt gewählt wird, so kann die Holzernteattraktivität von benachbarten Strassenabschnitten stark abnehmen. Der gewählt Ansatz ist nicht fähig, dynamische Veränderungen der Kantengewichte zu verarbeiten. Dies ist der grösste Schwachpunkt des Modells der vorliegenden Arbeit. Dennoch führt das Modell zu fast optimalen Lösungen, so lange kleine Gewichtungsfaktoren für die Holzernteattraktivität gewählt werden.

Résumé

Les dessertes forestières sont la base d'un aménagement du territoire efficace pour la plupart des régions où l'activité forestière est importante. La conception d'un réseau de dessertes demande une grande réflexion pour planifier de nouvelles routes, améliorer ou redimensionner des routes existantes. L'automatisation de la conception d'un réseau est un problème spatial très complexe qui doit tenir compte de plusieurs paramètres tels que la topographie, la géotechnique du sol, les systèmes d'exploitation du bois et les contraintes écologiques.

La plupart des logiciels existants pour l'optimisation des réseaux de dessertes forestières sont inappropriés pour les terrains à forte pente, parce qu'ils présentent les désavantages suivants: (1) Les coûts de construction sont homogènes pour toute une surface; (2) ils négligent les contraintes liées aux virages et les directions potentielles pour la route sont très limitées; (3) il n'est possible d'optimiser la route qu'en fonction d'une seule variable.

Le présent travail a pour but de contrer ces désavantages et propose un modèle à plusieurs composantes qui est capable de générer automatiquement un réseau de dessertes forestières pour une surface de 50 km^2 avec une précision de 10 mètres.

Le problème est représenté sur un graphe mathématique (G). Le graphe consiste en un ensemble de sommets (V, nœuds ou points de la desserte) et un ensemble d'arêtes (E, connections ou sections de la desserte) entre deux sommets. Chaque arête a un poids qui représente par exemple les coûts de construction ou les contraintes écologiques d'une section. Supposant que les points fixes sont connus, le problème peut alors être formulé par l'arbre de Steiner de poids minimal (angl. Steiner Minimum Tree, SMT). Par exemple, si les arêtes représentent les coûts, le SMT donnera le réseau connectant les points fixes avec les coûts minimaux. Malheureusement, il n'existe pas d'algorithme connu qui puisse résoudre le problème en temps polynomial. On parle alors de problème $\mathcal{NP}$-dur. Ce travail présente des approches heuristiques intelligentes qui permettent de résoudre le problème de façon quasi optimale.

En premier lieu, on recherche le réseau de dessertes aux coûts minimaux. Tout le cycle de vie de la desserte est considéré, c'est-à-dire que non seulement les coûts de construction sont pris en compte, mais également les coûts de maintenance et d'entretien sur toute la durée de service de la desserte. Pour cela, il est nécessaire d'avoir un modèle qui estime les coûts avec fiabilité (Chapitre 1). Dans un deuxième pas, on considère d'autres paramètres tels que les besoins pour l'exploitation du bois ou les contraintes écologiques. Pour résoudre ce problème plus complexe, des techniques d'optimisation multicritère sont utilisées (Chapitre 3). Le résultat sera entièrement lié aux choix et préférences des décideurs. Par exemple, un écologiste va favoriser une desserte forestière avec un minimum d'impact sur l'environnement tandis qu'un propriétaire va se soucier essentiellement des coûts. Les solutions obtenues sont appelées *optima de Pareto*, s'il n'est pas possible d'améliorer le résultat d'un paramètre sans empirer le résultat d'un autre paramètre. L'ensemble des optima de Pareto est l'ensemble de Pareto ou la frontière de Pareto. Selon l'interaction entre les paramètres, il existe un sous-ensemble de Pareto qui se trouvent sur une enveloppe convexe. La formulation mathématique est indiquée au Chapitre 4. Pour la pratique, seules les solutions de cet ensemble des optima de Pareto sont intéressantes. Dans le Chapitre 3, des solutions des optima de Pareto sont trouvées pour deux paramètres et dans le Chapitre 4 pour trois paramètres.

Les différents composants du modèle ont été testés pour plusieurs régions à forte pente. On suppose toujours que les points fixes sont connus. On ne considère qu'un seul système d'exploitation de la forêt; ici la grue à câble et seulement 2 contraintes écologiques; la présence du grand tétras (*Tetrao urogallus*) et la présence de marais. On trouve les résultats principaux suivants:

(1) D'un modèle qui considère la pente et les propriétés géotechniques du sol résulte un réseau de dessertes forestières qui est environ 25% meilleur marché, mais 10% plus long que les résultats des modèles développés jusqu'à ce jour, qui calculent avec des coûts de construction constants. D'un modèle qui considère la pente, mais néglige la géotechnique du sol résulte des solutions environ 17% plus chères que le nouveau modèle présenté.

(2) La manière dont un modèle représente les dessertes forestières est cruciale pour la qualité de la planification du réseau de dessertes. Plus raide est le terrain, plus il est important d'utiliser un modèle qui considère plusieurs directions de route et qui peut traiter les changements de directions correctement. Les modèles traditionnels qui ne considèrent que peu de directions et ne peuvent pas traiter les changements de direction, ne sont donc pas capables de trouver une solution réalisable sur un terrain ayant une pente supérieure à 35%. Les modèles qui tiennent compte de plusieurs directions, mais qui ne traitent pas correctement les changements de direction donnent des solutions environ 50% plus chères.

(3) Avec la méthode présentée ici, il est possible de trouver des optima de Pareto. Les paramètres de l'ensemble des optima de Pareto se trouvent sur une courbe convexe comme prédit par la théorie d'optimisation multicritère. L'analyse montre qu'il n'y a pas que les contraintes écologiques qui sont en concurrence avec les contraintes économiques, mais que les différentes contraintes écologiques sont concurrentes entre elles. Pour une surface test, un réseau de desserte qui minimise les impacts pour une contrainte écologique donne des coûts environ deux à trois fois plus élevés et défavorise une autre contrainte écologique de 20% et 40%. Les solutions sont fortement liées aux poids que les décideurs attribuent aux paramètres (c.-à-d. pondération). De petits changements de pondération peuvent résulter des solutions complètement différentes. La solution saute en fait d'un optimum de Pareto à un autre optimum. Si les interactions entre les différents paramètres sont connues, il est plus facile de définir l'optimum de Pareto à atteindre.

L'approche présentée dans ce travail, qui est de formuler le problème avec un SMT dans un graphe est très avantageuse, si les segments de routes ont des poids constants qui peuvent être définis par une somme des fonctions pondérées des différents paramètres. Cette approche est sans aucun doute correcte pour obtenir un réseau de desserte aux coûts minimaux ou pour minimiser les impacts écologiques. Si par contre, on ajoute le paramètre "exploitation du bois", cette approche n'est plus correcte. Le choix d'une méthode d'exploitation du bois ne sera pas valable pour tous les segments de route et le modèle présenté ici n'est pas capable de traiter des changements de poids entre les segments. C'est d'ailleurs le point le plus faible de ce modèle. Cependant, ce désavantage est moindre si la pondération de l'exploitation du bois est petite et le modèle donne alors des solutions quasi optimales.