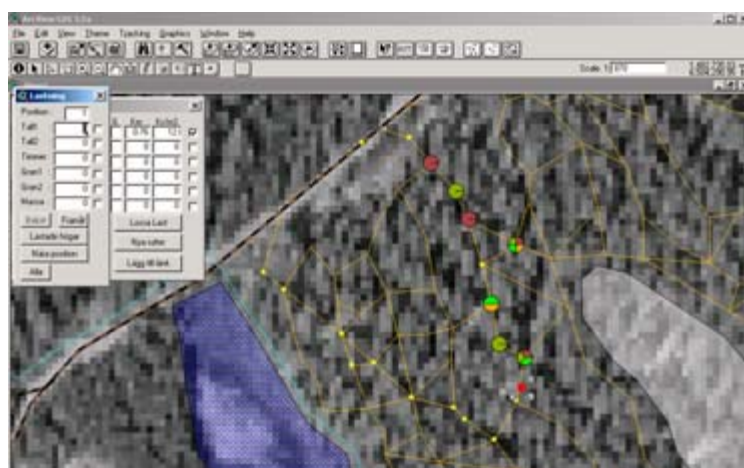


Skotningsplanering

Mattias Forsberg



Omslagsfoto: Mattias Forsberg
Ämnesord: GIS, GPS, ruttoptimering, skotning

SkogForsk – Stiftelsen Skogsbrukets Forskningsinstitut

SkogForsk arbetar för ett långsiktigt, lönsamt skogsbruk på ekologisk grund. Bakom SkogForsk står skogsbolag, skogsägareföreningar, stift, gods, allmänningar, plant-skolor, SkogsMaskinFöretagarna m.fl., som betalar årliga intressentbidrag. Hela skogsbruket bidrar dessutom till finansieringen genom en avgift på virke som avverkas i Sverige. Verksamheten finansieras vidare av staten enligt särskilt avtal och av fonder som ger projektbundet stöd.

SkogForsk arbetar med forskning och utveckling med fokus på fyra centrala frågeställningar: Produktvärde och produktionseffektivitet, Miljöanpassat skogsbruk, Nya organisationsstrukturer samt Skogsodlingsmaterial. På de områden där SkogForsk har särskild kompetens utförs även i stor omfattning uppdrag åt skogsföretag, maskintillverkare och myndigheter.

Serien **Arbetsrapport** dokumenterar långliggande försök samt inventeringar, studier m.m. och distribueras enbart efter särskild beställning.

Forsknings- och försöksresultat från SkogForsk publiceras i följande serier:

SkogForsk-Nytt. Nyheter, sammanfattningar, översikter.

Resultat. Slutsatser och rekommendationer i lättillgänglig form.

Redogörelse. Utförlig redovisning av genomfört forskningsarbete.

Report. Vetenskapligt inriktad serie (på engelska).

Handledningar. Anvisningar för hur olika arbeten lämpligen utförs.

ISSN 1404-305X

Innehåll

Sammanfattning.....	4
Inledning.....	6
Disposition.....	6
Syfte.....	7
Projektets löptid	8
Informationsstruktur	9
Skördare	9
Skotare.....	9
Administration.....	10
Informationsflöde.....	10
Optimeringsmodell	11
Grunder.....	11
Matematisk modell.....	13
Metoder för problemlösning.....	15
Beskrivning av RM	16
Ett löst exempel med RM.....	17
Indatafiler.....	18
Utdatafiler	18
GIS och dess funktionalitet.....	19
Datainsamling.....	20
Databehandling och normering.....	21
Resultat – Optimering	24
Resultat – Fordonsdator och GIS-applikation.....	25
Installation	25
Applikationens användbarhet	26
GPS-analys.....	27
Resultat – Optimalt lager	33
Optimalt lager – teori.....	33
Optimalt lager – metod.....	35
Optimalt lager – resultat	36
Diskussion.....	36
Optimering.....	36
GIS-applikation.....	38
Alternativ lösning.....	39
GPS-prestanda.....	40
Lageroptimering.....	42
Slutsatser.....	42
Referenser.....	44

Bilaga 1	Definition av in- och utdatafiler.....	45
Bilaga 2	Variabler som registrerades i Svarta Lådan.....	46
Bilaga 3	Kvalitet på positionering med GPS	48

Sammanfattning

Svensk skogsindustri har en av de högsta råvarukostnaderna i världen. Terrängtransporten, skotningen, representerar 10 % av denna kostnad. Råvaruleverantören har i dag uppgiften att hålla låga lager samtidigt som kostnaderna skall sänkas med en bibehållen leveransflexibilitet. Råvaruan-skaffningen är dessutom en komplex process. Råvarukällorna är många och geografiskt utspridda varför tillgängligheten varierar med årstid och väderlek m.m. Det är en svår uppgift som ställer krav på effektiva beslutsstöd.

SkogForsk genomförde inledande studier av optimering av skotningsarbetet under 1998 och 1999. Dessa indikerade en potentiell kostnadsminskning för terrängtransporten motsvarande 10 % av körsträckan.

Syftet med denna studie har varit att:

1. Validera tidigare resultat
2. Förbättra optimeringsmodellen
3. Bygga en fungerande prototyp som nyttjar avverkningsinformation, realtidspositionering, ruttoptimering och mobil datakommunikation i en fordonsdator.

Projektet har varit lyckosamt:

1. En optimeringsmodell har konstruerats som skapar logiska, effektiva rutter inom loppet av några minuter.
2. Optimeringen indikerade en potentiell effektivisering av skotningsarbetet motsvarande 8 % mindre terrängtransport. Detta motsvarar en reduktion av den totala skotningskostnaden på 4 %.
3. En fungerande prototyp konstruerades som har testats i fält.
4. Systemet för skotningsoptimering möjliggör skotningsrapportering med högre precision och detaljeringsgrad än i dag. I princip kan varje stocks längd, diameter, volym och sortimentstillhörighet rapporteras. Projektet har även identifierat ett alternativ till optimeringen för att skapa dessa rapporter.
5. Prototypen förenklar skotarförarens arbete, särskilt vid mörkerarbete och vid början av nya objekt. Den gör det även enklare att verifiera kvaliteten på skotningsarbetet både med avseende på det som skall göras och det som inte får göras.
6. Vidare kunde den insamlade informationen och prototypen användas för att simulera skotningsarbetet. En simulering visade att alltför små avverkningslager kan öka den nödvändiga terrängtransporten med 10 %, vilket motsvarar en ökning av den totala skotningskostnaden på 5 %.

Några problem med prototyp och arbetssätt identifierades:

1. Förmodade flervägsfel vid positionering gjorde att föraren inte till fullo kunde lita på den position som genererades.
2. Hytten i en skotare är inte anpassad för installation av en fordonsdator. Särskilt placering av skärm och pekdon påverkade arbetsplatsens ergonomi negativt.
3. Kvaliteten på den information som nyttjas är kritisk. Det är mycket viktigt att föraren har en förståelse för informationen och hur fel kan påverka resultatet vid optimering. Om fel har uppstått vid datagenerering måste föraren snabbt och enkelt kunna korrigera dessa.

Inledning

Sverige har en av världens högsta råvarukostnader. Terrängtransportkostnaden utgör knappt 10 % av den totala råvarukostnaden fritt industri eller ca 2,5 miljarder kronor per år.

Den tilltagande internationella konkurrensen på världsmarknaden i kombination med ett ökande miljömedvetande hos både leverantör och kund samt ökande konkurrens från olika substitut för trä och träfibrer skapar ett tydligt fokus för den svenska skogsindustrin: att tillverka produkter av hög kvalitet till internationellt konkurrenskraftiga kostnader på ett miljömässigt hållbart sätt. För att klara detta måste råvaruleverantören hålla en hög precision och leveransflexibilitet samtidigt som en färsk råvara levereras med rationella metoder.

En förutsättning för arbetet är att skogsnäringens råvarubas är geografiskt utspridd. Bilden kompliceras ytterligare av att flera olika råvarusortiment finns vid varje råvarukälla samt att varje sortiment har olika (och varierande) krav med avseende på behandling och ledtider.

För att göra rationella beslut i varje led i råvarukedjan krävs därför kraftfulla och användarvänliga beslutsstöd som kan:

- Minimera lager i skog och vid industri samtidigt som kostnaderna hålls nere i hela flödeskurvan.
- Hålla en god överblick över nuvarande lager och styra aktiviteter mot framtida behov.

Under 1998 och 1999 genomförde SkogForsk inledande studier av hur man kan genomföra en effektiv skotningsplanering med hjälp av informationssystem. En slutavverkning om 4,4 ha genomfördes på konventionellt vis. Virkeshögarnas position, volym och sortiment samlades in manuellt i efterhand. Skotarens arbete registrerades med hjälp av en GPS-mottagare, vilket sedan i efterhand jämfördes med optimerade rutter. Dessa indikerade att det finns en potentiell kostnadsminskning för skotningsarbetet om ca 10 % genom en bättre planering.

Under detta projekt drogs även riktlinjerna upp för hur ett framtida system kan se ut, där skotaren nyttjar avverkningsinformation från skördaren.

"I skördaren fogas information om stocken samman med dess position. Denna avverkningsinformation förs via mobil datakommunikation över till centrala administrativa system. Dessa förser sedan övriga funktioner inom organisationen med relevant information för kontroll av produktion mot kundkrav samt planering av skotning och skogsvård. Skotningsrapporteringen lägger i sin tur grunden för en effektiv styrning av vidaretransport till industri".

Disposition

Arbetsrapporten är disponerad enligt följande. Först behandlas projektets syfte och dess arbetsgång. Under rubrikerna *Informationsstruktur*, *Informationsflöde* och *Optimeringsmodell* beskrivs systemets struktur. Under rubriken GIS och dess

funktionalitet beskrivs kort den utvecklade applikationens funktioner. I texten *Datainsamling* beskrivs de begränsningar som fick göras i sättet som data samlades samt de problem som uppstod vid datainsamlingen. Under rubrikerna *Resultat – Optimering* och *Resultat – Fordonsdator och GIS-applikation* beskrivs den beräknade nyttan av ruttoptimering samt systemets användbarhet. I texten *GPS-analys* behandlas precisionen på använd GPS-mottagare. Nyttan med dagens mått på GPS-prestanda behandlas och ett alternativ föreslås. I stycket *Resultat – Optimalt lager* skattas skotarens prestation i relation till avverkningslagrets storlek. Därefter följer en diskussion om respektive delproblem, tre stycken, samt de slutsatser som kan dras från studien.

Syfte

För föreliggande studie har vi satt upp flera delmål:

Verifiering av tidigare resultat – Den tidigare studien baseras på endast ett objekt och en studie. Därför är det motiverat med fler försök för att verifiera resultaten.

Systembyggnad – Målsättningen var att komma så nära en framtida vision, om en digital informationskedja med en effektiv skotningsplanering, som det var tekniskt möjligt. Projektet syftar till att bygga ett system som består av:

- automatisk datafångst i skördaren,
- trådlös kommunikation mellan skördare, skotare och en koj dator,
- ett väl fungerande optimeringssystem,
- löpande on-line-presentation av rutter på skärm i skotarhytten.

Om kommunikationen mellan de tre enheterna inte gick att lösa inom ramen för projektet var målet i stället en manuell dataöverföring (diskett, PC-card eller motsvarande) till en koj dator, där produktion av papperskartor görs som utgångspunkt för skotarens arbete. En utvärdering av olika kommunikationslösningar skall genomföras, som en del i arbetet. Utvärderingen skall omfatta en teknisk och ekonomisk analys av olika alternativ (radiolänk, GSM, etc.).

Ett sista alternativ är ett förfarande liknande den inledande studien med manuell positions- och sortimentsbestämning samt skattning av volym av varje virkeshög. Skotning sker på traditionellt sätt, vilken i efterhand jämförs med separat ruttoptimering.

Förbättrad optimeringsmodell – Erfarenheterna från den första studien pekar mot att den existerande optimeringsmodellen bör revideras. Målet är att modellen skall kunna optimera skotningen utifrån manuellt eller automatiskt insamlade data, samt kunna hantera prioritering av sortiment.

Försöket bedömdes behöva 2–3 avverkningar för studien. En av dessa bör genomföras så att hela objektet avverkas och skotning genomförs utan stöd från optimering. Därefter utvärderas skotarens prestation utifrån de beräknade optimala rutterna för att verifiera potentialen för kostnadsbesparing vid skotningsplanering.

En eller flera avverkningar bör också genomföras för att testa det utvecklade systemets funktionalitet och användbarhet inklusive GPS-prestanda.

Det är även av vikt att bygga upp en databas med mer detaljerad information om skördarens och skotarens arbete för flera avverkningar. Detta möjliggör en bra testbana vid applikationsutveckling samt mer avancerade analyser t.ex. omfattande optimalt skotningslager.

Projektets löptid

Projektet påbörjades i juni 2000. Nedan följer en kort sammanställning av de aktiviteter som har företagits i projektet.

Tabell 1.
Projektaktiviteter.

Tid	Aktivitet
Juni – Juli	Genomgång av dokument och data från tidigare försök.
Juli	Startmöte med primära intressenter; Holmen Skog, MAI avd. för optimeringslära vid Linköpings Universitet och SkogForsk.
Juli – Aug	Utarbetning av försöksplan.
Juli	Samtliga tänkbara maskintillverkare kontaktas angående försöksplan och deras eventuella medverkan.
Aug	Kravspecifikation för de filer och funktioner som krävs av optimeringsalgoritmen.
Aug – Dec	Utveckling av optimeringsalgoritmen. Test av olika versioner.
Sep	Sunit meddelar sitt deltagande i projektet
Sep	Timberjack meddelar sitt deltagande i projektet.
Sep – Okt	Utveckling av GIS-applikation.
Sep	Projektmöte II med primära intressenter; Holmen, LiU och SkogForsk.
Sep	Test av optimeringsalgoritmen på äldre data.
Okt	Kontakt med entreprenör samt val av försöksobjekt.
Nov	Försöket genomförs på två avverkningar.
Nov – Dec	Analys av insamlade data.
Dec – Jan	Rapportskrivning.

Informationsstruktur

Utifrån det angreppssätt som använts vid detta försök uppstår tre tydliga objekt i en tänkt informationsstruktur.

- Skördare
- Skotare
- Centralt lokaliserat administrativt system med databas

Skördare

Skördaren är ursprunget till de flesta variabler som behövs vid en optimering av skotningsarbetet. I dagens skördare genereras alla nödvändiga avverkningsvariabler i apteringsdatorn, förutom position. Den standard som tagits fram för Pri-filer inom StanForD utgör en bra grund för den information som behövs. Pri-definitionen innehåller även möjligheter för ytterligare variabler som t.ex. koordinater. Ett flertal skogsmaskintillverkare förbereder en implementation av denna filtyp. Från ett tekniskt perspektiv torde det inte vara ett allt för omfattande arbete att ansluta en GPS-enhet till en apteringsdator.

Det finns således en möjlighet att inom en snar framtid skapa högkvalitativ information om sortiment, volym, diameter, längd, tid och position på bit-nivå.¹ Detta är förenat med flera möjliga nyttoeffekter varav skotnings-optimering endast är en.

Skotare

Skotaren är en av två användare av informationen som skapas i skördarmaskinen. För att rationalisera informationshanteringen summeras avverkningsdata per uppställningsplats och sortiment² innan den sänds till skotaren.

Med härledning av tidpunkt samt position för varje uppställningsplats kan ett nodsystem med sammanbindande nätverk genereras. Heuristiken baseras på att en länk genereras mellan nod A och nod B om nod B är nästa nod i en tids-serie eller om nod B befinner sig inom ett givet avstånd från nod A.

Information om nätverkets utseende, skotarens kapacitet, virkeshögarnas innehåll och position utgör indata för ruttoptimeringen.

Ruttförslag kan presenteras i ett GIS (Geografiskt Informations System). Information om virkeshögarnas samt skotarmaskinens position finns på en digital 2-dimensionell karta. Att arbeta enligt de föreslagna rutterna skapar en möjlighet att enkelt, men effektivt, automatisera skotarrapporteringen.

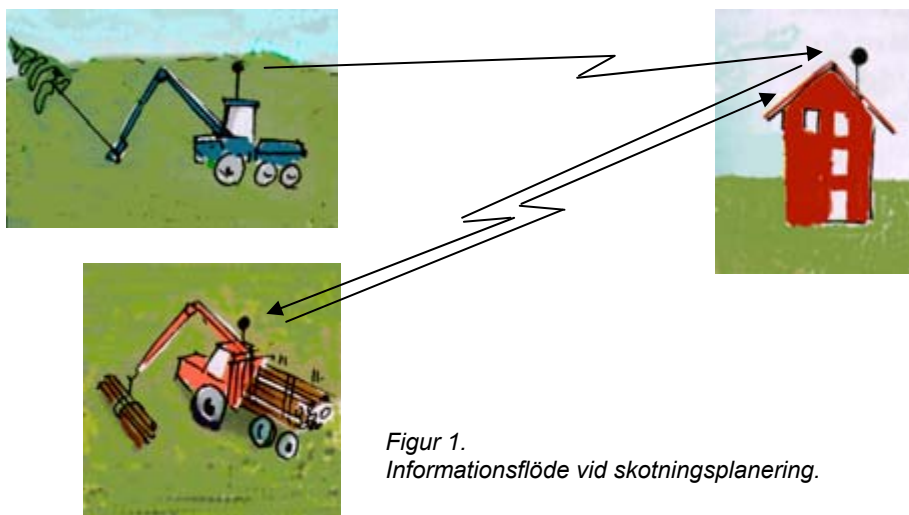
¹ Med bit avses del av ett avverkat träd. Varje avverkat träd delas upp i flera bitar, stockar, beroende på framtida användning.

² Normalt avverkas flera träd på en uppställningsplats. De avverkade bitarna läggs sedan i en hög per sortiment.

Administration

För att förbättra möjligheterna till mobil datakommunikation samt möjliggöra en automation av skördar- och skotarrapportering bör en centralt placerad databas ingå i systemet. Anledningarna är flera:

- De flesta system för mobil datakommunikation har begränsad täckning. Det är mer sannolikt att en överföring från en mobil enhet till en databas med fast anslutning till Internet och telesystem lyckas än om överföringen görs till en annan mobil enhet.
- Avverkningsinformationen kan användas till olika centralt placerade funktioner.
- Begränsning av den nödvändiga datamängden som sänds.



Figur 1.
Informationsflöde vid skotningsplanering.

Informationsflöde

Det flöde av information som systemet skapar från skördare till central databas, omfattar omkring 7,5 kB per 100 m³fub. Då skotaren inte kräver en lika hög upplösning på informationen kan den summeras per virkeshög, vilket minskar storleken till ungefär 0,6 kB per 100 m³fub. Dessa uppgifter är baserade på en slutavverkning och är beroende av objektets medelstam.

Det planerade informationsflödet kan beskrivas enligt följande:

1. Skördaren avverkar på en trakt, några gånger per dag sänds avverkningsinformation till en centralt placerad databas. I databasen definieras uppställningsplatser och volymer summeras per uppställningsplats och sortiment.

2. När skotaren anländer till platsen överförs den sammanställda informationen till skotaren där den tillsammans med skotarspecifika uppgifter används för ruttoptimering. En stick- och basvägskarta genereras som presenteras i GISet för skotarföraren tillsammans med rutförslag och övriga informationsskikt som t.ex. beståndsgränser, vattendrag och kultur-lämningar.
3. Skotarföraren väljer en föreslagen rutt och påbörjar arbetet. Efter varje rutt adderas det ”digitala lasset” till en skotningsrapport. Skotningsrapporter sänds till den centrala databasen med någon timmes intervall. Ny avverkningssinformation överförs till skotaren med samma intervall. Ur den centrala databasen kan sedan information om väglagret med valfri grad av upplösning genereras³. Även om skotningsrapporten endast innehåller ett id-nummer per virkeshög kan den sammanställda informationen i den centrala databasen användas för att ”läsa upp” informationen till en upplösning på individnivå.

Optimeringsmodell

Målsättningen har varit att ta fram en modell för optimering som minimerar den totala skotningstiden, inklusive lastning och lossning, samt har en hög prestanda. – En optimering skall kunna genomföras under några minuter. Kravet baseras på tiden från att de sista stockarna har lastats i en rutt till att skotaren skall påbörja nästa rutt.

Grunder

Ruttplanering är ett klassiskt optimeringsproblem som studerats i ett stort antal böcker och artiklar, se t.ex. Fisher (1995). Det traditionella ruttplaneringsproblemet går ut på att bestämma en mängd av rutter till lägsta möjliga kostnad för en flotta av identiska fordon för att besöka ett antal kunder, vilka har en given efterfrågan. Om antalet fordon i flottan är känt vill man att rutterna är konstruerade så att den totala transporttiden (eller transportsträckan) är minimerad. Om antalet fordon ej är känt vill man konstruera rutter så att man till ett minimalt antal fordon minimerar den totala körtiden. Det finns ett antal ytterligare vanliga begränsningar och aspekter som man kan lägga till för att beskriva problemet. Dessa inkluderar:

- Varje rutt har en begränsad körtid (eller körsträcka).
- Lastbar volym (eller vikten) är begränsad, ofta kallad lastkapacitet.
- Varje rutt skall starta och sluta i samma geografiska punkt, ofta kallad depå.
- Om en service skall utföras hos en kund i mellan tidpunkterna L_i och U_i , kallas $[L_i, U_i]$ för ett hårt tidsfönster. Om intervallet är ett önskemål men inget krav kallas det för ett mjukt tidsfönster.

³ Volym, diameter, längd, sortiment, tid sedan avverkning.

För många praktiska ruttplaneringsproblem finns det ytterligare aspekter som man behöver införa. Några av de viktigare är:

- Fordonen kan vara av olika typ och t.ex. ha olika kapacitet eller hastigheter.
- Efterfrågan hos en kund är kanske inte känd förrän vid lastning.
- De varor som skall transporteras har olika egenskaper och kan inte samlastas.

I vår tillämpning finns bara ett fordon som har en given lastkapacitet i termer av vikt och tvärsnittsarea. Kunder kommer att representeras av de olika högarna. Vad gäller depå så har vi en gemensam punkt där samtliga turer startar men där respektive sortiment skall lastas av vid olika punkter. I praktiken kan man dock hantera detta som ett problem med en depå. För närvarande finns inga tidsfönster givna för när högarna skall hämtas. Dock kan det senare finnas behov av att kunna styra ruttgenereringen så att man tömmer avverknings-trakten på vissa sortiment innan andra. I detta fall behöver man styra detta med t.ex. tidsfönster eller manuellt välja ut ordningen på hur rutterna skall genomföras.

Den aspekt som är mest komplicerande är hur samlastning av olika sortiment skall beskrivas. Vissa sortiment kan inte samlastas och det är relativt enkelt att formulera. Däremot är det betydligt svårare att formulera den extra tiden för sortering som krävs vid samlastning av två eller flera sortiment. Vi skall vara medvetna att detta sker genom att den matematiska modellen blir betydligt mer komplex och svårlöst (i alla fall med standardprogramvara för ruttplanering).

I princip alla ruttplaneringsproblem faller inom klassen av problem som kallas NP-hårda. Ett problem är NP-hårt om antalet beräkningar som krävs för att lösa det ökar exponentiellt med en parameter av modellstorleken. Eftersom det i praktiken är omöjligt att garantera optimala lösningar för någorlunda stora problem så används ofta heuristiska metoder för att hitta när-optimala lösningar. En heuristik kan enklast beskrivas genom att man använder ett antal tumregler för att genomföra planeringen, vilket i många fall kan vara snarlikt den process som man manuellt arbetar från. En standard heuristik för ruttplanering består av följande steg.

1. Välj ett fixerat antal rutter, K , som kan användas.
2. **Rutt generering:** Fördela ut högarna till K -grupper. Använd någon turuppbyggande heuristik för att konstruera initiala rutter.
3. **Ruttförbättring:** För att reducera den totala tiden för samtliga rutter samt för att varje hög skall finnas med i någon rutt utförs eller flera av följande punkter:
 - a. Ändra sekvensen av högar i turen.
 - b. Flytta högar mellan rutterna..
 - c. Sätt in ej hämtade högar i rutter.

Steg 3. Ruttförbättring upprepas tills inga förbättringar erhålls eller något avbrottskriterium avseende tid eller antal iterationer är uppfyllt.

Matematisk modell

För att formulera den grundläggande matematiska modellen för ruttplanering inför vi ett antal beslutsvariabler. Vi antar att vi har n högar och K rutter att utgå från. Vi noterar att det inte är säkert att alla K rutter används och detta visar sig genom att inga högar tilldelas vissa rutter.

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{om hög } i \text{ hämtas i rutt } k \\ 0, & \text{annars.} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{om rutt } k \text{ hämtar hög } j \text{ direkt efter hög } i \\ 0, & \text{annars.} \end{cases}$$

Vi behöver även ett antal koefficienter givna enligt:

a_i = storlek på hög i (area)

c_{ij} = tid för att köra mellan hög i och j

b = lastkapacitet

Det allmänna problemet kan nu formuleras enligt:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ijk}$$

då

$$\sum_{i=1}^n a_i y_{ik} \leq b, \quad k = 1, \dots, K \quad (\text{A})$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = \begin{cases} K, & i = 0 \\ 1, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (\text{B})$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = y_{jk}, \quad j = 0, \dots, n, \quad k = 1, \dots, K \quad (\text{C})$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = y_{ik}, \quad i = 0, \dots, n, \quad k = 1, \dots, K \quad (\text{D})$$

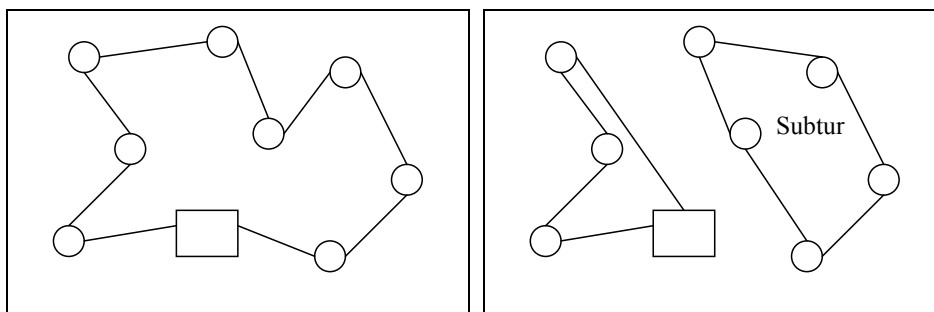
$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad S \subseteq N(\mathbf{y}_k), \quad 2 \leq |S| \leq n, \quad k = 1, \dots, K \quad (\text{E})$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, \dots, n, \quad k = 0, \dots, K \quad (\text{F1})$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, \dots, n, \quad j = 0, \dots, n, \quad k = 0, \dots, K \quad (\text{F2})$$

Målfunktionen beskriver den totala tiden som krävs för att genomföra turerna. I denna formulering har vi ett antal typer av bivillkor. Grupp (A) innebär att samtliga rutter uppfyller lastkapaciteten. Grupp (B) beskriver att antalet rutter som besöker avlastningsplats är lika med det totala antalet rutter, samt att varje hög hämtas upp av enbart en rutt. Grupperna (C) och (D) kopplar ihop rutt-designen som ges av x-variablerna med tillordningen av högar mot rutter som ges av y-variablerna. Grupp (E) ser till så att det inte skapas några subturer. Beteckningen $N(\mathbf{y}_k)$ används för att beteckna de högar som ingår i en viss tur k .

Grupperna (F1) och (F2) säger att beslutsvariablerna skall vara 0/1 variabler. De bivillkor som gör det komplicerat är grupp (E) som växer exponentiellt med problemstorleken. En illustration av subturer ges av figur 2. En rutt som uppfyller samtliga subtursvillkor ges av den vänstra delen (i figuren) medan den högra visar en tur som innehåller en subtur och då bryter mot de subtursförbjudande villkoren.



Figur 2.

Ett exempel på en tur som uppfyller villkoren på subturer (vänstra delen) samt ett exempel på en tur som ej uppfyller kraven på subturer (högra delen).

I vårt problem har vi möjlighet till samlastning av sortiment, men detta sker med en ökning av sorteringstiden vid avlastning. Detta kan formuleras i modellen genom att vi inför ytterligare en variabelgrupp som bestämmer vilken typ av sorteringsmönster som skall användas av varje rutt. Till detta tillkommer ett antal bivillkor för att de logiska sambanden skall blir korrekta. Vi ger inte denna formulering i denna rapport.

I många tillämpningar där man löser ruttproblem med många sidovillkor använder man så kallade 'set-partitioning'-modeller. I denna modell definierar man explicit de möjliga rutterna. Fördelarna med denna modell är att man kan inkludera många extra villkor på rutterna samt att det finns effektiva lösningsmetoder utvecklade. Denna modell använder följande variabler.

$$z_j = \begin{cases} 1, & \text{om rutt } j \text{ används, } j = 1, \dots, C \\ 0, & \text{annars.} \end{cases}$$

De koefficienter som behövs är

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{om hög } i \text{ hämtas i rutt } j \\ 0, & \text{annars.} \end{cases}$$

$$f_j = \text{tid för att köra rutt } j.$$

Modellen kan då skrivas som

$$\min \sum_{j=1}^C f_j z_j$$

då

$$\sum_{j=1}^C d_{ij} z_j = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A})$$

$$z_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, C \quad (\text{B})$$

Målfunktion uttrycker på samma sätt som tidigare den totala tiden för att utföra de rutter som väljs. Eftersom variablerna eller kolumnerna är definierade direkt via de högar som hämtas på motsvarande rutt är det enkelt att beräkna den korrekta tiden (inkluderade eventuella extra sorteringstider). Bivillkor (A) kräver att varje hög hämtas (täcks) av exakt en rutt. Grupp (B) kräver att beslutsvariablerna är 0/1 variabler. Antalet möjliga rutter kan vara mycket stort och ofta är det praktiskt omöjligt att inkludera samtliga. Ofta kombinerar man därför modellen med kolumngenerering, vilket innebär att man dynamiskt genererar möjliga rutter under lösningsproceduren.

Metoder för problemlösning

Det finns ett antal möjliga metoder för att lösa vårt problem. Vi har tidigare beskrivit en generell heuristik för ruttplanering och där återfinns många olika metoder. Vårt skotningsproblem har dock vissa speciella egenskaper som gör att man måste specialanpassa metoder för att få en korrekt beskrivning av problemet. I Carlsson et al. (1999) beskrivs en lösningsmodell och metod baserad på en modell av ett övertäckningsproblem (eng. set covering), vilken är mycket närbesläktad med uppdelningsproblem (eng. set partitioning) och kolumngenerering. Här genereras via en heuristik ett antal lösningar som bygger på hur skotarförarna tömmer avverkningstrakten genom att börja på den mest avlägsna upplagsplatsen. En heuristik kan enklast liknas med en implementering av ett antal väl fungerande tumregler. Sedan används en metodik där ett huvudproblem och ett delproblem (eller subproblem) alternativt löses. Huvudproblemet, vilket är ett övertäckningsproblem, och består av en mängd rutter ger information till delproblemet via dualvariabler. Delproblemet använder dualinformationen för att skapa en ny rutt, vilken skickas tillbaka till huvudproblemet. Huvudproblemet löses åter och processen upprepas. Denna process fortsätter tills delproblemet ej kan hitta någon rutt som kan förbättra lösningens kvalitet. Nackdelen med denna lösningsmetod är att det tar lång tid innan man kan generera bra och tillåtna heltalslösningar.

För att följa upp vilken potential metoden har jämfördes rutterna från metoden med faktiska rutter på ett avverkningsområde. Som en ytterligare jämförelse testades ett kommersiellt system för ruttplanering utvecklat av CAPS Logistics. Flera av de metoder, samtliga olika typer av heuristiker, som fanns i systemet testades. De besparingar som gjordes låg på upp till 10 % och det gäller både de kommersiella och den föreslagna metoden i Carlsson et al. (1999). Resultaten återfinns i Arvidsson et al. (2000). Vi kan dock notera att även det kommersiella systemet var för långsamt för operativ användning. Dessutom visade det sig att det var svårt att modellera vissa aspekter, vilket inkluderar möjligheterna till samlastning av sortiment.

Den metod som utvecklades i detta projekt är baserad på 'Repeated Matching' (RM), vilket närmast kan översättas med Upprepad Matchning. Grunden för metoden är att iterativt kombinera olika rutter till än mer effektiva rutter genom att i varje iteration lösa ett matchningsproblem. Metoden har tidigare används effektivt på olika typer av ruttplanerings- och sekvensieringsproblem. I Wark och Holt (1994) så löses ett generellt ruttplaneringsproblem, och i Forbes et al. (1991) ett ruttplaneringsproblem för busschaufförer. I Rönnqvist (1998) återfinns en generell beskrivning av RM använt i olika applikationer. En

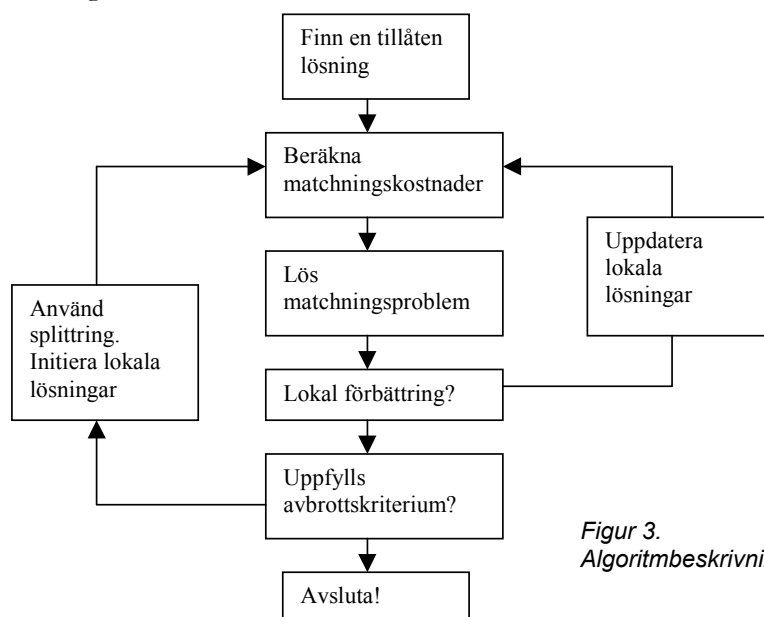
av de stora fördelarna med denna typ av metod är att det mycket snabbt genereras bra rutförslag. Detta innebär att man kan använda metoden operativt där det finns krav på att få förslag tillgängliga inom en relativt begränsad tid. Dessutom kan man relativt enkelt bygga upp ett system, då de flesta delarna som krävs återfinns som basmodeller inom optimering.

Beskrivning av RM

En algoritmbeskrivning av RM finns i figur 3. Först hittas en startlösning. Sedan beräknas kostnader som reflekterar den förändring av tid eller värde man får om rutter matchas ihop. Här innebär matchning olika saker men kort kan följande saker inträffa:

- Två rutter kombineras till en rutt (någon förtjänst).
- Två rutter kombineras men man erhåller två nya förändrade rutter (någon förtjänst).
- Två rutter förblir oförändrade (ingen förtjänst).

När samtliga parvisa matchningskostnader har beräknats löses ett matchningsproblem. Om en förbättrad lösning erhålls uppdateras den bäst funna lösningen. Dessa steg upprepas till ingen bättre lösning kan erhållas. Därefter används en teknik för att välja ut en rutt och sedan slå sönder, splittra, denna i enskilda rutter med en hög i varje. Därefter upprepas matchningsproceduren åter. Hela processen upprepas tills ett fixerat antal iterationer uppnåtts eller tills dess en given tid har använts.



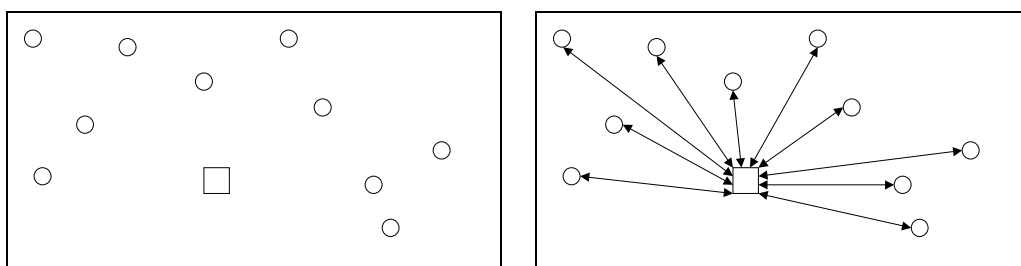
Figur 3.
Algoritmbeskrivning av RM.

För att beräkna matchningskostnader behöver ett antal olika jämförelser genomföras. I vårt fall kommer två turer att kombineras. För att bestämma matchningskostnaden så testas ett antal scenarier. Ett är att samtliga högar läggs till den ena eller andra ruten. Ett annat är att enbart en eller två högar flyttas mellan rutterna. Om så är fallet så kan ytterligare omflyttningar testas. Det finns flera möjligheter att försöka matcha ihop två rutter men de utelämnas i denna beskrivning.

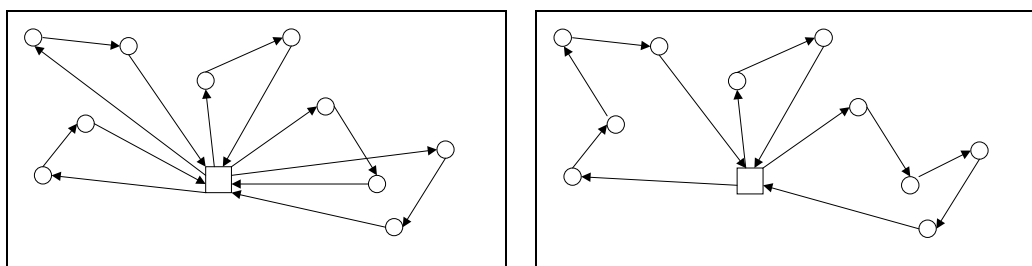
Att lösa matchningsproblemet är i sin tur ett eget optimeringsproblem. Detta problem kan formuleras direkt i en speciell modell för vilken det finns flera lösningsmetoder, se t.ex. Derigs och Metz (1986). Vi använder en metod som baseras på en kombination av trädsökning och det faktum att tillordningsproblemet är en relaxering av matchningsproblemet, se Forbes et al. (1991).

Ett löst exempel med RM

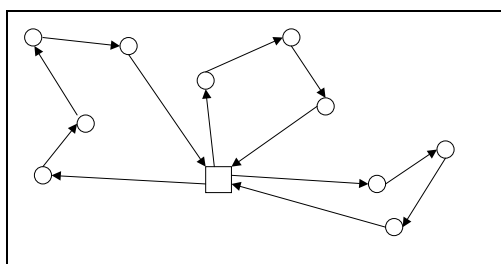
För att beskriva metoden utgår vi från ett enkelt problem med tio högar med samma storlek och sortiment. I figur 4 finns en illustration av exemplet. För enkelhetens skull antar vi att avstånden mellan högarna ges direkt av de Euklidiska avstånden. Skotarens kapacitet antas vara fyra högar. I figurerna 4–6 ges de följande fyra iterationerna som krävs innan man får en lokal lösning som ej kan förbättras.



Figur 4.
Initial data för exempel med tio högar och enbart ett sortiment (vänster del). Iteration 1 (höger del).

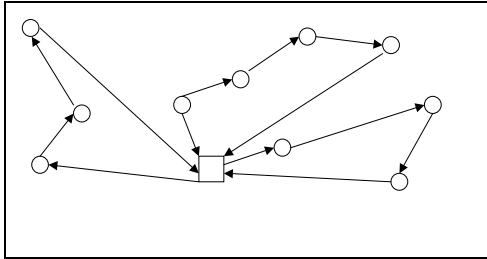


Figur 5.
Iteration 2 (vänster del) och iteration 3 (höger del).

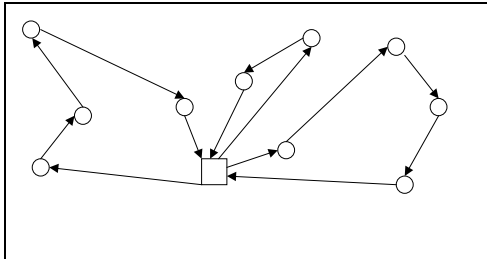


Figur 6.
Iteration 4 och den slutgiltiga lokala lösningen.

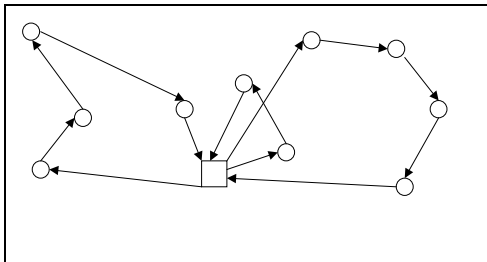
För att beskriva vad en splittring innebär kan vi studera figurerna 7–9. I övre vänstra hörnet så har vi en initial lösning. Vi splittrar sedan den mellersta rutten så att vi får fyra separata högar med respektive tur. I första iterationen tas en hög in till de två rutten som var med i den ursprungliga lösningen. I de två sista iterationerna förändras rutternas utseende genom att högar byts mellan rutterna.



Figur 7.
Initial lösning (vänster del) följt av en splittring av en rutt (höger del).



Figur 8.
Iteration 1 (ovan) och iteration 2 (höger del).



Figur 9.
Iteration 3 och slutgiltig lösning.

Den utvecklade modellen genererar en mängd olika sekvenser, vilka kombineras till rutter, sparar de bästa och genererar nya alternativ. På så sätt kan en näroptimal lösning skapas på relativt kort tid. Då den marginella nyttan av en ökad lösningstid (nya slumpningar och rutter att jämföra) är avtagande kan således ett tidsintervall identifieras där den marginella nyttan är försumbar. Med ett problem av försökets storlek (230 noder och 670 virkeshögar) och använd datorprestanda (450 MHz och 260 Mb RAM) nåddes denna tidpunkt inom 1–2 minuter.

Indatafiler

För optimering krävs uppgifter om virkeshögarnas area och volym, nätverkets struktur och skotarens kapacitet samt viss styrning för val av beräkningsmetod. En definition av filerna finns i bilaga 1.

Utdatafiler

Efter det att algoritmen har funnit den bästa lösningen, enligt den specificerade beräkningsmetoden, skapas två utdatafiler. De innehåller dels detaljerad information om de noder som ingår i en rutt, dels övergripande information om ruttens längd, beräknad körtid samt vilka sortiment som ingår. Bilaga 1 innehåller en definition av de två filerna; Ruttdata och Ruttinfo.

GIS och dess funktionalitet

GIS har till uppgift att visa olika digitala kartsikt för skotarföraren. Några av dessa skikt är dynamiska. De skapas, förändras och raderas under tiden en avverkning genomförs. Andra skikt är statiska. Exempel på statiska skikt kan vara de tidigare nämnda beståndsgränser, vattendrag, vägar, kulturlämningar, biotopskydd o.s.v. Dessa är inte nödvändiga för skotningsoptimeringen, men utgör ett stöd vid skotarförarens arbete. De statiska skikten lämnas utanför i den fortsatta analysen.

Det använda GISet består av programvaror från ESRI ArcView och Tracking Analyst. Med hjälp av denna plattform har sedan ett projekt utvecklats med en mängd extra funktioner. I den fortsatta framställningen kommer skikt användas synonymt med tema. De olika dynamiska skikten beskrivs nedan:

- Ett viktigt skikt är aktuell position. Med hjälp av Tracking Analyst kan en GPS anslutas till datorn. Den senast registrerade positionen visas i GISet som en punkt. Projektet modifierades så att uppkoppling mot GPS samt skiktgenerering sker automatiskt. Funktionerna anpassades för datumet⁴ WGS-84 samt protokollet⁵ NMEA-0184. Olika funktioner kan relateras till aktuell position, t.ex. varningsmeddelanden, rapportgenerering o.s.v.
- Volymskiktet innehåller alla uppställningsplatser samt information om volym per virkeshög. Volymerna baseras på antagandet om en virkeshög per sortiment och uppställningsplats och visas som ett punkttema.
- Nätverket, som visar hur de olika uppställningsplatserna är sammanknutna, visas som ett linjetema.
- Varje rutt utgör ett eget skikt. För att begränsa komplexiteten begränsades antalet rutter som kan visas samtidigt till sex stycken.

Det finns vidare två dialogrutor, med vilka många av GISets funktioner hanteras.

Den första, Rutter, innehåller information om de rutter som finns i GISet, vilka sortiment som ingår, ruttens längd samt beräknad kostnad. Enskilda rutter kan vara synliga/osynliga. En föreslagen rutt presenteras som en kombination av cirkeldiagram och punkter. På varje nod visas ett cirkeldiagram vid vilken lastning skall ske. Bitarnas färg och storlek beror av sortiment och dess volym som skall lastas. De noder som endast skall passeras visas som en punkt. Ett ”pärlband” av punkter och cirkeldiagram beskriver på så vis en rutt utseende.

En rutt lastas genom att klicka på knappen ”Lasta rutt” samt vald rutt markeras från en lista. Då detta görs markeras de virkeshögar som ingår i ruttens lastade i databasen. En rutt lossas genom att klicka på knappen ”Lossa last”. De virkeshögar som är markerade som lastade i volymtabellen raderas och flyttas till tabellen för skotarrapportering. På så vis kan information om skogslagret (volymtabell) och väglagret (skotarrapportering) ständigt vara uppdaterade.

⁴ Med datum avses Geodetiskt datum. En definition på jordens krökning. GPS är definierat för WGS-84, vilket är en god approximation av hela jorden. Kartor i Sverige är normalt anpassade för RT-90, vilket bättre beskriver jordens krökning i Sverige.

⁵ Protokollet beskriver utseendet på dataflödet från GPS.

Med knappen ”Ta bort rutter” kan de rutter som finns inlästa i GISet lyftas ur för att ge plats åt andra rutter. Nya rutter läses in med knappen ”Nya rutter”, vilken öppnar en dialogruta med samtliga tillgängliga rutter. Valda rutter markeras från en rullista. Då det är troligt att det genererade nätverket inte perfekt återger förutsättningarna i terrängen finns funktioner för att lägga till eller ta bort länkar. Detta görs med knapparna ”Lägg till länk” och ”Ta bort länk”, vilka öppnar en dialogruta där aktuell länk anges med från nod och till nod.

Den andra dialogrutan, Lastning, innehåller information om enskilda uppställningsplatser. Användaren kan bläddra mellan:

1. samtliga uppställningsplatser
2. uppställningsplatser som ingår i en rutt
3. uppställningsplatser nära en specifik position.

Det finns därmed möjlighet att markera/avmarkera olika virkeshögar i en rutt. Det finns även stöd för automatisk bläddring, så att information om den uppställningsplats som är närmast aktuell position visas.

Datainsamling

Vid försöket skapades avverkningsinformationen genom en lägre grad av integration i skördaren. Skördaren som användes vid försöket var en Timberjack 1270b. Via canbus, knutpunkt för maskinens styrenheter, anslöts en separat datasamlare. I fortsättningen benämns denna ”Svarta Lådan”. Svarta Lådan är en specialtillverkad datorenhet av Timberjack för mätning och registrering av olika variabler som förekommer i maskinens system. Fördelen med denna enhet är att den kan konfigureras att spara aktuella variabler på det format som önskas. Data sparades med ett format liknade en Pri-fil. Bilaga 2 innehåller en definition av de variabler som användes samt ett exempel på avverkningsdata.

Aktuell position lagrades varannan sekund. För ändamålet användes en Trimble Lassen SKII-GPS med differentiell korrigering i realtid. GPSen lagrade positionerna på en integrerad minnesenhet. Kapaciteten på minnet motsvarade ca 15 timmars positionering varför data tömdes från GPS och Svarta Lådan en gång per dygn⁶. Bilaga 2 innehåller en exempelfil med formatet NMEA-0183.

Utifrån uppgifter om start och stopp vid förflyttning kunde tidsintervall definieras vid vilka skördaren har stått stilla och avverkat träd. En medelposition kunde därmed beräknas för varje tidsintervall. För varje intervall summerades den avverkade volymen per sortiment. Efter dessa två moment kunde en tabell med uppgift om position och volym per sortiment för varje uppställningsplats skapas. På den första avverkningen motsvarade detta ca 1 200 positioner. Många av dessa var placerade i kluster endast några dm till ett par meter från varandra. Det stora antalet beror på att skördaren ofta gjorde

⁶ Båda enheterna anslöts till en bärbar dator via seriell kabel.

flera mindre förflyttningar på samma uppställningsplats. Data summerades därför manuellt ned till ca 230 uppställningsplatser.

Den totalt avverkade volymen underskattas något då den mekaniserade avverkingen föregicks av en manuell fällning, och i viss mån upparbetning av övergrova träd. De rotstockar som apterades manuellt registrerades därmed aldrig i skördarmaskinens apteringsdator. Dessa volymer skall framför allt hänföras till sortimentet Vänerblock.⁷

Skotningen på det första hygget utfördes utan optimeringsstöd. Skotarföraren registrerade manuellt på ett formulär vilka virkeshögar som lastades i en rutt. Lastad virkeshög definierades som den uppställningsplats som skotarföraren var närmast i GISet.⁸ Vissa problem uppstod vid orientering dels beroende på GPS-enhetens varians (Se GPS-analys, sid. 27), dels p.g.a. att uppställningsplatserna placerats för glest.

En teoretisk skattning av rimligt antal uppställningsplatser på hyggets 3,7 ha är 370–530.⁹ Skotarförarna rapporterade också att de tyckte uppställningsplatserna i GISet var färre än i verkligheten. Under skotningen användes applikationen för att registrera skotarens position. Skotarens körning tillsammans med skördarens körning samt besök på avverkingen ligger till grund för kontroll av att det genererade nätverket stämmer överens med verkligheten.

Databehandling och normering

Vid kontroll av skotarförarens manuella rapportering fanns några brister. Vissa virkeshögar hade lastats fler än en gång, andra inte alls. Problemet var störst för sortimenten gran- och barrmassaved. De högar som inte var rapporterade förekom ofta som luckor i en rapporterad rutt, varför dessa adderades till skotningsrapporten.

Tre av de registrerade rutterna hade dock så allvarliga brister att det inte var rimligt att använda dem i den fortsatta utvärderingen. En rutt (58) var den enda ruten för barrmassaved i ett område med en volym barrmassaved motsvarande ca 2–3 skotarlass. I de två andra (10 och 37) saknades volymer i de uppställningsplatser som rapporterades till den grad att den totalt saknade volymen per rutt översteg 2 m³fub¹⁰. Dessa rutter och de virkeshögar de omfattade exkluderades därmed ur analysen. De motsvarar 64 m³fub eller 7,7 % av den avverkade volymen. I den fortsatta framställningen kommer därmed de återstående, justerade rutterna att benämnas som rapporterade rutter.

Vid summering av den totalt avverkade volymen fanns en skillnad på de data som hämtades från den svarta lådan och de data som hämtades i apteringsdatorns standardiserade rapporteringssystem. Då det senare alternativet är ett beprövat system som ofta kalibreras bedömdes det som det korrekta alterna-

⁷ Vissa justeringar av datat blev därmed nödvändigt

⁸ I GISet visades endast aktuell position och uppställningsplatsernas position.

⁹ Skördaren når en yta i form av en halvcirkel med radien 8 m, vilket motsvarar 100 m² från vilken ett visst mått av överlappning skall subtraheras.

¹⁰ I båda fallen var det sortimentet V-Block som saknades, beräknat på medelvolym per sortiment och uppställningsplats.

tivet. Volymerna från svarta lådan korrigerades därmed enligt de kvoter som anges i kolumn "Volym norm". De registrerade volymerna angavs med enheten m³fub, vid beräkning av lastens area är det dock den travade volymen som är relevant, varför volymen multiplicerades med ett omföringstal.

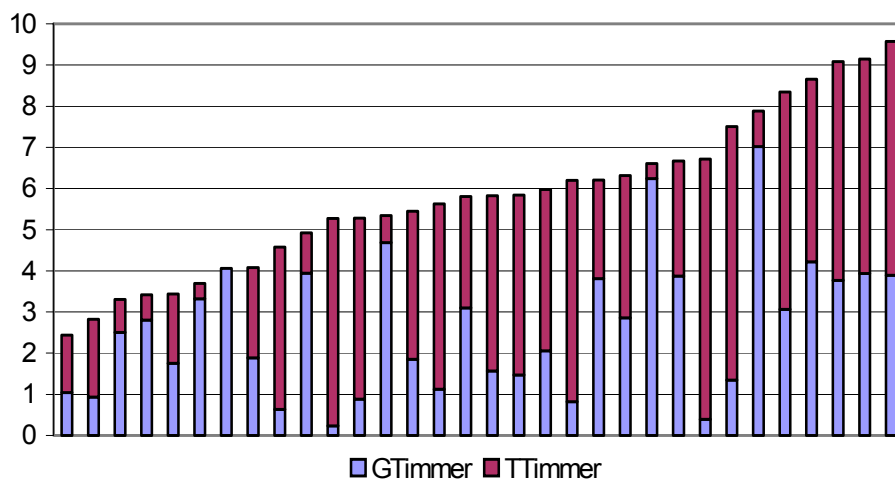
Varje bits tvärsnittsarea beräknades enligt:

$$Last\ area = (Volym\ (m^3\ fub) / Längd\ (m)) * Omföringstal\ (m^3\ fub - m^3\ t\ ob)$$

Tabell 2.

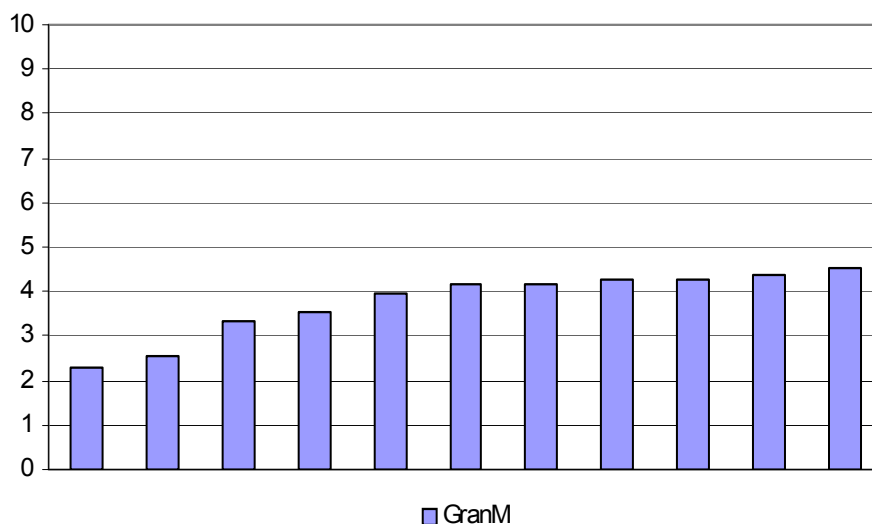
Normering av avverkningsdata.

	Topp diameter	Volym norm.	Omföringstal	Volym	Area
Timmer	230	0,933	1,60	552	186
Granm.	98	0,910	1,75	107	41
Barrm.	182	0,932	1,77	92	54
Löv	214	0,926	1,92	5	3
V-Block	409	1,039	1,60	10	11
Summa				766	295

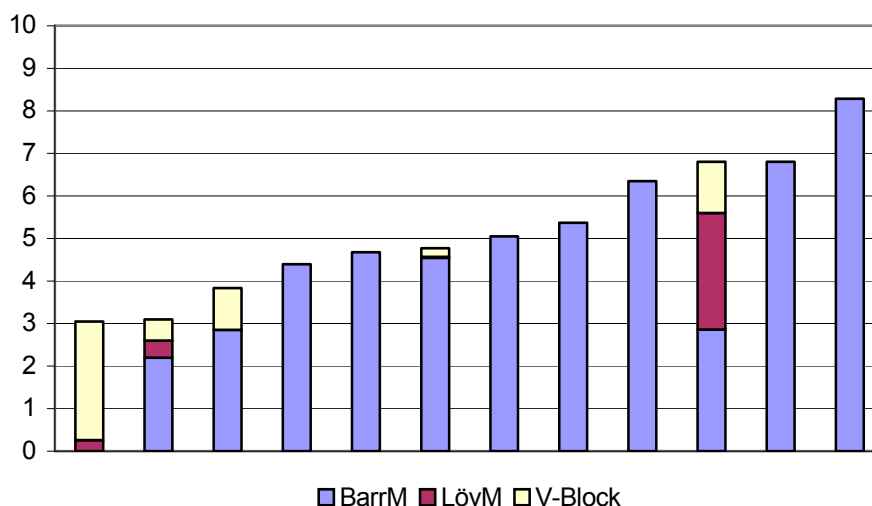


Figur 10.

Lastad area för rutter med gran- och talltimmer.



Figur 11.
Lastad area för rutter med granmassaved.



Figur 12.
Lastad area för rutter med barrmassaved, lövmassaved och Vänerblock.

I de tre ovanstående figurerna redogörs för den lastarea som har rapporterats av skotarförarna. I figurerna framgår att dels gran- och talltimmer, dels barrmassaved, lövmassaved och Väner-Block har samlastats. Variationen i registrerad lastarea är mycket stor för de samlastade sortimenten. Den antas främst bero på osäkerheten vid positionering av skotaren samt skillnaden mellan antalet uppställningsplatser på hygget och i GISet. Effekten blir naturligtvis störst i timmerrutterna då ett fåtal uppställningsplatser räcker för att fylla skotarens lastrum. Medelarea per virkeshög uppgår till ca 0,9 m² för timret relativt 0,3 för barrmassaveden och 0,2 för granmassaveden. Variationen av lastad area är ett problem när maximal lastarea skall definieras vid rutt-optimeringen.

1. Det första alternativet är naturligtvis att använda den på skotaren uppmätta grindarean, vilken uppgår till 5,0 m². Det visar sig dock orimligt då medel-lastarean för timmerrutterna uppgår till hela 5,81 m². För granmassaveden uppgår den till 3,77 m² och för de övriga sortimenten 5,21 m².

2. Ett andra alternativ är att använda medellastarean för respektive sortimentsgrupp. Av uppenbara skäl torde dock medellastarean vara en underskattning av maximal lastarea.
3. Ett tredje alternativ är att studera undergrupper av rutterna. Vid en kontroll av granmassarutterna finner man att ett flertal av dem har en likartad lastarea, $3,97 - 4,51 \text{ m}^2$. De återfinns dessutom samlade på hygget.

Medelarean för granmassarutten kunde därmed beräknas till $4,19 \text{ m}^2$ på en del av hygget. Maximal lastarea definierades till $4,20 \text{ m}^2$. Liknande undergrupper kunde inte återfinnas hos de samlade sortimentsgrupperna.

4. Ett fjärde alternativ är att definiera maximal lastarea till något större än medellastarea. Efter en iterativ process går det att finna en maximal lastarea som vid ruttoptimering ger en medellastarea motsvarande den rapporterade medellastarean. Detta innebär dock sannolikt en underskattning¹¹. På detta vis skattades maximal lastarea för timmer till $6,10 \text{ m}^2$ och för de övriga samlade sortimenten till $5,61 \text{ m}^2$.

Resultat – Optimering

Den totala körsträckan per rapporterad rutt beräknades som den kortaste vägen att köra från avlägget via samtliga virkeshögar i rutten tillbaka till avlägget. Beräkningen utfördes med hjälp av ESRI's Network Analyst. Denna beräkning förutsätter att skotarföraren alltid valde den kortaste vägen till och från avlägget. Det finns således en möjlighet till underskattning av skotningsarbetet. Den loggade körningen, d.v.s. den fil med positioner från GPS-mottagaren som skapades under skotarens förflyttning, användes inte för att skatta totalt körd sträcka. Denna omfattar även annat arbete som ej ingår vid optimeringen, t.ex. risning av körvägar.

Tabell 3.
Prestation vanlig skotning – skotningsoptimering.

Sortiment	Skotnings-rapport [km]	Skotningsoptimering [km]	Förbättring [%]
Gran- och talltimmer	14,06	12,96	7,82
Granmassa	6,35	5,56	12,36
Barrmassa, lövmassa och Väner-block	6,33	5,99	5,42
Summa	26,74	24,51	8,33

Tabell 3 visar resultatet av skotningsarbetet och hur resultatet kan påverkas med ruttoptimering. Nyttan med optimering varierar kraftigt mellan de olika sortimentsgrupperna, från 5,42 % till 12,36 %.

¹¹ Vid en jämförelse finner man att den definierade maximala lastarean för granmassaveden är 11 % större än den rapporterade medellastarean, för timret endast 5 % och för de övriga sortimenten 8 %. Den nedre brytpunkten för samma medellastarea (samma antal rutten) valdes. Detta innebär att det finns ett intervall i maximal lastarea som ger samma medellastarea.

Resultat – Fordonsdator och GIS-applikation

Följande avsnitt är baserat på intervjuer med skotarförarna samt egna bedömningar.

Installation

En viktig delkomponent i ett system för skotningsplanering är den fysiska lösningen. Viktiga delkrav är bland annat:

- Tangentbord och mus (eller motsvarande alternativ) måste kunna hanteras i förarens normala sittposition. Föraren skall alltså inte behöva luta sig framåt eller åt någon sida för att hantera datorutrustningen.
- Bildskärmen måste finnas tillgänglig både när föraren är framåt- och bakåtvänd. Reflexer i skärmen skall minimeras och ljusintensiteten bör kunna regleras.
- Utrustningen får inte placeras så att den ytterligare försvårar förarens fysiska rörelseutrymme i hytten.

Vid installationen användes den standardutrustning som Sunit levererar med sina enheter. Bildskärm monterades på ett ca 0,5 m högt golvstativ i det inre hörnet. Det vill säga, då föraren var vänd bakåt befann sig skärmen snett ned till vänster. Datorn placerades i en sidopanel. Tangentbord och pekdon applicerades på panelens överdel, se figur 13. GPS-antenn och FM-antenn placerades i den främre kanten av hyttens tak.

Redan vid installationen konstaterades att de monteringslösningar som finns i dag inte tillfredsställer behoven för ett system som skotningsplanering. Möjliga förbättringar är bl.a. en stolsmonterad skärm som kan fällas ned längs ena stolsidan. En bildskärm skall nyttjas för samtliga applikationer i maskinen; maskinövervakning, skotningsplanering, produktionsrapportering, Internet o.s.v. Ett pekdon kan vara integrerat i armstöden.



*Figur 13.
Fordonsdators placering i
skotarhytten.*

Applikationens användbarhet

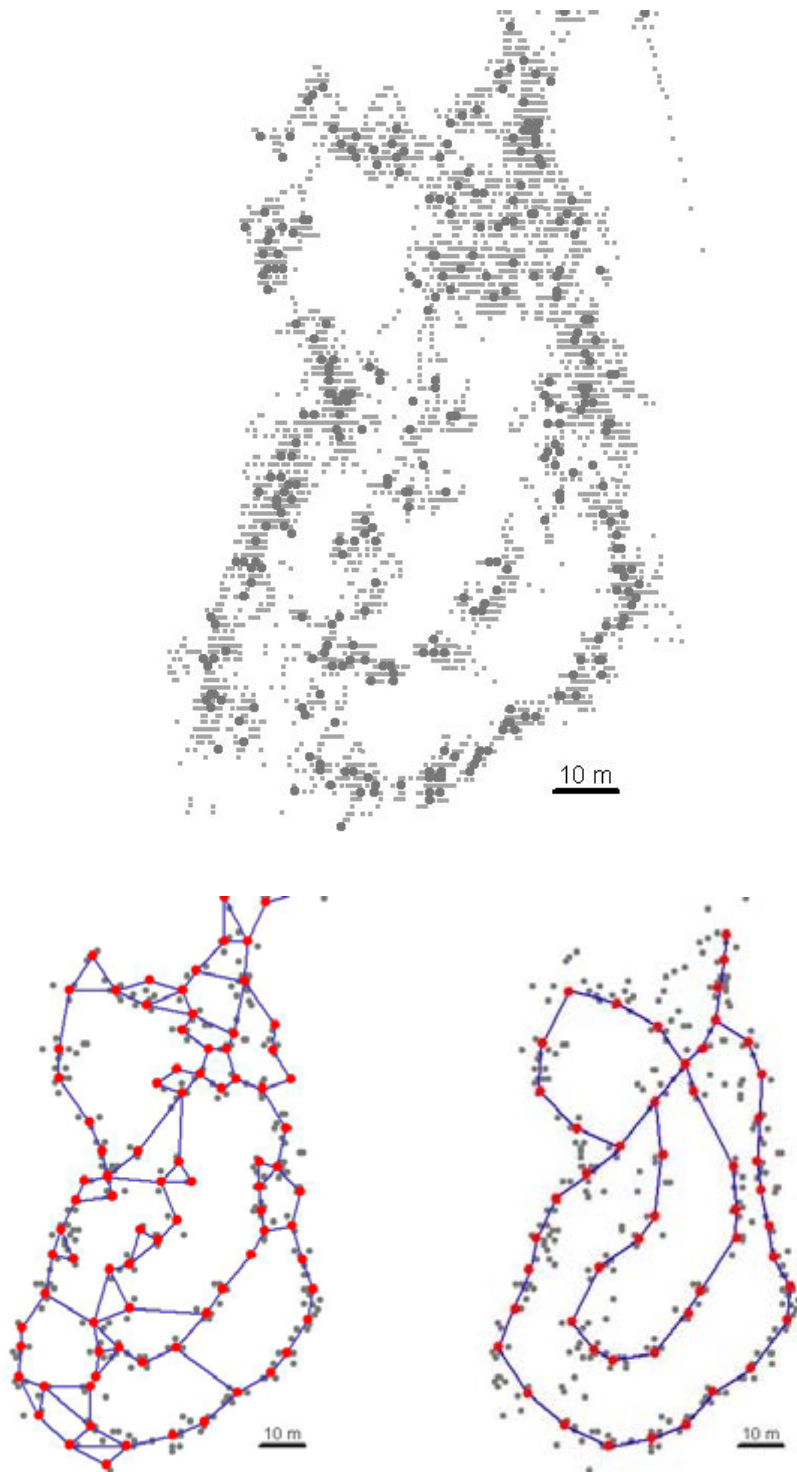
Jämfört med dagens situation önskade skotarförarna ett ökat positionsrelaterat informationsflöde. Framför allt önskade de kunna se sin egen position i relation till den avverkade trakten, beståndsregister, blöt- och hållmarker, vattendrag och kulturminnen. De önskade även kunna kontrollera när informationen skall visas. De ansåg att denna information skulle vara till stor hjälp vid den egna planeringen av arbetet, särskilt vid mörkerkörning eller när en ny trakt påbörjas. Om den testade applikationen ansåg de att:

- Kartan var för detaljrik. Kombinationen av noder och nodnummer, länkar, rutter med cirkeldiagram, två dialogrutor och ett antal verktygslister försvårade informationstolkningen.
- Rutter och noder som beskrevs med ett antal punkter kunde hellre presenteras som ett linjetema.
- Hämta, lasta och lossa en given rutt var relativt enkelt. Förarna saknade dock möjlighet att enkelt hämta samtliga rutter inom ett givet område.
- Förarna önskade se en riktning på sin egen position, inte bara en punkt, antingen som en riktad figur eller som en svans till punkten.
- Att följa en given rutt var relativt enkelt, det var däremot svårt att förändra den som att ta bort eller lägga till virkeshögar i rutten.
- Positioneringen upplevdes som allt för osäker med för stort slumpmässigt fel.

En viktig faktor vid skapandet av avverkningsinformation och nyttjandet av det beskrivna systemet är kvaliteten på de registrerade positionerna. Aktuell position i skotar-GISet baserades på momentanvärden, en mätning ligger till grund för positionen. Trots att GPSen var utrustad med differentiell korrigering i realtid upplevdes precisionen under försöket som allt för dålig. Då det inte finns något sätt att urskilja i vilka tidsfönster skotaren har stått stilla under en längre tid (mer än en minut) går det inte att göra en objektiv skattning av enhetens prestanda. En subjektiv bedömning är dock att felet kan vara stort. Vid några tillfällen observerades fel större än 10 m. Skotaren kunde stå stilla medan angiven position i GIS rörde sig över en stor yta. Det tycktes också som att felet blev större på specifika platser på hygget, ofta nära stående skog.

Noggrannheten vid positioneringen av uppställningsplatser var bättre. I snitt registrerades 35 positioner per uppställningsplats. En medelvärdesberäknad position har en högre säkerhet än momentanvärden.

Även om positionen medelvärdesberäknades var de olika positionerna spridda över avverkningen på ett sådant sätt att det var svårt att skapa uppställningsplatser på ett korrekt sätt. Figur 14 visar ett exempel på detta problem. Den första bilden visar samtliga positioner som registrerats vid fällning/upparbetning av träd (små ljusgrå punkter) samt samtliga uppställningsplatser som beräknats därav (mellangrå punkter). Den nedre bilden till vänster visar ett manuellt genererat nätverk med länkar och summerade uppställningsplatser. Efter ett fältbesök konstaterades att ett korrekt nätverk såg ut som den nedre bilden till höger. Vid optimering med det felaktiga nätverket finns det därmed risk för att okörbara rutter bildas.



*Figur 14.
Avverkningsinformation per uppställningsplats, summerad till ett
felaktigt och ett korrekt nätverk.*

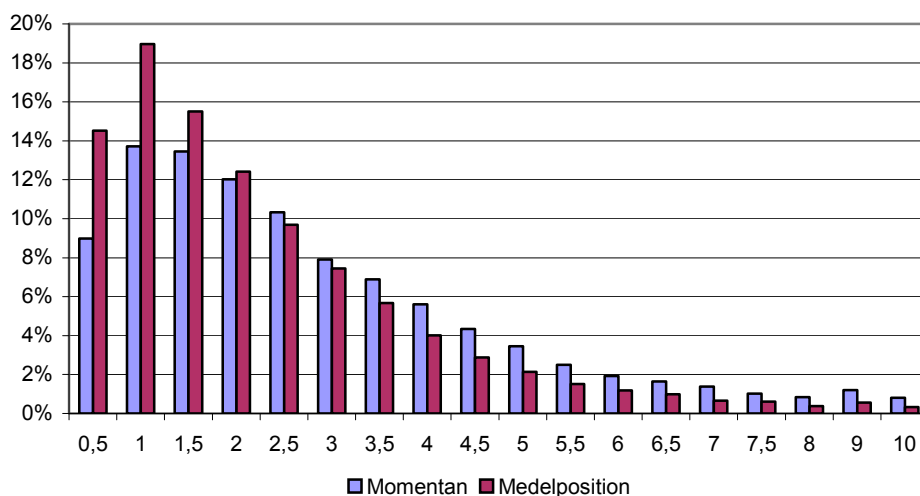
GPS-analys

Vid försöket var felet vid positioneringen större än väntat. Aktuell position vandrade oregelbundet fram och tillbaka över en stor yta då maskinen stod stilla, t.ex. då skotaren lastade eller lossade eller vid de tidigare definierade tidsfönster då skördaren fällt/upparbetat träd. Felet var tidvis av den storleken

att det var svårt att avgöra vid vilken uppställningsplats maskinen befann sig. Det motiverar en närmare analys av maskinernas positionsfiler.

I figur 16 visas skotarens loggfil som rosa punkter, skördarens loggfil som grå punkter, de uppställningsplatser som skapades är röda och nätverket har blå linjer. Vid en subjektiv visuell skattning av samtliga registrerade positioner för skördaren och skotaren tycks positionerna ha en jämförbar spridning. Det är värt att beakta är att positionering av skördaren haft sämre förutsättningar då den hela tiden varit helt/delvis omgiven av slutavverkningsmogen skog. Skotaren har till större delen av tiden befunnit sig på ett hygge med fröträdsställning.¹²

En objektiv mätning av precisionen av den GPS som skotaren utrustades med går inte att göra då sann position saknas för mätserien. Den fortsatta analysen är baserad på loggfiler från skördarens positionering. Momentanvärden jämförs med en skattning av sann position. Om felet vid positionering endast var slumpmässigt och inte autokorrelerat¹³ skulle ett medelvärde beräknat på ett fåtal observationer med hög sannolikhet ge en god precision. Tyvärr är felet autokorrelerat. Om sann position approximeras med medelposition, är det därför orimligt att använda allt för korta serier. Tidigare erfarenheter pekar på att sekvenser om minst 60 sekunder krävs för att slippa allt för stora störningar av autokorrelation. Positionsserier med ett tidsfönster mindre än 60 sekunder har därför exkluderats ur analysen.



Figur 15.
Mättelets fördelning vid momentan- och medelvärdesberäkning. Båda har en typisk Weibull-fördelning.

Den vanligaste måttenheten vid skattningar av precisionen vid positionering med GPS är RMS (Root Mean Squared Error). RMS kan beräknas på två sätt.

”Fördelningen av GPS-mätningarna vid en positionering kan approximeras som en bivariant normalfördelning utan korrelation mellan de två variablerna. För enkelhets skull kan man antaga att variansen är densamma i båda riktningar (mätningar visar att detta inte är helt korrekt). Görs dessa förenklingar kan

¹² Ca 70 träd per hektar, främst tall, lämnades efter avverkning.

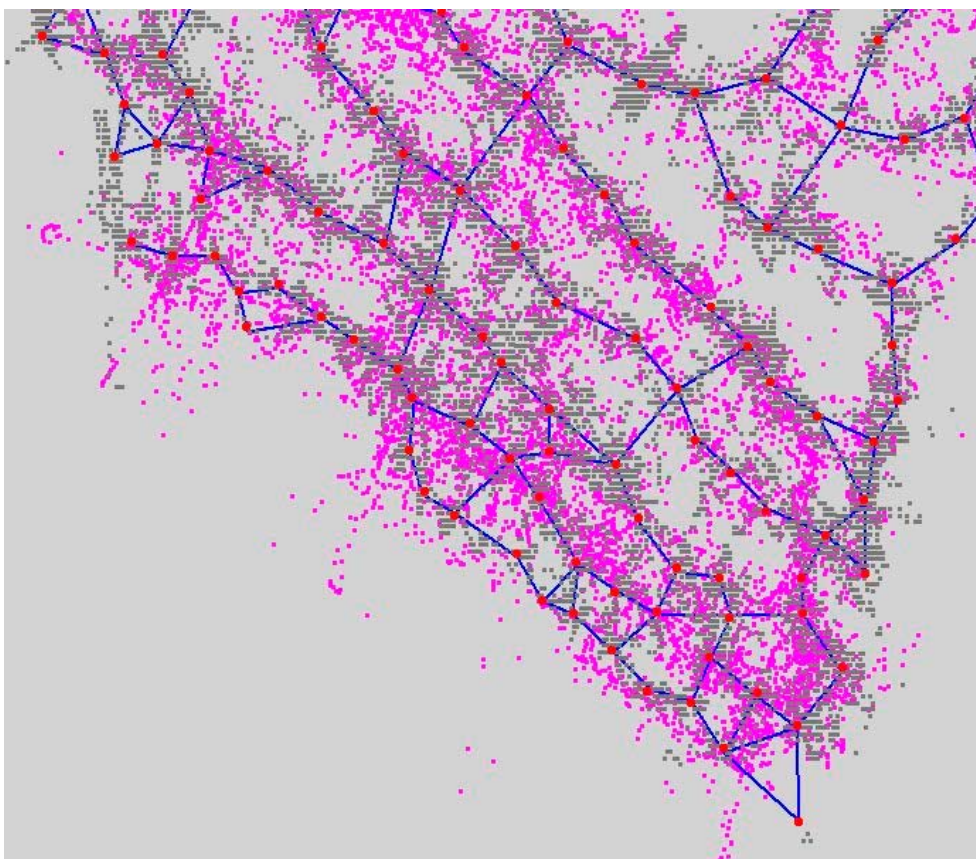
¹³ Autokorrelation avser då felet vid tiden t är likt felet vid tiden $t+1$.

mätfelet beskrivas med en mycket enkel funktion, vilken är känd som en Weibull-fördelning med formfaktor 2 eller Rayleigh-fördelning.”¹⁴ Funktionen $F(x)$ anger sannolikheten för att mätfelet är mindre än X . X motsvarar felets Root Mean Squared Error (RMS) och β motsvarar formfaktorn 2.

- $F(x) = 1 - e^{-(x/\alpha)^\beta}$

- $$RMS_Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Mätfel_i^2}{N}}$$

- $$RMS_Error = \sqrt{(Medelmätfel)^2 + (Std.avv._av_mätfel)^2}$$

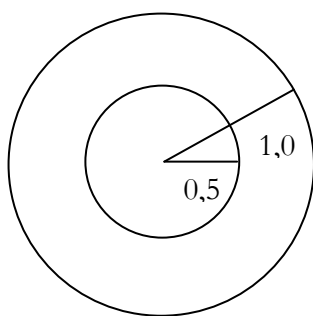


Figur 16.

Samtliga registrerade positioner för skotaren (rosa) och skördaren (grå) på del av hygget.

I figur 15 redovisas fördelningen av felet för momentanvärden och medelposition för 30 sekunders intervall. Tydligt framgår att noggrannheten förbättras väsentligt vid medelvärdesberäkning. Endast 66 % av momentanvärdena har ett fel mindre än 3 meter. För medelpositionerna har 79 % ett fel mindre än 3 meter. Initialt kan det vara förvånande att sannolikheten är större för ett fel av 0,5 – 1,0 m än 0 – 0,5 m. Det beror dock på att ytan av en cirkel med diametern 1 meter är betydligt mindre än ytan av ett cirkelformat band med 2 m ytterdiameter och 1 m innerdiameter, se figur 17.

¹⁴ Fritt översatt från <http://users.erols.com/dlwilson/gps.htm>



Figur 17.
Ytorna 0 – 0,5 och 0,5 – 1,0 meter från sann position.

För de registrerade positionerna har RMS_Error beräknats för momentanvärden och medelvärden. De redovisas i tabell 4.

Vid beräkningen av RMS har sann position beräknats av medelpositionen för hela mätningen. Detta har teoretiskt och praktiskt visats ge en ungefärlig, men något låg, skattning av sant RMS.

Tabell 4.
RMS_Error för skördarens GPS.

Antal positioner	Medelmätfel	Standardavvikelse av	
		mätfel	RMS_Error
1	2,758	2,553	3,76
5	2,608	2,357	3,52
10	2,405	2,149	3,23
15	2,209	1,964	2,96
30	2,038	1,814	2,73

Att använda RMS_Error som kvalitetsmått på en GPS-precision har en begränsad användbarhet. Vid beräkning av felets standardavvikelse tas inte hänsyn till dess autokorrelation. RMS kan användas för att grovt skatta sannolikheten för att ett mätfel är mindre än någon kravgräns. Önskar man skatta under hur lång tid en medelvärdesberäkning skall pågå för att felet skall vara mindre än en kravgräns, måste en mer sofistikerad modell för beräkning av varians användas.

Låt x_t vara mätfelet vid tidpunkten t , x_{t-1} vid tidpunkten före o.s.v. Låt $m(x)$ vara medelfelet av n antal mätningar, enligt (1). Om ingen autokorrelation finns medför det att $\text{Cov}(x_t, x_{t-1}) = 0$. Enligt Centrala Gränsvärdessatsen gäller därmed (2)¹⁵. Om det finns en autokorrelation mellan mätfelet är variansen av $m(x)$ skilt från $\text{Var}(x)/n$. Antag att variansen av $m(x)$ är $\text{Var}(m(x))$. Vid autokorrelation kan därmed (2) modifieras till (3). Då sambandet (4) = (5) råder och om antaganden (6) och (7) råder gäller (8), vilket enkelt kan beräknas.

¹⁵ Mätfelet är normalfördelat runt medelvärdet 0 med variansen $\text{Var}(x)/n$.

1. $m(x) = (x_t + x_{t-1} + \dots + x_n) / n$
2. $m(x) \sim N(0, Var(x) / n)$
3. $m(x) \sim N(0, Var(m(x)))$
4. $Var(m(x)) = \frac{1}{n * n} * Var(X_t + X_{t-1} + \dots + X_{t-n+1})$
5.
$$\left(\frac{1}{n * n}\right) * (Var(x_t) + Var(x_{t-1}) + \dots + Var(x_{t-n+1}) +$$

$$Cov(x_t, x_{t-1}) + \dots + Cov(x_t, x_{t-n+1})$$

$$\dots$$

$$Cov(x_{t-n+1}, x_t) + \dots + Cov(x_{t-n+1}, x_{t-n+2}))$$
6. $Var(x_t) = Var(x_{t-1}) = \dots = Var(x_{t-n+1}) = Var(x)$
7.
$$Cov(x_t, x_{t-1}) = \dots = Cov(x_{t-n+2}, x_{t-n+1}) = Cov(-1)$$

$$Cov(x_t, x_{t-2}) = \dots = Cov(x_{t-n+3}, x_{t-n+2}) = Cov(-2)$$

$$\dots$$

$$Cov(x_t, x_{t-n+1}) = \dots = Cov(-n)$$
8.
$$Var(m(x)) = \frac{n * Var(x) + 2 * (n-1) * Cov(-1) + 2 * (n-2) * Cov(-2) + \dots + 2 * Cov(-n)}{n^2}$$

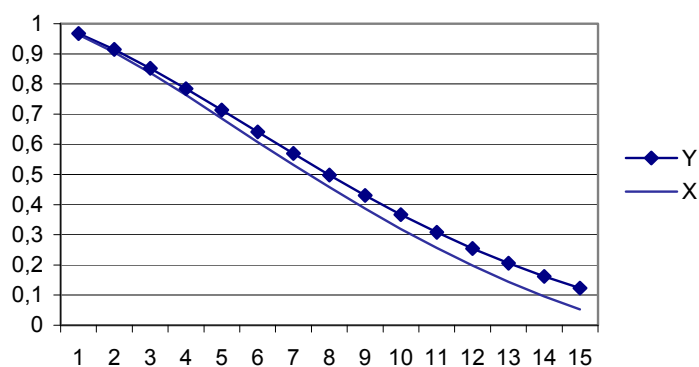
Med (8) kan således varians och standardavvikelse för momentanvärden och medelvärden beräknas på ett korrekt sätt, se tabell 6 .

Hur många mätningar som krävs för att felet vid medelvärdeberäkning skall bli litet beror således av kovariansen. Figur 18 visar hur korrelationen för mätfelet minskar då tiden mellan mättillfällen ökar. Varje mättillfälle är skilt med två sekunder. Korrelationen är således initialt mycket stor, men avtar relativt snabbt och är efter ca 30 sekunder i det närmaste försumbar.

Då korrelation är kovarians dividerat med varians och därmed alltid mellan 1 och 0, framgår inte att kovariansen, och därmed även variansen, är mer än dubbelt så stor för mätfelet i nord-sydlig riktning (x) som mätfelet i ost-västlig riktning (Y). De två kovarianserna konvergerar dock då tiden mellan de två mätpunkter ökar, se tabell 5.

Tabell 5.
Varians och kovarians för mätfel.

Tidsförskjutning (s)	X	Y
0	9,248	3,995
2	8,856	3,833
10	6,233	2,763
20	2,935	1,424
30	0,496	0,496



Figur 18.
Korrelation mellan mätfel vid närliggande tidpunkter.

Tabell 6.
Varians för olika medelvärdesberäkningar av position.

Antal	Var(m(X))	Var(m(Y))
1	9,2480	3,9953
2	9,0517	3,9143
3	8,8575	3,8343
4	8,6553	3,7514
5	8,4454	3,6654
6	8,2292	3,5771
7	8,0085	3,4870
8	7,7854	3,3958
9	7,5614	3,3043
10	7,3375	3,2129
11	7,1149	3,1222
12	6,9106	3,0325
13	6,7043	2,9443
14	6,4980	2,8577
15	6,2932	2,7730
16	6,0911	2,6904

I bilaga 3 redogörs för skattade konfidensintervall vid olika medelvärdesberäkningar och precisionskrav. Det kan dock kort sägas att tiden som krävs vid ett givet konfidensintervall varierar med kravet på uppnådd precision. 5 meters noggrannhet nås med en 95-procentig sannolikhet efter 2–4 sekunder, 2 meters noggrannhet nås först efter ca 25 sekunder.

Resultat – Optimalt lager

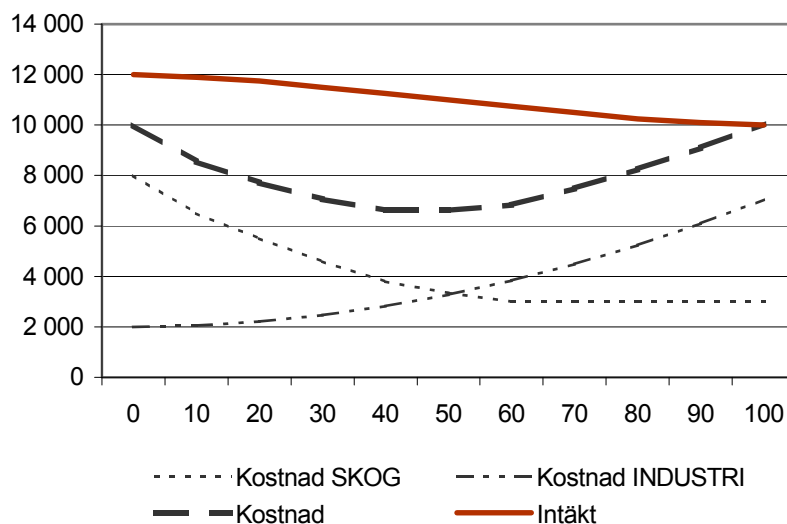
Utvecklingen mot ett orderstyrt skogsbruk där varje stock har en destination vid avverkningstillfället och industriernas behov av en färsk råvara ställer krav på avverkningsorganisationen. Ett av de viktigaste nyckeltalen i dag är lagerstorlek. Fokuseringen på lagerstorlek innebär att så fort ett träd avverkas skall det uppdelas i stockar, skotas till bilväg och transporteras till industri. En rationell organisation bör dock inte driva lagerminimering extremt.

Optimalt lager – teori

Antag att följande gäller för en given produktionsmängd:

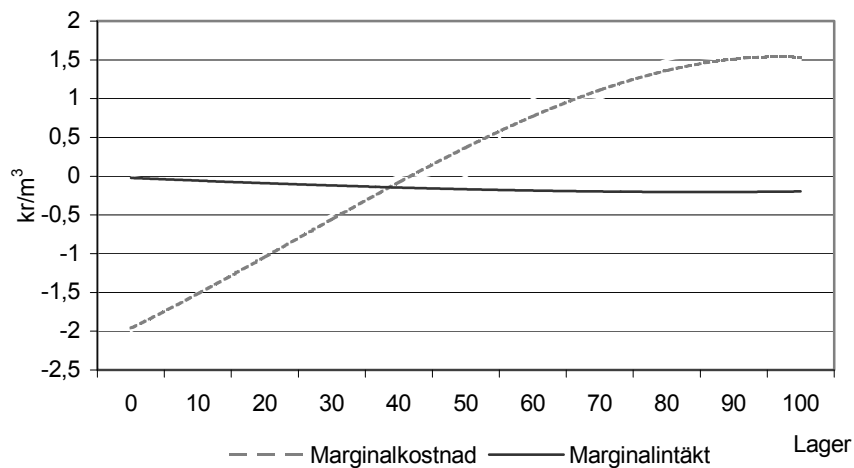
1. En produktionskedjas syfte är att maximera vinsten.
2. För industrin uppstår en stor kostnad vid höga råvarulager. Dessa kostnader kan sänkas betydligt då lagernivån reduceras. För mycket låga lagernivåer, några dagar till några timmar, sker endast en mycket marginell sänkning av kostnaden. Industrin har således en marginellt ökande kostnad med ökad lagernivå, se figur 19.
3. För råvaruorganisationen är det mycket kostsamt med extremt låga lagernivåer. Den minsta lagernivån nås då varje stock transporteras individuellt från skog till industri. Nyttjas större lagernivåer kan stockar lastas tillsammans till en lägre transportkostnad. Vid mycket höga lagernivåer sker en liten förändring av avverknings- och transportkostnaden, då varje led kan genomföra sin del av verksamheten rationellt. Råvaruorganisationens kostnader är därmed marginellt avtagande, se figur 19.
4. Stora lager ger dåliga egenskaper på råvaran, vilket resulterar i produkter med ett lägre marknadsvärde. Intäkten är avtagande med stigande lagernivåer.

Någonstans längs axeln för lagernivån finns därmed en punkt där skillnaden mellan kostnad och intäkt är som störst, se figur 19.



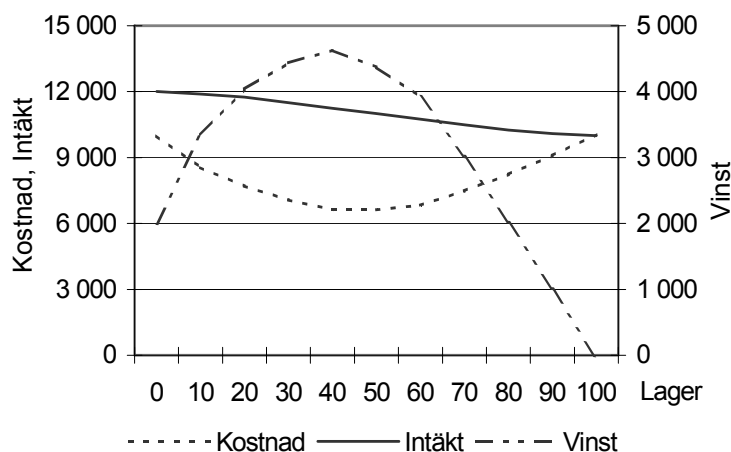
Figur 19.
Kostnad och intäktsfunktioner för råvaruorganisation och industri.

Enligt ekonomisk teori går denna punkt att finna med hjälp av derivatan av intäkts- och kostnadsfunktionerna (Pindyck, 1998). Maximal vinst återfinns därmed då marginalintäkten (MR) är lika med marginalkostnaden (MC). Detta är en logisk konsekvens av de två funktionernas utseende. Vid lagernivåer lägre än optimum kommer nyttan av kostnadssänkningen i produktionen vara större än intäktsminskningen. Vid lagernivåer större än optimum gäller det omvända. I figur 20 återges de två funktionerna för marginalkostnad och marginalintäkt.



Figur 20.
Marginalkostnad och marginalintäkt för hela flödeskedjan i relation till lagernivå.

Den optimala lagernivån återges även i figur 21. I exemplet ger en lagernivå av 40 enheter den största vinsten.



Figur 21.
Vinst i relation till kostnad och intäkt vid olika lagernivåer.

Det har vid flera tillfällen visats att industrins kostnader stiger med ökande lagernivåer (Forsberg, 2000). Det är inte lika klart i vilken grad råvaruorganisationens kostnader påverkas av lagernivån. Att göra empiriska undersökningar torde vara synnerligen kostsamt. Ett sätt att hantera detta är att simulera prestationen i en råvaruorganisation.

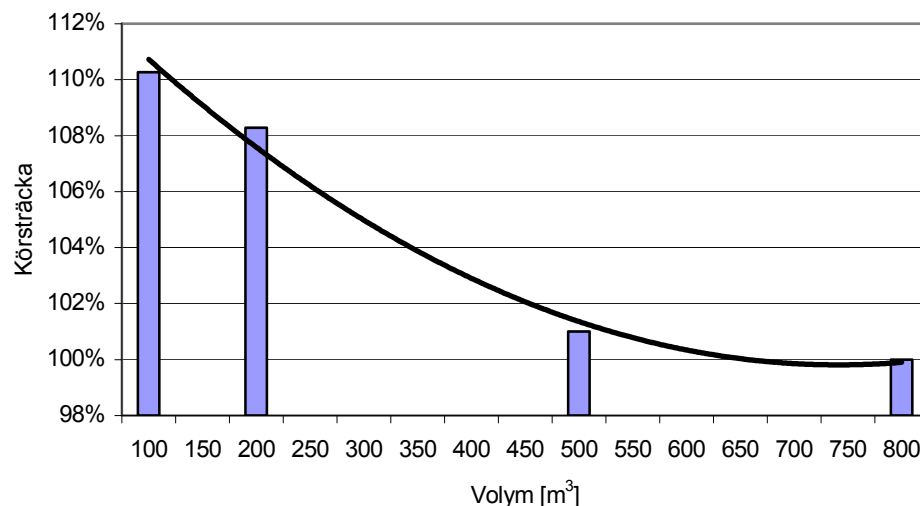
Optimalt lager – metod

I denna studie gjordes ett försök att simulera hur prestationen i skotningsarbetet påverkas av lagernivån. Hypotesen var att en liten lagernivå, d.v.s. ett litet avverkningslager, minskar möjligheterna att skota effektivt. Om skotningen påbörjas innan avverkning är avklarad har inte alla stickvägar skapats och antalet möjliga kombinationer är begränsat. Vid denna simulering antas att en skotarförarens prestation påverkas på ett sätt jämförbart med optimeringsalgoritmens prestation då lagernivån förändras.

I och med att varje uppställningsplats gavs en tidskod kunde avverkningen simuleras i efterhand i samma ordning och hastighet som den ursprungligen genomfördes. Skotaren antas ha en prestation som är jämförbar med skördaren, d.v.s. att om skotaren börjar på en avverkning en dag efter skördaren kommer den att vara klar en dag efter skördaren. Praktiskt löstes detta så att systemet initialt tillfördes början av avverkningen motsvarande den lagernivå som skulle simuleras. En ruttoptimering genomfördes på det tillgängliga lagret. En eller ett par optimerade rutter registrerades. Därefter tillfördes systemet nästföljande uppställningsplatser i motsvarande mängd som nyss skotats ut. På detta sätt upprepas ett antal iterationer tills hela avverkningen och skotningen är genomförd.

Optimalt lager – resultat

Vid simuleringen användes ett avverkningslager på 100, 200, 500 och 800 m³fub. Den sista alternativet motsvarar hela avverkningen och är därmed den referens som tidigare jämfördes med skotarförarens prestation i avsnittet Resultat–Optimering. Nedan jämförs endast total körsträcka, övriga variabler som påverkar skotningsprestationen, lastning och lossning, är stockberoende och kommer därmed inte att påverkas vid simuleringen.



Figur 22.
Minsta transportarbete i relation till lagernivån.

I figur 22 framgår att körsträckan (och därmed körtid och kostnad) ökar med ca 10 % då avverkningslagret sänks från 800 m³fub till mellan 100 och 200 m³fub. Om terrängtransporten motsvarar hälften av den rörliga kostnaden vid skotning kommer därmed alltför små avverkningslager öka skotningskostnaden med ca 5 %. Det är också värt att notera att körsträckan och skotningskostnaden inte nämnvärt påverkas då avverkningslagret minskar från 800 till 500 m³fub.

Diskussion

Diskussionen är uppdelad på tre underrubriker; Optimering, GIS-applikation och GPS-prestanda.

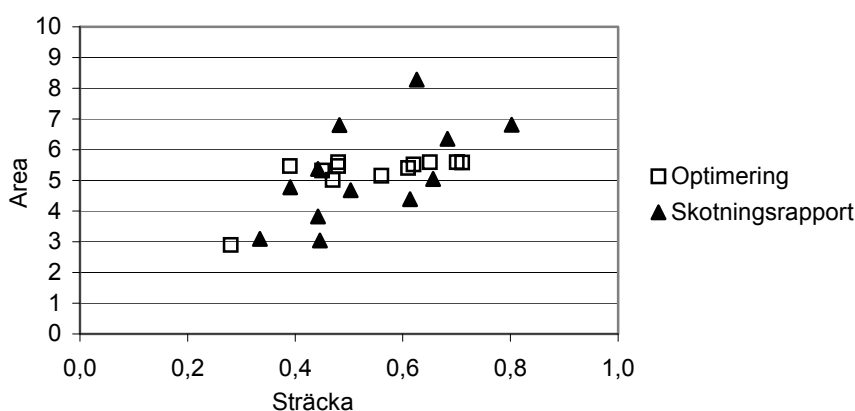
Optimering

Utvecklingen av optimeringsalgoritmen har varit lyckosam. På kort tid, 1–2 minuter, kan effektiva rutter med ett logiskt utseende beräknas. Det bedöms som väsentligt att de beräknade rutterna har ett logiskt utseende för att vinna acceptans av skotarförarna. Hela optimeringen löses med de in- och utdatafiler som tidigare specificerats. Funktionen är kompillerad till ett DLL (Dynamic LinkLibrary) och datafilerna har ett enkelt textformat, vilket gör integration med andra moduler enkel.

Syftet med optimeringen har varit att minimera den totala körsträckan. Detta görs genom att kombinationer av virkeshögar summeras till rutter. Om varje

virkeshögar har en relativt stor volym/area i förhållande till begränsningen per rutt blir det ”svårare” att finna effektiva kombinationer. Detta kan också vara fallet då volymen/arean varierar kraftigt per hög. Två intilliggande virkeshögar kan därmed vara omöjliga att inkludera i samma rutt, till skillnad från praktiskt skotningsarbete där det är möjligt att lasta delar av en virkeshög. Detta medför att den största nyttan av optimering, med virkeshögar som minsta enhet, torde återfinnas i sortiment som finns på många uppställningsplatser och i relativt små volymer, massaved¹⁶.

Detta resonemang passar väl in på resultaten för sortimenten timmer och granmassa. En anledning till den ringa förbättringen vid optimering för barrmassa samt övriga sortiment går att finna vid en närmare analys av skotningsrapporten. I figur 23 visas förhållandet mellan en rutts längd och lastad area.



Figur 23.
Ruttens längd i förhållande till lastarea för sortimenten barrmassaved, lövmassaved och Väner-block.

Det råder ett tydligt positivt samband mellan ruttlängd och lastad area. Skillnaden i medellastarea är mycket stor mellan de kortare, <0,5 km, och de längre, >0,5 km, rutterna 1,7 m². Denna skillnad finns inte i de optimerade rutterna. Detta får till följd att det utförda skotningsarbetet blir mycket ”effektivt” i förhållande till total medellastarea. Skotaren kommer att transportera ut en stor ”extra area” i de längre rutterna.¹⁷ För övriga sortiment är skillnaden i medellastarea för korta och långa rutter betydligt mindre.

Vid detta försök kunde nyttan av ruttoptimering beräknas till ca 8 % kortare körsträcka. Variationen var dock stor mellan olika sortiment, 5,42 – 12,36 %. Osäkerheten vid skotarens positionering och för få uppställningsplatser i GISet har bidragit till att skapa den stora variationen i lastarea för vissa sortiment. Det har därför varit svårt att med säkerhet definiera en maximal lastkapacitet vid optimering. Dessa skattningar är därför försiktiga. Vidare medför antagandet att skotarföraren alltid har kört den kortaste vägen. Det blir vid varje tur på hygget en medveten underskattning av beräknad körsträcka. Även det positiva sambandet mellan ruttens längd och lastad area för de rapporterade

¹⁶ Många virkeshögar i varje rutt, lastning under en relativt lång del av rutten.

¹⁷ Medel samtliga rutter = 5,21 m², medel långa rutter = 6,18 m², antal = 5. Extra area = 5*(6,18-5,21) = 4,85 m².

rutterna påverkar resultatet. För få uppställningsplatser medför också att möjliga kombinationer per rutt blir färre.

En begränsad mängd av sortimentet Väner-block som ej finns med i avverkningsinformationen, men har inkluderats vid skotningsrapporteringen, påverkar resultatet. Det är osäkert i vilken omfattning resultatet ändras. Tiden för försöket föregicks av en längre tid med nederbörd, varför skotarens framkomlighet på vissa körvägar begränsades på grund av spårbildningen. Denna aspekt ingår inte vid ruttoptimeringen. Det är därför möjligt att skotarföraren körde omvägar för att undvika dessa partier.

Tabell 7 är ett försök till att skatta effekterna av de olika felkällorna. Slutsatsen är att den beräknade nyttan, 8 %, torde vara en underskattning av egentlig nytta. Då transportarbetet motsvarar ungefär hälften av skotningskostnaden medför detta en sänkt skotningskostnad av ca 4 %.

Tabell 7.
Olika osäkerhetsfaktorers påverkan på nyttan av ruttoptimering.

Faktor	Effekt
Kortast möjliga körsträcka från skotningsrapport	–
Försiktig skattning av maximal lastkapacitet	– –
Positivt samband längd – lastarea i skotningsrapport	–
För få uppställningsplatser	–
Oregistrerade volymer ingick i skotningsrapport	+
Försämrade körvägar	+
Total effekt	– – –

GIS-applikation

Under utvecklingen av GIS-applikationen har de funktioner som används givet att en optimering är utförd prioriterats. Under försöket var därför arbetsgången som följer:

- Avverkningsdata sammanfogades manuellt med positionsdata i en databas. Sammanställning av uppställningsplatser gjordes manuellt i GIS och databas. Databasen stöder även export av filer för optimering.
- Utdatafiler från optimering lästes in i ett separat GIS-projekt, vilket stöder export av filer avsedda för skotnings-GIS.
- Projektet som användes av skotarföraren visar aktuell position, uppställningsplatser och länkar i nätverket samt eventuella statiska teman. Vidare finns stöd för att läsa in, visa, lasta och lossa olika rutter. Information om sortiment och volymer i närmaste uppställningsplats samt övergripande ruttdata visas i separat dialogruta.

Skotarförarna tyckte det var mycket positivt att få tillgång till avverkningsinformation tillsammans med sin egen position och övriga statiska teman. Förarna upplevde GISet som för detaljrikt. Rutter kunde alternativt visas som ett linjetema i stället för en kombination av punkter och cirkeldiagram. Skotar-

förarna upplevde vidare att det var relativt enkelt att förstå och följa den föreslagna rutten. De tyckte däremot att det var för svårt att ändra i en föreslagen rutt. Rutterna var enkla att hämta upp, förarna saknade dock ett bättre stöd för att hämta upp samtliga rutter inom ett specifikt område.

Då utvecklingen av applikationen inte kom att omfatta mobil datakommunikation har inga tester av olika system utförts. Det bör dock påpekas att en fungerande kommunikationslösning är en förutsättning för en effektiv informationskedja. Det finns för närvarande flera alternativ. Gemensamt för samtliga är att de har någon nackdel; höga investerings- och trafikkostnader, dålig yt-täckning eller låg överföringshastighet. Vissa av dessa faktorer varierar dessutom över landet. Om ett system därmed skall kunna fungera nationellt med god tillförlitlighet krävs förmodligen en integration av flera kommunikationslösningar där systemet väljer det för tillfället bästa alternativet¹⁸.

Skotarens position baserades på momentanvärden. Under utvecklingsfasen kunde inget stöd för medelvärdesberäkning hittas i ArcView TrackingAnalyst.

Positionsfelet får bl.a. till följd att summering av flera tidsfönster till en uppställningsplats/virkeshög blir svårare, vilket i sin tur ökar sannolikheten för fel i nätverket. Skall optimeringen hålla en hög kvalitet och generera rimliga rutter krävs bra indata. Detta medför att någon, skotarföraren, måste ägna tid åt att korrigera nod/nätverksstruktur i ett produktionsskede. Därmed kan en kostnadsbesparing av ruttoptimering snabbt vändas till en kostnadsökning. En automatisk generering av högkvalitativa data är därför avgörande för systemets nytta. Positionsfelet vid medelvärdesberäkning blir mindre, men inte försumbart.

Det är således av stor vikt att en hög kvalitet på de genererade nätverken säkerställs.

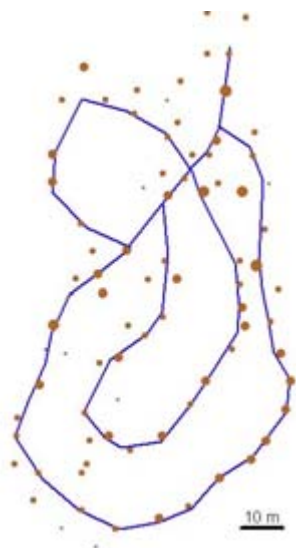
Alternativ lösning

Systemet för skotningsplanering, såsom det har presenterats här, har fler positiva effekter än enbart optimerade rutter. Hur kan dessa realiseras utan att använda ruttoptimering? Det vill säga hur kan man skapa ett system där skotarförarna får tillgång till högkvalitativ information om avverkningen som stöd för den egna planeringen av arbetet samtidigt som skotningsrapporteringen automatiseras med en bibehållen hög detaljeringsgrad och precision?

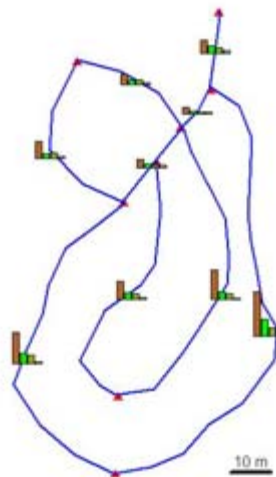
Ett alternativ är då att uppställningsplatser och nätverk genereras enligt tidigare beskrivning samt presenteras i ett GIS. Nätverks- och volymstema kan utformas på flera sätt. Bilderna nedan är endast några alternativ. I figurerna 24 och 25 är nätverket volymsneutralt. I figur 24 beror storleken på uppställningsplatsen av virkets beräknade lastarea. I figur 25 visas area per sekvens av länkar i ett stapeldiagram. Sekvensens start- och slutpunkt anges med en liten röd triangel. I figur 26 är tjockleken på linjerna i nätverket baserat på lastarea av aktuellt sortiment. Position anges med röd triangel. Då aktuell last och area per länk är känd, kan den sekvens av länkar som måste köras för fullt lass beräknas. Sekvenserna är gulmarkerade.

¹⁸ Jämför den diskussion som förs angående mobila 3G- och 4G-nät.

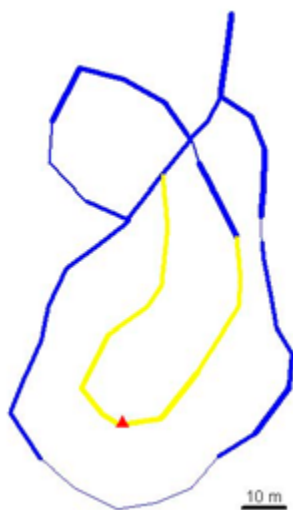
Registrering av lastade virkeshögar kan vara positionsbaserad. Om föraren anger vilket/vilka sortiment som skall lastas under denna rutt samt när lastning påbörjas och avslutas kan en funktion lasta samtliga virkeshögar inom ett givet avstånd från aktuell position, t.ex. 3 m, under lastningssekvensen.



Figur 24.
Volym per virkeshög.



Figur 25.
Sekvens av virkeshögar.



Figur 26.
Sekvens av virkeshögar för att fylla
skotarlasset är gulmarkerade, nuvarande
position är röd triangel.

GPS-prestanda

Vid projektering av en applikation är det av högsta vikt att noga väga nyttan/kravet på precision mot kostnaden. Precisionen på de positioner som skapas är en av de viktigaste faktorerna i denna typ av applikation. Kan inte föraren/systemet avgöra var han/det befinner sig i förhållande till övriga objekt förlorar informationen mycket av sin mening. Vid försöket upplevde förarna just detta. Det var svårt att avgöra var de egentligen befann sig.

Felet vid GPS-positionering beror av många faktorer:

- **Rådande väder.** Signalen, från satellit till mottagare, passerar moln och jonosfär, vilka kan störa. Vädret var ”dåligt” under försökets genomförande med nederbörd varje dag.
- **Typ av antenn.** Vilken antenntyp som används påverkar mottagningskapaciteten¹⁹. Detta försök syftar inte till att utvärdera de olika antensystemen.
- **Bästa placering av antenn** beror av typen av signal samt vilken antenntyp som används. Korrektionsignalen sändes över FM-nätet, vilket är horisontellt polariserat. En vertikal spröstantenn bör därför placeras i ett hörn av en metallyta. Detta eftersom radiovågorna böjer av mot fordonets sida och tenderar att bli mer vertikala vid kanten av t.ex. taket. En fullständig FM-antenn är egentligen 1,5 m lång, en halv våglängd. Kortare passiva och aktiva antenner måste därför ha god kontakt med jordplanet då detta kommer att utgöra en del av mottagaren. GPS antennerna bör normalt placeras mitt på en horisontell metallyta för jämn och god mottagning. GPS-antennen på skotaren placerades dock i framkant av hyttaket, vilket kan ha påverkat dess prestanda (Terracom, 1999).
- **Aktuell satellitkonstellation.** För bästa möjliga positionering önskas flera satelliter med stor vinkel mot horisonten, men med vitt skilda positioner. Kvalitetsmättet HDOP (Horizontal Dillution of Precision) är baserad på dessa variabler.
- **Större fysiska kroppar.** Stora objekt, t.ex. skog, kan dels skymma himlen samt reflektera signaler. När himlen skymms kan antalet möjliga satellitsignaler begränsas. Positioneringen baseras på den tid det tar att sända en signal. Om en signal reflekteras innan den når mottagaren, s.k. multipath, kommer därmed beräkningen baseras på en felaktig signaltid.

Inom projektets ramar har det inte funnits möjligheter att samla den data-mängd som krävs för att reda ut hur stor effekt dessa olika felkällor har haft på positioneringsfelet. De kvalitetsmått som presenterades under rubriken GPS-analys skall endast ses som ett exempel på den precision som kan uppnås, ej som ett absolut mått på systemets prestanda. Felet vid positionering varierade mellan de olika försöksdagarna.

Det finns flera möjligheter/tekniker för att minska positioneringsfelet:

- **Differentiell korrigering.** Detta kan antingen uppnås genom ett abonnemang eller att installera en egen basstation. Det andra alternativet torde endast vara ekonomiskt rimligt om man har flera mottagare inom ett begränsat område. Det finns även tillgång till en gratis tjänst via Sjöfartsverkets system (Sjöfartsverket, 2000).

¹⁹ Vid försöket användes två olika antennkonstellationer dels en Trimble Bullet-II (GPS) tillsammans med en hoprullar dipol (FM) på skördaren, dels en Sunits standard GPS-antenn och spröstantenn.

- **Filtrering av signalen.** Genom att identifiera de olika satelliterna kan multipath-signaler filtreras bort (Trimble, 2000).
- Mer **avancerade beräkningsmodeller** där medelvärdesberäkning är ett av de enklare angreppssätten.

För denna typ av applikation torde skotarens precisionskrav vara av storleksordningen maximalt tre meters fel för 95 % av positionerna. Vid försöket hade detta kunnat uppnås genom medelvärdesberäkning för 15 sekunders intervall. Vid medelvärdesberäkning bör fordonets hastighet beaktas. Ett snabbt fordon är inte betjänt av långa tidsintervall. Detta skulle medföra att registrerad position kommer markant efter sann position under förflyttning samt ”genar” vid riktningsändringar.

Lageroptimering

Simuleringen av olika lagernivåer kan inte betecknas som allmängiltig då detta endast rör sig om en avverkning. Vidare approximeras påverkan av avverkningslagret på skotarförarens prestation med dess påverkan på optimeringsalgoritmens prestation. Faktum kvarstår dock att vid denna fallstudie ökade transportarbetet med ca 10 %, då avverkningslagret sänktes från 800 till ca 150 m³fub. Även om det kan vara svårt att noga beskriva hur avverkningslagret påverkar skotarförarens prestation kan det vara relevant med en grov skattning av den typ som gjorts. Denna och liknande skattningar för avverkning och lastbilstransport måste utgöra grunden vid en diskussion om hur stora de totala transportlagren bör vara i en råvaruorganisation.

Av figurerna 19–22 går det att dra vissa slutsatser hur en effektivisering av råvaruorganisation och industriella processer kommer att påverka den optimala lagernivån och vinsten. Antag att råvaruorganisationen implementerar planeringsrutiner för transportstyrning t.ex. en effektivare destinering eller en ökad ruttkörning. Dessa kommer framför allt sänka kostnaderna för transportverksamheten vid högre lagernivåer. Konsekvensen blir därmed att flödeskedjans minsta kostnadsnivå flyttas mot högre lagernivåer. Följden blir att marginalkostnaden möter marginalintäkten vid en högre lagernivå. I detta fall kommer således en större vinst uppstå vid en högre lagernivå.

Slutsatser

På det studerade objektet uppgick nyttan av ruttoptimering till ca 8 %. Skotarens totala körsträcka minskade med 8 %. Flera skäl talar för att detta är en underskattning av den verkliga nyttan. Denna studie bekräftar således den föregående studien (Arvidsson et al., 1999).

Precisionen på GPS har förbättrats sedan SA-störningen togs bort. Momentanvärdet har dock troligtvis fortfarande för stort fel för att kunna användas i det testade systemet. Olika tekniker för att minska medelfelet är nödvändiga. Bland dessa har bl.a. medelvärdesberäkning och multipath-filter visat sig ha en stor positiv effekt. En fördel med dessa två tekniker är att de är mjukvarubaserade.

De är således inte knutna till ett abonnemang eller beroende av radio-förbindelse.

Det har visats fullt möjligt att integrera positionerad avverkningsinformation, ruttoptimering och ett skotarGIS i ett fungerande system. Ett system som skapar logiska rutter som skotarföraren kan arbeta efter. Mobil datakommunikation provades ej under försöket.

Brister har påvisats i den fysiska arbetsmiljön. Integrationen mellan fordonsdator och skotare måste förbättras. I det testade GISet fanns det brister i användarvänlighet. Även om det gick bra att följa en rutt så var övriga funktioner i systemet svåra att hantera och kartan innehöll för mycket information, ansåg förarna.

System för skotningsoptimering möjliggör skotningsrapportering med högre precision och detaljeringsgrad än i dag.

Vidare har studien pekat på nödvändigheten av korrekt information och svårigheter med att skapa denna. Alternativ utan ruttoptimering, men med bibehållen noggrannhet i skotarrapporteringen, har föreslagits.

Prototypen förenklar skotarförarens arbete, särskilt vid mörkerarbete och vid påbörjandet av nya objekt. Den gör det även enklare att verifiera kvaliteten på skotningsarbetet med avseende både på det som skall göras och det som inte får göras.

I studien görs även ett försök att analysera hur avverkningslagret påverkar skotarförarens prestation. En sänkning av avverkningslagret från 4 dagar till $\frac{1}{2}$ –1 dags lager ökar det nödvändiga transportarbetet med 10 % och därmed den totala skotningskostnaden med ca 5 %.

Referenser

- Arvidsson, P.-Å., Erikson, P., Eriksson, I., Rönnqvist, M., Westerlund, A. & Igeklint, P. 1999. Smartare vägval i skotning – bra för både ekonomi och miljö, SkogForsk, Resultat, Nr 22, 1999.
- Carlsson, D., Rönnqvist, M. & Westerlund, A. 1999. Extraction of logs in forestry using operations research and geographical information systems, Proceedings of the 32th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 5–8, Maui, Hawaii, USA.
- Derigs, U. & Metz, A. 1986. On the use of optimal fractional matchings for solving the (integer) matching problem, Computing, Vol. 36, 263–274.
- Forbes, M., Holt, J., Kilby, P. & Watts, A. 1991. A matching algorithm with application to bus operations, Australasian Journal of Combinatorics, Vol. 4, 71–85.
- Forsberg, M. 2000. Optimalt Virkeslager – En fallstudie av olika lagerstrategier vid AssiDomän Kraftliner Piteå, Arbetsrapport 291, Inst. för Skogs-ekonomi, Sveriges Lantbruksuniversitet, Umeå.
- Fisher, M. 1995. Vehicle routing, Chapter 1 in Handbooks in Operations Research and Management Science: Network Routing Vol. 8, (eds.) M.O. Ball, T.L. Mignanti, C.L. Monma & G.L. Nemhauser, Elsevier, Amsterdam.
- Pindyck, R. & Rubinfeld, D. 1998. Microeconomics, Kapitel 7–8, Prentice Hall, New Jersey.
- Rönnqvist, M. 1998. The use of repeated matching in some combinatorial optimization applications, Report LiTH-MAT-R-1998-09, Linköping University, Linköping, Sweden.
- Sjöfartsverket. 2000. Radionavigeringsplan för Sverige år 2000. Norrköping.
- Terracom. 1999. Antenner och mottagning. Luleå.
- Trimble Navigation Limited. 2000. A New Level of Accuracy for Differential Mapping Applications using EVEREST Multipath Rejection Technology. White Paper. www.trimble.com.
- Wark, P. & Holt, J. 1994. A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, Vol. 45, pp. 1156–1167.

Definition av in- och utdatafiler

Tabellen nedan är en definition av samtliga filer som används av optimeringsalgoritmen.

Tabell 1.
Definition av indatafiler.

Area	Nod; Lat; Lon; Area1..6 – Latitud och Longitud samt total area för varje sortiment per nod.
Volym	Nod; Volym1..6 – Total volym för varje sortiment per nod.
Lasttid	Nod; Tid1..6 – Lastningstid för varje sortiment per nod.
FranTill	Nod; Nod; Avstånd – Avståndet mellan vilka noder körning är möjlig.
Bestand	Nod 1..6 – Till vilken nod varje sortiment skall skotas.
Samlastning	Sort1..6; Tidstillägg – Olika tillåtna kombinationer av sortiment i ett skotarlass. Tidstillägg baseras på avståndet mellan avläggsnoderna, extra transportarbete.
Skotare	Hastighet tom; full; under lastning; maximal lastarea
Optinst.	Antal yttre iterationer Antal slumpningar vid byte av uppdrag mellan rutter Antal inre iterationer Maximalt antal ruttalternativ vid optimering Tid för att vända skotaren Lossningskonstanter, tidstillägg per ytterligare sortiment i lasset. Maximalt avstånd mellan två högar vid vilken den lägre lastningshastigheten skall användas.

Tabell 2 är en definition av de filer som skapas av optimeringsalgoritmen efter ruttoptimeringen är utförd.

Tabell 2.
Utdatafiler.

Ruttdata	Ruttnr; Nod; Sort1..6 – Samtliga noder i en rutt samt vid vilka noder varje sortiment skall lastas.
Ruttinfo	Ruttnr, Sort1..6; Avstånd; Tid – För varje rutt anges vilka sortiment som ingår, samt beräkna körsträcka och tid.

Bilaga 2

Variabler som registrerades i Svarta Lådan

- 800 Start träd (ååååmmddhhmmss)
- 801 Slut träd (ååååmmddhhmmss)
- 802 Stockdata
 - Data 1 Bitnummer
 - Data 2 Volym i dl
 - Data 3 Sortimentsnummer.²⁰
 - Data 4 Toppdiameter i mm
 - Data 5 Längd i cm
- 803 Trädvolym i dl
- 804 Förflyttning start (ååååmmddhhmmss)
- 805 Förflyttning stopp
 - Data 1 Stopptid (ååååmmddhhmmss)
 - Data 2 Lutning X^0
 - Data 3 Lutning Y^0 ²¹

Tabell 1 är ett exempel på de avverkningsdata som lagrades i Svarta Lådan enligt definitionen ovan.

Tabell 1.
Avverkningsinformation.

804	1	20001101142124~
805	1	20001101142242 1 0~
800	1	20001101142242~
802	1	1 74 2 6 0 121 467~
802	1	2 33 2 6 0 65 492~
803	1	107~
801	1	20001101142257~
800	1	20001101142310~
802	1	1 272 2 3 0 254 438~
802	1	2 186 2 3 64 209 468~
802	1	3 82 2 6 64 104 460~
803	1	540~
801	1	20001101142335~
800	1	20001101142344~
800	1	20001101142408~
802	1	1 35 2 6 0 69 463~
803	1	35~
801	1	20001101142414~
800	1	20001101142421~
804	1	20001101142424~
805	1	20001101142435 -1 -1~

²⁰ Refererar till de sortimentsnummer som definieras i apt-filen. Se StanForD appendix1.

²¹ Lutning registrerades för en annan studie som ej omfattas av denna rapport, varför dessa variabler inte behandlas i den fortsatta framställningen.

Tabell 2. innehåller ett exempel på flödet av data från GPS enligt formatet NMEA-0183.

Tabell 2.
Positionsdata enligt NMEA-0183.

142124.0,5839.4908,N,01529.9515,E,2,8,0.97,00077,M,030,M,01,0000*6E
142126.0,5839.4906,N,01529.9524,E,2,8,0.97,00077,M,030,M,01,0000*60
142128.0,5839.4907,N,01529.9529,E,2,7,1.12,00077,M,030,M,02,0000*62
142130.0,5839.4907,N,01529.9532,E,2,7,1.12,00077,M,030,M,01,0000*62
142132.0,5839.4907,N,01529.9535,E,2,7,1.12,00077,M,030,M,01,0000*67
142134.0,5839.4908,N,01529.9537,E,2,7,1.12,00077,M,030,M,02,0000*6F
142136.0,5839.4907,N,01529.9541,E,2,8,0.97,00077,M,030,M,01,0000*63
142138.0,5839.4904,N,01529.9548,E,2,8,0.97,00077,M,030,M,01,0000*67
142140.0,5839.4901,N,01529.9556,E,2,8,0.97,00077,M,030,M,02,0000*61
142142.0,5839.4900,N,01529.9559,E,2,7,1.12,00077,M,030,M,01,0000*6D
142144.0,5839.4901,N,01529.9559,E,2,7,1.12,00078,M,030,M,01,0000*65

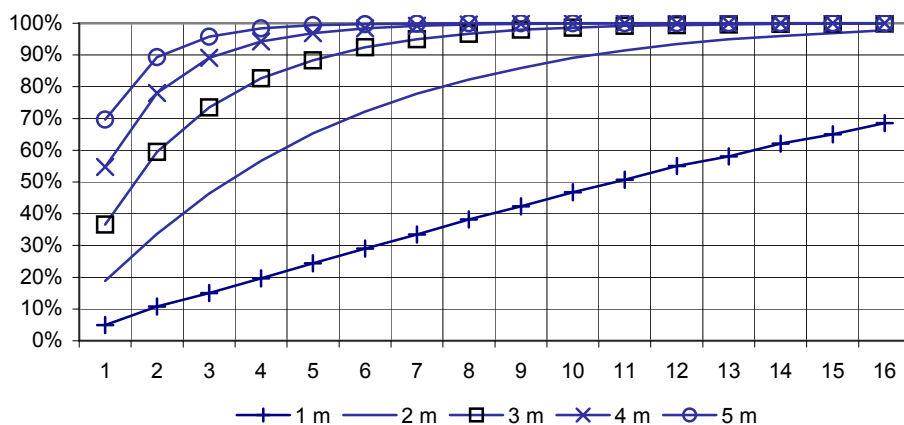
Flödet av data är definierat enligt dialekten GGA av NMEA-0183. Tabellen nedan är en tolkning av den första raden i exemplet ovan.

Tabell 3.
Definitionen för dataström från GPS enligt NMEA-0183, GGA.

142124	Position tagen vid 14:21:24 UTC
5839.4908, N	Latitud 58 grader 39.4908 minuter Norr
1529.9515, E	Longitud 15 grader 29.9515 minuter Öster
2	Positionskvalitet : 0 = Ogiltig 1 = GPS fix 2 = DPGS fix
8	Antal satelliter vid positionering
0.97	HDOP
00077, M	Höjd, meter, över medel havsyta
030, M	Höjd, meter, över WGS84 ellipsoid
01	Tid, sekunder, sedan senaste DGPS uppdatering
0000	DGPS stationens ID-nummer

Bilaga 3

Kvalitet vid positionering med GPS



Figuren anger det antal positioner som krävs för att nå ett visst konfidensintervall, givet en felgräns. En ny position tas med 2 sekunders intervall. Antag att kravet är ett fel av som mest ± 3 meter med 15 % sannolikhet. Funktionen för 3 m ger att med 7 positioner (12 sekunder) har en medelvärdesbildning nått kravgränsen.