



# Planering av väginvesteringar

*Planning of forest road investments*

**Joakim Myhrman**

**Arbetsrapport 182 2007**  
**Examensarbete 15p C**

**Handledare:**  
**Iwan Wästerlund**

---

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET  
Institutionen för skoglig resurshushållning  
S-901 83 UMEÅ  
Tfn: 018-671000



ISSN 1401-1204  
ISRN SLU-SRG--AR—182--SE

# Planering av väginvesteringar

*Planning of forest road investments*

**Joakim Myhrman**

## *Sammanfattning*

Problematiken runt och planering av virkesflödet är något av det mest komplexa i skogsnäringen. Idag är den enskilde tjänstemannens erfarenhet och överblick helt avgörande för att korrekta beslut kan tas, såväl ur ett taktiskt som ekonomiskt perspektiv. Med ökande besparingskrav samt krav på en allt kortare reaktionstid och högre flexibilitet i flödeskedjan är det hög tid att hitta lösningar och hjälpmedel som kan effektivisera arbetet och processerna runt virkesflödet.

Holmen Skog ligger i startgroparna med att utveckla ett nytt vägförvaltningssystem. Systemet ska underlätta arbetet med vägar, dels nybyggnation och upprustning men också ajourhållning.

Syftet med denna studie var att undersöka funktionaliteten i beslutsstödet Vägrust, såväl ur ett ekonomiskt som ett praktiskt perspektiv. Målet har varit att upprätta en vägupprustningsplan för 4, 6 och 8 veckors tjällossning, löpande på 10 år för Holmen Skog, distrikt Bredbyn.

Väg och beståndsdata för distriktet samt för distriktet i dagsläget aktuella mottagares kommande råvarubehov utgjorde grunden för optimeringen. I Vägrust angavs virkesvolymernas geografiska läge, vägnätets beskaffenhet med avseende på tillgänglighet samt respektive industris försörjningsbehov under året. En optimering för respektive förfallsperiod 4, 6 och 8 veckor genomfördes sedan av Mathias Henningsson vid Linköpings universitet.

Optimeringarna visade på i sammanhanget mycket låga upprustningskostnader för planperioden, mellan 5,6 och 9,7 kr/m<sup>3</sup>fub beroende på förfallsperiodens längd.

Vägrust som idag är en prototyp av ett beslutsstöd för vägupprustningar genererade användbara och trovärdiga upprustningsplaner för distrikt Bredbyn. Holmen Skog AB antas sänka kostnaden för väghållning genom att använda en optimeringsmodell för vägupprustning.

Nyckelord: Vägrust, Vägupprustning, GIS, Optimering

## ***Summary***

The problems around and the planning of wood flow is some of the most complex issues in the forest-sector. The experience and overview of the single employees is crucial for the possibility of correct tactical and economical decision-making. The increasing demand of savings and shorter reaction-times with greater flexibility in the wood-supply-chain, makes solutions and aids for improved effectiveness in the work and processes according to wood-flow urgent.

Holmen Skog is starting to develop a new forest-road-management-system. The system will facilitate the work according to construction, improvements and updating the standard of roads.

The aim of this study was to investigate the tactical and economical functionality of the decision-support tool Vågrust. The goal was to establish a plan for road improvements with 4, 6 and 8 weeks of thaw, running on 10 year at Holmen Skog district Bredbyn. Road-data, stand-data and the coming need of wood at the district founded the base which the optimization was performed. The location of the wood-volumes, conditions of the road-network with respect of accessibility and the yearly procurement-need of the industries was recorded in Vågrust. One optimization was run for each thaw-period of 4, 6 and 8 weeks by Mathias Henningsson at Linköpings universitet.

The optimizations shows, in this context, a very low improvement-cost ranging between 5,6-9,7 kr/m<sup>3</sup>fub for the planning-period depending on the length of the thaw period. Vågrust, that today is a prototype decision-tool, generated useful and reliable plans of road improvements at district Bredbyn. The costs of road management at Holmen Skog AB is supposed to decrease through the use of an optimization-model for road-improvements.

Keywords: Vågrust, road improvement, GIS, Optimization

<b>INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
BAKGRUND .....	1
SYFTE.....	2
INDATA .....	3
<i>Vägar</i> .....	4
<i>Bestånd</i> .....	4
<i>Utbytesberäkning</i> .....	5
RESTRIKTIONER OCH STYRPARAMETRAR .....	6
<i>Tillgänglighet</i> .....	6
<i>Upprustningskostnad</i> .....	6
<i>Industrier</i> .....	6
KÄNSLIGHETSANALYS .....	7
INMATNING OCH OPTIMERING .....	8
"VISUALISERAT NULÄGE" .....	9
UPPRUSTNINGSFÖRSLAG .....	10
KOSTNADER .....	14
<b>DISKUSSION</b> .....	<b>15</b>
INDATA .....	15
RESULTAT .....	16
UTVÄRDERING .....	16
<i>Slutsatser</i> .....	18
<b>REFERENSER</b> .....	<b>19</b>
SKRIFTLIGA .....	19
MUNTliga .....	19
<b>BILAGOR</b> .....	<b>20</b>
BILAGA 1 .....	20
BILAGA 2 .....	24

# Inledning

## *Bakgrund*

Problemen runt och planering av virkesflödet är något av det mest komplexa i skogsnäringen. Komplexiteten ligger dels i den rad av beslut som måste samklinga, dels i den verklighet som helst bör stämma överens med planeringen men också i integreringen av planeringsnivåerna (Andersson, 2005). Det som är optimalt ur ett strategiskt perspektiv kan ur ett taktiskt perspektiv verka helt främmande eller än värre vara helt förkastligt. Vilket i första hand beror på olika tidshorisonter men också planeringens upplösning. Att det finns pengar att spara på optimala lager, ett rationellt utnyttjande av avverknings- och transportresurser är många eniga om. Allt handlar om planering och inte minst om att skapa förutsättningar för att planera. Idag är den enskilde tjänstemannens erfarenhet och överblick helt avgörande för att korrekta beslut kan tas, såväl ur ett taktiskt som ekonomiskt perspektiv. Med ökande besparingskrav samt krav på en allt kortare reaktionstid och högre flexibilitet i flödeskedjan, är det hög tid att hitta lösningar som kan effektivisera arbetet och processerna runt virkesflödet.

Förväntansfullt kan det konstateras att vi är en god bit på väg. Tankesättet är etablerat och förslag på lösningar till ett effektivare flöde har börjat presenteras. Det har under senare tid uppvisats en rad olika beslutsstöd och optimeringsmodeller som är konstruerade för att underlätta och främja ekonomiskt korrekta beslut samt att för den enskilde tjänstemannen underlätta beslutsprocessen. Det görs också försök att integrera den strategiska och taktiska planeringen (Andersson, 2005).

Holmen Skog ligger i startgroparna med att utveckla ett nytt vägförvaltningssystem. Systemet ska underlätta arbetet med vägar, dels nybyggnation och upprustning men också ajourhållning. Till skillnad från många andra storskogsbolag väljer Holmen att skapa ett eget system bestående av ändamålsenliga komponenter. I den här studien kommer ett aktuellt beslutsstöd, Vägerust, att testas och utvärderas. Beslutsstödet syftar till att optimera upprustningen av skogsbilvägar genom att minimera upprustningskostnaden utifrån befintlig vägstandard och industrins efterfrågan. Vidare kommer studien, i diskussionsform, att beröra hur Vägerust kan användas samt om det med fördel kan användas tillsammans med kalkylprogrammet Vägboatnad.

Holmen vägboatnad 1.5 är ett geografiskt analysverktyg för planering av skogsbilvägbyggnad. Programmet ger användaren vägledning om var i terrängen nybrytning är lämplig att utföra. Holmen vägboatnad är en vidareutveckling av Skogforsk vägboatnad, med utökad funktionalitet och anpassning till Holmen Skogs specifika datastruktur.

Projektet Vägerust startades under våren 2003 och syftade till att utveckla en prototyp till ett beslutsstöd för vägupprustningar. Utvecklingen drevs som ett samarbete mellan Skogforsk, Linköpings universitet och de fyra största skogsbolagen, Holmen Skog, SCA, Stora Enso Skog samt Sveaskog. I projektet skall två fallstudier genomföras och dessa skall syfta till att testa prototypen samt göra skarpa analyser av vägupprustningsmöjligheter. Den första fallstudien genomfördes vid Stora Enso Skog, Hagge distrikt och omfattade ett mindre block av distriktet ca:1100 bestånd. Upprustningsplanen berörde tiden 2003-2013 fördelat

på två femårs perioder. Studien föll ut väl och visade på mycket låga upprustningskostnader, < 0,9 kr/m<sup>3</sup>.

För Holmen Skog är det i nuläget känt att det befintliga vägsystemet inte håller en tillräckligt bra standard för att klara virkesflödet under förfallsperioderna. På distrikt Bredbyn extra behandlas årligen ca: 4000 m<sup>3</sup>fub för att klara flödet under tjällossning (Norgren 2006, pers. medd). Extra behandling i form av skotning och lagring bedöms kosta ca: 35 kr/ m<sup>3</sup>fub (Norgren 2006, pers. medd.), vilket är en drastisk skillnad jämfört med resultatet från tidigare utförd pilotstudie vid Stora Enso.

Förutom att för Holmen Skogs räkning testa och utvärdera beslutsstödet Vägrust kommer denna studie att utgöra den andra fallstudien i projektet. Till skillnad från den första fallstudien skall det nu testas om prototypen är praktiskt tillämpbar på ett helt distrikt. Det är ännu oklart huruvida optimeringsmodellen klarar av att hantera ett större antal bestånd och vägar. Det är först efter en sådan studie som en trovärdig utvärdering av Vägrust kan genomföras.

### ***Syfte***

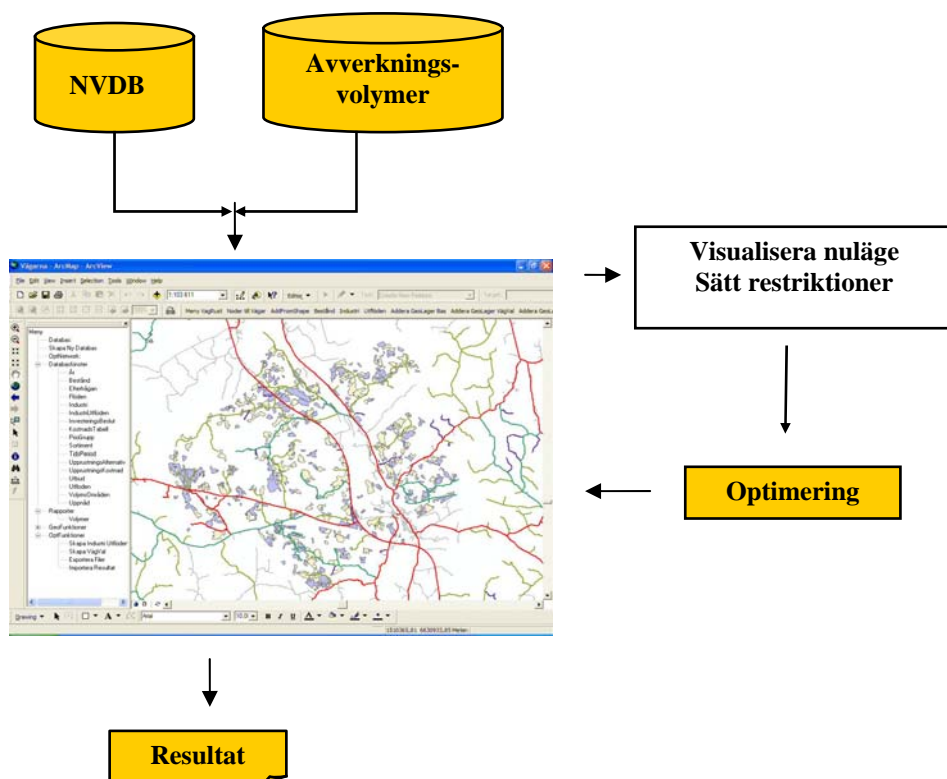
Syftet med denna studie var att undersöka funktionaliteten i beslutsstödet Vägrust, såväl ur ett ekonomiskt som ett praktiskt perspektiv. Kan Vägrust användas, med avseende på omfattning, för att upprätta en vägupprustningsplan löpande på 10 år för Holmen Skog, distrikt Bredbyn?

Studiens resultat ska ligga till grund för en diskussion med personal från Holmen Skog där följande frågor ska beröras:

- Hur kan Vägrust integreras i det praktiska arbetet på distriktet?
- Hur skulle Vägrust och Vägboatnad kunna användas tillsammans?

## Material och metoder

Studien har genomförts genom att först skapa förutsättningar för att göra en optimering möjlig. Detta har inneburit insamling, bearbetning och kvalitetssäkring av väg samt beståndsdata. Efter denna process användes materialet i Vägrust för att skapa en optimerad upprustningsplan för distrikt Bredbyn (figur 1).



**Figur 1.** Studiens upplägg  
*Figure 1.* The plan of the study

### Indata

Programmet behöver följande indata/information för att generera ett upprustningsförslag samt kostnad för upprustningen:

- **Väginformation för försöksområdet**
- **Beståndsattribut**
  - Bestånds ID
  - Centrumkoordinat
  - Beräknat volymutfall/sortiment
- **Restriktioner/Styrparametrar**
  - Hur stor del av året respektive väglklass får användas
  - Kostnad för olika upprustnings alternativ



- **Information om aktuella mottagare**
  - Volym/industri/period
  - Industrins geografiska läge

## Vägar

Nödvändig väginformation utgjordes av vägnätets sträckning d.v.s. dess geografiska läge, väghållare, den enskilde vägnodens längd samt tillgänglighetsklass. Denna information hämtades från NVDB (NationellaVägDataBasen).

För att minimera datamängden har försöksområdet definierats så att ingen ”onödig” vägdata har behandlats. Definitionen utgjordes av två shape-filer, en där alla planerade avverkningar inom distrikt Bredbyn för kommande tio års period visualiserades samt en fil där alla för perioden aktuella industrier är markerade med en punkt. Utifrån dessa shape-filer tankades sedan berörda vägar ned från NVDB. Dataformatet i NVDB utgörs av sk nvd-filer och för att kunna använda den informationen i Vägrust var dessa filer tvungna att konverteras om till shape format.

Nedtankningen från NVDB och konverteringen från nvd till shape gjordes med hjälp av Mikael Frisk på Skogforsk i Uppsala.

Beroende på fel eller bristande information i NVDB var en kvalitetssäkring nödvändig. Denna bestod av att tillsammans med vägansvarig på distriktet Christer Hållberg visuellt granska vägnätet och rätta till fel och komplettera de brister som förekom.

## Bestånd

Beståndsdata bestående av fyra shape-filer genererades från Holmen Skogs avverkningsberäkning och tillhandahölls av Skogstekniska avdelningen vid Holmens Skog i Örnköldsvik. I Holmen Skogs avverkningsberäkning går det att utläsa planerad avverkningsåtgärd per bestånd de kommande femtio åren, fördelat på tio femårsperioder. Avverkningsåtgärderna är indelade i F(fröträd), S(skärm), K(kalavverkning) samt G(gallring). I denna studie ingår endast bestånd med planerad avverkning de kommande tio åren dvs de två första femårsperioderna. Således utgjordes de fyra shape-filerna av gallring första femårsperioden, slutavverkning (F,S,K) första femårsperioden samt gallring och slutavverkning för andra femårsperioden. För att underlätta inmatningen i Vägrust och hantering av data slogs dessa samman i ArcGis till två filer, en per femårsperiod. Efter att beståndsfilerna var sammanslagna exporterades attributtabellerna till Excel för vidare bearbetning. Totalt berörde studien 4853 bestånd fördelat enligt tabell 1.

**Tabell 1.** Beståndens fördelning mellan period och avverkningsform  
*Table 1. Distribution of stands per period and type of harvest*

Åtgärd	1:a perioden	2: perioden
Gallring	1264	1203
Slutavverkning	1272	1114

## Utbytesberäkning

För utbytesberäkning av bestånden användes Rune Ollas utbytesfunktion för utbyte per m<sup>3</sup>sk (Lendrup, Nilsson, Ollas, 1993). För att kunna använda denna funktion behövs följande beståndsdata:

- Areal, ha
- Grundyta per trädslag, m<sup>2</sup>/ha
- Höjdklass per trädslag
- Grundytavägd medeldiameter (Dgv), cm

Utöver detta behövdes också min. toppdiametern för timmer respektive massaved fastställas. Utbytesberäkningen genomfördes därefter i två steg.

**Steg 1:** Fastställ beståndets höjdklass trädslagsvis

**Steg 2:** Avläs omräkningstal i utbytestabell

Utbytesberäkningar genomfördes i Excel och gjordes för varje bestånd i respektive åtgärdsklass, G och S(F,S,K). I utbytesberäkningen är ingen hänsyn tagen till lämnad volym, exempelvis för frö- eller skärmträd. Uttaget i gallring sattes till 25% av volymen. Volymen per bestånd räknades upp med den årliga tillväxten ggr 2 respektive 5 för första och andra femårsperioden. Min. toppdiametern sattes till 12 cm för timmer och 5 cm för massaved. Volymutfallet fördelat per sortiment och femårsperiod räknades sedan samman. (Tabell 2).

För att minimera datamängden rensades sedan attributtabellerna på all information som inte var nödvändig i det fortsatta arbetet. Efter rensningen bestod tabellerna av information om beståndens geografiska läge (centrum koordinat), beståndens geometri samt utbytesberäkningen/bestånd. Slutligen exporterades filerna tillbaka till ArcGis för vidare bearbetning i Vägrust.

**Tabell 2.** Planperiodens beräknade utfall fördelat på sortiment TT, GT, BM, LM

*Table 2. The estimated yield per assortment during the planning-periods TT, GT, BM, LM*

	Utbyte i m <sup>3</sup> fub				Totalt
	TT	GT	BM	LM	
<b>1:a perioden</b>	329281	188430	654170	98857	1270738
<b>2:a perioden</b>	226066	213429	689227	114833	1243555
<b>Totalt</b>	555347	401859	1343398	213690	2514293
<b>Per år</b>	55535	40186	134340	21369	251429

## Restriktioner och styrparametrar

### Tillgänglighet

I Vägrust är det inte möjligt att ange tiden för förfallsperioden utan istället sätts restriktioner för hur olika vägklasser måste användas. Denna definieras genom att ange antal veckor/år då lägst en viss vägklass kan användas. Om exempelvis tjällossningen varar i 6 veckor blir restriktionen att 6/52 av volymen måste transporteras på tjälsäkrade vägar. Liknade fördelning görs på respektive vägklass, dvs antal veckor/år då minst B, C och D vägar måste användas. Vilken tillgänglighetsfördelning som gäller för denna studie redovisas under "känslighetsanalys".

**Tabell 3.** Klassindelning för grusvägar med avseende på tillgänglighet

*Table 3. Forest-road classification with respect to accessibility*

<b>Tillgänglighetsstandard – gäller fullastad virkesbil</b>	
Klass A	Farbar hela året
Klass B	Farbar hela året utom under tjällossning
Klass C	Farbar hela året utom under tjällossning och ihållande regnperioder
Klass D	Farbar när det är tjälat

### Upprustningskostnad

Upprustningskostnaden definierades som kr/m för möjliga upprustningsalternativ och fungerar som en styrparameter i optimeringsmodellen för att finna de billigaste vägvalen från beståndet till industrin. Kostnaden för upprustning (tabell 4) bygger på en uppskattning gjord av Holmen Skogs vägmästare (Ahlenius 2006, pers. medd.).

**Tabell 4.** Uppskattad upprustningskostnad för skogsbilväg

*Table 4. Estimated improvement costs for forest roads*

<b>Från</b>	<b>Till</b>	<b>Kr/m</b>
B	A	40
C	A	55
D	A	75
C	B	35
D	B	50
D	C	25

### Industrier

I studien räknas det med att alla volymer ska transporteras ut under respektive tidsperiod. Därför fick utbudet per sortiment och tidsperiod motsvara det totala industribehovet. Fördelningen mellan industrierna utgick ifrån en procentuell fördelning per sortiment under 2006. För varje industri upprättades en behovstabell där volymen per sortiment och tillgänglighetsklass per period angavs (tabell 5 och bilaga 1).

**Tabell 5.** Exempel på Husums massavedsbehov under första femårsperioden fördelat på tillgänglighetsklass.

*Table 5. Example of the distribution of pulpwood demand per assortment and accessibility class of Husum during the first five year period*

<b>Industri</b>	<b>Volym</b>	<b>Sortiment</b>	<b>Tillgänglighetsklass</b>	<b>Period</b>
Husum	2000	GM	A	Första
Husum	1000	GM	B	Första
Husum	1500	GM	C	Första
Husum	4000	GM	D	Första

För att inte optimeringen skulle bli mer komplicerad än nödvändigt togs inte de minsta kvantiteterna med. Dvs eventuella specialsortiment som inte var av vikt för distriktet eller endast uppgick till några hundra kubik under planperioden. Antalet sortiment i Vägrust kan max vara fem. I denna studie ingick följande sortiment talltimmer (TT), grantimmer (GT), barmassa (BM), lövmassa (LM) (tabell 6).

**Tabell 6.** I studien förekomna sortiment fördelade på mottagare

*Table 6. Assortments per receiver represented in the study*

<b>Industri</b>	<b>Sortiment</b>
FS Kaj	TT
Bollsta	TT
Höglands såg	GT
Älgsjö såg	GT
Husum	BM, LM
Domsjö	BM

### ***Känslighetsanalys***

Genom att upprätta tre upprustningsplaner som byggde på exakt samma indata men med skillnader i restriktionen för tillgänglighet kan en jämförelse mellan förfallsperiodens längd göras. De förfallsperioder som jämfördes är 4, 6 och 8 veckor. På distrikt Bredbyn är 6 veckors tjällossning per år ett troligt snitt på en 10 års period (Norgren 2006, pers. medd.).

Eftersom industrin håller stängt under en månad per år måste årsvolymen transporteras ut under 48 veckor. Då upprustningsplanen gäller för en tioårsperiod fördelad på två femårsperioder innebär det således att industrins behov per femårsperiod skall transporteras ut under totalt 240 veckor (48 veckor \* 5 år). Följaktligen har restriktionen för tillgänglighet angetts i hur många veckor per femårsperiod olika vägklasser måste användas. Fördelningen mellan olika tillgänglighetsklasser utgår ifrån användandet av A-klassade vägar och därefter har en trolig fördelning mellan övriga tillgänglighetsklasser gjorts utifrån erfarenhetstal från distriktet (Norgren 2006, pers. medd.) enligt tabell 7.

**Tabell 7.** Restriktion för tillgänglighet. Tabellen anger antal veckor per år då lägst en viss tillgänglighetsklass måste användas

*Table 7. The restrictions of accessibility. Yearly amount of weeks when a certain type of accessibility class has to be used*

Tjällossning	4v.	6v.	8v.
Femårsperiod	1 & 2	1 & 2	1 & 2
A	20	30	40
B	55	55	55
C	95	90	85
D	70	65	60
	240	240	240

### ***Inmatning och optimering***

Fram till detta skede har arbetet syftat till att skapa förutsättningar för en optimering dvs data har införskaffats och anpassat till en struktur lämplig för fortsatt arbete i Vägrust. Därefter skickades all data till Mikael Frisk på Skogforsk i Uppsala. Inmatning i programmet gjordes enligt följande arbetsordning:

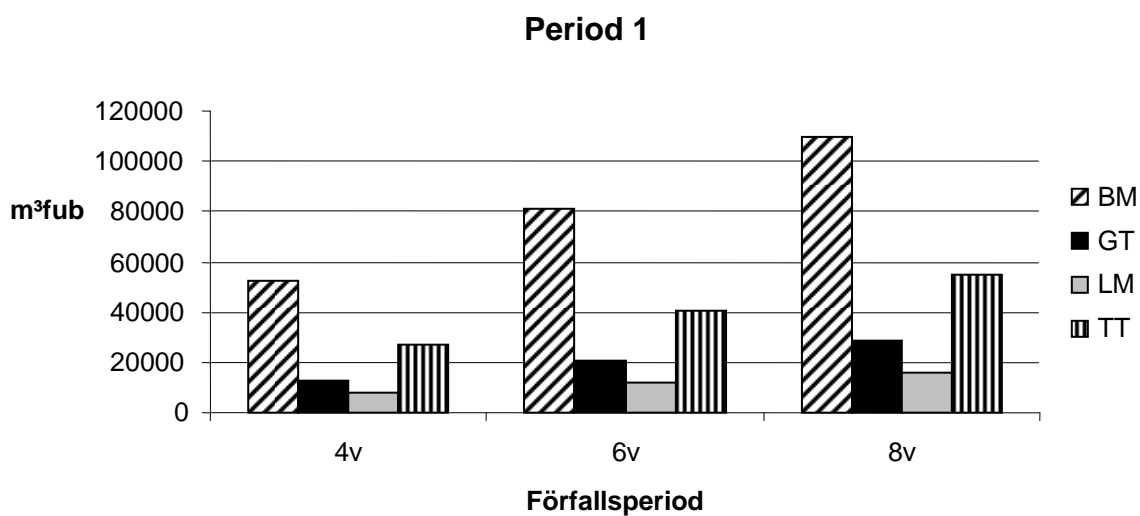
- 1: Import av data – Vägar, bestånd, industrier och restriktioner
- 2: Spatial Join – Varje bestånd kopplas till närmsta väg
- 3: Dissolve – De bestånd som kopplar till samma väg slås samman till ett och samma bestånd
- 4: Koppla industri – Varje industri kopplas till närmsta tjälsäkra väg
- 5: Restriktion för upprustning – Alla vägar som man i optimeringen inte kan eller vill rusta anges som icke investerbara exempelvis, statliga, kommunala eller vägar som ägs av andra skogsbolag.
- 6: Skapa vägval – Vägval skapas från varje bestånd till varje industri
- 7: Export av data – Data exporteras till optimeringsmodellen

Optimeringen genomfördes av Mathias Henningsson vid Linköpings Universitet. Inför optimeringen programmerades en ny optimeringsmodell som arbetar med färre variabler och därmed lite snabbare än den som tidigare har använts. Dessvärre finns det ännu ingen dokumentation som beskriver den nya modellen. Principen för hur en liknande modell fungerar beskrivs i bilaga 2 (Henningsson, M., Karlsson, J. & Rönnqvist, M. 2004. Mixed integer programming models to support tactical forest road upgrade planning. Department of Mathematics. Linköping Institute of Technology. Linköping. Tech. Rep. No. LiTH-MAT-R-2004-20). Optimeringen som låg till grund för resultatet är en s.k. näroptimering d.v.s. att upprustningsplanen är optimerad till 99 %. Detta innebär att det kan finnas en bättre lösning än vad som presenteras i resultatet.

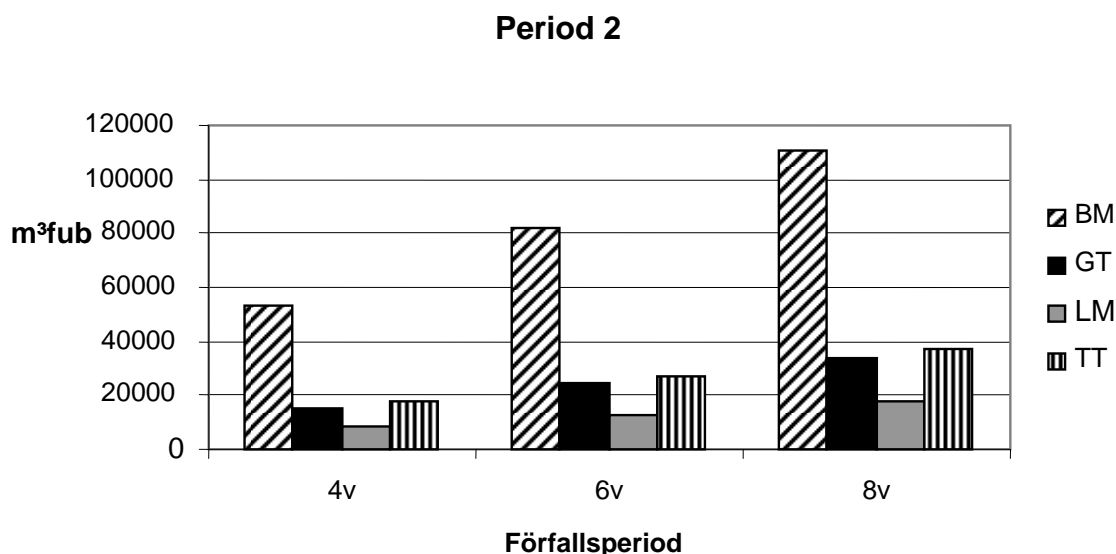
## Resultat

### *"Visualiserat nuläge"*

Genom att jämföra volymen från de bestånd som kopplar mot A-klassade vägar, steg 2 i inmatningsprocessen, med efterfrågad volym under tjällossning går det att se vilka sortiment som utgör en brist med dagens vägstandard, (figur 2 & 3). Skillnaden mellan första och andra femårsperioden är marginell. BM är det sortiment som utgör störst brist för distrikt Bredbyn kommande tioårsperiod.



**Figur 2.** Saknad volym/sortiment under första femårsperioden för respektive förfallsperiod.  
*Figure 2.* Lack of volume/assortment per decay/thaw-period during the first five year period.



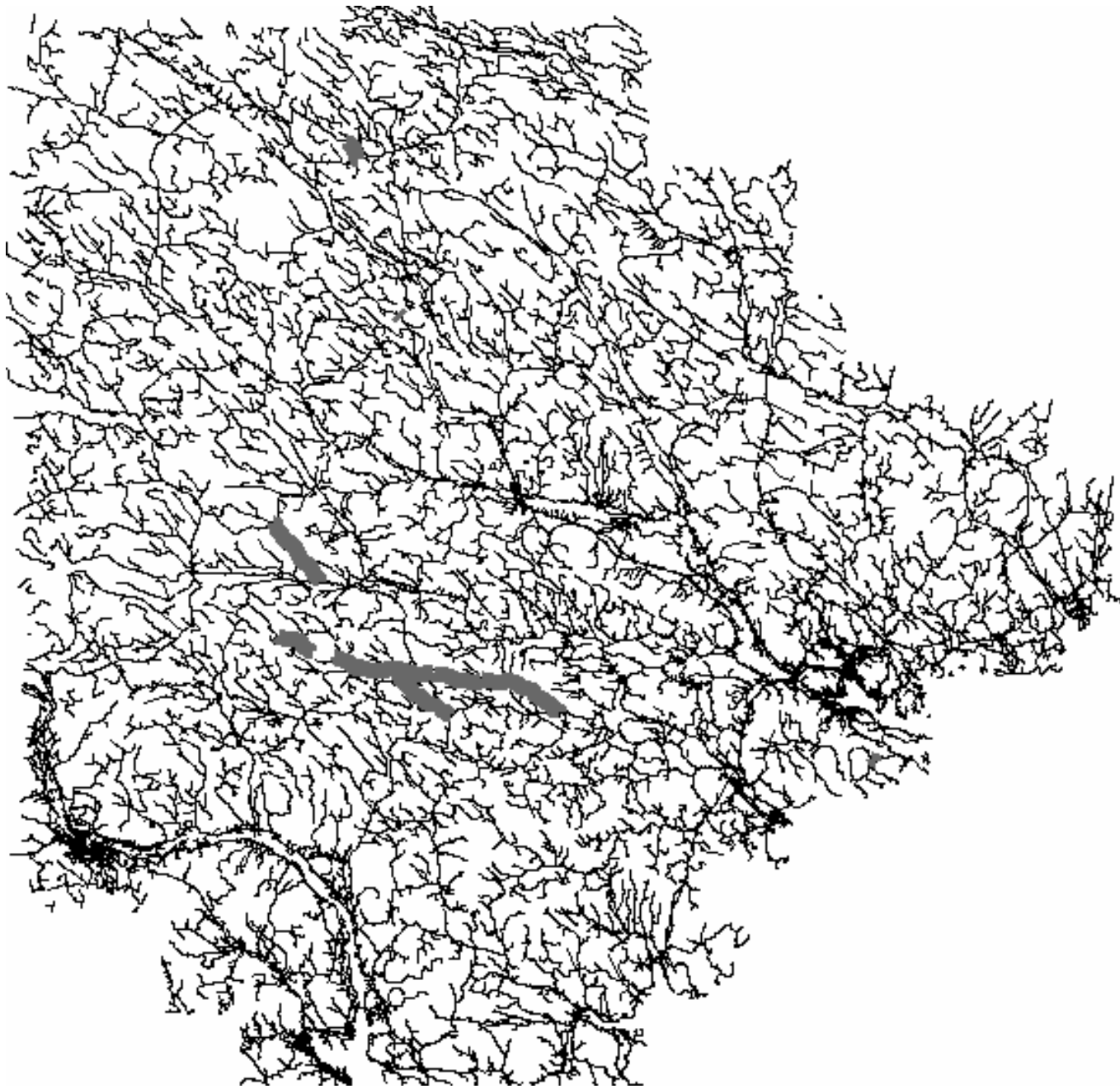
**Figur 3.** Saknad volym/sortiment under andra femårsperioden för respektive förfallsperiod.  
**Figure 3.** Lack of volume/assortment per decay/thaw-period during the second five year period.

### *Upprustningsförslag*

I en övervägande del av upprustningsförslagen föreslår optimeringsmodellen upprustning från B till A klass och endast ett fåtal förslag från C till A, inga andra upprustningsalternativ föreslås. Skillnaden i upprustad väglängd mellan 6 och 8 veckors förfallsperiod är 174 meter samt mellan 4 och 8 veckors förfallsperiod 9859 meter, enligt tabell 8. Det förekommer ingen geografisk skillnad i upprustningsförslagen mellan de olika förfallsperioderna utan endast skillnad i upprustad väglängd (figur 4, 5 och 6).

**Tabell 8.** Optimeringens upprustningsförslag fördelat på upprustningsalternativ/förfallsperiod  
**Table 8.** Proposed road improvement according to the optimization model per period length with thaw-period and improvement alternative

	4 veckor	6 veckor	8 veckor
B – A (m)	45045	54730	54730
C – A (m)	34	34	208
Totalt (m)	45079	54764	54938



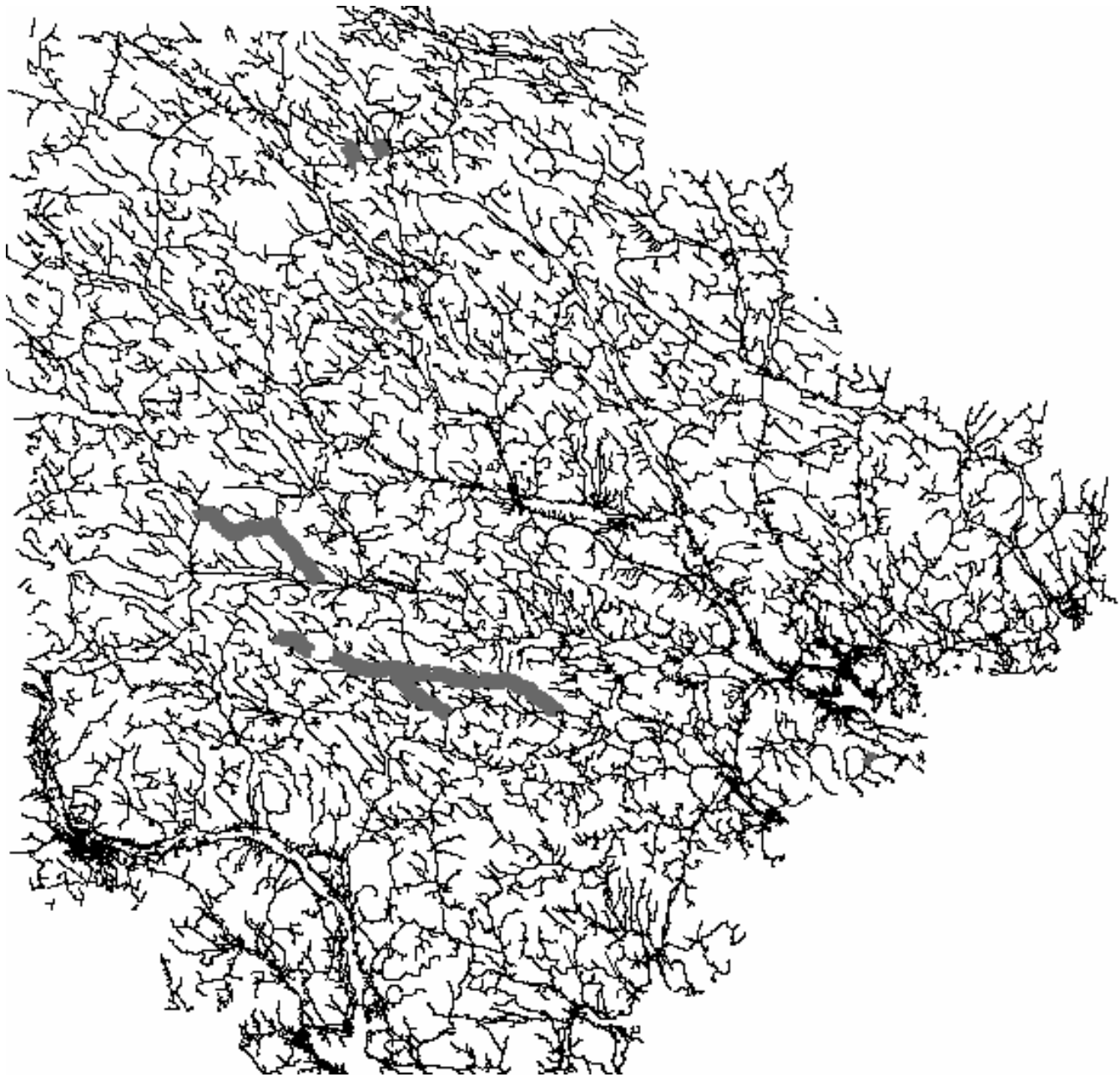
**Figur 4.** Vagnätet inom försöksområdet

— Vägar som föreslås upprustning vid 4 veckors förfall.

**Figure 4.** Road network of the study area

— Proposed roads for improvement when 4 weeks of decay/thaw.



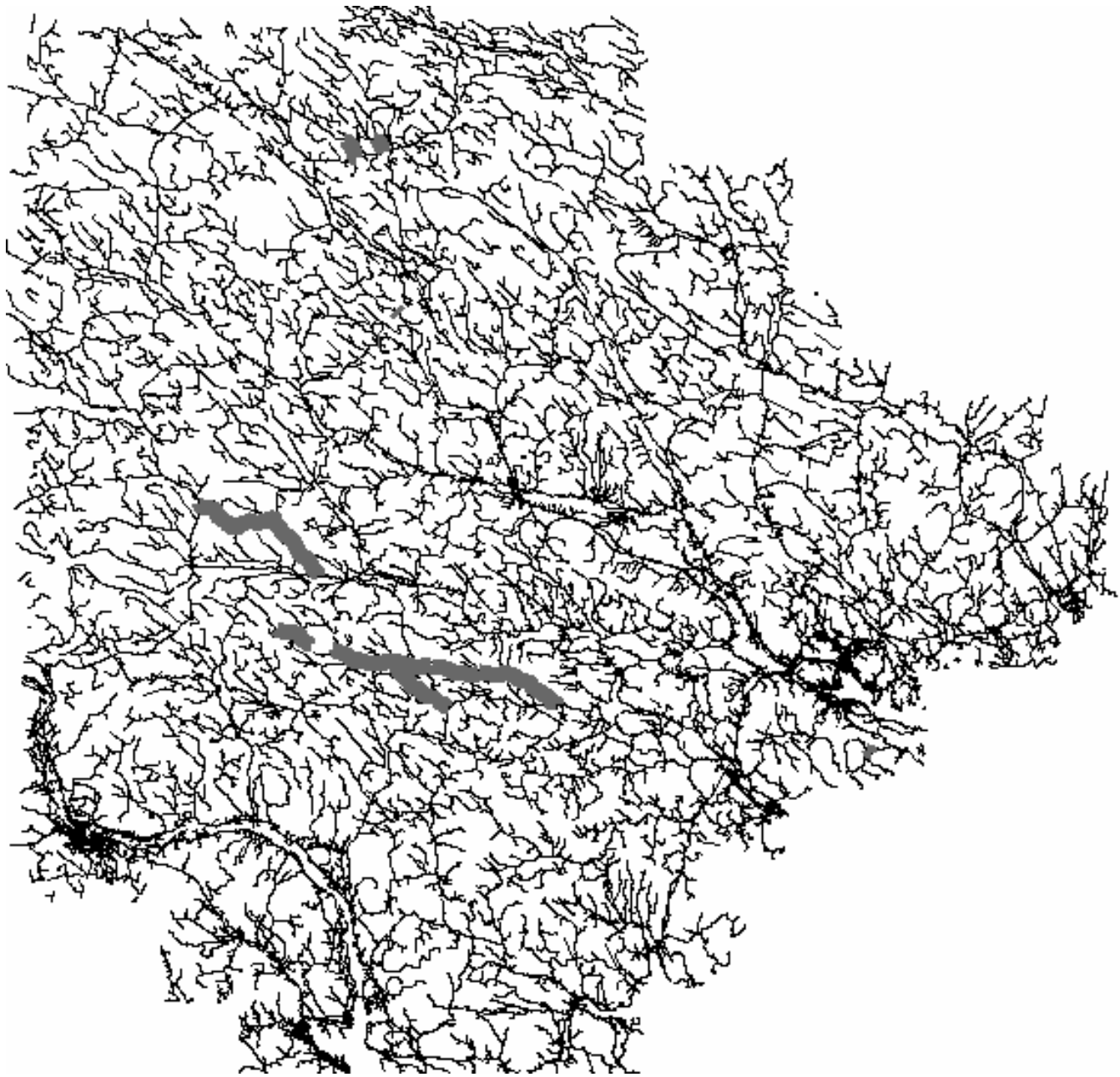


**Figur 5.** Vägnätet inom försöksområdet

— Vägar som föreslås upprustning vid 6 veckors förfall.

**Figure 5.** Road network of the study area

— Proposed roads for improvement when 6 weeks of decay/thaw.



**Figur 6.** Vägnätet inom försöksområdet

— Vägar som föreslås upprustning vid 8 veckors förfall.

**Figure 6.** Road network of the study area

— Proposed roads for improvement when 8 weeks of decay/thaw.

## Kostnader

Resultatet visar på små skillnader mellan totalkostnaden för de olika förfallsperioderna (tabell 9). Vidare visar resultatet att det inte blir dyrare per m<sup>3</sup>fub att rusta för en längre förfallsperiod (tabell 10). Alternativkostnaden (tabell 9) utgörs av kostnaden för att extra behandla, dvs lunna och lagra, hela den saknade volymen för planperioden. Kostnaden för extra behandling är uppskattad till 35 kr/m<sup>3</sup>fub (Norgren 2006, pers. medd.).

**Tabell 9.** Kostnaden för upprustningsförlagen redovisat per förfallsperiod och upprustningsalternativ

*Table 9. Cost of improvement per decay/thaw period and improvement alternative*

	<b>4 veckor</b>	<b>6 veckor</b>	<b>8 veckor</b>
B – A (Kr)	1 892 119	2 279 679	2 279 679
C – A (Kr)	1 877	1 877	11 477
Totalt (Kr)	1 893 996	2 281 556	2 291 112
Alternativkostnad (Kr)	6 838 055	10 548 055	14 258 160

**Tabell 10.** Kostnaden fördelad på frigjord volym för respektive upprustningsplan. Marginalkostnaden utgörs av merkostnaden fördelad på frigjord volym

*Table 10. The costs of each improvement-plan distributed on harvested volume per year. The marginal-cost is the additional-cost of released volume*

	<b>4 veckor</b>	<b>6 veckor</b>	<b>8 veckor</b>
Kostnad/m <sup>3</sup> fub	9,7	7,6	5,6
Marginalkostnad	-	3,6	0,1

## Diskussion

### *Indata*

Värdet av resultatet i en optimering är till stor del direkt sammankopplat med kvalitén på det indata som används. Kvalitetssäkring av data har genomförts i den utsträckning som varit möjlig och praktiskt hanterbar. Studien bygger i huvudsak på tre sorters indata, vägar, bestånd och kommande industribehov.

Kvalitetssäkring av vägarna genomfördes genom att granska och uppdatera NVDB data tillsammans med vägensvarig på distriktet. Därmed utgjorde den lokala bedömningen grunden för kvalitén på vägdata. Enligt Stridsman (2006) avviker inventerad vägstandard mot lokalt bedömd vägstandard i 50 % av fallen inom region Örnsköldsvik. I samtliga fall där avvikelser förekom har inventeringen en lägre standard än lokal bedömning. 40 % av vägarna höll enligt inventeringen minst en väglag lägre än vad som angavs i SNVDB. Naturligtvis påverkas studien till viss del av detta faktum, men hur mycket är svårt att avgöra. Distrikt Bredbyn, som tillhör region Örnsköldsvik, anses inom företaget ha mycket god ordning på sitt vägnät. Därför är det skäligt att anta att det enskilda distriktet mycket väl kan göra en bättre lokal bedömning jämfört med regionen i sin helhet.

Beståndsdata som hämtades från Holmen Skogs avverkningsberäkning bedömdes i sig inte avvika på något avgörande sätt. En möjlig felkälla kan vara att det i avverkningsberäkningen figurerar bestånd som inte faller ut inom planperioden. De förenklingar som gjordes i utbytesberäkningen påverkar i allra högsta grad det enskilda beståndet, men sett till helheten bör utbytesberäkningen stämma väl med det förväntade utfallet på distriktet kommande 10 års period. Utan denna typ av förenklingar skulle det inte vara praktiskt hanterbart att genomföra optimeringen på distriktsnivå. Optimeringsmodellen utgår från att samtliga bestånd kan drivas oavsett årstid och att det endast är vägnätet som utgör begränsningen. Naturligtvis ser verkligheten annorlunda ut och troligtvis kommer beståndens bärighet att utgöra en begränsning. Genom att analysera de bestånd som kopplar till A-klassade vägar under första och andra femårsperioden (steg 2 i arbetet med Vägrust), framgick det att 45% av bestånden i första femårsperioden och 39% av bestånden i andra femårsperioden inte bör avverkas under tjällossning. Frågan är hur många av dessa bestånd som inte kan avverkas under tjällossning och hur det påverkar volymen? Om det är praktiskt omöjligt att komma åt en större del av de föreslagna bestånden, vilket värde har då upprustningsplanen? Det borde betraktas som en brist att upprustningsplanen inte tar hänsyn till det enskilda beståndets bärighet. Inte bara för att det kan skilja mycket mellan de teoretiskt beräknade volymerna och praktiskt greppbara volymerna, utan också för att det kan bli mycket dyrt att avverka ett bestånd i fel årstid. Dyrt såväl ur ett ekonomiskt- som biologiskt perspektiv.

Indata rörande kommande industribehov bygger helt på gjorda antaganden och utgick ifrån leveransplanen 2006. Hur det kommer att se ut om tio år är naturligtvis omöjligt att veta och att gissa en trolig utveckling torde vara lika fel eller rätt som att utgå från dagens situation. Skulle det ske förändringar gällande ett specifikt sortiment och mottagare, kommer det inte att påverka upprustningsplanen så länge den totala volymen för sortimentet stämmer. Skulle mottagare tillkomma eller försvinna under planperioden bör det inte heller utgöra någon förändring i planen. Detta beror på att de flesta industriernas

geografiska läge är vid eller i närheten av större vägar och att upprustningsförslagen oftast berör vägar långt ut i vägnätet, dvs vägar som ligger långt ifrån industrin. Det som skulle kunna ställa till problem är om efterfrågan på ett sortiment skulle öka under en viss tidsperiod. Exempelvis om efterfrågan på BM skulle öka med 15 % under tjällossningsperioden för år 6-8. Då skulle det i teorin kunna innebära att genomförda upprustningar inte skulle vara tillräckliga för att tillgodose behovet.

## ***Resultat***

Inte helt oväntat ligger resultatet i linje med tidigare utförd fallstudie och visar på en relativt låg upprustningskostnad för planperioden. Trots att studien bygger på några förenklingar och antaganden är kostnaden så pass låg att det finns utrymme för eventuella avvikelser. De upprustningsförslag som genererades från Vägrust var inte främmande för distriktspersonalen utan bekräftade snarare deras kunskap. Således bekräftas också kvaliteten på upprustningsförslagen.

Intressant i resultatet är att skillnaden mellan 4, 6 och 8 veckors förfallsperiod är försvinnande liten. Exempelvis är marginalkostnaden mellan 4 och 8 veckor dvs merkostnaden dividerad med den frigjorda volymen endast 3,7 kr/m<sup>3</sup>fub. Därmed kan det anses vara billigt att försäkra sig inför längre förfallsperioder. Denna kostnad skall ställas mot de 35 kr/m<sup>3</sup>fub (Ahlenius 2006, pers. medd.) för extra skotning och lagring vid brist på tillgängligt virke. Trots att det är dubbelt så mycket volym som ska transporteras ut under 8 veckor jämfört med 4 veckor skiljer det inte mycket mellan de olika upprustningsförslagen. Programmet väljer att upprusta i samma geografi men med skillnad i upprustad väglängd. Detta kan antas bero på en stor virkeskoncentration och/eller ett starkt vägnät i just den geografin.

I huvudsak har programmet föreslagit upprustning från vägklass B till A och endast i ett fåtal fall från vägklass C till A. Vilka upprustningar som programmet väljer styrs dels av vilken volym som ska transporteras på vägen och dels av kostnaden för olika upprustningsalternativ. I studien har det inte tagits hänsyn till den enskilda vägens avstånd till närmsta täkt. Detta innebär att kostnaden är den samma för att upprusta från en vägklass till en annan oavsett om vägen ligger 100 m eller 10 000 m från närmsta täkt. I praktiken kan det vara så att kostnaden för att rusta från C till A kan vara den samma som att rusta från B till A om den C-klassade vägen ligger vid eller i närheten av en täkt. Genom att öka eller minska differensen mellan olika upprustningsalternativ borde de gå att få programmet att välja annorlunda. En annan lösning är att öka precisionen i kostnaderna genom att i ArcMap mäta hur långt varje väglänk har till närmsta täkt och utifrån det anpassa kostnaden för upprustning av respektive länk. Inom distrikt Bredbyn finns det förhållandevis många täkter och därmed också anledning att anta att upprustningsförslagen skulle ha sett annorlunda ut om hänsyn tagits till dessa.

## ***Utvärdering***

Glädjande kan det konstateras att optimeringen lyckades. Innan studien var det oklart huruvida det var möjligt att upprätta en upprustningsplan för ett distrikt i Vägrust eller ej. Resultatet anses av Holmen Skog och Skogforsk vara godkänt och något som är till nytta

för skogsföretaget. Viktigt att komma ihåg är att kvalitén på indata och kanske i förstahand vägdata i allra högsta grad styr optimeringens resultat. I de fall där upprustningsförslagen verkar konstiga eller inte överensstämmande med distriktspersonalens uppfattning går det oftast att härleda detta till inställningar i programmet eller till felaktig indata. Några av de konstiga upprustningsförslagen kan dock härledas till att upprustningsplanen är näroptimerad. Då dessa upprustningsförslag pga. av sin orimlighet är lätta att lokalisera, påverkar de inte resultatet nämnvärt.

Att Vägrust är ett beslutstöd som Holmen Skog har stor nytta av råder det inga tvivel om. Ett färdigutvecklat beslutstöd skulle underlätta för vägansvarig på distrikt- eller regionsnivå att fatta ekonomiskt korrekta beslut. Även på de distrikt där det redan idag existerar en bra väghållning skulle en optimerad upprustningsplan medföra en bättre överblick samt stimulera förmågan att finna alternativa lösningar. En fortsatt satsning på Vägrust förutsätter en vidareutveckling av programmet. I projektbeskrivning för Vägrust framgår det att "Syftet med projektet är att utveckla en prototyp till ett beslutstöd för vägupprustning". En prototyp är just vad Vägrust är idag vilket innebär att det krävs en del handpåläggning för att åstadkomma ett användbart resultat. Tillsammans utgör Vägrust och optimeringsmodellen en mycket bra grund för en fortsatt utveckling av ett vägförvaltningssystem. Det framtida systemets utformning styr till vilken grad och hur Vägrust skall utvecklas.

En del av studiens syfte var att tillsammans med Holmen Skog diskutera hur Vägrust kan integreras i det praktiska arbetet på distriktet samt hur Vägrust och Vägboatnad kan användas tillsammans. Diskussionen mynnade ut i några konkreta förslag och ett antal önskemål om hur det borde kunna vara. Den starkaste synpunkten från distriktspersonalen var att det borde finnas möjlighet att jämföra olika upprustningsalternativ exempelvis genom att genomföra flera körningar med olika förutsättningar. Det framkom också önskemål om att lättare få en helhetsbild av kostnaden. Vägrust genererar en optimerad upprustningsplan inte en optimerad helhetslösning. Om upprustningsplanen slaviskt följs kan det för distriktet innebära att en stor andel A klassade vägar måste byggas för att få fram virket till en rimlig kostnad. Det finns i nuläget inget bra sätt att få en helhetsbild av kostnaden samt möjlighet att jämföra alternativa lösningar. Vilket i en förlängning innebär att det trots beslutstödens hjälp är upp till den enskilde tjänstemannen att subjektivt hitta det mest ekonomiska alternativet. Med anledning av det sist nämnda vore det därför önskvärt om det inom ramen för samma program/beslutstöd gick att hantera både nybyggnation och upprustning.

### **Förslag till arbetsordning vid upprättande av vägplan**

Vägplanens omfattning bör i första hand styras av hur väl det går att förutse kommande virkesbehov. Planen bör med avseende på datamängd inte omfatta mer än två femårsperioder. Då även nybyggnation skall planeras bör arbetet påbörjas 3-4 år innan planperioden.

#### 1. Upprätta en vägupprustningsplan i Vägrust.

Datainsamling och kvalitetssäkring görs av vägansvarig på distriktet. Anpassa restriktionerna utifrån lokala förutsättningar exempelvis enskild vägs avstånd till täckt, terräng förutsättningar som medför att vissa bestånd inte kan kopplas till närmsta väg etc. Optimeringen genomförs på regionsstaben alternativt vid SkogForsk. Därefter utvärdera och analysera resultatet. I detta skede kan det vara lämpligt att se över vilka bestånd som

berörs av drivning under tjällossning. Om det förekommer bestånd som absolut inte går att driva under denna period måste antingen den tjälsäkra volymen reduceras eller så måste dessa bestånd plockas bort och en ny optimering genomföras.

## 2. Lokalisera nybyggnationer

I upprustningsplanen går det att lokalisera "tvingande" nybyggnationer, dvs nybyggnationer som måste genomföras för att få ut virket till en rimlig kostnad. Dessa kartläggs på kontoret och följs sedan upp i terrängen med en preliminär vägsträckning.

## 3. Båtnadsberäkning

Digitalisera den preliminära sträckningen i Vägboatnad och beräkna vägens kostnad. Här finns det möjlighet att variera sträckningen så att bästa nuvärde hittas.

## 4. Sammanställ

Färdigställ planen genom att sammanställa planperiodens alla nybyggnationer och upprustningar i ett GIS. Attributtabeln bör minst utgöras av väg-id, koordinat, planerad åtgärd, tidpunkt för åtgärd samt beräknad kostnad.

## **Slutsatser**

Holmen Skog AB skulle kunna sänka kostnaden för väghållning genom att använda en optimeringsmodell för upprustning.

Resultatet från optimeringen skulle kunna användas vid en dialog med andra väghållare ex vägverket.

Beståndens bärighet behandlas inte i Vägrust vilket kan medföra klara begränsningar.

Det är i nuläget tidskrävande och svårt att jämföra olika alternativ. Förutsatt att samma volym frigörs kan det i ett enskilt fall vara bättre att rusta en längre sträcka från C till A istället för att bygga en A klassad väg på annat håll.

## **Referenser**

### ***Skriftliga***

- Andersson, D., 2005. Approaches to Integrated Strategic/Tactical Forest Planning, Institutionen för skoglig resurshushållning och geomatik, Umeå. Rapport 16. Lic avhandling.
- Henningsson, M., Karlsson, J. & Rönnqvist, M. 2004. Mixed integer programming models to support tactical forest road upgrade planning. Department of Mathematics. Linköping Institute of Technology. Linköping. Tech. Rep. No. LiTH-MAT-R-2004-20,
- Jönsson, A. 2001, Beräkning av skogsnäringens merkostnader till följd av bristande vägstandard, Skogforsk, Uppsala, Arbetsrapport, Nr 473
- Lendrup, L., Nilsson, G., Ollas, R., 1993. Utbytes tabeller norra Sverige, Forskningsstiftelsen Skogsarbeten Kista, 1 vol.
- Stridsman, A., 2006. Kvalitet på vägdata. Inst f skoglig resurshushållning och geomatik, SLU. Umeå. Studentuppsatser Skogsteknologi nr 85.

### ***Muntliga***

- Ahlenius, S., 2006. Holmen Skog, Lycksele
- Frisk, M., 2006-2007. Skogforsk, Uppsala
- Norgren, O., 2006. Holmen Skog, Bredbyn



## Bilagor

### *Bilaga 1*

Behov för respektive industri och scenario.

**Tabell 11.** Behov för respektive industri vid 4 veckors förfall  
*Table 11.* Need for each industry with 4 weeks of decay/thawing

<b>Industri</b>	<b>Volym</b>	<b>Sortiment</b>	<b>Tillgänglighetsklass</b>	<b>Period</b>
FS Kaj	6858	TT	A	1:a
FS Kaj	18859	TT	B	1:a
FS Kaj	32575	TT	C	1:a
FS Kaj	24003	TT	D	1:a
FS Kaj	4709	TT	A	2:a
FS Kaj	12951	TT	B	2:a
FS Kaj	22370	TT	C	2:a
FS Kaj	16483	TT	D	2:a
Bollsta	20574	TT	A	1:a
Bollsta	56578	TT	B	1:a
Bollsta	97726	TT	C	1:a
Bollsta	72008	TT	D	1:a
Bollsta	14128	TT	A	2:a
Bollsta	38852	TT	B	2:a
Bollsta	67109	TT	C	2:a
Bollsta	49448	TT	D	2:a
Högländ	10674	GT	A	1:a
Högländ	29353	GT	B	1:a
Högländ	50701	GT	C	1:a
Högländ	37358	GT	D	1:a
Högländ	12094	GT	A	2:a
Högländ	33259	GT	B	2:a
Högländ	57448	GT	C	2:a
Högländ	42330	GT	D	2:a
Älgsjö	5023	GT	A	1:a
Älgsjö	13813	GT	B	1:a
Älgsjö	23859	GT	C	1:a
Älgsjö	17580	GT	D	1:a
Älgsjö	5691	GT	A	2:a
Älgsjö	15651	GT	B	2:a
Älgsjö	27034	GT	C	2:a
Älgsjö	19920	GT	D	2:a
Husum	31959	BM	A	1:a
Husum	87888	BM	B	1:a
Husum	151807	BM	C	1:a
Husum	111858	BM	D	1:a
Husum	32159	BM	A	2:a
Husum	88438	BM	B	2:a

Husum	152757	BM	C	2:a
Husum	112558	BM	D	2:a
Domsjö	25111	BM	A	1:a
Domsjö	69055	BM	B	1:a
Domsjö	119277	BM	C	1:a
Domsjö	87888	BM	D	1:a
Domsjö	25268	BM	A	2:a
Domsjö	69487	BM	B	2:a
Domsjö	120023	BM	C	2:a
Domsjö	88438	BM	D	2:a
Husum 2	8224	LM	A	1:a
Husum 2	22615	LM	B	1:a
Husum 2	39062	LM	C	1:a
Husum 2	28783	LM	D	1:a
Husum 2	9528	LM	A	2:a
Husum 2	26201	LM	B	2:a
Husum 2	45256	LM	C	2:a
Husum 2	33347	LM	D	2:a

**Tabell 12.** Behov för respektive industri vid 6 veckors förfall  
*Table 12.* Need for each industry with 6 weeks of decay/thawing

Industri	Volym	Sortiment	Tillgänglighetsklass	Period
FS Kaj	10287	TT	A	1:a
FS Kaj	18859	TT	B	1:a
FS Kaj	30861	TT	C	1:a
FS Kaj	22288	TT	D	1:a
FS Kaj	7064	TT	A	2:a
FS Kaj	12951	TT	B	2:a
FS Kaj	21192	TT	C	2:a
FS Kaj	15305	TT	D	2:a
Bollsta	30861	TT	A	1:a
Bollsta	56578	TT	B	1:a
Bollsta	92582	TT	C	1:a
Bollsta	66865	TT	D	1:a
Bollsta	21192	TT	A	2:a
Bollsta	38852	TT	B	2:a
Bollsta	63577	TT	C	2:a
Bollsta	45916	TT	D	2:a
Högländ	16011	GT	A	1:a
Högländ	29353	GT	B	1:a
Högländ	48032	GT	C	1:a
Högländ	34690	GT	D	1:a
Högländ	18141	GT	A	2:a
Högländ	33259	GT	B	2:a
Högländ	54424	GT	C	2:a
Högländ	39307	GT	D	2:a

Älgsjö	7534	GT	A	1:a
Älgsjö	13813	GT	B	1:a
Älgsjö	22603	GT	C	1:a
Älgsjö	16325	GT	D	1:a
Älgsjö	8537	GT	A	2:a
Älgsjö	15651	GT	B	2:a
Älgsjö	25611	GT	C	2:a
Älgsjö	18497	GT	D	2:a
Husum	47939	BM	A	1:a
Husum	87888	BM	B	1:a
Husum	143817	BM	C	1:a
Husum	103868	BM	D	1:a
Husum	48239	BM	A	2:a
Husum	88438	BM	B	2:a
Husum	144717	BM	C	2:a
Husum	104518	BM	D	2:a
Domsjö	37666	BM	A	1:a
Domsjö	69055	BM	B	1:a
Domsjö	112999	BM	C	1:a
Domsjö	81610	BM	D	1:a
Domsjö	37902	BM	A	2:a
Domsjö	69487	BM	B	2:a
Domsjö	113706	BM	C	2:a
Domsjö	82121	BM	D	2:a
Husum 2	12335	LM	A	1:a
Husum 2	22615	LM	B	1:a
Husum 2	37006	LM	C	1:a
Husum 2	26727	LM	D	1:a
Husum 2	14292	LM	A	2:a
Husum 2	26201	LM	B	2:a
Husum 2	42875	LM	C	2:a
Husum 2	30965	LM	D	2:a

**Tabell 13.** Behov för respektive industri vid 8 veckors förfall  
*Table 13. Need for each industry with 8 weeks of decay/thawing*

<b>Industri</b>	<b>Volym</b>	<b>Sortiment</b>	<b>Tillgänglighetsklass</b>	<b>Period</b>
FS Kaj	13716	TT	A	1:a
FS Kaj	18859	TT	B	1:a
FS Kaj	29146	TT	C	1:a
FS Kaj	20574	TT	D	1:a
FS Kaj	9419	TT	A	2:a
FS Kaj	12951	TT	B	2:a
FS Kaj	20015	TT	C	2:a
FS Kaj	14128	TT	D	2:a
Bollsta	41148	TT	A	1:a
Bollsta	56578	TT	B	1:a
Bollsta	87439	TT	C	1:a

Bollsta	61721	TT	D	1:a
Bollsta	28256	TT	A	2:a
Bollsta	38852	TT	B	2:a
Bollsta	60045	TT	C	2:a
Bollsta	42384	TT	D	2:a
Högland	21348	GT	A	1:a
Högland	29353	GT	B	1:a
Högland	45364	GT	C	1:a
Högland	32021	GT	D	1:a
Högland	24189	GT	A	2:a
Högland	33259	GT	B	2:a
Högland	51401	GT	C	2:a
Högland	36283	GT	D	2:a
Älgsjö	10046	GT	A	1:a
Älgsjö	13813	GT	B	1:a
Älgsjö	21348	GT	C	1:a
Älgsjö	15069	GT	D	1:a
Älgsjö	11383	GT	A	2:a
Älgsjö	15651	GT	B	2:a
Älgsjö	24189	GT	C	2:a
Älgsjö	17074	GT	D	2:a
Husum	63919	BM	A	1:a
Husum	87888	BM	B	1:a
Husum	135827	BM	C	1:a
Husum	95878	BM	D	1:a
Husum	64319	BM	A	2:a
Husum	88438	BM	B	2:a
Husum	136677	BM	C	2:a
Husum	96478	BM	D	2:a
Domsjö	50222	BM	A	1:a
Domsjö	69055	BM	B	1:a
Domsjö	106721	BM	C	1:a
Domsjö	75333	BM	D	1:a
Domsjö	50536	BM	A	2:a
Domsjö	69487	BM	B	2:a
Domsjö	107389	BM	C	2:a
Domsjö	75804	BM	D	2:a
Husum 2	16447	LM	A	1:a
Husum 2	22615	LM	B	1:a
Husum 2	34950	LM	C	1:a
Husum 2	24671	LM	D	1:a
Husum 2	19055	LM	A	2:a
Husum 2	26201	LM	B	2:a
Husum 2	40493	LM	C	2:a
Husum 2	28583	LM	D	2:a

## Bilaga 2

Beskrivning av optimeringsmodell.

Henningsson, M., Karlsson, J. & Rönnqvist, M. 2004. Mixed integer programming models to support tactical forest road upgrade planning. Department of Mathematics. Linköping Institute of Technology. Linköping. Tech. Rep. No. LiTH-MAT-R-2004-20,

### **Mixed Integer Programming models to support Tactical Forest Road Upgrade Planning**

Mathias Henningsson, Jenny Karlsson, Mikael Rönnqvist

Department of Mathematics

Linköping Institute of Technology

S-58183 Linköping

Sweden

*Keywords:* forestry, tactical planning, wood flow, road restoration, Operations Research, modelling, integer programming, branch and bound, model strengthening

#### **Abstract**

Road blocking due to thawing or heavy rains annually contribute to a considerable profit loss in Swedish forestry. Companies are forced to build large stocks of raw material (saw and pulp logs) in order to secure a continuous supply during periods of uncertain accessibility of the road network. This extra storage leads to quality deterioration and related cost of logs. One approach to reduce the losses due to road blocks is to upgrade the road network to a standard that guarantee accessibility. We consider the road upgrade problem from the perspective of Swedish forest companies with a planning horizon of about one decade. The objective is to minimize the combined investment and transportation costs. We present two mixed integer programming models, which are uncapacitated fix charge network flow problem including multiple assortments, several time periods and a set of road classes. One model is based on arc flows and one on route flows. The models are tested in a case study for a major Swedish company and solved using a commercial IP solver. For a typical district, the models become large and we propose how to improve solution performance through model strengthening.

# 1. Introduction

The forest industry is highly dependent on an efficient road network, since almost all wood are transported some distance by trucks. In Sweden, the weather conditions vary during the year, due to the Nordic climate (cold winters, warm summers). Every year, there is a period of thawing in the Spring and typically a period of heavy rain in the Fall. During these periods, it is uncertain accessibility to parts of the road network due to loose ground, which cause the Swedish forestry considerable costs. About 6 % of total cost to deliver timber and pulp logs originates from increased storage and transportation costs due to insufficient road accessibility (Arvidsson and Jönsson, 2000). In order to secure a continuous supply to the mills, the forest companies must have a large security stock of raw material. During periods of stock building an increased harvest and transportation capacity is needed. The storage of raw material outdoors involves considerable costs, due to quality deterioration. Transportation corresponds to a large part (about 30 %) of the total cost to produce and deliver timber and pulp. Road blocking lead to longer hauling distances and an increased transportation cost. The concept of accessibility classes is used to describe which periods of the year a road is open, where the highest grade of accessibility means year-round. Restorations are performed to improve standard and accessibility of the roads. There is a trade-off between restoration cost and losses due to road blocking. The benefit from road restorations (from the view of the forest companies) depends on which transportation possibilities are provided, i.e. which combination of roads that is upgraded and where the harvest areas are located. The aim of road restorations is to achieve an effective wood flow.

At present, much of the road upgrading planning for each district is carried out manually and the planning is strongly dependent on one senior planner. It is difficult to obtain an overview of the road network and the accessible volumes or necessary restorations. The transportation routes must be determined to estimate the available volumes and there are a very large number of road links and a lot of information needed. Optimization models and solution methods are tools to produce effective plans considering all information involved. These are key components in a decision support system. Presentation of resulting plans from optimization models in maps provides an overview of the planning situation. The use of such a decision support system makes it possible to produce plans in advance, evaluate different scenarios and larger districts can be simultaneously considered. The opportunity to produce objective plans will provide support for collaborations and agreements, in case of different owners of the roads in the same district. The importance of road restorations is provable and upgrading of public roads can be justified.

The recently developed Swedish National Road Database (NVDB), see Anon (1999) and Löfroth (2000), together with the use of Geographical Information Systems (GIS) will provide further possibilities for integrating the supply chain in the Swedish forestry sector. The use of the road data base makes it possible to easily obtain relevant information about all roads in Sweden, such as length, accessibility class and maximum allowed speed. GIS is used for conveniently storing, presenting and analyzing data for objects on maps. These two tools provide promising opportunities for using decision support and operations research in forest applications.

The first models integrating land management and road building are presented in Weintraub and Navon (1976), Kirby et al (1980) and Kirby et al (1986). Murray and Church (1995) present a model including road building and other environmental constraints. Gunn and Richards (1997) discuss the trade-off between productivity losses and road building costs for a planning horizon of 10-30 years. Consideration of road building (and other spatial aspects) in forest planning models leads to Mixed Integer Linear Programming (MILP) models, typically difficult to solve due to the large size of realistic problems. Weintraub et al (1995) presents a heuristic solution procedure for a problem based on the model in Kirby et al, (1986). Gunn and Richards (2003) present a Tabu search algorithm for their problem. Guignard et al (1998) show how solvability is improved for the integrated harvest/transportation model, by use of different valid inequalities and careful selection of B&B branching priorities.

Andaleft et al (2003) present a model including short-term decisions concerning the areas to harvest, the amount of timber to produce, the roads to build or upgrade for access and storage of timber. The planning horizon is a couple of years, which imply consideration of different seasons (winter/summer). There are two different road standards, defining which season the roads are open. Harvested timber can be stocked from summer to winter. Solution strategies involve model strengthening and applying Lagrangian relaxation. Cea and Jofre' (2000) present a two-level model and optimization algorithm to assist simultaneously strategic and tactical planning. The tactical planning problem (time horizon is a couple of years) includes decisions about harvesting, transportation, road construction and upgrading considering two different road standards. A two-stage solution algorithm is presented. First the road network is designed and second a linear programming model corresponding to the harvest planning is solved.

Olsson (2004) present a MILP model which starts from the tactical overall harvest planning and include decisions concerning restorations of existing forest roads and transportation. The problem is to provide available harvest areas during the part of the year when only roads of the highest standard is accessible (typically 6-10 weeks per year) considering transportation and restoration costs. Arvidsson et al (2000) develop a MILP model to support forest road restorations, which was further studied in Karlsson et al (2002). The overall wood flow for the planning period was produced and the storage was assumed to be related to the transported volumes and the accessibility classes of the passed road links. This model was difficult to solve due to the large number of integer variables and a complex and detailed connection between flow and storage.

This paper considers a problem with similarities to the one described above, especially Olsson (2004) and Arvidsson (2000). In Sweden, there is a rather dense road network at the countryside. Therefore, the problem concerned is how to improve the standard of the existing roads whereas building of new roads is not considered. A restoration involves the road standard is maintained for about 15 years. Therefore the overall flow over a long time horizon is essential for evaluation of benefits from upgrading. Tactical harvest planning, where the age of the harvest areas is determining and the standard of the road network is secondary, provides the areas to harvest during the planning period. The following new aspects need to be considered:

- Four weather seasons with respect to accessibility conditions.

- Four road standards describing the grade of accessibility during the four seasons.
- Storage from one season to another is not possible.
- The aim is to produce prerequisites for an even supply to the mills. Therefore the requirement for feasibility is access to the demanded volumes.

Integration of short-term harvesting and road upgrading decisions, considering four seasons and road standards over a time horizon of a decade, produces a very large model. Short-term harvest decisions includes 0/1 decision for harvest areas (harvest areas are harvested at the same occasion), and constraints such as proportions of thinning/final felling, the equipment and working time of the harvest teams. These decisions are considered on shorter time horizons of 1-2 years. Therefore, we delimit this problem to concern road upgrade and flow decisions. One time period corresponds to a couple of years, for which the overall harvest planning yields. We reflect the different seasons during a time period by requirements on the road standard used for transportation.

The aim of this study is to provide an optimization model and method to implement in a future decision support system. A prototype is now developed in collaboration with The Forest Research Institute (Skogforsk) and a software company, Frisk (2004). We have a close interaction with several forest companies (Holmen Skog, Stora Enso, Svea Skog, SCA) to guarantee an industrial setting. In this paper we present two slightly different MILP models. The first is a straight forward network flow model with fixed charges. In the second model, the wood flow is determined along defined routes for each pair of origin-destination. In practice, only short distance routes are used, due to considerable transportation costs. This approach will simplify to work up the needed data and heuristic methods to provide a feasible solution in short time, which facilitate the development of the decision support system. The models are strengthened by valid inequalities, derived from structural considerations. Computational results from a case study are given. Our case study problem is solvable directly with commercial software.

## **2. Problem description**

The road investment problem can be illustrated in a network. There are supply nodes (harvest points), demand nodes (mills or passage nodes defined later) and intermediate nodes (crossings). Each link corresponds to an edge or two directed arcs. The problem includes multiple time periods, assortments and road standards. A network with four supply points, one mill, one crossing and two passage nodes on both sides of a lake is shown below, (Figure 2.1).



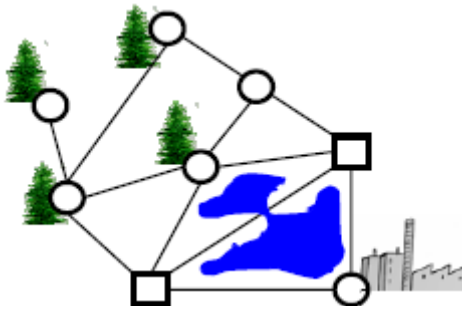


Figure 2.1. A network including four harvest areas, one crossing and one mill. There is a lake in between the harvest areas and the mill, giving two 'passage nodes'.

## Road network

The Swedish road network corresponds to 380 000 km private and 150 000 km public roads. A large proportion of the private network is forest roads. We assume only one owner (or planner) for the entire network. This is the case if one forest company owns all roads or if several companies cooperate in decision making. In large forest districts the company that owns the forest typically owns the main part of the road network. The forest roads are of different standards depending on size and how regularly they have been maintained. During thawing only the roads at the highest standard is available and during the winter when the ground is frozen, all roads are accessible. Private forest roads are divided into four accessibility classes according to below, (Löfroth et al, 2000).

- A. Trucks and cars all seasons.
- B. Trucks all seasons except from difficult thawing. Cars allowed all seasons.
- C. Trucks all seasons except from period of thawing and heavy rain. Cars allowed all seasons except from thawing.
- D. Trucks only during winter season. Cars only during good weather conditions.

Restoration alternatives correspond to improve the road standard one or more accessibility classes, for instance from D to C (D-C) or from D to B (D-B). Then four accessibility classes lead to six upgrade alternatives, D-C, D-B, D-A, C-B, C-A and B-A. Each road link can be upgraded in stages, i.e. from D to C in one time period and from C to A in the next. The restoration cost for each road is dependent of the type of road, the initial state and the aim of restoration. The road links are assumed to have the resulting accessibility class in the same time period as the restorations are accomplished. In this model we do not include maintenance. On a long time horizon the wood flow can be seen as constant and an even maintenance is required on all roads.

Information about road links is available in the recently developed National Road Data Base (NVDB). Here, all roads in Sweden are included and several attributes are stored, such as position coordinates, quality, distance etc. A road link corresponds to a part of a road with common properties. For instance, a road with two parts, where one corresponds to quality B and the other quality C, gives two links in NVDB. For a typical district, the NVDB includes about 1000-5000 road links, depending on how dense the network is and how the attributes vary on the roads. Aggregation of road links to produce a network, where each node corresponds to supply node, demand

node or crossing does not affect the solution of the corresponding optimization problem. Then one road link in the optimization network possible corresponds to one or more road links in NVDB, with different properties. The restoration cost to consider depends on the data for each part of the road.

### **Harvest supply points**

Harvesting is balanced against the predicted demand. The forest is divided into different harvest areas, about 1000-1500 for the planning period of one decade, with supplies between 20-1000 m<sup>3</sup>. For each harvest area, the closest node in the road network is given as location for corresponding volume. For each node, the assigned volumes are aggregated to produce the total supply. This gives about 500 supply nodes for a typical district. The wood production is divided into assortments, typically five different: pine timber, spruce timber, birch timber, pine pulp, spruce pulp and birch pulp. On a tactical time horizon, on district level, forest products is evenly distributed. At a smaller area on operative level the production of different assortments varies depending on compositions, age and quality of the forest stands.

### **Industrial demand**

The industrial demand for raw material is divided into assortments and predicted for the next couple of years. It depends on different customer demands for industrial products. If customer demand is stable and at a high level, then production capacity and the raw material utilization determine the needed volumes. The demand is balanced against the supply in the corresponding forest districts and imported raw material from distant areas. On an annual level, the industrial demand is on the whole regular under the assumption that the mill using their production capacity to the full.

Since a time period is one or a couple of years, it includes periods (weather seasons) corresponding to different requirements on road standard. During a specific season, the available volumes are those possible to deliver with respect to road accessibility. To secure an even wood flow, we include requirements on the accessibility class of the road links used for transportation. In each time period, the demand is divided into four parts (i.e. accessibility classes), corresponding to the demand during the (statistical) length of the corresponding weather conditions. Demand of “accessibility class A” corresponds to the demand during the period of thawing. For instance, consider a time period of one year. The period of thawing typically corresponds to six weeks each year, then during 6 of 52 weeks transportation is possible only on class A roads. This implies that 6/52 of the total demand must be transported via links of class A. The frozen part of a year typically corresponds to 12 weeks in the north of Sweden. That gives, for 12/52 of the total demand all roads are open for transportation.

### **Passage Nodes**

In Sweden, the main roads typically correspond to public roads of high quality. The roads which need to be upgraded often correspond to smaller private roads (on the countryside). In some cases the mills are situated far away from the harvest district and the main distance to the mill corresponds to year-round accessible (often public) roads. Therefore, we introduce the concept of passage nodes. This is a point which is passed on the way from the forest to a mill, where the roads leading to the mill all correspond to the highest grade of accessibility. A passage node typically corresponds

to the point where the main road is reached. From here, the used roads correspond to shortest (or fastest) path and no restorations need to be considered. Then, no other links are used than those corresponding to this path, which imply a smaller number of road links in the optimization problem. Figure 2.2 gives an example where a passage node is introduced. Depending on the geography, one or several passage nodes are reasonable. In case it is not obvious which passage node to use for the mills, we need the shortest path for each combination of passage node and mill (introduced as a link in the optimization problem), Figure 2.3. In some cases it is obvious which passage node to use for all the mills, Figure 2.4. Then the demand is determined in the passage node and the node corresponding to the mill can be excluded. In Figure 2.3 and 2.4 the harvest points are located in between a lake and a river and the passage nodes correspond to the upper and lower nodes, given as squares.



*Fig. 2.2 Paths from a passage node to a mill. The shortest path is bold.*



*Fig. 2.3 Two passage nodes and two mills. Shortest path for each combination is included.*



*Fig. 2.4 Two mills, each with an adjacent passage node.*

## Transportation routes

Transportation corresponds to a considerable cost, which implies only short distance routes are used. In many cases there are few reasonable alternative transportation routes. A common structure adjacent to the supply points is only one way leading to a larger road. There is a shortage of harvest points along roads of the highest grade of accessibility, which implies these are used only during the period of bad weather conditions. The number of possible paths for each supply node depends on the road network in the district.

For a typical district, the number of road links included in NVDB is very large, which correspond to a lot of upgrade decisions and a large network in the corresponding planning problem. It is a complicated operation to aggregate the road links in NVDB, to produce the network consisting of only supply, demand and crossing nodes. A decision support system is supposed to produce feasible solution in short time. From this point of view, it is interesting to try a model formulation, where the wood flow is determined along defined paths or routes for each pair of origin-destination (supply node-passage node). This is common in applications dealing with traffic planning (Patriksson, 1994).

We present two slightly different formulations of the problem. The first corresponds to the most straightforward model including link flow decisions, denoted Model A. The next formulation is similar except from the wood flow decisions, which are defined as routes, Model B. If all possible routes are included, this is the same problem as Model A. For each route, the including road links is defined and considered for investment. For a limited number of routes, this approach typically

gives less road links, i.e. investment decisions to consider, compared to Model A. The disadvantage is that effective routes can be missed.

Routes from all supply nodes to all passage nodes can be generated by solving the corresponding shortest path problem. This is a well-solved optimization problem with polynomial algorithms (Ahuja, 1993). Different link costs can be used to make different prioritises for the routes such as, length, road quality and maximum allowed speed. Alternatively, the  $k$ -shortest path for a network can be solved (Hadjiconstantinou and Christofides, 1999).

### **Planning Process**

The road restoration planning interacts with two levels of harvest planning. The tactical harvest planning produces information about available volumes. The time for thinning and final felling is estimated, in order to maximize the total value, typically supported by the simulation tool, IPAK, (Jonsson et al, 1993). Then, restoration of existing roads is planned based on available volumes, to provide input to the next level of harvest planning. This correspond to the configuration of harvest areas considering road systems, ground conditions, timber assortments in order to produce the list of areas which is the prerequisite for the operational (typically annual) harvest planning.

## **3. Mathematical Formulations**

We present two Mixed Integer Linear Programming (MILP) models, Model A (link flow) and B (route flow). The problem considered is similar to the problem in Olsson (2003) but with significant differences. Olsson (2003) presents a model to support decisions of road restorations to the highest grade of accessibility, including 0/1 variables describing if the road link corresponds to the highest accessibility class or not. The overall wood flow is determined for a volume corresponding to the demand during the seasons which require the highest road standard. We include all possible restorations and estimate the overall wood flow for the whole planning period (all weather seasons). This implies multiple accessibility classes and the estimation of the accessibility class of all road links used for transportation. The total demand corresponds to the total supply.

Model A and B correspond to uncapacitated Fixed Charged Network Flow (FCNF) problems. FCNF problems occur in different applications, i.e. oil pipeline design (Brimberg, et al, 2003), railroad blocking (Barnhart et al, 2003), network design for internet protocol traffic (Holmberg and Yuan, 2003). This is a well-studied class of problem, there are papers presenting valid inequalities (Rardin and Wolsey, 1993), branch and cut (Ortega and Wolsey, 2003), Tabu search (Ghamlouche et al, 2003), hybrid optimization and constraint programming approach (Kim and Hooker, 2002) etc. Neither Model A nor B correspond to standard FCNF. Model A involves multiple levels of fixed charges (multiple road qualities). Model B has similarities with the uncapacitated fixed charged transportation problem (Lundgren and Larsson, 1994). Each route corresponds to a directed arc from a source to a sink. The difference is that fix charges of different arcs (i.e. routes) are dependent, in case of common road links.

The alternative routes from a harvest point to a mill correspond to parallel arcs.

As intended to be implemented in a decision support system, first of all we want to solve the models close to optimality via the use of commercial software, i.e. Branch and Bound (B&B). In B&B the linear relaxation of the problem (LP) is solved repeatedly. To decrease the number of LPs or nodes in the B&B, it is very important to have a tight LP relaxation of the MIP, which means the LP and MIP optimal objective function values are close (small integrality gap). In the trade-off between the speed of solving the LP and the bound it provides, the rule of thumb is to choose the relaxation that gives the tightest bound and therefore requires solving the smallest number of LPs (Barnhart et al, 1993). The road investment models typically give large integrality gap, due to the fixed costs corresponding to road restorations. Fortunately valid inequalities, which tighten the LP relaxation, can be generated from structural considerations. Model B is extended with a decision variable for route class, which gives a stronger dependence between the decisions concerning restorations of road links. High branch priorities on variables, which have a strong effect on the size of the remaining subproblem, can improve performance in branch and bound, Guignard (1998).

### **Model A**

First we present the defined sets. The set of accessibility classes is defined as numbers, where 1 corresponds to the highest accessibility class (A) and a lower grade of accessibility class corresponds to a lower number (i.e. B=2, C=3, D=4). The lowest grade of accessibility class is denoted  $a^{LG}$ .

$N$ : the set of all nodes  $n$  in the network.

$O \subseteq N$ : the subset of all nodes corresponding to supply nodes (sources).

$I \subseteq N$ : the subset of all nodes corresponding to intermediate nodes.

$M \subseteq N$ : the subset of all nodes corresponding to mills.

$L$ : the set of road links  $(i,j)$  (directed arcs) in the network.

$T$ : the set of time periods  $t$ .

$P$ : the set of assortments  $p$ .

$A$ : the set of accessibility classes  $a$ ,  $A = \{1, 2, \dots, a^{LG}\}$ .

$U$ : the set of all possible upgrade activities  $(a,q)$ , giving class  $a$ , starting from class  $q$ , (the alternative  $a=q$  is included).

The defined parameters are listed below:

$$I_{ija} = \begin{cases} 1 & \text{if link } (i,j) \text{ has the accessibility class } a \text{ when } t = 0, \text{ i.e. when the planning period starts.} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$S_{ipt}$  = the total supply at source node  $i$  of assortment  $p$  during time period  $t$ .

$D_{ipat}$  = the demand of assortment  $p$  of accessibility class  $a$  at mill node  $i$  during time period  $t$ .

$C_{ijaqt}^U$  = Total cost for restoring link  $(i, j)$  to accessibility class  $a$  from accessibility class  $q$  during time period  $t$ .

$C_{ijat}^U$  = Transportation cost on link  $(i, j)$ , accessibility class  $a$  time period  $t$ .

$M_{at} = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} D_{ipat}$  = The maximum flow of accessibility class  $a$  time period  $t$  on each link.

$M_t = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} S_{ipt}$  = The total supply time period  $t$ .

The decision variables are:

$x_{ijpat}$  = flow on link  $(i,j)$  of assortment  $p$  accessibility class  $a$ , during time period  $t$ .

$y_{ijaqt} = \begin{cases} 1 & \text{if link } (i, j) \text{ is upgraded to accessibility class } a \text{ from class } q \text{ during time period } t. \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$

$v_{ipat}$  = flow from source node  $i$  of assortment  $p$  accessibility class  $a$ , during time period  $t$ .

Now the model can be formulated.

[A]:

$$\min \sum_{e \in E} \sum_{(a,q) \in U} \sum_{t \in T} C_{ijaqt}^U y_{ijaqt} + \sum_{(i,j) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} C_{ijpat}^T x_{ijpat} \quad (0_A) \text{ Minimize cost}$$

subject to:

$$\sum_{j:(j,i) \in L} x_{jipat} - \sum_{j:(i,j) \in L} x_{ijpat} = \begin{cases} D_{ipat} & \forall i \in M, p, a, t \\ 0 & \forall i \in I, p, a, t \\ v_{ipat} & \forall i \in O, p, a, t \end{cases} \quad (1_A) \text{ Node balance}$$

$$\sum_{a \in A} v_{ipat} = S_{ipt} \quad \forall i, p, t \quad (2_A) \text{ Limited supply}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijpat} \leq M_{at} \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{ija'qt} \quad \forall a, t, (i, j) : i < j \quad (3.1_A) \text{ Required acc. class}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijpat} \leq M_{at} \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{jia'qt} \quad \forall a, t, (i, j) : j < i \quad (3.2_A) \text{ Required acc. class}$$

$$\sum_{a \in HG} y_{ija'at} \geq \sum_{q \in LG} y_{ijaqt-1} \quad \forall i, j, a, t \geq 2, HG = \{1, 2, \dots, a\}, LG = \{a, a+1, \dots, a^{LG}\} \quad (4.1_A) \text{ Possible upgrades}$$

$$\sum_{a \in HG} y_{ija'at} \geq I_{ija} \quad \forall i, j, a, t = 1, HG = \{1, 2, \dots, a\} \quad (4.2_A) \text{ Possible upgrades}$$

$$\sum_{(a,q) \in U} y_{ijaqt} = 1 \quad \forall i, j, t \quad (5_A) \text{ Acc. class estimated}$$

$$y_{ijaqt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, a, q, t \quad (6_A) \text{ Variable restrictions}$$

$$x_{ijpat}, v_{ipat} \geq 0 \quad \forall i, j, p, a, t \quad (7_A) \text{ Variable restrictions}$$

The objective (0A) means minimize total cost corresponding to restorations and transportation. The first constraints (1A) give node balance for demand nodes, intermediate nodes and supply nodes. For each source, the total supply is limited, constraints (1A) and (2A). Constraints (3A) specify that flow of class  $a$  is feasible only if the road quality corresponds to accessibility class  $a$  or a higher grade of accessibility. Constraints (4.1A, 4.2A) specify possible upgrade alternatives for each edge. These are: no upgrading from present class ( $a$ ), ( $y_{ea'at}=1$  for  $(a',a): a'=a$ ) or upgrading from the present accessibility class ( $a$ ) to a higher grade of accessibility ( $y_{ea'at}=1$  for  $(a',a): a'<a$ ). Constraints (5A) describe that the accessibility class of each edge must be determined in each time period. Finally, (6A)-(7A), the variable restrictions are given.

The above constraints fully describe the model. All transportation routes are possible. The main disadvantage is that the LP relaxation can be very weak due to constraints (3A). It is important how to choose the  $M$ , large values imply small values on the  $y$  variables and large integrality gaps. The constant  $M_{at}$  is the smallest value to describe the possible flow on each link, but this is typically an overestimation of the actual flow. For instance, the optimal value of the IP corresponding to our case study problem gives the total restoration cost 2.7 Million Swedish Kronas (SEK). The LP corresponding to ( $M=M_{at}$ ) gives the restoration cost 240,000 and ( $M=M_t$ ) 44,000 SEK. The second disadvantage is the weak dependence between the 0/1 decision variables, giving one binary variable the value 1 does not determine the value of any other binary variable.

### ***Inequalities Model A***

First, we introduce constraints which eliminate inefficient solutions, used by Andaleft et al (2003). These are not valid inequalities, as they are not necessarily satisfied by all integer-feasible solutions, (Wolsey, 1998). We formulate constraints (8A) stating that one should not upgrade an isolated link. Restoration of a road link implies at least one adjacent link ( $A_{ij}$ ) of corresponding quality, or better.

$$\sum_{(a,g) \in U: a \neq g} y_{ijaqt} \leq \sum_{(i,j) \in A^i} \sum_{(a',g) \in U: a' \leq a} y_{ija'qt} \quad \forall i, j, a, t \quad (8A) \text{ Adjacent links required}$$

The subset of links  $(i,j)$ , where neither  $i$  nor  $j$  correspond to a supply node or a demand node, is defined as intermediate links ( $IL$ ). Restoration of these implies an adjacent link of corresponding class on both ends. Constraints (8A) is divided to (9.1A) and (9.2A), corresponding to node  $i$ , (adjacent links,  $A_i$ ) and node  $j$  (adjacent links  $A_j$ ), respectively.

$$\sum_{(a,g) \in U: a \neq g} y_{ijaqt} \leq \sum_{(i,j) \in A_i} \sum_{(a',g) \in U: a' \leq a} y_{ija'qt} \quad \forall (i,j) \in IL, a, t \quad (9.1A) \text{ Adjacent links required}$$

$$\sum_{(a,g) \in U: a \neq g} y_{ijaqt} \leq \sum_{(i,j) \in A_j} \sum_{(a',g) \in U: a' \leq a} y_{ija'qt} \quad \forall (i,j) \in IL, a, t \quad (9.2A) \text{ Adjacent links required}$$

Constraints (8A) and (9A) increase the dependence between upgrade decisions and can produce LPs more close to IP.

### **Model B**

Some additional definitions are needed and some indices are different compared to

Model A. These are given below.

$O \subseteq N$ : the set of nodes corresponding to supply nodes (origin for paths), index  $o$ .

$D \subseteq N$ : the set of nodes corresponding to passage nodes (destinations for paths),  
index  $d$ .

$M \subseteq N$ : the set of nodes corresponding to demand nodes (mills), index  $m$ .

$OD$ : the set of pairs of origin and destination, index  $(o, d)$ .

$R(o, d)$ : the set of routes  $r$  from sources  $o$  to demand nodes  $d$ .

$OE(e)$ : subset of supply nodes, i.e. origins, from which there are a route,  
including edge  $e$ .

Parameters to describe the included routes and an estimation of  $M$  are introduced:

$$\delta_{odre} = \begin{cases} 1 & \text{if edge } e \text{ is included in route } r \text{ from origin } o \text{ to destination } d. \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$C_{eaqt}^U$  = Total cost for restoring edge  $e$  to accessibility class  $a$  from accessibility class  $q$   
during time period  $t$ .

$C_{odpat}^F$  = Flow cost, for one unit flow along route  $r$  from origin  $o$  to destination  
 $d$  of assortment  $p$ , accessibility class  $a$  during time period  $t$ .

$$M_{eat} = \sum_{o \in OE(e)} \sum_{p \in P} S_{opt} = \text{The maximum flow of accessibility class } a \text{ time period } t \text{ edge } e.$$

The variables are as follows:

$x_{odpat}$  = flow from source  $o$  to demand point  $d$  according to route  $r$  of assortment  $p$   
accessibility class  $a$ , during time period  $t$ .

$$y_{eaqt} = \begin{cases} 1 & \text{if edge } e \text{ is upgraded to accessibility class } a \text{ from class } q \text{ during time period } t. \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$w_{dipat}$  = flow from passage node  $d$  to mill  $i$  of assortment  $p$  accessibility class  $a$ ,  
during time period  $t$ .

Now the model can be formulated.



[B]:

$$\min \sum_{e \in E} \sum_{(a,q) \in U} \sum_{t \in T} C_{eaqt}^U y_{eaqt} + \sum_{(o,d) \in OD} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} C_{odrp}^F x_{odrp} \quad (0_B) \text{ Minimize cost}$$

subject to:

$$\sum_{i \in I} w_{dipat} = \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} x_{odrp} \quad \forall d, p, a, t \quad (1.1_B) \text{ Flow equilibrium}$$

*passage nodes*

$$\sum_{d \in D} w_{dipat} \geq D_{ipat} \quad \forall i, p, a, t \quad (1.2_B) \text{ Fulfil demand}$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{odrp} \leq S_{opt} \quad \forall o, p, t \quad (2_B) \text{ Limited supply}$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \delta_{odre} x_{odrp} \leq M_{eat} \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{ea'qt} \quad \forall e, a, t \quad (3_B) \text{ Required acc. Class}$$

$$\sum_{a' \in HG} y_{ea'at} \geq \sum_{q \in LG} y_{eaqt-1} \quad \forall e, a, t \geq 2, HG = \{1, 2, \dots, a\}, LG = \{a, a+1, \dots, a^{LG}\} \quad (4.1_B) \text{ Possible upgrades}$$

$$\sum_{a' \in HG} y_{ea'at} \geq I_{ea} \quad \forall e, a, t = 1, HG = \{1, 2, \dots, a\} \quad (4.2_B) \text{ Possible upgrades}$$

$$y_{eaqt} \in \{0, 1\} \quad \forall e, a, q, t \quad (6_B) \text{ Variable restrictions}$$

$$x_{odrp}, w_{dipat} \geq 0 \quad \forall o, d, i, r, p, a, t \quad (7_B) \text{ Variable restrictions}$$

The meaning of the objective and constraints of Model B is similar to Model A (and we use the same numbering). Constraints (1.1<sub>B</sub>) give flow equilibrium for passage nodes. This is the general case, where any passage node is used for any mill. Model B gives smaller integrality gap compared to Model A. The  $M$  in constraints (3<sub>B</sub>) typically gives a closer estimation of the flow on each edge  $e$ . For each edge, the maximum flow is limited to the supplies, which have a route including edge  $e$ . This is still an overestimation. Valid inequalities are formulated to produce better LP bounds. With a limited number of routes, Model B corresponds to a smaller problem than Model A. The main disadvantage is that effective routes may be excluded.

### **Valid inequalities model [B]**

The constraints (8<sub>A</sub>) and (9<sub>A</sub>) above, preventing restorations of isolated links, can be introduced (index  $e$  instead of  $ij$  on the  $y$  variables). Valid inequalities can be formulated based on the information about source and destination of the flow on each edge (i.e. flow routes are defined). This is used to disaggregate constraints (3<sub>B</sub>) giving constraints (10) and (11). Disaggregation is the idea of separating one constraint into many without changing the meaning of the MIP model but improving the LP relaxation and is one of the general principles for tightening an LP relaxation (Barnhart et al, 1993). Define  $E_o$  as the edges included in any route from source  $o$ .

$$\sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \delta_{odre} x_{odrp} \leq \left( \sum_{p \in P} S_{opt} \right) \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{ea'qt} \quad \forall o, a, t, \quad e \in E^o \quad (10) \text{ Disaggregate } (3_B)$$

Constraints (10) mean that the total flow (to all destinations on all alternative routes) on edge  $e$  from source  $o$  cannot exceed the supply at source  $o$ . In case a passage node is given for all mills, the demand of the passage nodes are defined as:  $W_{dpat} = \sum_{i \in I} w_{idpat}$ . Then, it is possible to disaggregate constraints (3<sub>B</sub>) for each demand point (11). Define  $E^d$  as the edges that are included in any route to destination  $d$ .

$$\sum_{o \in O} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \delta_{odre} x_{odrp} \leq \left( \sum_{p \in P} W_{dpat} \right) \sum_{q=a}^{a^t} y_{eaqt} \quad \forall d, a, t, \quad e \in E^d \quad (11) \text{ Disaggregate } (3_B)$$

Constraints (11) mean that the total flow (from all source  $o$  on all alternative routes) on edge  $e$  to destination  $d$  cannot exceed the demand at  $d$ .

### Model B'

In order to produce a stronger dependence between the binary variables corresponding to upgrade decisions in Model B, we introduce a binary variable corresponding to route class ( $q_{odrat}$ ), Model B'. We introduce following definitions:

$$q_{odrat} = \begin{cases} 1 & \text{if route } r \text{ from source } o \text{ to passage node } d \text{ has accessibility class } a \\ & \text{during time period } t. \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$E^{odr}$  = the subset of edges that are included in route  $r$  from source  $o$  to destination  $d$ .

$$M_{ot} = \sum_{p \in P} S_{opt} = \text{The maximum flow from source } o \text{ during time period } t.$$

[B']:

(0<sub>B</sub>) to (2<sub>B</sub>) & (4<sub>B</sub>) to (7<sub>B</sub>)

$$\sum_{p \in P} x_{odrp} \leq M_{ot} \sum_{g=1}^a q_{odrgt} \quad \forall o, d, r, a, t \quad (3.1_{B'}) \text{ Required acc. class}$$

$$q_{odrat} \leq \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{ea'qt} \quad \forall o, d, r, a, t, e \in E^{odr} \quad (3.2_{B'}) \text{ Required acc. class}$$

$$q_{odrat} \in \{0,1\} \quad \forall o, d, r, a, t \quad (12) \text{ Variable restrictions}$$

Constraints (3.1<sub>B'</sub>) means that route  $r$  must be of accessibility class  $a$ , to be used for flow of class  $a$ . The  $M$  in this case is the supply at source  $o$ . Constraints (3.2<sub>B'</sub>) means, if route  $r$  is of class  $a$ , then all included edges must be of accessibility class  $a$ . This produces a stronger dependence between the decision variables for edge class ( $y$ ).

Model B' involves constraints for each combination of source and edge. This gives LP properties close to Model B + (10). The main disadvantage is that (3.2<sub>B'</sub>) correspond to a very large number of constraints. The second is that different routes can be used from the same source, which gives small values of  $q$  variables and corresponding  $y$  variables in LP.

### Valid inequality Model B'

A valid inequality which strengthens the Model B' is formulated through logical considerations. For each combination of supply and demand point, there is at most one route used for accessibility class  $a$  (13). If there is more than one route open, then the shortest distance route will be used.

$$\sum_{r \in R^{od}} q_{odrat} \leq 1 \quad \forall o, d, a, t \quad (13) \text{ Max number of routes}$$

The right hand side in (3.2B') is less or equal to 1. From (3.2B') and (13) we can derive the valid inequality (14) for B'.

$$\sum_{r \in R^{od}} \delta_{odre} q_{odrat} \leq \sum_{(a',q) \in U: a' \leq a} y_{ea'qt} \quad \forall o, d, a, t, e \in E^{od} \quad (14) \text{ Required acc. class}$$

This type of constraints, where more 0-1 variables can be added to the left hand side of a  $\leq$  constraint without changing the right hand side is used by Guignard (1998) and denoted lifting. Introducing (14) makes (3.2B') redundant and the number of constraints (14) are considerable smaller. For each combination of source  $o$  and edge  $e$  there are constraints which delimit the flow. Therefore the LP properties (and the number of constraints) are about the same as Model B + (10).

### Model sizes

Below in Table 3.1 some Model statistics are given to compare the sizes of Model A and B. For a typically case, all combinations of indexes do not exist. The notation used is as follows. For each set  $S$  (capital letter), the same letter  $s$  but an italic small, denotes the number of elements in the set, i.e.  $N$ = nodes,  $n$ = the number of nodes;  $P$ =assortments,  $p$ =the number of assortments,  $E$ =edges,  $e$ =the number of edges, etc. The notation  $e'$  below corresponds to the number of edges included in a path from origin  $o$  to destination  $d$ .

Model	Number of Constraints	Binary variables	Continuous variables
Model A	$pat+opt+3*eat+et$	$eut$	$epat+opat$
Model B	$dpat+ipat+opt+2*eat+et$	$eut$	$odrp+odripat$
Model B+	$dpat+ipat+opt+odrat+odre'+eat+et$	$eut+odrat$	$odrp+odripat$

Table 3.1. Model sizes.

## 5. Case study

The case study comes from Holmen Skog, a major Swedish company, and its Sveg district. Holmen is one of the largest forest owners in Sweden with more than one million hectares of forest. Holmen Skog is responsible for providing raw material to the Swedish industries included in Holmen, consisting of a group of companies, where both saw-, pulp- and papermills are included.

All data is collected and put together in a former project accomplished at Midsweden University (Olsson, 2003). Especially the road network is handled in order to decrease the number of links. Information about the road network, road length and initial quality is received from Holmen and is the data included in NVDB, i.e. each road link is a road sector with uniform properties. These road links (about 1500) are aggregated to larger units, so that each node corresponds to a supply point, demand point or a crossing, which gives 452 road links. The average length of the road links are about 2.5 km. The road network in Sveg district is sparse, the number of nodes is 400. There are roads owned by Holmen Skog and public roads. In this case study, all public roads are of the highest grade of accessibility.

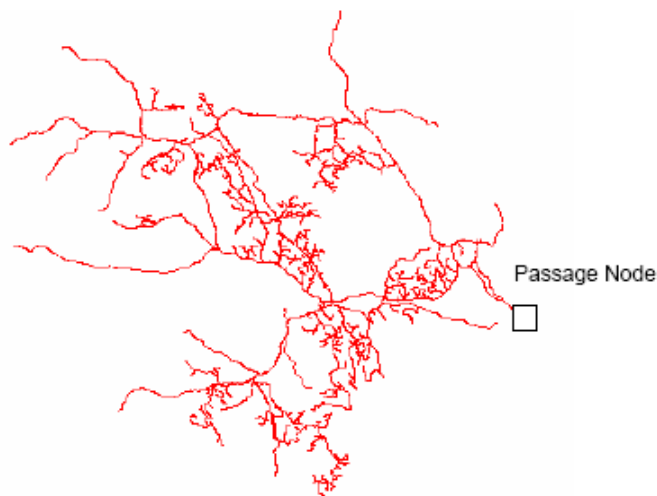


Figure 5.1. The road network of Sveg district.

Sveg district is of average size and is located in the middle of Sweden in the longitudinal direction and about 100 km from the east coast. From the tactical harvest planning, the supplies are given. There are 320 supply nodes, spread over the district. Available volumes are divided into the three assortments; pine, spruce and birch. The Sveg district delivers to different mills all located along the coast. Therefore, we have only one passage node, located at the main road along the coast line, used for all mills. This implies the demand is determined in the passage node. The total planning horizon is ten years and the annual harvested volume at Sveg district is about 100 000 m<sup>3</sup>.

The possible paths included in this case study are generated considering distance and road quality. As the road network is sparse and only a few of these roads are of the highest grade of accessibility, there are very few reasonable paths for each supply point. In order to generate alternative paths, the corresponding shortest path problem was solved repeatedly including different arc costs. First, the distance is used as link cost and the shortest distance routes are estimated. Then different penalties were used to prioritise accessibility class. In practice, only short distance routes are used and obvious detours due to low accessibility class is not accepted. We obtain 1-3 different paths for each source. Some basic data for this case study are summarized in Table 5.1.

Aspect	Case Sveg
Number of nodes	400
Number of supply points	320
Number of demand nodes	1
Number of road links	452
Road links accessibility class A/B/C/D	101/26/268/57
Number of paths for each source	1-3
Assortments	3
Accessibility classes	4
Time periods	2

Table 5.1. Basic data for the case study

## 6. Numerical Results

All the computations are performed on a personal computer based on a 2.66 GHz Pentium IV processor equipped with 2 GB RAM memory. The mathematical models are implemented using ILOG AMPL, see e.g. Fourer et al. (1993), with ILOG CPLEX 8.1 as solver. CPLEX is the implementation of fundamental B&B technique and utilizes heuristics and a variety of branching and node selection strategies. We present computational experiments for the case study problem. We have solved the two models, model A and B, with and without valid inequalities. Two versions of Model A corresponding to different choice of  $M$  is used. The first,  $A_0$  includes  $M_t$  = the total demand during time period  $t$ . The second includes  $M_{at}$  = the total demand during time period  $t$  of accessibility class  $a$ .

The size of each model corresponding to the case study is presented in Table 6.1. Based on best found integer solution (IP#), we estimate an approximation of the integrality gaps according to:  $(LP-IP\#)/IP\#$ . Restoration costs are small compared to transportation costs, the best integer solution found corresponds to 35,4 million Swedish kronas, where restoration cost corresponds to 2,7 (about 10 %). Therefore the integrality gaps given in % are relatively small, even though the values of the binary variables are very small. To show the size of the fractional values, we present the upgrade costs in Swedish kronas.

Model	Continuous variables	Binary variables	Constraints	CPU	Restoration cost	Integrality gap %
$A^0$	29,280	9000	34,920	4.1	44,767	8.2
A	29,280	9000	34,920	4.2	241,473	7.5
A+(8)	29,280	9000	38,520	4.7	241,473	7.5
A+(8)+(9)	29,280	9000	39,080	4.9	241,473	7.5
B	15,384	9000	10,068	1.3	1,045,730	5.0
B+(8)	15,384	9000	13,668	1.4	1,061,230	4.9
B+(8)+(9)	15,384	9000	14,168	1.8	1,061,230	4.9
B+(10)	15,384	9000	40,068	2.8	1,524,380	3.4
B+(8)+(9)+(10)	15,384	9000	44,168	2.6	1,524,380	3.4
B'	15,384	14,120	71,500	4.5	1,312,440	3.9
B'+(14)	15,384	14,120	41,500	4.7	1,322,860	3.7

Table 6.1. Model sizes and LP results (CPLEX 8.1): CPU time in seconds, restoration cost in Swedish kronas, and an approximation of integrality gaps.

For this case, Model B corresponds to a smaller problem than Model A. The problems corresponding to the strengthen models are larger but LP produce better estimation of investment costs. In Model B' including (14), the redundant constraints (3.2 $B'$ ) are excluded.

The next computational experiments compare run times for B&B (CPLEX 8.1) correspond to Model A and B with and without the extra constraints, Table 6.2. Search and branch strategies correspond to default settings in all computations, except from the last four, where \*) higher branch priority on  $q$  than the  $y$ -variables and \*\*) higher branch priority on  $q$  and depth first search are used. Gap means the difference between the best integer solution and best bound (from LP relaxation) divided with best bound, given as a percentage. The tolerance was set to 1 or 0.1 % depending on solution time.

Model + (constraints)	B&B	Simplex iterationer	CPU min	Gap %	Objective
A <sup>0</sup>	235,549	19,740,500	900 <sup>+</sup>	5.52	36,287,359
A	34,070	4,470,509	225	1	35,351,064
A+(8)	15,926	2,411,230	138	1	35,351,064
A+(8)+(9)	9,900	1,085,857	70	1	35,350,980
B	83,787	13,337,344	408	1	35,538,442
B+(8)	46,186	6,262,600	229	1	35,608,251
B+(8)+(9)	10,854	2,087,202	74	1	35,446,793
B+(10)	28,201	4,303,707	198	1	35,568,270
B+(8)+(9)+(10)	3,690	581,343	32	0.87	35,617,915
B <sup>2</sup>	11,988	1,191,696	46	0.06	35,424,970
B <sup>2</sup> +(14)	7,144	466,260	19	0.1	35,430,979
B <sup>2</sup> *	12,559	1,004,339	39	0.1	35,424,970
B <sup>2</sup> +(14)*	9,920	576,698	23	0.1	35,444,963
B <sup>2</sup> **	7,937	465,554	18	0.1	35,424,970
B <sup>2</sup> +(14)**	9,477	524,374	21	0.08	35,424,970

Table 6.2. B&B results CPLEX 8.1, with default settings, \* ) branch priority on  $q$  and \*\*) branch priority on  $q$  and depth first search. +)max solution time 900 minutes.

All models were possible to solve to a reasonable quality within a practical time limit. Model B' can be solved in shorter time than Model A and B. Model A is more effectively solved than A<sub>0</sub>, due to the closer estimation of  $M$ . A slightly better objective value is obtained from Model B compared to A. It is more likely that Model A produces a better objective value than B since Model B corresponds to a restriction of the problem, a limited number of routes are considered and good solutions might be excluded. In this case, there were not many possible routes due to the sparse network structure. Then, all important routes were included by generating a few routes, considering distance and accessibility class. Adding valid inequalities gives larger models in terms of constraints, but the number of LPs solved (i.e. B&B nodes) is smaller.

## 7. Concluding remarks

A close interaction with planners at the major Swedish forest companies during the development of the models has been important to accurately represent the forest road upgrade planning problem. The models support decisions over a long time horizon for the quality of the existing network in order to secure an even wood flow. Multiple levels of accessibility classes and overall transportation cost are included. The models are general and can be used to support decisions of road restorations when the road standard affects the accessibility during different seasons. The models require information available from customer database (harvest areas) and the Swedish National Road Data Base, NVDB (road network).

Two slightly different models are presented. Model A is the straightforward formulation of this problem using arc flows. In Model B, the wood flow is determined along defined paths or routes for each pair of origin-destination. In practice only short distance routes are used. Both models correspond to a non-standard uncapacitated fixed charged network flow problems. The models have been tested in a case study at

Holmen which corresponds to a sparse network with only one demand point. With a limited number of included routes in Model B, the case study problem was solved within a couple of minutes. The LP relaxations can be tightened by inequalities. For both Model A and Model B inequalities is introduced to improve LP properties and valid inequalities are suggested for Model B. The dependence between binary and flow variables is improved by adding an extra binary variable corresponding to decision of accessibility class on route level. For the case study problem, both models were more efficiently solved including inequalities. Model B' was solved in shorter time than Model A, but corresponds to a restriction to the problem.

At present, several large companies see a considerable need of restorations of forest roads and demand a system to support these decisions. Today, there is no such system and road investments are planned manually. The plans are made mainly for shorter time periods of about a year. The developed models will be an important component in a future decision support system. The model gives an overview of available volumes over longer time horizons and it is possible to make long-term plans in advance. The model is supposed to be used on a rolling time horizon.

The case study problem corresponds to a district with a sparse road network, which is a common case in the north part of Sweden. However, the road network for a district can be dense and also involve more supply points and demand points. This problem is more complex as there are more routes and the solution time is increased. Future work includes tests on such networks and development of a decision support system prototype for road upgrade planning (Frisk, 2004). This will give a great opportunity for further testing of these models and further feed back from the practitioners.

## Acknowledgements

This research was founded by Formas, Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande. This work was performed with support from the forest research institute of Sweden, Skogforsk and the companies Holmen Skog, Stora Enso, Svea Skog and SCA. We are grateful to Leif Olsson, Midsweden University, for making the case study data set available to us.

## References

- Ahuja R. K., Magnati T. L., Orlin J. B. 1993. *Network Flows: Theory, algorithms, and applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Andaleft N., Andaleft P., Guignard M., Magendzo A., Wainer A., Weintraub A. 2003. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. *Operations Research* 51(4), 613-628.
- Anon. 1999. Nationell Vägatabas – Specifikation av innehåll. Vägverket – avd. för väginformatik, Version 3.0.
- Arvidsson P-Å., Flisberg P., Forsberg M., Jönsson A., Rönnqvist M. 2000. BIT, Beslutstöd för investeringar i bärighetshöjande åtgärder. *Working Report 470, 2000*, The Forest Research Institute of Sweden, (in Swedish).
- Arvidsson P-Å., Jönsson A., 2000. Industrivisa effekter av bristande bärighet, *Working Report 445, 2000*, The Forest Research Institute of Sweden, (in Swedish).
- Barnhardt C., Johnson E. L., Nemhauser G. L., Sigismondi G., Vance P. 1993. Formulating a mixed integer programming problem to improve solvability. *Operations Research* 41(6),

1013-1019.

- Brimberg J., Hansen P., Lih K-W, Mladenovic N., Breton M. 2003. An oil pipeline design problem. *Operations Research* 51(2), 228-239.
- Cea C., Jofre' A. 2000. Linking strategic and tactical forestry planning decisions. *Annals of Operations Research* 95(1-4), 131-158.
- Ghamlouche I., Crainic T. G., Gendreau M. 2003. Cycle-based neighbourhoods for fixed-charge capacitated multicommodity network design. *Operations Research* 51(4), 655-667.
- Guignard M., Ryu C., Spielberg K. 1998. Model tightening for integrated timber harvest and transportation planning. *European Journal of Operations Research* 111, 448-460.
- Gunn, E. A., Richards E. 2003. Tabu search for difficult forest management optimization problems. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 1126-1133.
- Gunn, E. A., Richards E. 1997. Optimizing stand level forest harvesting using a tradeoff objective function. In: Freid, J., Vasievich, J.M., Leefers, L. 1997. *Proceeding of the Seventh symposium on systems analysis in forest resources*, 28-31 May 1997, Bellaire, Michigan.
- Fourer R., Gay D. M., Kernighan B. W. 1993. AMPL – a modelling language for mathematical programming. Scientific Press. Danvers, Massachusetts, USA.
- Frisk M., 2004. VägRust underlättar planeringen, *Proceedings Utvecklingskonferensen 2004*, 3-4 March, Elmia, Jönköping, Sweden, The forest research institute of Sweden (in Swedish).
- Hadjiconstantinou E., Christofides N. 1999. An efficient implementation of an algorithm for finding K shortest simple paths. *Networks* 34(2), 88-101.
- Holmberg K., Yuan D. 2003. Optimization of Internet Protocol network design and routing. *Networks* 43(1), 39-53.
- Jonsson B., Jacobsson J., Kallur H. 1993. The forest management planning package: theory and application. *Studia forest Suecia*. 189. pp. 1-56.
- Karlsson J., Flisberg P., Gunnarsson H., Rönnqvist R. 2002. Modelling of road investments, Department of Mathematics, Linköping Institute of Technology, LiTH-MAT-R-2002-13, Sweden.
- Kim H-J., Hooker J.N. 2002. Solving fixed-charge network flow problems with a hybrid optimization and constraint programming approach. *Annals of Operations Research* 115(1), 95-124.
- Kirby M. W., Wong P., Hager W. A. 1980. Huddleston. *Guide to the integrated resources planning models*. USDA Management Sciences Staff, Technical Report, Berkeley, CA.
- Kirby M. W., Hager W. A., Wong P. 1986. Simultaneous planning of wildland management and transportation alterations. *TIMS Studies in the Management Sciences* 21, 371-387, Elsevier Science Publisher B. V. (North Holland).
- Lundgren M. G., Larsson T. 1994. A set covering reformulation of the pure fixed charge transportation problem. *Discrete Applied Mathematics* 8(3), 245-259.
- Löfroth C., Adolfsson J., Persson B., Persson T., Bergström J. 2000. Handledning av NVDB – Registrering av skogsbilvägar. The Forest Research Institute of Sweden (in Swedish).
- Murray A. T., Church R. L. 1995. Measuring the efficacy of adjacency constraint structure in forest planning models. *Canadian Journal of Forest Research* 25, 1416-1424.
- Olsson L. 2004. Optimization of forest road investments and the roundwood supply chain. Ph. D. Thesis, The Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.
- Ortega F, Wolsey L. A. 2003. A branch-and-cut algorithm for the single commodity, uncapacitated, fixed-charged network flow problem. *Networks* 41(3), 143-158.
- Patriksson M. 1994. *The traffic assignment problem – models and methods*, VSP, Utrecht, The Netherlands.
- Rardin R. L., and Wolsey L. A. 1993. Valid inequalities and projecting the multicommodity extended formulation for uncapacitated fixed charge network flow problems. *European Journal of Operations Research* 71, 95-109.
- Weintraub A., Jones G, Meacham M., Magendzo A., Magendzo A., Malchuk D. 1995. Heuristic procedures for solving mixed-integer harvest scheduling-transportation planning models. *Canadian Journal of Forest Research* 25(19), 1618-1626.
- Weintraub A., Navon D. 1976. A forest management planning model integrating silvicultural and transportation activities. *Management Science*, 22(12), 1299-1309.
- Wolsey, L. A., 1998, *Integer Programming*. Wiley Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization.