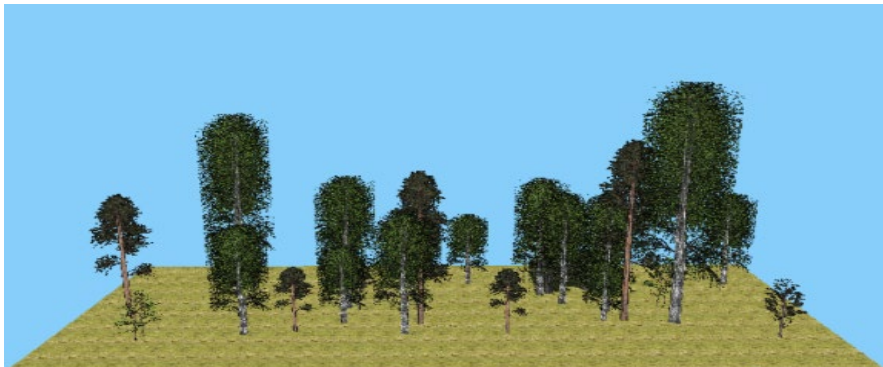


# Kostnadseffektiva system för skörd av slybränslen

*Cost-effective systems for harvest of brushwood fuels*

Daniel Nilsson, Örjan Grönlund, Maria Iwarsson Wide



# Kostnadseffektiva system för skörd av slybränslen

*Cost-effective systems for harvest of brushwood fuels*

Daniel Nilsson                      Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik, daniel.nilsson@slu.se  
Örjan Grönlund                      Skogforsk, Uppsala, orjan.gronlund@skogforsk.se  
Maria Iwarsson Wide                Skogforsk, Uppsala, maria.iwarssonwide@skogforsk.se

**Utgivningsort:** Uppsala

**Utgivningsår:** 2020

**Omslagsbild:**

**Serietitel:** Rapport

**Delnummer i serien:** 115

**ISSN:** 1654-9406

**Elektronisk publicering:** <https://pub.epsilon.slu.se>

**Bibliografisk referens:** Nilsson, D., Grönlund, Ö. & Iwarsson Wide, M. (2020). *Kostnadseffektiva system för skörd av slybränslen*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik. (Rapport, 115).

**Nyckelord:** Sly, åkerkanter, vägkanter, simulering, bioenergi, beståndsgenerator, skördekostnad, avverkning, kalkylprogram

**Sveriges lantbruksuniversitet**

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik

## SAMMANFATTNING

Under de senaste årtiondena har landskapet i stora delar av Sverige blivit mer och mer igenväxt med sly. Detta gäller framförallt på gamla åkrar och betesmarker, längs mindre vägar och inom områden med höga kulturvärden. Det finns också stora arealer där sly måste röjas bort med jämna mellanrum, exempelvis längs större vägar och järnvägar och i kraftledningsgator. Mängden energi i sly på dessa marker i Sverige har uppskattats till ca 85 TWh, och då är sly som växer på skogsmark inte medräknat. Uppskattningen är att i storleksordningen 6 TWh sly skulle kunna skördas med lönsamhet varje år, men f.n. är nyttjandet av denna energiresurs låg.

Eftersom det sällan finns detaljerad information om träden på dessa områden, är det svårt att veta för den som vill avverka ett specifikt område om det är lönsamt eller inte. I denna studie har vi därför med hjälp av datorsimuleringar undersökt hur mycket avverkningen kostar under olika förutsättningar när det t.ex. gäller beståndsytans areal och form, artsammansättning, fördelning av brösthöjdsdiameter och stamtäthet.

Modelleringsarbetet har varit indelat i tre steg: i) utveckla en beståndsgenerator med syfte att kunna generera slybestånd, ii) utveckla en modell för simulering av avverkning och skotning (ihopsamling) av sly och iii) utveckla en kalkylmodell för beräkning av kostnader och lönsamhet för åtgärden.

Med hjälp av datormodellerna har vi visualiserat, simulerat och kostnadsberäknat 29 exempel på ytor med sly (25 m x 5 m), där bestånden skiljer sig med avseende på bl.a. trädens storlek, stamtäthet och innehåll av biomassa. Genom att kombinera ihop dessa ytor så att de efterliknar ett område i verkligheten, kan man sedan med hjälp av kalkylverktyget räkna ut den totala kostnaden för skörd för det aktuella fallet (se kalkylverktyget på [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se)).

I ett annat exempel beräknades lönsamheten för röjning på ett lantbruk, där en dikeskant och fyra åkerkanter skulle röjas. I modellen simulerades skörd, insamling och transport till lager, samt förflyttningar mellan de olika bestånden. Därefter beräknades kostnaderna, som sedan jämfördes med kostnaderna för manuell röjning med röjsåg/motorsåg. Resultaten visade att maskinell röjning var billigare än manuell, men för båda alternativen var kostnaderna högre än intäkterna, d.v.s. de var i detta fall olönsamma.

De fem viktigaste slutsatserna i projektet var:

- Den framtagna beståndsgeneratoren är ett användbart redskap för att ta fram fiktiva, men ändå verklighetstroga, beståndstyper för skörd av sly.
- Dynamisk simulering av slyskörd är ett effektivt sätt att jämföra olika skördesystem med avseende på deras prestanda, och valideringarna visade att den modell som har tagits fram i detta projekt är tillräckligt tillförlitlig med tanke på modellens syfte.
- Det framtagna ekonomiska kalkylverktyget (se Skogforsks hemsida, [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se)) ger goda möjligheter att uppskatta intäkter och kostnader för röjning av sly, hela vägen från bestånd till leverans vid förbränningsanläggning.
- Lönsamheten för slytäkt är låg, och det är därför viktigt att tänka sig för innan beslut tas när det gäller val av maskinsystem (t.ex. maskinellt eller motormanuellt) och avverkningstidpunkt (t.ex. i år eller om fem år för att få ett högre utbyte av biomassa).
- I många fall uppstår betydande indirekta värden vid slyskörd. Ett exempel är mindre beskuggning och snabbare upptorkning och därmed högre skördar vid röjning av åkermarkskanter. Även om det kan vara svårt att kvantifiera dessa indirekta värden, så bör de också beaktas i kalkylerna.

## ABSTRACT

During recent decades, a relatively large part of the open landscape in Sweden has become overgrown with brushwood. For example, brushwood is spreading on abandoned agricultural land, abandoned semi-natural grasslands, on ancient cultural land and in marginal land in urban areas. There is also growth of brushwood along roads and railway lines and in power line corridors, which needs to be managed. The standing and annual available quantities of brushwood in Sweden has been estimated to 309 PJ and 23 PJ, respectively (excl. brushwood established on forest land). At present, however, the use of this biomass resource is negligible.

In real situations, there is often lack of detailed data on stands and harvest costs. Thus, it may be difficult to know in advance if it is profitable or not to harvest a specific stand. The aim of this project was to produce a decision support to assess costs and revenues. Simulations were used to investigate the costs under a wide range of harvest conditions regarding e.g. area and shape of stands, composition of tree species, stem density and breast height diameter.

The project comprised three main parts: i) development of a brushwood stand generator, ii) development of a dynamic simulation model to simulate harvest and handling operations, iii) development of a model to calculate costs and profitability. Literature review provided data for generation of brushwood stands and for simulations (e.g. machine time consumption).

By means of the models, 29 type stands (25 m x 5 m) were visualized and simulated, and the costs were calculated. The type stands differ with respect to e.g. average breast height diameter, stem density and quantity of biomass. By combining a number of these visualized stands, a farmer/land owner/etc. can use a calculation tool developed in the project (available at [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se)) to estimate the total harvest costs for the stand to be harvested.

The models were also used to estimate time demand and costs in a case study, where harvest and forwarding of brushwood were simulated for a farm with stands along a ditch and four arable field edges. The results showed that mechanized harvest rendered lower costs than motor-manual harvest. In this case, however, both harvest methods had negative net gains.

The most important conclusions in this project were:

- The simplified stand generator developed in the project was considered as a useful tool to generate a wide range of different fictive stands for harvest of brushwood.
- Dynamic simulation of brushwood harvest is an efficient way to analyse, evaluate and compare different machinery systems and harvesting strategies. The validations showed that the model developed could be regarded as reliable according to its purpose.
- The economic calculation tool available at [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se) provides opportunities to calculate profitability of brushwood harvest, taking all handling operations from harvest site to heating plant into account.
- As anticipated, it was shown that profitability of brushwood harvest generally is low. Therefore, it is important to make careful decisions regarding choice of machinery (e.g. mechanized or motor manual) and time of harvest (e.g. this year or in five years to get a higher yield).
- Harvest of brushwood often implies indirect economic benefits. Less shading and faster soil drying along field edges could, for example, result in higher crop yields and higher profitability. Although it may be difficult to quantify such indirect values, they should at least be recognized in economic analyses.

## FÖRORD

Det svenska landskapet håller sakta på att växa igen med sly, och studier har visat att man skulle kunna ta ut ca 6 TWh sly som bränsle per år. En utmaning är dock att prognosticera vilka slyavverkningar som kan vara lönsamma.

Syftet med detta projekt var att ta fram ett beslutsstöd för att bedöma lönsamhet i avverkning och hantering av sly. Projektet bestod av tre delmoment: 1) generera slybestånd, 2) simulera tidsåtgång vid mekaniserad avverkning av sly och 3) beräkning av lönsamhet. I projektet har bl.a. ett antal typbestånd tagits fram. Bestånden har visualiserats, och dessa bilder, tillsammans med uppgifter om tidsåtgång för skörd från simuleringarna, kan användas i ett digitalt beslutsstöd som har utvecklats inom projektet. Detta beslutsstöd finns tillgängligt på Skogforsks hemsida: [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se).

Vi vill tacka referensgruppen bestående av Bo Granqvist, skogsbränsleentreprenör och vd för Kvarnmon AB, Åke Lundberg, Hedesunda, Anders S Johansson, Länsstyrelsen i Gävleborg, Erik Reis, LRF Konsult samt Olof Olsson, Hushållningssällskapet, som har givit värdefulla synpunkter under projektets genomförande.

Slutligen vill vi tacka Stiftelsen Lantbruksforskning, som har finansierat projektet. Forskningsprogrammet STandUp har också bidragit med finansiering.

Uppsala, oktober 2020

Daniel Nilsson  
Örjan Grönlund  
Maria Iwarsson Wide

## INNEHÅLL

1. INLEDNING.....	5
1.1. Bakgrund.....	5
1.2. Syfte och mål.....	7
1.3. Avgränsningar och system- och modellöversikt.....	8
2. BESTÅNDSGENERATOR.....	10
2.1. Litteraturstudie.....	10
2.2. Tilldelning av träslag, brösthöjdsdiameter samt beräkning av höjd.....	11
2.3. Positionering av stammar.....	15
2.4. Beräkning av biomassamängder.....	22
3. MODELL FÖR SIMULERING AV SKÖRDEARBETET.....	26
3.1. Bakgrund, tidigare studier och systemgränser.....	26
3.2. Modellbeskrivning.....	27
3.3. Utdata från simuleringar.....	34
3.4. Ekonomiska beräkningar.....	36
4. VERIFIERING OCH VALIDERING AV SIMULERINGSMODELLEN.....	38
4.1. Verifiering.....	38
4.2. Validering.....	38
5. RÖJNING AV OLIKA BESTÅNDSTYPER LÄNGS VÄGKANTER.....	48
5.1. Beskrivning av typbestånd.....	48
5.2. Resultat - prestanda vid skörd av typbestånden.....	51
5.3. Resultat - avverkningskostnader.....	55
6. RÖJNING LÄNGS ÅKERMARKSKANTER – EN FALLSTUDIE.....	56
6.1. Systemöversikt och beståndsbeskrivning.....	56
6.2. Resultat - prestanda och kostnader.....	58
7. DISKUSSION.....	62
8. SLUTSATSER.....	64
LITTERATUR.....	65
BILAGA A.....	70
BILAGA B.....	71

## 1. INLEDNING

### 1.1. Bakgrund

Under de senaste decennierna har landskapet i stora delar av Sverige blivit alltmer igenväxt av sly (Emanuelsson m.fl., 2014). Detta gäller framförallt igenväxande åker- och betesmarker, övergångszoner mellan jordbruksmark och skogsmark, längs brukningsvägar och skogsvägar (Emanuelsson m.fl., 2014) samt inom stadsnära områden med höga rekreations- och kulturvärden (Johansson, 2011). Det finns också stora arealer i landet där sly regelbundet måste röjas bort av säkerhetsskäl, men där man inte tillvaratar biomassan, t.ex. längs större vägar, längs järnvägar (Huisman, 2001) och i kraftledningsgator (Svenska Kraftnät, 2010). Enligt Ebenhard m.fl. (2017) består slyet främst av småplantor, buskar och yngre träd av lövträdarter såsom björk (*Betula* spp.), asp (*Populus tremula*), al (*Alnus* spp.) och sälg (*Salix caprea*), ofta med inslag av barrträdarter såsom gran (*Picea abies*) och en (*Juniperus communis*). Vanligen uppstår det först täta buskage som med tiden övergår till olikåldriga trädbestånd genom självgallring och självföryngring.

Andersson m.fl. (2016) beräknade att mängden stående biomassa i form av sly i Sverige uppgår till totalt ca 18 milj ton TS inom följande s.k. områdeskategorier: vägkanter, järnvägar, kraftledningsgator, småbiotop åker (åkerkanter, åkerholmar, m.m.), igenväxande åkermark samt ängs- och betesmarker (tabell 1.1). Denna mängd biomassa motsvarar ca 85 TWh. Observera att denna mängd inte innefattar den sly som växer på mark som klassificeras som skogsmark.

Om man tar hänsyn till ekonomiska faktorer, såsom att anta att hanteringskostnaden får vara maximalt 1000 kr per ton TS, exkl. kostnader för skörd, eftersom skörden i många fall är obligatorisk (t.ex. i kraftledningsgator), så är den tillgängliga kvantiteten 26 TWh (tabell 1.1). På årlig basis beräknas skördepotentialen vara 6,5 TWh/år om man beaktar årlig tillväxt och andra praktiska faktorer (Ebenhard m.fl., 2017). De största potentialerna finns för ängs- och betesmarker (2,4 TWh/år) och igenväxande åkermark (1,6 TWh/år). Om man utökar skördeytorna så att man gallrar 5 m in på omgivande mark på båda sidor längs vägar, d.v.s. 5 m utanför de områden som klassificeras som väg och vägren, samt gör motsvarande gallring 10 m in på omgivande mark för åkerkanter, så blir den stående mängden biomassa mycket stor (190 TWh). Den årliga tillgängliga mängden från dessa ytor är också avsevärd (1,1 TWh/år) (tabell 1.1). Utöver den ovan nämnda nationella studien av Ebenhard m.fl. (2017), finns det även exempel på mer platsspecifika mätmetoder för potentialuppskattningar (se t.ex. Iwarsson Wide m.fl., 2013).

Sverige är ett ledande land när det gäller produktion och användning av bioenergi, och idag är tillförseln av bioenergi på samma nivå som den totala tillförseln av fossila bränslen (Energimyndigheten, 2017). Efterfrågan på förnybara och ”koldioxidneutrala” bränslen, såsom biobränslen, förväntas öka ytterligare framöver, med avseende på att Sverige har satt som mål att vara ett ”koldioxid neutralt” land år 2045. Den ökade användningen av bioenergi inom värme- och kraftvärmesektorn kommer sannolikt att mattas av alltmer, medan efterfrågan inom drivmedelssektorn, och annan materialproduktion, förmodligen kommer att öka starkt. En allmän övergång till en mer biobaserad ekonomi kommer troligen också att ge en ökad efterfrågan på biomassa inom andra industri- och samhällssektorer. Det är därför av stor vikt att på ett klokt sätt utnyttja de biomassapotentier som redan finns, t.ex. i form av sly (Emanuelsson m.fl., 2014).

Utnyttjande av biomassa i form av sly har många fördelar jämfört med produktion av biomassa genom odling av energigrödor. Sly kräver inga särskilda odlingsåtgärder i form av markbearbetning, gödsling och kemisk bekämpning, och energikvoten är hög (värmevärdet i sly i förhållande till energin som går åt för skörd, flisning, transport, m.m. är ca 25:1) (Andersson m.fl., 2016; Ebenhard m.fl., 2017). Utnyttjande av sly konkurrerar inte heller med mark avsedd för foder- och livsmedelsproduktion. Väl avvägd skörd av sly gynnar den biologiska mångfalden, olika kulturella värden och rekreationsområden, samtidigt som landskapet hålls mer öppet och varierat. Ebenhard m.fl. (2017) menar att många rödlistade arter är helt beroende av aktiv skötsel av öppna biotoper inom t.ex. ängs- och betesmarker, längs vägar och vid skogsbryn.

Det är också viktigt att komma ihåg att det finns juridiska restriktioner för skörd av sly. Detta gäller t.ex. med avseende på eventuella områdesskydd (biotopskydd, Natura 2000-områden, m.m.) och artskyddsförordningen (Anderson m.fl., 2016; Ebenhard et al., 2017). Detta innebär att den tillgängliga potentialen reduceras för vissa områdeskategorier (tabell 1.1).

Tabell 1.1. Arealer, ton torrsbstans (TS) och energitillgångar inom olika områdeskategorier med sly (Ebenhard m.fl., 2017).

Områdeskategori	Areal (ha)	Biomassa (milj ton TS)	Biomassa (ton TS per ha)	Energi (TWh)	Tillgänglig för skörd (TWh)	Årlig skörd (TWh per år)
Vägkanter	467 500	1,0	2,2	4,9	2,8	0,8
Järnvägar	32 600	0,1	4,3	0,7	0,7	0,2
Kraftledningsgator	160 400	0,6	4,0	3,0	2,1	0,8
Småbiotop åkermark	117 700	4,2	36,0	19,9	7,2	0,7
Igenväxande åkermark	138 900	2,7	19,5	12,7	7,3	1,6
Ängs- och betesmark	509 100	9,5	18,7	44,7	6,4	2,4
<b>Totalt</b>	<b>1 426 100</b>	<b>18,3</b>	<b>12,8</b>	<b>85,8</b>	<b>26,4</b>	<b>6,5</b>
Väggkantzonen (+5 m) <sup>a</sup>	287 800	23,1	80,1	108,4		0,9
Åkerkantzon (+10 m) <sup>b</sup>	150 200	17,1	113,9	80,4		0,3
<b>Totalt kantzoner</b>	<b>438 000</b>	<b>40,2</b>	<b>91,7</b>	<b>188,8</b>		<b>1,1</b>

<sup>a</sup> Utökad skördeyta med gallring ytterligare 5 m in på omgivande mark på båda sidor längs vägar.

<sup>b</sup> Utökad skördeyta med gallring 10 m in på omgivande mark längs åkerkanter.

En ytterligare fördel med slyskörd är att den bidrar till en mer levande landsbygd genom ökat entreprenörskap och ökad sysselsättning. Vid skörd och utnyttjande av 6 TWh slybränsle per år (tabell 1.1), kan 1300 - 4500 nya arbetstillfällen skapas, och det totala samhällsproduktionsvärdet öka med 2-3,6 miljarder kr/år enligt uppskattningar av Andersson m.fl. (2016) (författarna menar dock att de lägre värdena inom intervallen är mer troliga). En annan fördel med slyskörd är att arbetet i huvudsak genomförs under vinterhalvåret, vilket innebär att det kan vara en kompletterande sysselsättning för lantbrukare med växtodling.

Lönsamheten för en slyentreprenör är beroende av både priset på konkurrerande bränslen (t.ex. skogsflis) och på kostnaderna för att producera slyflis. Priset på skogsflis är f.n. ca 200 kr/MWh (Energimyndigheten, 2020). För att det ska vara lönsamt att producera slyflis, måste



alltså kostnaderna vara lägre än så. Kostnaderna för slyflis på marker där röjning är obligatorisk, t.ex. i kraftledningsgator och på betesmarker med miljöersättning, är betydligt högre än kostnaderna för flisning av exempelvis grenar och toppar (grot). Därför utnyttjas vanligen inte denna röjningsresurs som bränsle idag. Men så länge de extra kostnaderna för att samla upp, flisa och transportera materialet är lägre än intäkten för flisen, så skulle det vara lönsamt att utnyttja slyet även på dessa marker eftersom den totala nettokostnaden blir lägre.

För områden där det inte finns några krav på röjning, men där det tillkommer ett nyttovärde, är lönsamheten för slytäkt ofta positiv. Exempel på sådana nyttor är snabbare upptorkning och längre livslängd för mindre vägar/skogsvägar som röjs, och bättre odlingsförutsättningar och högre avkastning där åkerkanter röjs. På sådana marker är röjning av sly lönsam så länge flisintäkten plus värdet av nyttan överstiger kostnaderna. Ofta sker röjningarna här med längre tidsintervall än på marker där regelbunden röjning är ett krav, och därför kan biomassamängden per hektar vara större här.

En begränsande faktor för ett lönsamt utnyttjande av sly är bristen på erfarenhet och kunskap kring storskalig skörd och hantering av bränslet. Ett annat problem rör det faktum att mängden biomassa per ytenhet normalt är låg, vilket resulterar i höga skördekostnader. Undersökningar har tidigare gjorts när det gäller prestanda och kostnader för skörd av sly med olika maskiner, t.ex. längs vägkanter (Iwarsson Wide, 2009a; 2009b; 2009c), i kraftledningsgator (Fernandez-Lacruz m.fl., 2013) och igenväxande åkermark (Bergström m.fl., 2015). Datorprogram för att beräkna kostnader och intäkter vid skörd av klenträdd i produktionsskogar har också tagits fram (Jacobson & Iwarsson Wide, 2012).

Slutsatserna från tidigare studier visar att lönsamheten vid skörd av sly ofta är låg men att skillnaderna är stora. En utmaning är att på förhand bedöma lönsamheten eftersom det är ovanligt med detaljerad information om slybevuxna ytor. Följaktligen skulle lönsamheten i slyskörd kunna öka vid tillämpning av verktyg för att bedöma prestanda och kostnader för olika typer av bestånd (med avseende på ålder, stamtäthet, areal, m.m.) och maskinsystem.

## 1.2. Syfte och mål

Det övergripande syftet med detta projekt var att utveckla ett beslutsstöd för bedömning av lönsamheten i skörd och hantering av sly. Projektet har utgjorts av ett antal delprojekt med separata delmål:

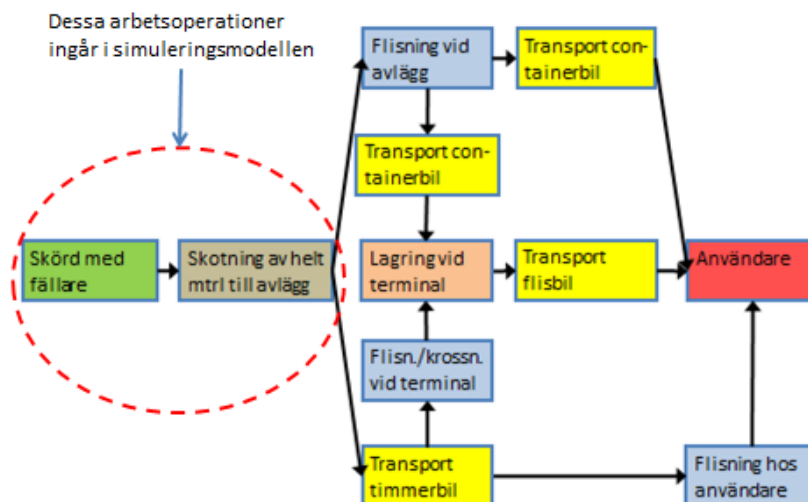
- att utveckla en datorbaserad simuleringsmodell med vilken man kan ta fram avverkningsprestanda och lönsamhet under olika förutsättningar när det t.ex. gäller beståndens täthet, trädens storleksfördelning, ålder och biomassavkastning, val av maskinteknik, geografiska förutsättningar såsom transportavstånd, etc.
- att ta fram ett allmänt tillgängligt datorverktyg för att uppskatta kostnaden för olika röjningsåtgärder. Datorverktygets målgrupp ska vara landsbygdsföretagare (lantbrukare, maskinentreprenörer, bränsleleverantörer, m.fl.) men även markägare och skötselansvariga (kommuner, länsstyrelser, m.fl.).

### 1.3. Avgränsningar och system- och modellöversikt

Termen “sly” definieras här som yngre träd och buskar spontant uppkomna på igenväxande åkermark, på småbiotoper vid aktivt brukad åkermark, på ängs- och betesmarker, längs vägar och järnvägar, i övergångsområden mellan öppen mark och skogsmark, i kraftledningsgator, i naturreservat och kulturellt intressanta områden, samt i stadsnära rekreationsområden. Sly som växer på produktiv skogsmark ingår alltså inte i denna studie.

Exempel på system för skörd och hantering av sly, från bestånd till värmeverk, visas i figur 1.1. I projektet har två datormodeller tagits fram; en dynamisk modell för att simulera avverkning och skotning med syfte att få fram maskinprestanda under olika bestånds- och maskinförutsättningar, och en särskild modell för att beräkna kostnaderna. I den dynamiska simuleringsmodellen är endast avverkningsarbetet och skotningen medtagna (figur 1.1). Skälet är att volymerna per ytenhet och beståndens arealer vid skörd av sly ofta är mycket mindre än vad som normalt är fallet vid skogliga åtgärder, t.ex. vid gallring eller omhändertagande av grot (grenar och toppar). När skotaren väl har samlat in slyet och transporterat det till avlägggen, kan man anta att det inte är några större skillnader i prestanda och kostnader jämfört med hantering av t.ex. grot. Därför kan data från konventionell flishantering användas för beräkning av kostnaderna från avlägg till användare.

När det gäller geografiska systemgränser, så ingår transporter mellan bestånd och mellan bestånd och avlägg i den dynamiska simuleringsmodellen. Anledningen till att beakta transporter mellan olika skördeområden är att det ska vara möjligt att ta hänsyn till att slybestånden kan ha låga avverkningsvolym, omfatta en mindre areal och vara geografiskt utspridda, vilket kan få stor betydelse för de totala kostnaderna vid slyskörd.

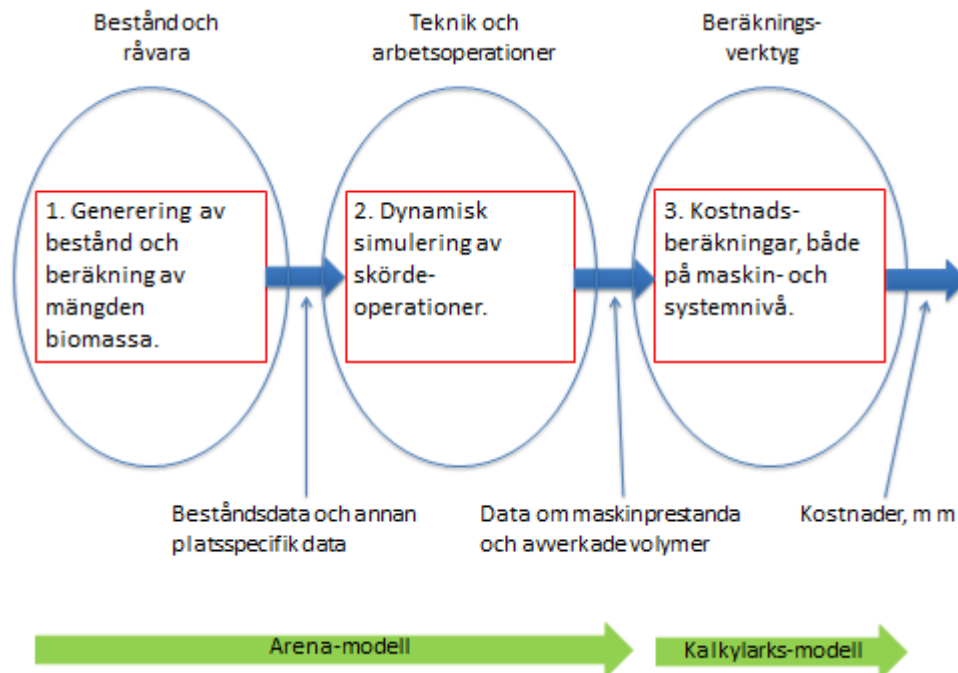


Figur 1.1. Exempel på olika alternativ för hantering av sly för bränsleändamål, och de operationer (inom röd streckad linje) som ingår i den dynamiska simuleringsmodellen.

Det är mycket kostsamt att mäta upp stammarnas exakta positioner, trädslag, brösthöjdsdiameter och höjd i ett slybestånd. När data om detta behövs, kan man därför använda s.k.

beståndsgeneratorer, med vilka man försöker skapa verklighetstroga bestånd med hjälp av datormodeller. Denna studie innehåller därför egentligen tre steg, där det första steget handlar om generering av själva slybeståndet, det andra steget om teknik och arbetsoperationer vid skörden (dynamisk simuleringsmodell), och det tredje steget innefattar beräkning av kostnader för hela kedjan fram till användare (figur 1.2).

Beståndsgeneratoren och den dynamiska simuleringsmodellen har konstruerats i programmet Arena (Rockwell Automation, 2020). Modellen för beräkning av kostnader baseras på ett kalkylprogram utvecklat av Skogforsk och är tillgänglig för allmänheten på hemsidan [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se).



Figur 1.2. De tre stegen i modellarbetet.

## 2. BESTÅNDSGENERATOR

### 2.1. Litteraturstudie

Under senare år har det utvecklats komplexa modeller som kan användas för att simulera skogens tillväxtförändringar, inlagring av kol, påverkan på biodiversitet, m.m. på landskapsnivå (Shifley m.fl., 2017; Huang m.fl., 2018; SLU, 2018). Flera av dessa modeller har en koppling till olika simuleringsmodeller även på beståndsnivå, s.k. beståndssimulatorer. I USA är t.ex. simulatören FVS (Forest Vegetation Simulator) allmänt använd för att simulera tillväxt, mortalitet och föryngring på trädindivid-nivå för att studera skogsvegetationens förändringar utifrån naturlig påverkan (väder, markförhållanden, m.m.) och olika skötselåtgärder (Crookston & Dixon, 2005). I Europa används SILVA för att simulera hur enskilda träd i ett bestånd förändras över tid med avseende på bl.a. tillväxt (Pretzsch m.fl., 2002). En annan simulator för att studera tillväxten hos bestånd, med beaktande av enskilda trädets tillväxtförändringar över tid, är MOSES (Thurnher m.fl., 2017). Andra exempel som nämns i litteraturen är WASIM, PROGNAUS, STAND och BWINPro (Söderbergh & Ledermann, 2003). Under nordiska förhållanden används bl.a. simulatorerna MOTTI (Hynynen m.fl., 2005) och Heureka (StandWise) (SLU, 2018) för att studera utvecklingen på beståndsnivå.

Vid initialisering av beståndssimulatorerna används avståndsberoende (t.ex. SILVA), semi-avståndsberoende (t.ex. FVS) eller avståndsberoende (t.ex. MOTTI) data om de individuella träden. Avståndsberoende data innebär att den specifika positionen för enskilda träd (i ett koordinatsystem) utgör en indataparameter, förutom t.ex. trädslag, brösthöjdsdiameter, höjd och kronutbredning.

Positionsdata kan fås från mätningar i fält, vilket som nämnts tidigare är mycket kostsamt. Ett annat alternativ är beståndsgeneratorer, som utifrån olika positioneringsmönster tilldelar träden x- och y-koordinater. Mönstren för trädens positioner kan vara 1) homogena/enhetliga, 2) slumpmässiga eller 3) klusterbaserade. Den första typen representeras t.ex. av träd (av samma trädslag och ålder) som är planterade i enhetliga rader, medan den andra t.ex. kan representeras av spontant uppkommen sly på nedlagd åkermark. Det tredje alternativet kan utgöras av avgränsade dungar som domineras av ett särskilt trädslag eller av träd som har annan ålder än omgivningen. Det är ett ganska komplext problem att positionera träd för de två senare alternativen, eftersom avstånden mellan dem beror av ålder, trädslag, trädkronans höjd och utbredning, m.m. Dessutom kan markens och terrängens beskaffenhet påverka stammarnas positioner.

Ett antal beståndsgeneratorer för positionering av enskilda träd i olika bestånd har tagits fram. Det vanligaste är att man tilldelar träden koordinater i x- och y-led från sannolikhetsfördelningar. En viktig skillnad mellan generatorerna är dock hur man beaktar vilka avstånd som är ”tillåtna” mellan stammarna. I SILVA har man använt en metod som baserar sig på empiriska data för beräkning av ett minsta tillåtna avstånd mellan träd av samma art (t.ex. lärk-lärk, björk-björk) eller mellan arter (lärk-björk) (Pretzsch, 1997). Detta minsta avstånd är beroende av trädets brösthöjdsdiameter. En liknande metod beskrivs av Wang m.fl. (2002), men en skillnad är att det enskilda trädets brösthöjdsdiameter tilldelas efter att trädet har positionerats (Wang m.fl., 2009).

En nackdel med ovanstående metoder är att betydelsen av t.ex. kronans utbredning kan underskattas. Valentine m.fl. (2000) beskriver en annan metod i fem steg: 1) generera x- och y-koordinater och skapa geometriska figurer i ett mönster runt varje träd utan överlappningar

eller mellanrum (s.k. tessellation), 2) tilldela varje stam en diameter genom att sampla från en sannolikhetsfördelning, 3) beräkna trädets höjd utifrån diametern och avstånden till sina grannar, 4) beräkna kronlängden utifrån höjd och grannavstånd och 5) beräkna en ny diameter utifrån höjd och kronlängd. Denna metod har nackdelar, t.ex. att de resulterande diametrarna i steg 5 kan avvika från den ursprungliga diameterfördelningen.

Kokkila m.fl. (2002) utvecklade en metod där de enskilda träden liknas vid elektriska laddningar som repellerar ('stöter' ifrån) varandra beroende på hur stora de är, och där varje bestånd på så sätt bygger upp en viss 'laddningsenergi'. Modellen baserar sig på Gibbs punktprocess-metodik (Kokkila m.fl., 2002). En annan mer avancerad metod beskrivs av Kershaw m.fl. (2010), där man använder sig av s.k. kopulas. Kopulas är ett statistiskt begrepp och innebär att man använder multivariabla fördelningar för spatialt korrelerade egenskaper (t.ex. kronutbredning och "behov" av yta) hos stammarna. Positioneringen av träd kan också simuleras med hjälp av punktprocesser som tar hänsyn till hierarkiska förhållanden mellan träd av olika storlek (Grabarnik & Särkkä, 2009; Lister & Leites, 2018).

En viktig aspekt när det gäller beståndsgeneratorer är att resultatet ska kunna gå att visualisera. När ett slybestånd ska avverkas, så görs av naturliga skäl inga detaljerade mätningar av varje stams position, dbh, höjd, etc. Men genom visualisering får den som ska göra avverkingen en översiktlig uppfattning om hur beståndet ser ut. Därmed kan exempelvis den erfarna entreprenören uppskatta ungefärlig tidsåtgång och ungefärliga kostnader.

Flera datorhjälpmedel har utvecklats för 3-dimensionell visualisering av bestånd. De flesta av de ovan nämnda simulatorerna har någon form av visualisering, och Wang m.fl. (2009), Kershaw m.fl. (2010) och Han m.fl. (2016) beskriver ytterligare några exempel. Borges m.fl. (2014) och Linkevicius m.fl. (2018) presenterar en mängd olika datorbaserade beslutstödssystem ("decision support systems") med visualiseringsmöjligheter och som f.n. används inom skogsbruket.

Till skillnad mot många av ovanstående beskrivna beståndsgeneratorer, så ska generatorm i detta projekt ge en ögonblicksbild av hur det ser ut vid skörden, och inte användas för att modellera förändringar över tid. En annan viktig skillnad är att bestånden i många fall är unga utan utvecklad trädkrona. Eftersom det är sly som utgör 'råvaran' i detta projekt, har en enkel beståndsgenerator tagits fram som baserar sig på slumpmässig och/eller klusteranpassad positionering. Modellen har konstruerats i simuleringsprogrammet Arena (Kelton m.fl., 2007; Rockwell Automation, 2020), och visualiseringar av de framtagna bestånden (se t.ex. Bilaga B) görs i programmet Heureka (SLU, 2018).

## 2.2. Tilldelning av trädslag, brösthöjdsdiameter samt beräkning av höjd

Först bestäms antalet stammar i beståndet utifrån aktuell/vald stamdensitet och ytans areal. I beståndsgeneratorm tilldelas sedan stammarna ett trädslag. I modellen utgör varje träd en s.k. entitet med ett antal s.k. attribut, där t.ex. trädslag ( $Trs/g$ ) är ett attribut med fyra trädslagskategorier; tall (1), gran (2), björk (3) och övrigt löv (4). Därefter tilldelas träden en brösthöjdsdiameter ( $dbh \geq 0$  för alla träd med höjden  $h \geq 1,3$  m). Om det finns uppmätta data om alla stammars trädslag och  $dbh$  används dessa, annars tilldelas trädslag och brösthöjdsdiameter genom sannolikhetsfördelningar. Om man t.ex. uppskattar att inslaget av björk är 65 % i det bestånd som ska skördas, genererar modellen ett bestånd där 65 % av träden är björk.

Tidigare studier har visat att Weibull-fördelningen är lämplig att använda vid tilldelning av trädets brösthöjdsdiametrar (Bailey & Deell, 1973; Shifley & Lenz, 1985; Valentine m.fl., 2000; Wang m.fl., 2009). Denna fördelning har normalt två parametrar; en formparameter ( $\alpha$ ) och en skalparameter ( $\beta$ ), vilka bestämmer täthetsfunktionens utseende ( $\alpha > 0, \beta > 0$ ) (observera att man i litteraturen ibland kallar  $\alpha$  för skalparameter och  $\beta$  för formparameter, men här används ovanstående benämningar). När  $\alpha = 1$  blir fördelningen lika med en exponentialfördelning, och när  $\alpha \approx 3-3,5$  liknar fördelningen en normalfördelning. Skalparametern  $\beta$  indikerar var på x-axeln som täthetsfunktionens är lokaliserad. Ibland kan bestånden enbart bestå av stammar med stor brösthöjdsdiameter, och då kan det vara lämpligt att även använda en lägesparameter ( $\gamma$ ) som flyttar täthetsfunktionen högerut från begynnelsepunkten ( $x = 0$ ) längs x-axeln (abskissan). Weibullfördelningens täthetsfunktion definieras i intervallet  $[0, +\infty]$ , och då kan det också vara lämpligt att ibland införa ett max-värde vid tilldelning av *dbh*, eftersom fördelningen kan ge extremvärden som inte är troliga med hänsyn tagen till beståndens uppskattade ålder (notera dock att ett sådant maxvärde kan påverka fördelningens medelvärde och standardavvikelse).

Om man har mätt *dbh* (klavat) på ett tillräckligt stort antal träd inom ett bestånd, exempelvis på bestämda provytor, kan dessa data beskrivas i histogram (stapeldiagram), där frekvensen avbildas på y-axeln som funktion av storleksklasserna av *dbh* (på x-axeln). Därefter kan man anpassa täthetsfunktioner utifrån histogrammen, och på så sätt få fram skattade parametrar ( $\alpha^*, \beta^*$ ) för sannolikhetsfördelningarna (se t.ex. figur 4.1). Dessa skattade parametrar används sedan i beståndsgeneratoren för att generera trädens *dbh*.

Om man enbart har tillgång till provytors medel-*dbh* och spridning (standardavvikelse), kan följande metod användas för att generera trädens *dbh* med hjälp av de skattade parametrarna  $\alpha^*$  och  $\beta^*$ . Väntevärdet ( $\mu$ ) hos en Weibull-fördelning är (Shifley & Lenz, 1985):

$$\mu = \beta\Gamma(1+1/\alpha) \quad (2.1)$$

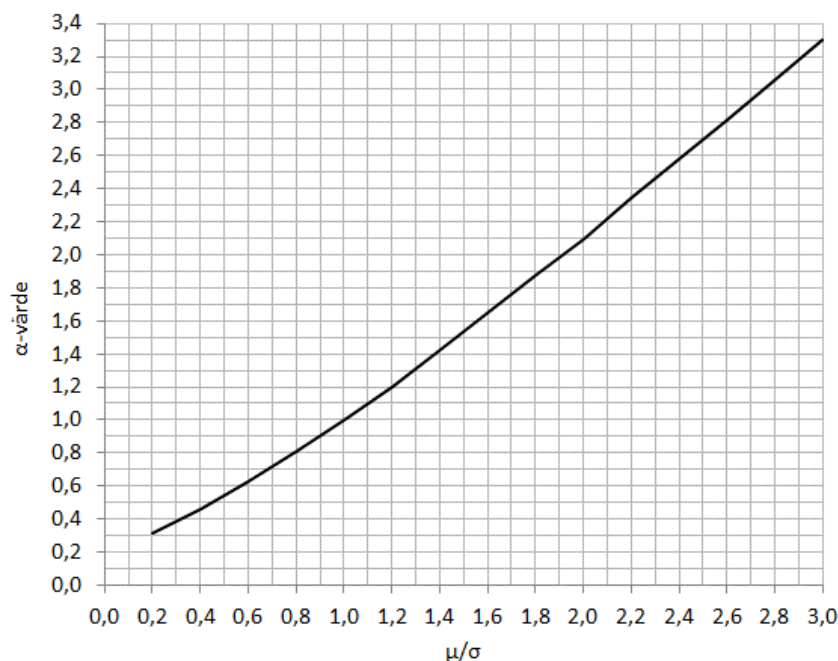
där  $\Gamma$  är gamma-funktionen. Variansen är

$$\sigma^2 = \beta^2(\Gamma(1+2/\alpha)-\Gamma(1+1/\alpha)^2) \quad (2.2)$$

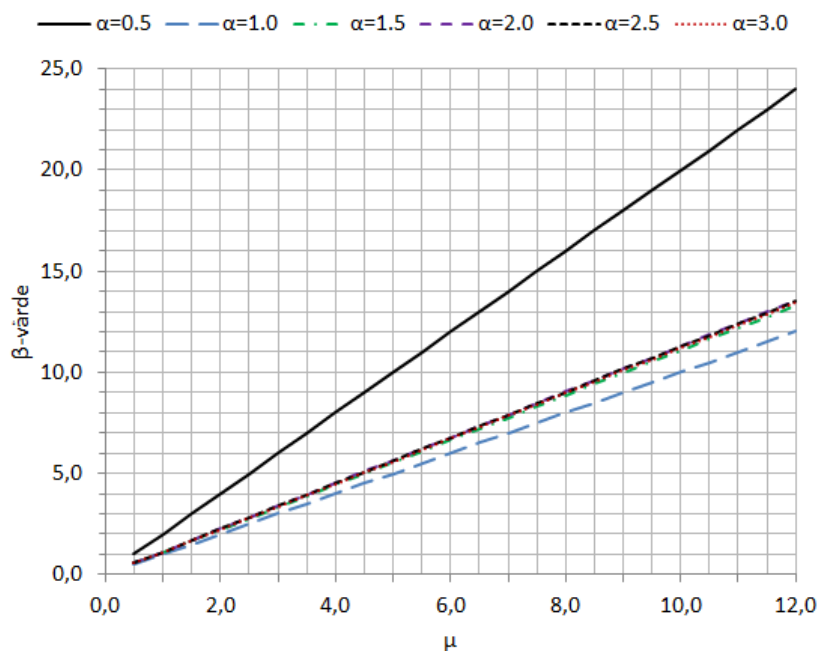
Från ekvationerna 2.1 och 2.2 får vi

$$\mu/\sigma = \Gamma(1+1/\alpha)/(\Gamma(1+2/\alpha)-\Gamma(1+1/\alpha)^2)^{0.5} \quad (2.3)$$

Detta innebär att  $\mu/\sigma$  är oberoende av  $\beta$ , vilket gör att vi först kan skatta fördelningens formparameter med hjälp av ekvation 2.3. Denna ekvation (2.3) kan dock inte lösas analytiskt, utan man måste använda numeriska metoder. Ett exempel på en sådan finns på internet, se Weibullfördelningen (2020). I figurerna 2.1-2.2 visas plottar av  $\alpha$  som funktion av  $\mu/\sigma$  och  $\beta$  som funktion av  $\mu$  och  $\alpha$ . Om vi på ett antal provytor inom ett bestånd har klavat trädets brösthöjdsdiametrar och därmed fått fram ett medelvärde ( $\bar{x}$ ) och en standardavvikelse ( $s$ ), kan en skattning av formparametern ( $\alpha^*$ ) erhållas från figur 2.1 genom bildning av kvoten  $\bar{x}/s$ , och en skattning av skalparametern ( $\beta^*$ ) erhållas från figur 2.2 med hjälp av  $\bar{x}$  och  $\alpha^*$ . Det finns en risk att felet kan bli ganska stora med denna grafiska metod, och om man har tillgång till en numerisk ”lösare”, bör denna hellre användas.



Figur 2.1. Plot av  $\alpha$  som funktion av  $\mu/\sigma$ . Ploten har tagits fram med hjälp av en numerisk lösare (Weibullfördelningen, 2020).



Figur 2.2. Plot av  $\beta$  som funktion av  $\mu$  (notera att kurvorna för  $\alpha = 1,5$ ,  $\alpha = 2,0$ ,  $\alpha = 2,5$  och  $\alpha = 3,0$  ligger väl samlade och därför är svåra att urskilja i diagrammet). Ploten har tagits fram med hjälp av en numerisk lösare (Weibullfördelningen, 2020).

Efter att stammarna har tilldelats en brösthöjdsdiameter, beräknas deras höjd i beståndsgeneratoren (om inte hela populationens *dbh* och höjd redan har mätts). Om *dbh* och höjd har mätts för träd inom ett antal provytor i beståndet, kan kurvanpassningar göras, t.ex. med logaritmiska funktioner eller andragsgradspolynom. Dessa funktioner används sedan i beståndsgeneratoren för att beräkna höjden hos alla träd i beståndet (se t.ex. avsnitt 4.2.1).

I de fall då höjddata saknas för det aktuella beståndet, har andragradspolynom tagits fram med hjälp av höjddata från Marklunds (1988) studier. Marklund (1988) genomförde en landsomfattande undersökning för att ta fram s.k. biomassafunktioner för att beräkna mängden torrsubstans i stam på bark, stamved, levande grenar, döda grenar, stubbar, rötter, m.m. hos tall, gran och björk. Marklund (1988) mätte också trädens höjd, som redovisas i tabeller som funktion av olika diameterklasser. Vid kurvanpassningen av dessa data användes andragradspolynom för att på ett enkelt sätt få fram funktioner med interceptet 1,3 m, d.v.s. när *dbh* ligger nära noll, så sjunker höjden till nära 1,3 m. När höjddata saknas, använder beståndsgeneratoren alltså de höjdfunktioner som redovisas i figurerna 2.3-2.5. För kategorin ”övrigt löv” används de funktioner som gäller för björk.

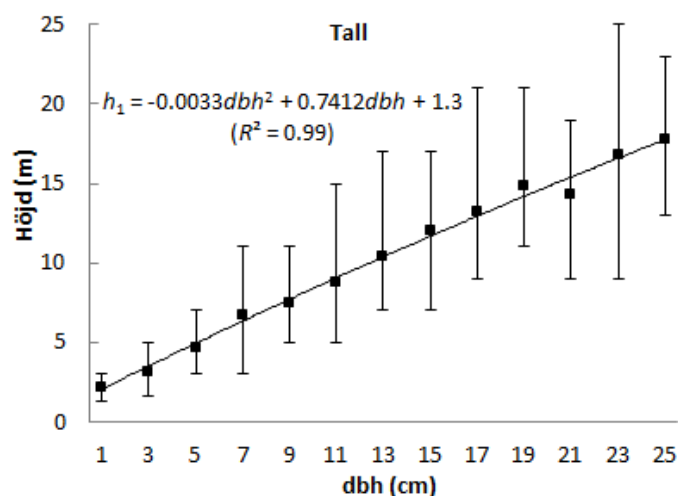


Fig. 2.3. Höjd hos tall med *dbh* som oberoende variabel. Punkterna visar det aritmetiska medelvärdet i varje *dbh*-klass (0-2 cm, 2-4 cm, etc.), intervallen visar observerade min- och max-värden (totala antalet observationer  $n = 396$ ) och värdet på  $R^2$  avser kurvanpassningen till de aritmetiska medelvärdena (data från Marklund, 1988).

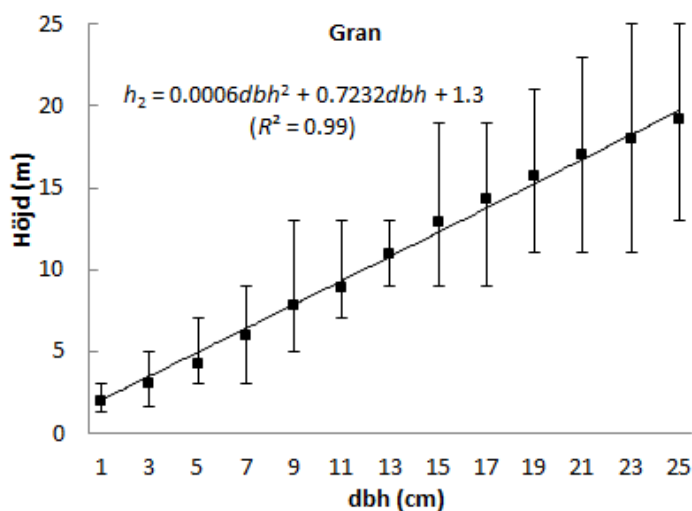


Fig. 2.4. Höjd hos gran med *dbh* som oberoende variabel. Punkterna visar det aritmetiska medelvärdet i varje *dbh*-klass (0-2 cm, 2-4 cm, etc.), intervallen visar observerade min- och max-värden (totala antalet observationer  $n = 469$ ) och värdet på  $R^2$  avser kurvanpassningen till de aritmetiska medelvärdena (data från Marklund, 1988).



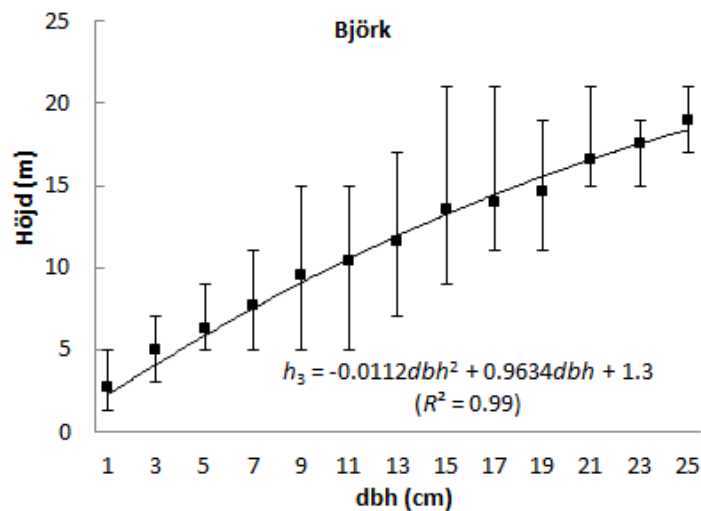


Fig. 2.5. Höjd hos björk med dbh som oberoende variabel. Punkterna visar det aritmetiska medelvärdet i varje dbh-klasse (0-2 cm, 2-4 cm, etc.), intervallen visar observerade min- och max-värden (totala antalet observationer  $n = 233$ ) och värdet på  $R^2$  avser kurvanpassningen till de aritmetiska medelvärdena (data från Marklund, 1988).

### 2.3. Positionering av stammar

Vid positioneringen av stammarna definieras först storleken och formen på beståndsytan inom vilken stammarna ska fördelas. Om det t.ex. är en rektangulär yta som avgränsas av hörnen  $(x_{min}, y_{min})$ ,  $(x_{min}, y_{max})$ ,  $(x_{max}, y_{max})$  och  $(x_{max}, y_{min})$ , och om sannolikheten för en positionering är lika stor över hela ytan, slumpas trädets preliminära x- och y-koordinater  $(x, y)$  i ett s.k. kartesiskt koordinatsystem med hjälp av likformiga sannolikhetsfördelningar. Innan positionen fastslås, kontrolleras dock först närheten till andra stammar. Stammarna tillåts inte stå alltför tätt av biologiska/fysiska skäl, och avståndet mellan stammarna blir längre ju större träden (dbh) är. Minimiavstånden mellan stammarna är också beroende av om det gäller avståndet till en artfrände eller till en stam av en annan art.

#### 2.3.1. Minsta avstånd mellan stammar

Undersökningar av vilka avstånd som råder mellan stammar i ett spontant uppkommet slybestånd, och avståndens beroende av brösthöjdsdiametern, har inte hittats i litteraturen för svenska tillväxtförhållanden. I beståndsgeneratoren användes därför resultat från en tysk studie (Pretzsch, 1997) för att bestämma minsta tillåtna avstånd mellan stammarna. Baserat på data från 5 000 lärk- och bokstammar, tog Pretzsch (1997) fram trädslagsspecifika kurvanpassade dbh-beroende ekvationer för olika percentiler. Exempelvis innebär en 1-percentilekvation att 99 % av träden har ett längre avstånd till närmaste granntråd av ett visst trädslag än vad ekvationen anger. Dessa ekvationer togs fram från mätningar av dbh i intervallen 20-70 cm (lärk-lärk och lärk-bok) och 5-70 cm (bok-bok). I beståndsgeneratoren användes dock andragsgradspolynom som anpassades till Pretzsch's (1997) data för att få mer rimliga kurvor vid extrapolering till  $dbh = 0$  (figur 2.6).

Det antogs att de minsta tillåtna avstånden (1-percentilen) i beståndsgeneratoren mellan barrträd ( $D_{b-b}$ ) kunde representeras av lärk-lärkavstånden i Pretzsch (1997) studie, att de minsta tillåtna avstånden mellan lövträd ( $D_{l-l}$ ) kunde representeras av bok-bokavstånden och

att de minsta tillåtna mellan barr- och lövträd ( $D_{b-l}$ ), eller vice versa ( $D_{l-b}$ ), kunde representeras av lärk-bokavstånden (figur 2.6).

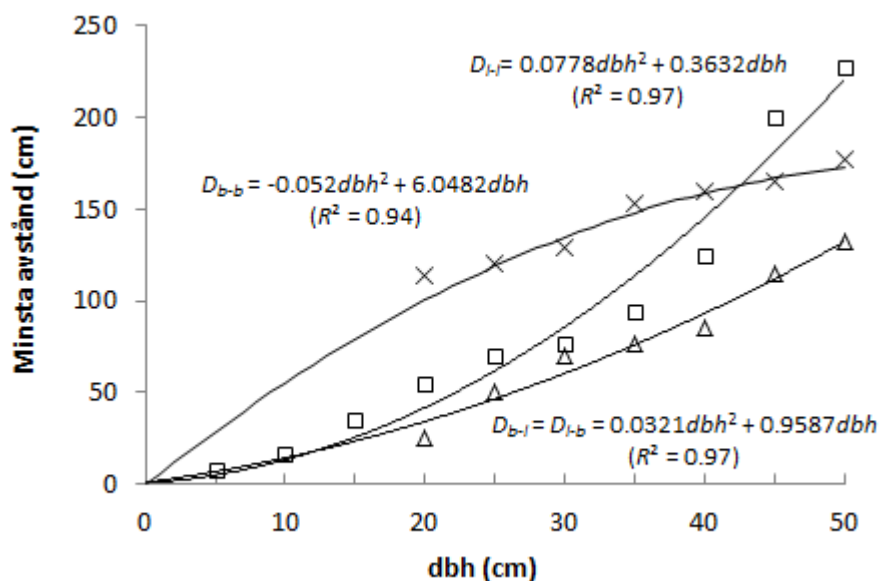


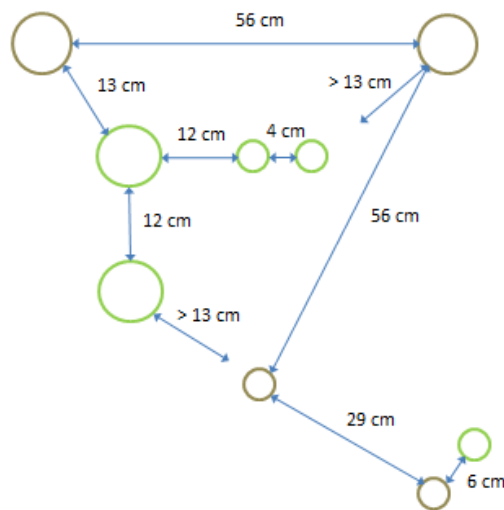
Fig. 2.6. Minsta tillåtna avstånd mellan barrträd ( $D_{b-b}$ ), mellan barr- och lövträd ( $D_{b-l}$ ) (eller  $D_{l-b}$ ) samt mellan lövträd ( $D_{l-l}$ ) i beståndsgeneratoren. Markeringarna visar 1-percentilen för avstånden mellan lärk-lärk ( $\times$ ), lärk-bok ( $\Delta$ ) och bok-bok ( $\square$ ), baserat på totalt 5000 lärk- och bokträd i en studie av Pretzsch (1997).

För varje nytt träd  $j$  av trädslaget  $k_j$  som genereras, beräknas avstånden  $d$  till redan positionerade träd i beståndsgeneratoren. Om avståndet  $d_{i-j}$  till ett granträd  $i$  med trädslaget  $k_i$  är kortare än det minsta tillåtna avståndet, d.v.s.

$$d_{i-j} - (dbh_i/2 + dbh_j/2) \leq \text{Max}[D_{k_i-k_j}(dbh_i), D_{k_j-k_i}(dbh_j)], \quad (2.4)$$

så genereras nya positionsparametrar  $\{x_i, y_i\}$  i modellen, annars godkänns den tilldelade positionen. Termen  $(dbh_i/2 + dbh_j/2)$  finns med i ekvation 2.4 för att beakta att de minsta tillåtna avstånden avser sträckan ”från bark till bark”, d.v.s. inte sträckan mellan stammarnas centrumpositioner.

För exempelvis lövträd med  $dbh$  på 1 cm, 5 cm, 10 cm och 20 cm blir de minsta tillåtna avstånden till andra lövträd 1 cm, 4 cm, 12 cm samt 39 cm (i modellen avrundas avståndet uppåt till heltal) (figur 2.7). För avstånden mellan två barrträd blir motsvarande minsta tillåtna värden 6 cm, 29 cm, 56 cm och 100 cm. Dessa avstånd är korta, men formeln baserar sig alltså på mätningar där den framtagna kurvan motsvarar 1-percentilen av alla stammar (Pretzsch, 1997), d.v.s. för 99 % av stammarna var avståndet längre. I figur 2.7 visas exempel på minsta tillåtna avstånd i beståndsgeneratoren när  $dbh$  är 5 cm resp. 10 cm.



Figur 2.7. Minsta tillåtna avstånd mellan stammar med  $dbh = 10$  cm (större cirklar) och  $dbh = 5$  cm (mindre cirklar) för barrträd (brun färg) och lövträd (grön färg) enligt formlerna i figur 2.6 (bilden är skalenlig).

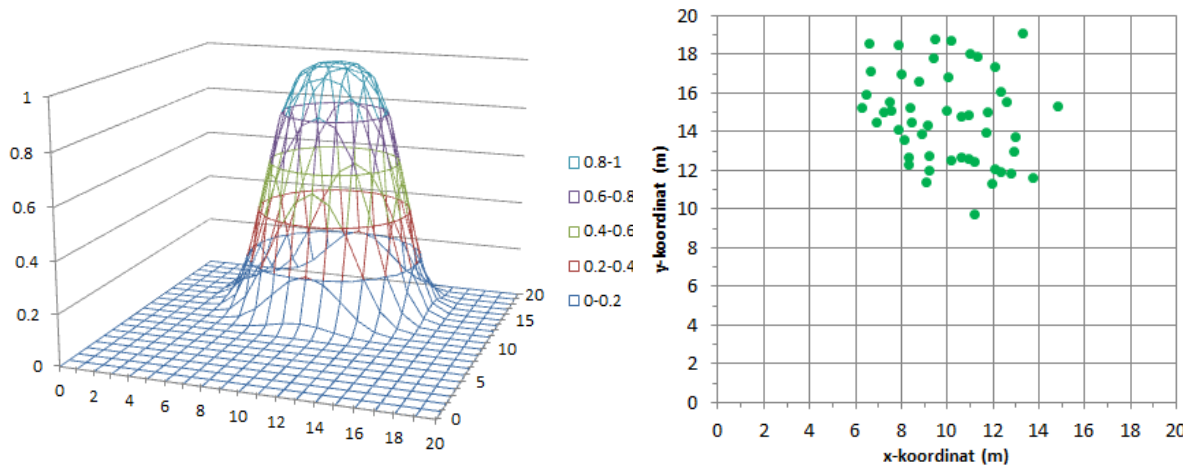
### 2.3.2. Positionering inom runda och avlånga beståndsytor

Som nämnts tidigare, slumpas trädens preliminära  $x$ - och  $y$ -koordinater  $(x,y)$  i ett s.k. kartesiskt koordinatsystem med hjälp av likformiga sannolikhetsfördelningar, d.v.s. sannolikheten  $Z_R(x,y)$  för positionering inom den rektangulära ytan är lika stor över hela ytan. Om det förekommer luckor i beståndet, kan koordinaterna för dessa luckor bestämmas, varefter sannolikheten för positionering sätts till noll ( $Z_R(x,y) = 0$ ) inom dessa luckor. Värdet på  $Z_R(x,y)$  kan variera från 0 till 1, d.v.s.  $Z_R(x,y) \in [0,1]$ . Vid positioneringen genereras också ett slumpstal  $u$  ( $u \in [0,1]$ ) för varje träd från en likformig sannolikhetsfördelning. Om  $u < Z_R(x,y)$  och om träden inte står för tätt, blir koordinaterna ”godkända”, annars börjar positioneringsproceduren om på nytt för den specifika stammen (med de redan tilldelade attributen  $Trslg$ ,  $dbh$ ,  $h$ ).

Om träden inte är jämnt fördelade inom den aktuella ytan, t.ex. om de står i täta dungar, kan en metod som utvecklats av Pretsch (1997) användas. Om det är runda ytor med ”mjuka” övergångar som stammarna ska fördelas inom, t.ex. inom en cirkelrund dunge, kan dessa beskrivas med hjälp av (Pretsch, 1997)

$$Z_C(x,y) = e^{-((x-X_C)^2 + (y-Y_C)^2)/E^2} \quad (2.5)$$

där  $X_C$  och  $Y_C$  beskriver koordinaterna för cirkelns mittpunkt, och där faktorn  $E^2$  beskriver cirkelytans utbredning från centrum (figur 2.8).

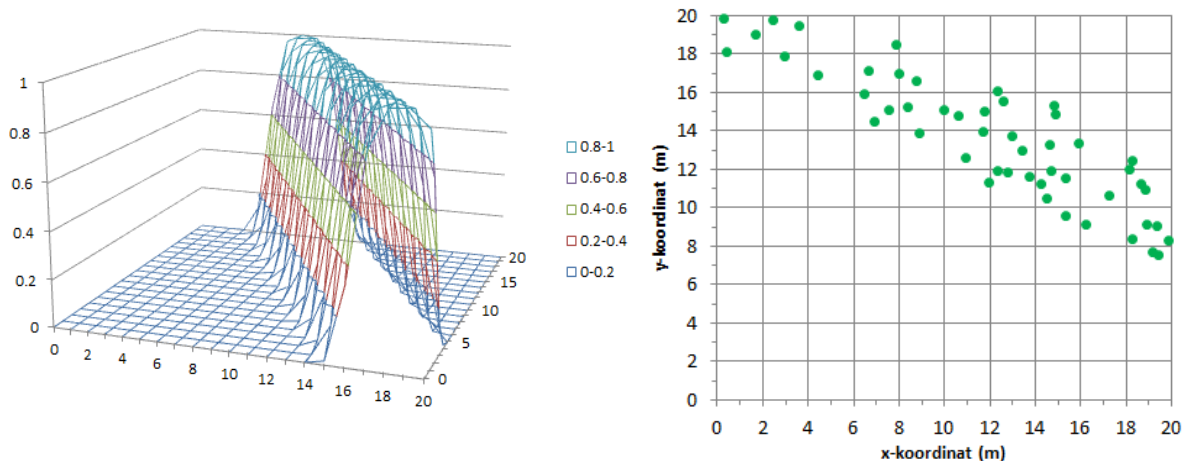


Figur 2.8. T.v. visas ett exempel på en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en viss stam ska placeras inom en cirkulär beståndsyta med  $X_C=10$ ,  $Y_C=15$  och  $E=20$  i en ruta på 20 m x 20 m. T.h. visas resultatet för en simulering med 50 trädstammar av björk (genomsnittlig dbh var 6,2 cm).

Om stammarna ska fördelas inom en avlång yta ('strip'), t.ex. för sly som växer längs en skogsväg eller längs en åkerkant, så kan följande uttryck användas (Pretzsch, 1997)

$$Z_S(x, y) = e^{-(\cos \alpha(x-X_M) + \sin \alpha(y-Y_M))^2 / E^2} \quad (2.6)$$

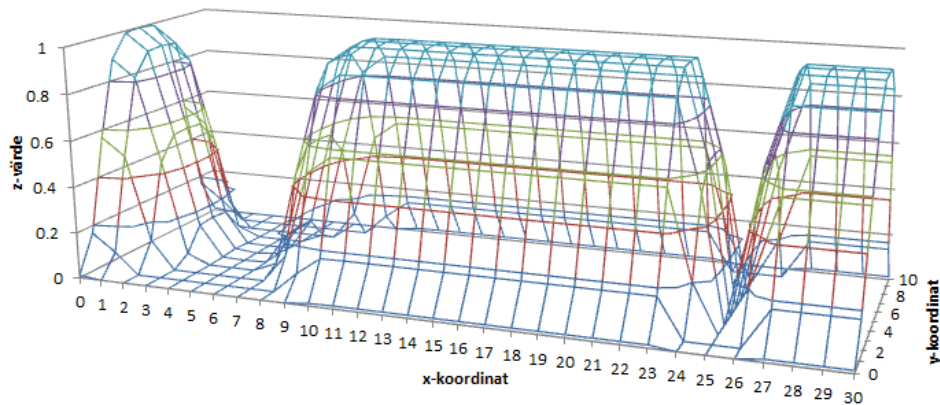
där  $\alpha$  är vinkeln (i radianer) mellan beståndsytaens längdaxel och y-axeln (figur 2.9), och där  $(X_M, Y_M)$  beskriver längdaxelns mittpunkt (enligt Pretzsch (1997) gäller  $\cos \alpha \cdot x + \sin \alpha \cdot y = 0$  genom mittpunkten  $X_M, Y_M$ ).



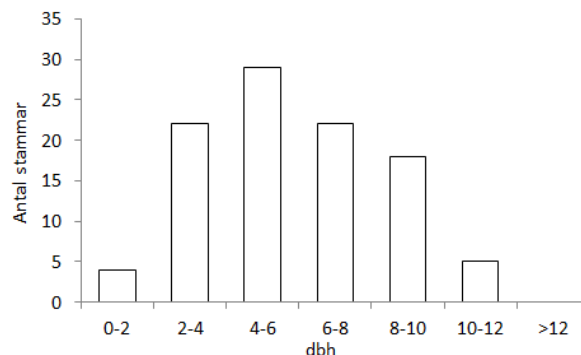
Figur 2.9. T.v. visas ett exempel på en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en viss stam ska placeras inom en avlång beståndsyta med  $X_M=10$ ,  $Y_M=15$ ,  $E=5$  och  $\alpha=\pi/3$  i en ruta på 20 m x 20 m. T.h. visas resultatet för en simulering med 50 trädstammar av björk (genomsnittlig dbh var 6,2 cm).

Om det rör sig om avlånga sträckor med luckor i beståndet, t.ex. längs en väg, kan man kombinera beräkningsfunktionerna för olika ytformer (se figur 2.10). Resultaten från simuleringar för ytan i figur 2.10, med 100 stammar som har en dbh-fördelning enligt figur 2.11,

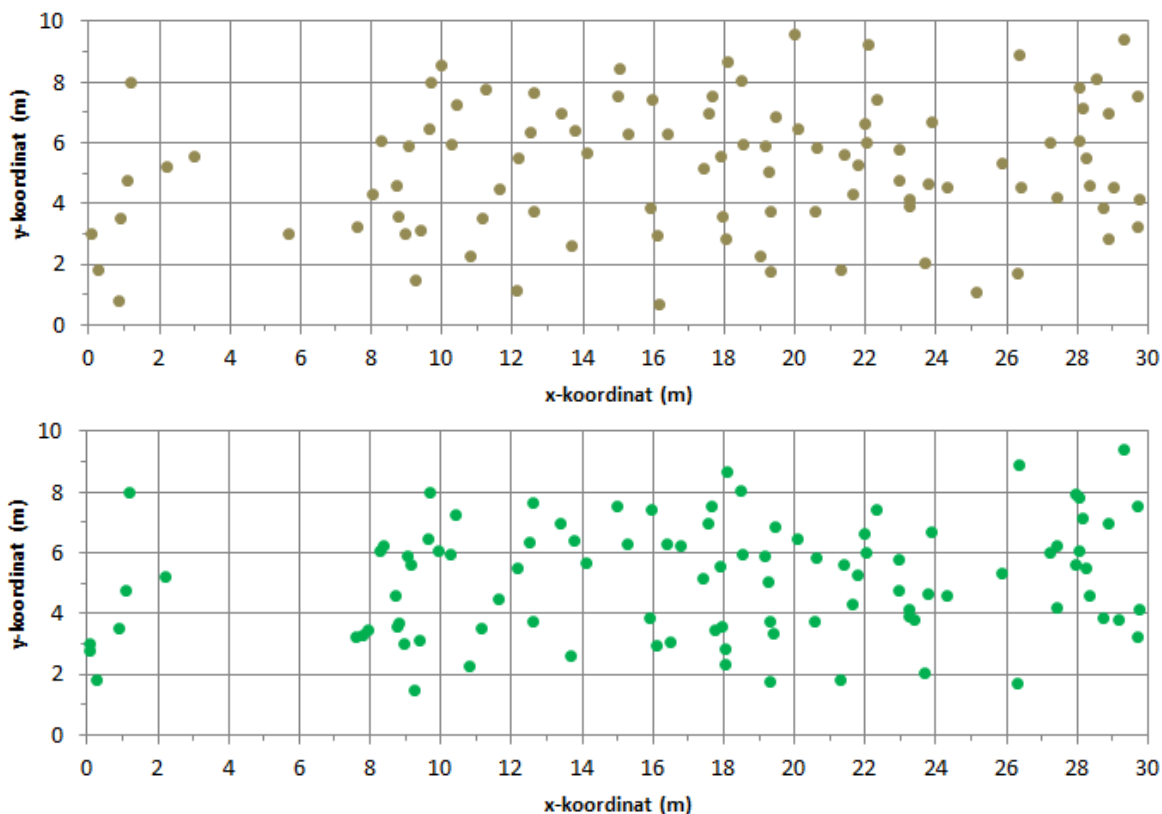
visas för tall och björk i figur 2.12. I figuren kan två luckor ses i beståndet, dels vid x-koordinaterna 3-7 m och dels vid x-koordinaten 25 m. Eftersom tall har högre krav när det gäller minsta avstånd mellan stammarna (figur 2.6), är träden något mer utspridda jämfört med björk. Ju högre värden på *dbh*, och ju fler stammar av ett visst trädslag som ska positioneras på en given yta, desto större är sannolikheten att stammarna "tvingas ut" i områden med låga värden på *Z*. Vid mycket täta bestånd behöver därför en avvägning göras mellan antal träd och *dbh*, så att alla träd verkligen får plats inom beståndsytan.



Figur 2.10. Ett exempel på en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en viss stam ska placeras inom en avlång yta (30 m x 10 m,  $E=12$ ) med två luckor i beståndet, t.ex. längs en vägsträcka.



Figur 2.11. Fördelning av *dbh* för 100 stammar (data från en fältmätning utförd av Skogforsk). Medel-*dbh* = 5,9 cm.



Figur 2.12. Resultat från en simulering för ytan i figur 2.10, med en dbh-fördelning enligt figur 2.11, för 100 stammar med tall (överst) och björk (nederst).

Ju närmare mittpunkten (cirkulär yta) eller mittaxeln (avlång yta) en stam hamnar, desto större är sannolikheten att den godkänns av beståndsgeneratoren. Det omvända förhållandet gäller också, d.v.s. ju längre ut från mittpunkten man kommer, desto mindre blir sannolikheten. Faktorn  $E$  används för att beskriva beståndsytagens avstånd från mittpunkten/mittaxeln. Ju högre värde på  $E$ , desto längre avstånd. Värdet på  $E$  kan beräknas med hjälp av avståndet  $D$  (i meter) för en given sannolikhet  $Z_C$  eller  $Z_S$ . Vid t.ex.  $Z_C(x,y) = 0,05$  gäller (Pretzsch, 1997)

$$E = 0,1444 \cdot D^2 \quad (2.7)$$

Denna formel kan användas för att bestämma beståndsyternas utbredning från mittpunkten/mittaxeln, eftersom sannolikheten är låg ( $Z_C(x,y) \leq 0,05$ ) att några stammar hamnar utanför denna avgränsning. Genom att koordinaterna  $X_C, Y_C$  och  $X_M, Y_M$  kan bestämmas godtyckligt, kan dungen eller remsan med sly positioneras utifrån rådande förhållanden på den aktuella platsen.

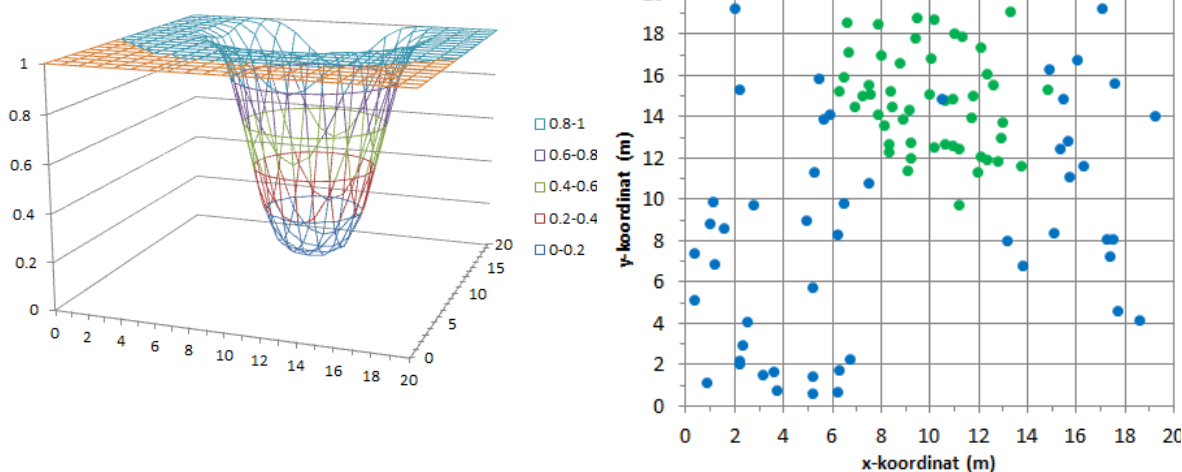
### 2.3.3. Bestånd med flera trädslag

Oftast innehåller bestånden fler än ett trädslag. I modellen av Pretzsch (1997) förekommer fem olika grader av blandning av olika trädslag ('intermingling'): svag, måttlig, genomsnittlig, stark och mycket stark. Dessa begrepp innebär alltså att förekomsten av ett visst trädslag relateras till förekomsten av ett annat trädslag. De fem blandningsgraderna beskrivs av sannolikhetsfunktionen  $Z_D$  (se tabell 2.1).

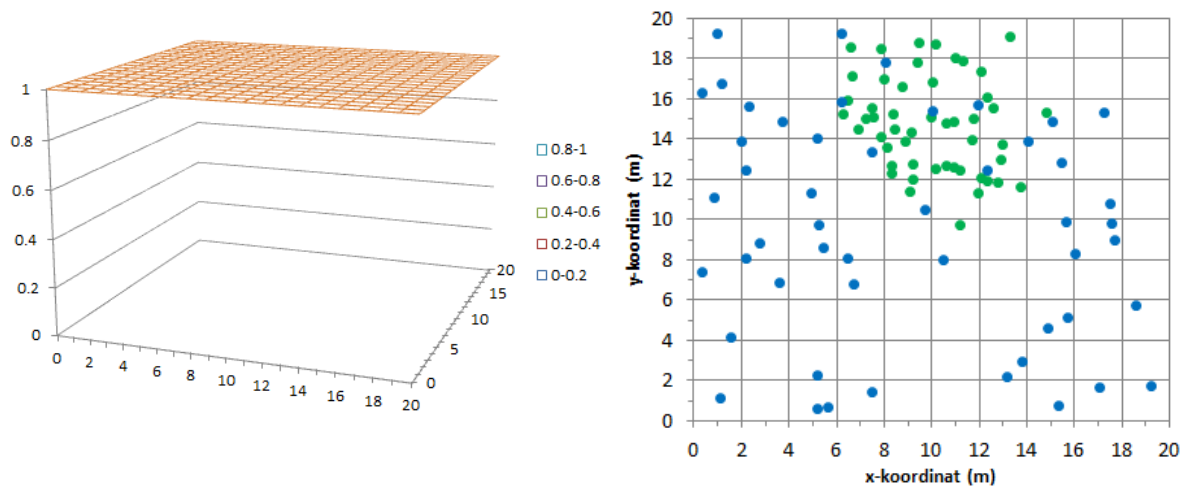
Tabell 2.1. Blandningsgrader med tillhörande sannolikhetsfunktioner för (cirkelformade) ytor med fler än ett trädslag (för avlånga ytor byts  $Z_C$  mot  $Z_S$ ) (Pretzsch, 1997)

Blandningsgrad	Sannolikhetsfunktion
Svag	$Z_D = 1 - Z_C$
Måttlig	$Z_D = 1 - 0,5Z_C$
Genomsnittlig	$Z_D = 1$
Stark eller mycket stark	T.ex. från $Z_D = 0,8 + 0,2Z_C$ till $Z_D = 0,05 + 0,95Z_C$

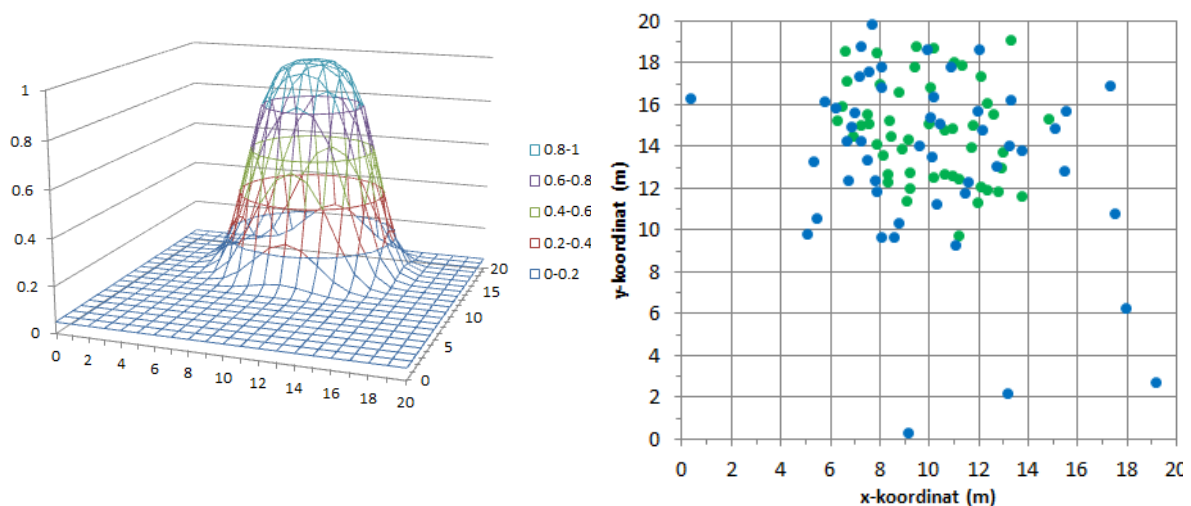
För ”svag” inblandning ( $Z_D = 1 - Z_C$ ) i ett kluster (dunge) är sannolikheten att ett trädslag finns i centrum av dungen nästan noll, medan den ökar ju längre från centrum den kommer (figur 2.13). Utanför dungen är sannolikheten 1,0. Exempel på hur sannolikhetsfördelningarna ser ut för ”genomsnittlig” och ”mycket stark” inblandning visas i figurerna 2.14 och 2.15. Vid fler än två trädslag används samma metod för fördelning av stammarna som vid fördelning av det andra trädslaget (tabell 2.1). När det finns kluster med träd, fördelas det trädslag som är dominerande i klustren först i modellen, och därefter övriga trädslag i den ordning som bestäms utifrån deras förekomst eller ’dominans’.



Figur 2.13. Exempel på ”svag” inblandning ( $Z_D = 1 - Z_C$ ) med en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en stam av ett visst trädslag ska placeras i och utanför en dunge (figur 2.8) som domineras av ett annat trädslag i en ruta på 20 m x 20 m (t.v.). Exempel på simuleringsresultat för björk i dungen och resten övrigt löv (t.ex. asp), med vardera 50 träd (t.h.).



Figur 2.14. Exempel på "genomsnittlig" inblandning ( $Z_D = 1$ ) med en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en stam av ett visst trädslag ska placeras i och utanför en dunge (se figur 2.8) som domineras av ett annat trädslag i en ruta på 20 m x 20 m (t.v.). Exempel på simuleringsresultat för björk i dungen och resten övrigt löv (t.ex. asp), med vardera 50 träd (t.h.).



Figur 2.15. Exempel på en "mycket stark" inblandning ( $Z_D = 0,05 + 0,95Z_C$ ) med en sannolikhetsfördelning (i z-led) för att en stam av ett visst trädslag ska placeras i och utanför en dunge (figur 2.8) som domineras av ett annat trädslag i en ruta på 20 m x 20 m (t.v.). Exempel på simuleringsresultat för björk i dungen och övrigt löv (t.ex. asp), med vardera 50 träd (t.h.).

## 2.4. Beräkning av biomassamängder

För att uppskatta biomassamängden hos enskilda träd, har det tagits fram en mängd olika s.k. biomassafunktioner (se t.ex. Marklund, 1988; Johansson, 1999a; Johansson, 1999b; Johansson, 2000; Claesson m.fl., 2001; Repola & Ahnlund Ulvcrona, 2014).

Marklunds (1988) biomassafunktioner används inom Riksskogstaxeringen, och de innefattar regressionsmodeller för uppskattningar av torrvikten av bl.a. stamved, stambark, levande grenar, döda grenar och barr-/lövverk för tall, gran och björk. Exempel på oberoende variabler i funktionerna är brösthöjdsdiameter, trädhöjd, brösthöjdsålder och höjd över havet. Generellt



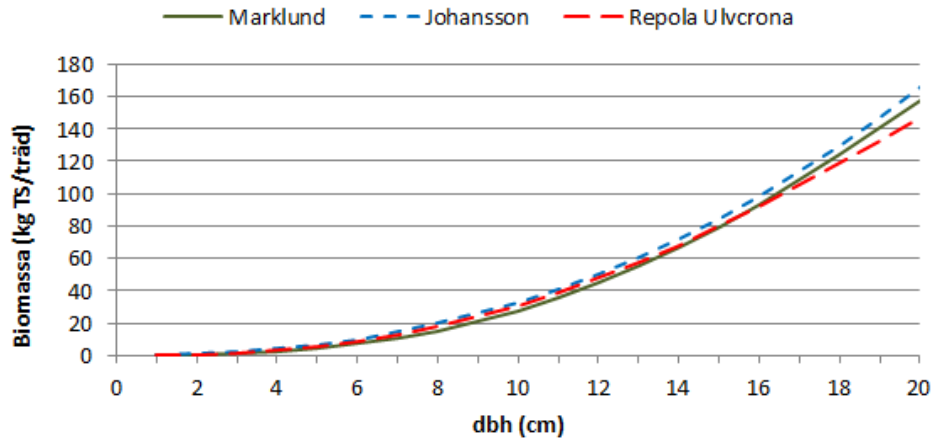
gäller att ju fler oberoende variabler som kan tas med i beräkningarna, desto större noggrannhet får modellen. För exempelvis björk erhöll dock Marklund (1988) en relativt hög precision enbart med brösthöjdsdiametern som indata. Marklunds (1988) funktioner baserar sig på data för träd på mark med aktiv skogsskötsel och med varierande tillväxtförhållanden i hela Sverige.

Biomassafunktioner har också tagits fram för vårt- och glasbjörk (Johansson, 1999a), asp (Johansson, 1999b) samt klibb- och gråal (Johansson, 2000), som alla växte på övergiven åkermark. Samtliga bestånd var relativt homogena, och de hade uppkommit genom självföryngring. Björkbestånden varierade i åldern 8-32 år (vårtbjörk) och 6-20 år (glasbjörk). I några björk- och aspbestånd hade det gjorts en viss gallring. I samtliga fall togs biomassaformlerna fram som funktion av brösthöjdsdiametern.

Claesson m.fl. (2001) tog fram biomassafunktioner för tall, gran och björk. Dataunderlaget kom från täta talldominerande bestånd i norra Sverige (>10 000 stammar per ha). Träden var unga ( $dbh < 10$  cm). Torrvikten biomassa beräknades som funktion av  $dbh$  och  $h$ .

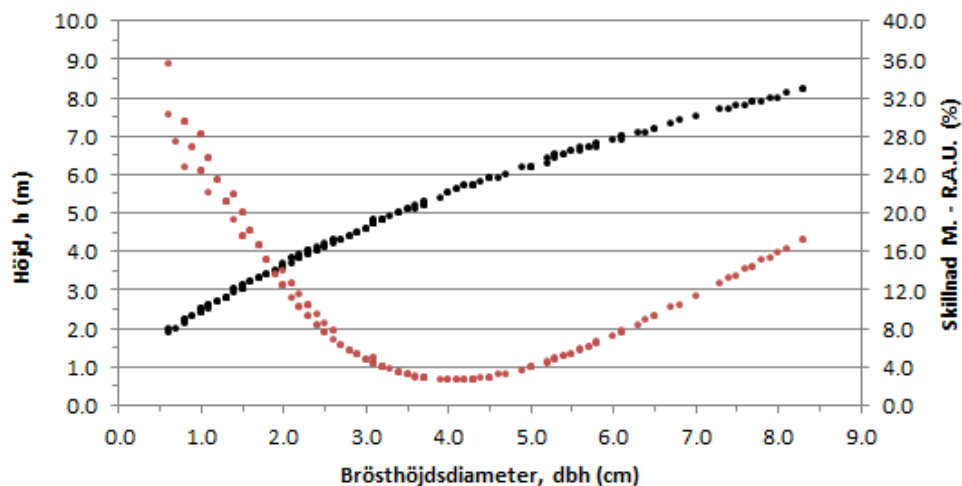
Till viss del använde Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014) samma grunddata som Claesson m.fl. (2001), men i studien av Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014) ingick även mätningar från senare år och träd med större  $dbh$  (upp till 21 cm). Även här växte träden i unga täta bestånd som var naturligt föryngrade. Vid en jämförelse med Marklunds (1988) biomassafunktioner för björk, visade Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014) att dennes estimeringar av stambiomassan var något lägre än Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014), medan biomassan i grenar var högre. Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014) redovisar sina resultat för två oberoende variabler ( $dbh$  och  $h$ ). Om man enbart använder variabeln  $dbh$  i Marklunds (1988), Johanssons (1999a) och Repola Ahnlund Ulvcronas (2014) funktioner för björk (stam plus grenar), erhålls de kurvor som visas i figur 2.16. Kurvorna ligger väl samlade, men för högre värden på  $dbh$  sjunker biomassamängden relativt sett för Repola Ahnlund Ulvcronas (2014) funktioner (en viktig anledning till detta kan vara att endast  $dbh$  här har beaktats i deras 2-variabelsfunktioner).

För att undersöka eventuella skillnader mellan Marklunds (1988) och Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014) biomassafunktioner, då både  $dbh$  och  $h$  används som indata, utnyttjades data från Skogforsk för  $dbh$  (uppmätta data) och för  $h$  (beräknade genom kurvanpassning (regression) av uppmätta värden). Antalet uppmätta stammar var 180 st, och beståndet bestod av unga björkar med  $dbh$ -värden som varierade från 0,6 cm till 8,3 cm, medan de beräknade värdena på  $h$  varierade från 1,9 m till 8,2 m.



Figur 2.16. Total biomassamängd (kg TS) hos björk i stammar samt levande och döda grenar, beräknade med hjälp av Marklunds (1988), Johanssons (1999a) (vårtbjörk) och Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014) (enbart som funktion av dbh) modeller.

För låga värden på *dbh* (<2 cm) var skillnaden mellan metoderna stor (10-35 %), medan det fanns ett minimum då *dbh* var runt 4 cm (figur 2.17). Med ökande värden på *dbh* (>7 cm) tycks skillnaderna öka igen (observera att den procentuella skillnaden beräknades med Marklunds funktioner som bas, d.v.s. om skillnaden är >0 så ger Marklunds funktioner ett högre värde). Dessa resultat, att Marklunds biomassafunktioner generellt tycks ge ett högre värde för björk totalt sett då både stam och grenar beaktas, bekräftas av de jämförelser som gjordes av Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014). En förklaring kan vara att Repola och Ahnlund Ulvcrona (2014) genomförde sina studier i oröjda bestånd där kronorna får en mer begränsad utbredning och därmed också mindre biomassa. Marklunds (1988) studier baserar sig främst på skötta/röjda bestånd.



Figur 2.17. Sambandet mellan *dbh* (uppmätta värden) och *h* (beräknat genom kurvanpassning) hos björkstammar (180 st; data från Skogforsk) (svarta punkter), och den procentuella skillnaden mellan Marklunds (1988) (M.) och Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014) (R.A.U.) biomassafunktioner när både *dbh* och *h* används som ingående variabler för att beräkna torrvidkten hos stam samt levande och döda grenar (röda punkter).

I projektet antogs Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014) biomassafunktioner för tall, gran och björk, med  $dbh$  och  $h$  som indata (se bilaga A), vara mest lämpliga. För den fjärde trädslagskategorin, ”övrigt löv”, antogs att Johanssons (1999) biomassafunktioner för asp (se bilaga A) var representativa.

### 3. MODELL FÖR SIMULERING AV SKÖRDEARBETET

#### 3.1. Bakgrund, tidigare studier och systemgränser

En simuleringsmodell för att få fram tidsrelaterade prestandadata för skörd av sly för olika typer av bestånd, maskinval, arbetsstrategier, m.m., har konstruerats inom projektet. Datormodeller kan vara statiska eller dynamiska, deterministiska eller stokastiska, samt kontinuerliga eller diskreta (Law & Kelton, 1991). I en statisk modell har tiden ingen betydelse för resultatet, medan resultatet i en dynamisk simuleringsmodell är beroende av vad som har hänt tidigare i modellen. I en deterministisk modell finns inga slumpfaktorer, medan resultatet i en stokastisk modell är beroende av utfallet av olika slumpfaktorer. Detta innebär att resultatet från varje simulering i sig i en stokastisk modell är slumpmässig. Därför behöver man göra flera simuleringar för att exempelvis få fram tillförlitliga medelvärdesresultat. I kontinuerliga modeller beskrivs dynamiska förändringar i små steg med hjälp av t.ex. differentialekvationer, medan ”klockan” i en diskret modell stegar fram direkt till den aktuella händelsen i modellen utan att ta hänsyn till kontinuerliga förlopp däremellan (Law & Kelton, 1991).

I litteraturen finns ett antal simuleringsmodeller beskrivna för analys av system för avverkning av skog; redan så tidigt som på 70-talet (Seppälä, 1971; Santesson & Sjunnesson, 1972; Almquist, 1973; Goulet m.fl., 1979). Men det var först runt millennieskiftet som utvecklingen tog fart, särskilt i de nordiska länderna (Asikainen, 1995; Eliasson, 1999; Eliasson & Lageson, 1999; Talbot & Suadiciani, 2005; Bergström m.fl., 2007), men även i Nordamerika (Aedo-Ortiz m.fl., 1997; Wang & Greene, 1999; Wang m.fl., 2005). Dessa modeller, och de som sedan har följt, har till övervägande del varit s.k. händelsestyrda simuleringsmodeller, d.v.s. dynamiska, stokastiska och diskreta. Opacic och Sowlati (2017) presenterar en översikt över händelsestyrda modeller som har använts inom skogssektorn under senare år.

Det finns några exempel på händelsestyrda simuleringsmodeller som har utvecklats i Sverige under senare år för att analysera själva skördemomentet. Sängstuvall m.fl. (2012) konstruerade en dynamisk simuleringsmodell för att studera produktiviteten vid uttag av biomassa i unga bestånd. Modellen var utvecklad i programmet Matlab och innehöll en mängd olika algoritmer för att beskriva skördemaskinernas olika arbetsmoment (med tidssteget 1 sekund) vid selektiv och geometrisk (korridor-) gallring. Med hjälp av modellen simulerades både enträds- och flerträdshantering. En liknande simuleringsmodell (i Matlab-miljö) för att jämföra system för skörd av stubbar utvecklades av Berg m.fl. (2014). Eftersom studien handlade om kombinerad skörd av rundved och stubbar, simulerades enbart skörd av träd med  $dbh > 80$  mm. Även i denna modell var tidssteget 1 sekund, och den använde detaljerad data om tidsåtgång för olika arbetscykler och arbetsmoment. I båda dessa modeller användes uppgifter om de enskilda trädens positioner (kartesiska koordinater),  $dbh$ , höjd, m.m., från uppmätta bestånd. Ett tredje exempel är en modell utvecklad av Jundén m.fl. (2013) i programmet Python. Modellen användes för att studera korridorgallring med hjälp av maskiner med två kranarmer och med varierande grad av automation.

Med utgångspunkt från syftet i detta projekt, har en modell som kan ta hänsyn till dynamiska, stokastiska och diskreta systemegenskaper valts i denna studie, d.v.s. modellen är händelsestörd. Tidsaspekter och olika ”händelser” ansågs ha betydelse i det studerade systemet. Simuleringarna i sig behöver dock inte vara händelsestyrda, eftersom man t.ex. kan välja att bortse från slumpfaktorerna. Modellen implementerades i simuleringsprogrammet Arena (Kelton m.fl., 2007).

## 3.2. Modellbeskrivning

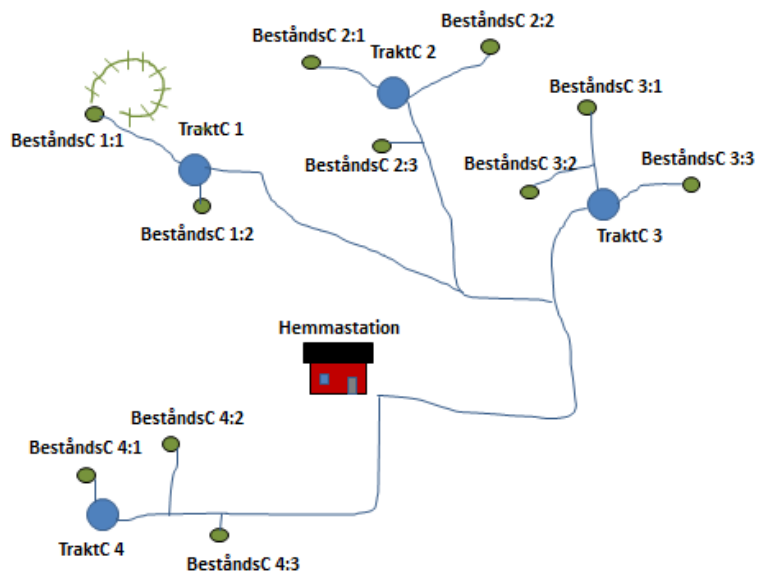
Det finns olika typer av händelsestyrda simuleringsprogram. Den typ som används här kallas för processororienterad. Detta innebär att s.k. entiteter ”flödar” genom ett system och genomgår olika processer. En entitet kan representera konkreta begrepp, t ex en trädstam, eller mer abstrakta begrepp, som t ex en viss typ av information. Varje entitet bär med sig vissa egenskaper som kallas attribut. Attributen för en stam kan t ex vara *dbh*, stammens x-koordinat, tidpunkt för avverkning, m.m. Entiteterna genomgår olika processer utförda av olika resurser. Exempel på resurser är basmaskiner som utför processen ”kapning av stam”, eller skotare som utför processen ”lastar”. För att en viss aktivitet eller process ska kunna genomföras, måste vissa villkor vara uppfyllda. Dessa villkor kan styras av ”global variables”, och de kan t.ex. representera klockslag (”inget arbete får utföras om klockan är senare än 20.00”), ”driftledning” av arbetet (”ett bestånd är klart för avverkning i Slyby, skicka dit basmaskinen”), etc. Om entiteterna konkurrerar om resurserna uppstår köer i simuleringarna.

### 3.2.1. Avverkning

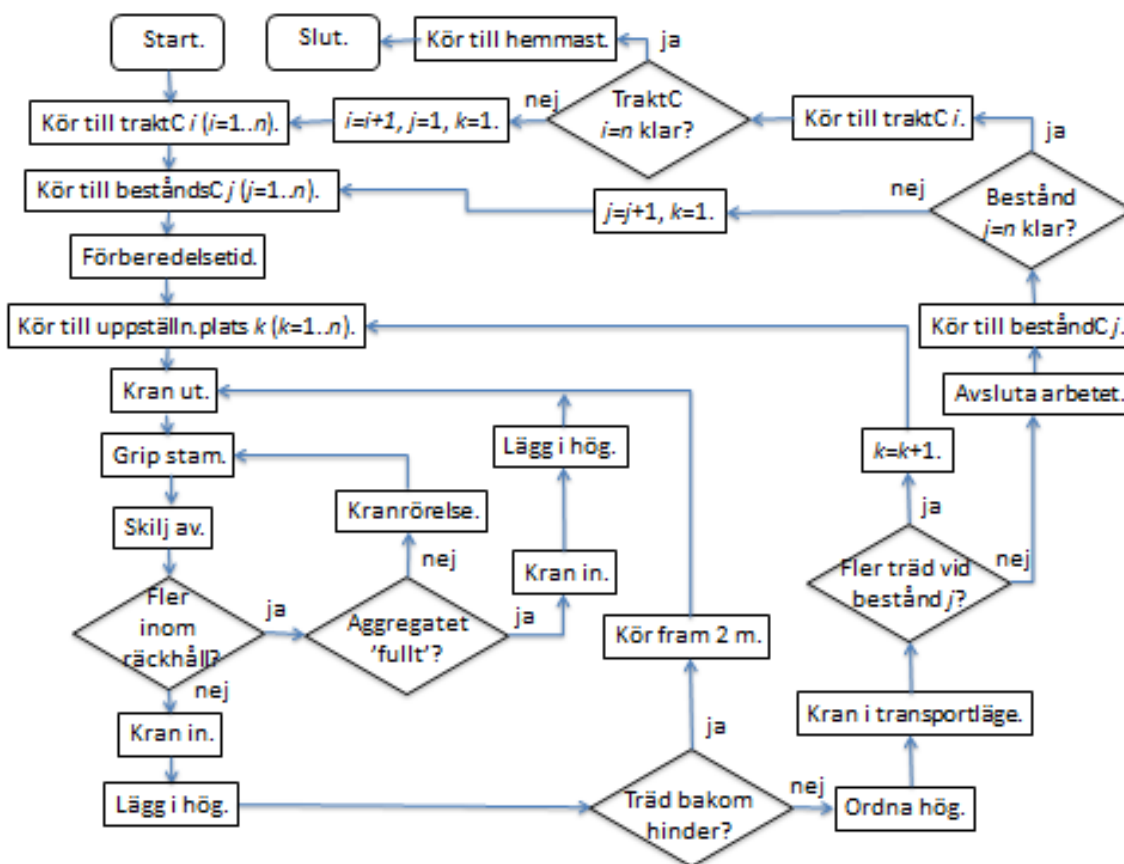
I den modell som har utvecklats för slyskörd utgår maskinerna från en s.k. hemmastation, vilket kan vara en gård, maskinstation, terminal el. dyl. När de ska ut på ett uppdrag, kör de till ett område (trakt) som innehåller ett eller flera sammanhängande bestånd (figur 3.1). Exempel på sådana beståndsytor kan vara åkerkanter som ska röjas eller vägkanter som ska röjas på båda sidor. Maskinerna kör från bestånd till bestånd och utför sitt arbete, och när alla bestånd är klara återvänder de till sin hemmastation. Varje bestånd har ett beståndscentrum, vid vilket röjningen påbörjas, och dit maskinen återvänder efter att beståndet är avverkat. Det avverkade materialet, som läggs i högar vid avverkningsmaskinens uppställningsplatser i beståndet, transporteras av skotare till en lämplig avläggsplats. Varje avläggsplats tillförs träd från ett eller flera bestånd, beroende på beståndens avverkade volymer och transportavstånd. I modellen definieras varje avläggsplats som ett traktcentrum (figur 3.1).

Modellen initieras bl.a. genom att filer med data om stammarna (träslag, *dbh*, x-koordinat, y-koordinat, höjd, biomassamängd) läses in från beståndsgeneratoren. Avverkningsmaskinen, bestående av en basmaskin med ett ackumulerande aggregat (i basscenariot) följer sedan en viss logisk struktur i sitt arbete (se flödesschema i figur 3.2).

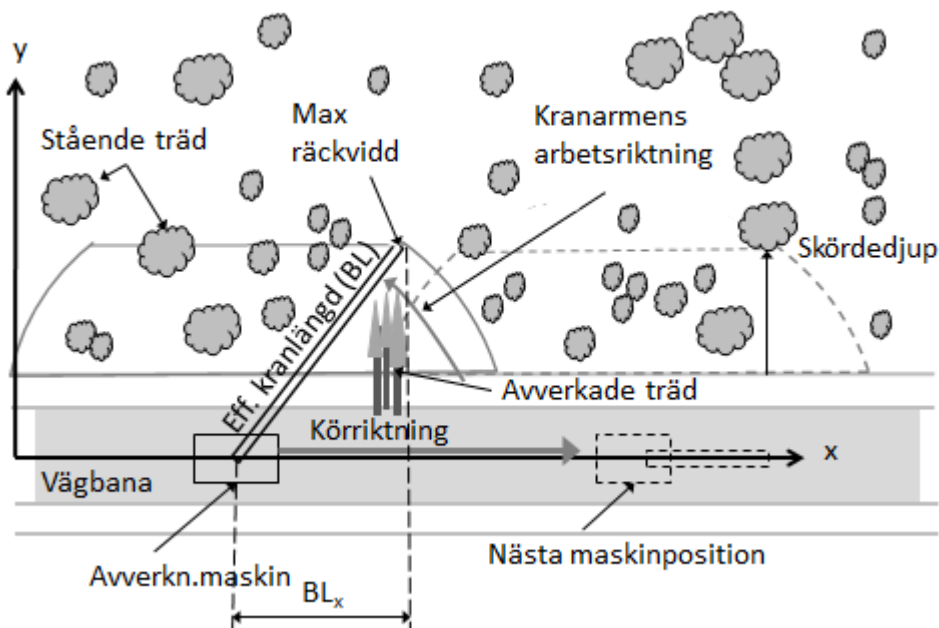
När maskinen har kommit till ett beståndscentrum, kör den fram till det närmaste trädet i beståndet, och fortsätter därefter att köra en sträcka som motsvarar kranens räckvidd. Kranarmen hålls i transportläge under alla förflyttningar. När maskinen har stannat, görs en kranrörelse till det första trädet, som är det träd som är beläget längst fram inom räckviddsområdet (eller längst till höger, se i figur 3.3). Därefter greppar maskinen trädet och avskiljer det. Kranarmen antas röra sig moturs och söker upp nästa träd för greppning och avskiljning. När det är dags att tömma aggregatet, rör sig kranen inåt och lägger stammarna vid kanten av det avverkade området. Maskinen fortsätter sedan att avverka tills allt är klart inom räckviddsområdet, som kan ha en borte avgränsning definierad av ett maximalt röjningsdjup in i beståndet (figur 3.3). Efter att allt material inom ett räckviddsområde har avverkats, finns det möjlighet att ordna till högen för att underlätta skotarens uppsamlingsarbete. Vid förflyttningen fälls kranen in och maskinen kör sedan till nästa uppställningsplats.



Figur 3.1. Exempel på simulering av röjning av sly i ett geografiskt område med 4 trakter (avläggsplatser) och totalt 11 sammanhängande bestånd. Maskinerna utgår från en hemmastation, och kör sedan till röjningsplatserna (bestånden) via traktcentrum (TraktC) och beståndscentrum (BeståndsC). Skotarna antas transportera de avverkade träden från högarna i bestånden till avläggen, som är belägna vid TraktC, där sedan flisning sker. För bestånd 1:1 har körmönstret för avverkningsmaskinen ritats ut (det kan t.ex. röra sig om röjning längs en åkerkant), där de tvärräddade strecken visar var maskinen har lagt högarna med avverkade träd. De blå linjerna representerar vägar.



Figur 3.2. Flödesschema för skördarens arbetsoperationer.



Figur 3.3. Skiss som visar kranarmens och maskinens rörelser vid röjning längs en väg.  $BL_x$  är kranens maximala räckvidd i x-led, från kranens infästning till beståndsyttans bortre hörn.

En krancykel antas bestå av följande moment (motsvarande tidsåtgång inom parentes): kran ut ( $t_{kranut}$ ), greppa stam ( $t_{greppa}$ ), avskilja stam ( $t_{avskilja}$ ), kranrörelse till nästa stam ( $t_{nästast}$ ), greppa stam o.s.v. tills aggregatet är 'fullt'; därefter kran in och nedläggning i hög ( $t_{kranin}$ ). När alla stammar inom avsett räckviddsområde är avverkade, antas en viss tid åtgå för att bl.a. ordna till högen ( $t_{ordnhög}$ ) innan maskinen förflyttar sig framåt till nästa uppställningsplats. Momentet "kranut" börjar när förflyttning har skett eller när stammarna har lagts i hög på marken och avslutas när aggregatet har lagt an mot en ny stam, medan "kranin" börjar när sista stammen har avskiljts och avslutas när aggregatet har släppt stammarna i högen.

För att beräkna tiden för kranrörelser ( $t_{kran}$ ) använde Eliasson (1999), och därefter bl.a. Sängstuvall m.fl. (2012) och Jundén m.fl. (2013), formler av typen

$$t_{kran} = C_{kran} + \sum \text{Max}((C_r + L/v), (C_v + a/\omega)) \quad (3.1)$$

där  $C_{kran}$  är en konstant (1,5 s) och där summatecknet summerar tiden för alla delrörelser som kranen gör i "rak" riktning (linjärt) och i svängande riktning (vinkelrörelse) i förhållande till maskinen.  $C_r$  och  $C_v$  är konstanter (båda 0,1 s),  $L$  och  $a$  är sträckor (m) och  $v$  och  $\omega$  motsvarande rörelsehastigheter (2,5 m/s resp. 20 °/s) (de angivna värdena på  $C_{kran}$ ,  $C_r$ ,  $C_v$ ,  $v$ , och  $\omega$  användes av Eliasson (1999), Sängstuvall m.fl. (2012) och Jundén m.fl. (2013)).

I denna studie har det antagits i grundscenariot att  $t_{kranut} = 1,5 + (0,1 + 6/2,5) = 4$  s (se ekvation 3.1) för alla kranut-rörelser, d.v.s. att tidsåtgången motsvarar en rak rörelse på i medeltal 6 m. Eftersom skördeområdet normalt är relativt smalt och avståndet mellan maskinen och skördeområdet relativt kort, är det rimligt att anta ett medelavstånd i intervallet 5-8 m i radiell riktning. Vid förhållanden med ett stort röjningsdjup och längre avstånd mellan maskinens position och beståndet kan andra värden användas.

Tiden för kranrörelser mellan avskiljningarna baseras också på ekvation 3.1;  $t_{nästast} = 1,5 + (0,1 + d/2,5)$ , där  $d$  är avståndet mellan den senast avsågade stammen och den stam som står på tur att sågas av nästa gång. I modellen beräknas avståndet med hjälp av stammarnas koordinater, och det har antagits att bommens rörelse är en rak rörelse.

Tiden för att greppa och kapa en stam med arean  $A$  antogs vara  $t_{greppa} + t_{kapa} = 1 + A/800$ , där den första termen (1 s) är en konstant (Eliasson, 1999) och där  $800 \text{ cm}^2/\text{s}$  är kaphastigheten (Eliasson, 1999; Sängstuvall m.fl., 2012). Ytan  $A$  ( $\text{cm}^2$ ) är egentligen den yta som kapas vid stammens nedre del, men det har här antagits att ytan vid brösthöjd kan användas för sly utan att det blir några större avvikelser i den totala krancykeltiden, d.v.s.  $A = dbh^2 \cdot \pi/4$ .

Krancykelns utsträckning i tid är beroende av vilken volym det ackumulerande aggregatet kan hålla innan stammarna läggs i högarna. Det är flera faktorer som påverkar när aggregatet töms, t.ex. trädens diameter/längd/kronutbredning/stamtäthet, aggregatets omfång, förarens skicklighet, etc. Vid tre prestandastudier (Iwarsson Wide, 2009a; 2009b; 2009d) av röjningsgallring var det genomsnittliga antalet träd per krancykel 4,3, 3,6 och 1,3, och de genomsnittliga värdena på  $dbh$  4,0, 6,2 och 9,9 cm. Om man multiplicerar det genomsnittliga antalet träd med genomsnittlig  $dbh$ , erhålls 17,2, 22,3 och 12,9 cm ( $\bar{x} = 17 \text{ cm}$ ) för respektive studie, och om man beräknar den genomsnittliga tvärsnittsarean (vid  $dbh$ ) får man 54, 109 och  $100 \text{ cm}^2$  ( $\bar{x} = 88 \text{ cm}^2$ ). Utifrån dessa resultat, antogs det i basscenariot i denna studie att aggregatet tömdes antingen när summan av  $dbh$  översteg 20 cm eller när den sammanlagda tvärsnittsarean översteg  $100 \text{ cm}^2$ . Det förra fallet togs med eftersom det finns en praktisk gräns för hur många klenta stammar man kan ha i aggregatet.

Värdet på  $t_{kranin}$  har i olika rapporter varierat från  $t_{kranin} \approx t_{kranut}$  (Nilsson, 2009; Sängstuvall m.fl., 2012) upp till ca  $t_{kranin} = 1,4t_{kranut}$  (Edlund, 2009). I denna studie antogs att  $t_{kranin} = 1,25t_{kranut} = 5 \text{ s}$ . När kranen fälls in har den stammar i skördeaggregatet, och det antogs att tiden för att släppa stammarna i högen ingår i  $t_{kranin}$ .

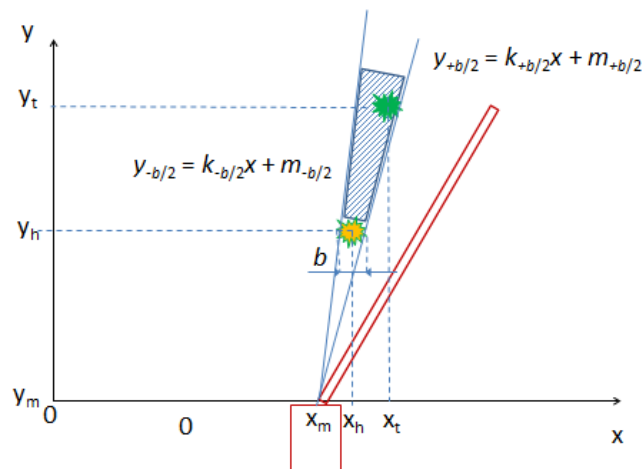
Ofta behöver man ägna viss tid till att ordna högen, plocka upp träd som har tappats, kapa loss rötter, röja små plantor som inte utnyttjas, m.m. (Iwarsson Wide, 2009a; Edlund, 2009). Det är framförallt röjningen som kan ta mycket tid i anspråk (Iwarsson Wide, 2009a). I ett basscenario, med ett försumbart röjningsarbete ( $t_{röjn}=0$ ), har tidsåtgången för att ordna högen ( $t_{ordnhög}$ ) antagits vara 5 s per hög.

Körhastigheten mellan uppställningsplatserna i bestånden har antagits vara  $4 \text{ km/tim}$  ( $1,11 \text{ m/s}$ ). Vid dessa korta förflyttningar får accelerationen och retardationen en större relativ betydelse. Därför har accelerationen ( $a$ ) och retardationen antagits vara  $2500 \text{ km/tim}^2$  ( $0,19 \text{ m/s}^2$ ). Vid en förflyttning på t.ex. 10 m, motsvarar dessa värden på körhastighet och acceleration/retardation, bl.a. enligt sambanden  $\bar{a} = \Delta v/\Delta t$ ,  $s = v_0t + at^2/2$ , den tidsåtgång (i sekunder) som redovisas av Eliasson (1999) (med  $t = 5 + v \cdot s$ ). Vid transport med maskinen ej i arbete, t.ex. från sista uppställningsplatsen tillbaka till beståndscentrum, antogs hastigheten vara  $8 \text{ km/tim}$ . Den sträcka som behövs för förflyttningen bestäms i modellen av kranarmens räckvidd, beståndets djup och koordinaterna för de stammar som står på tur att avverkas (se även figur 3.3). Ju längre räckvidd och ju längre bort nästa träd för avverkning är belägen, desto längre blir maskinens förflyttning mellan två specifika uppställningsplatser. Den kortaste sträcka som maskinen förflyttar sig beskrivs av  $2 \cdot BL_x$  i figur 3.3.



Avverkningsmaskinens genomsnittliga körhastighet på landsväg mellan hemmastationen och traktcentra, samt mellan olika traktcentra, har antagits vara 25 km/tim. Den genomsnittliga körhastigheten mellan traktcentra och beståndscentra, samt mellan olika beståndscentra, har antagits vara 10 km/tim, eftersom transporterna i huvudsak antas ske på gårds- eller traktorvägar. De ovan angivna körhastigheterna och accelerations-/retardationsvärdena har använts i basscenarierna, men det är enkelt att ändra dessa parametrar i modellen om andra alternativ ska utvärderas. Transportavstånden mellan hemmastation, traktcentra och beståndscentra kan t.ex. mätas upp med hjälp av digitala karthjälpmedel (exempelvis GIS).

Ofta kan det finnas anledning att spara träd längs röjningssträckan. Om där t.ex. finns sälg, så ska dessa sparas, eftersom detta trädslag har stor betydelse för bl.a. humlornas, vildbinas och fjärilarnas intag av nektar under tidig vår (Ehnström & Holmer, 2009). Under röjningsarbetet kan därför sådana träd bli ett hinder för kranrörelserna. Det kan även finnas många andra typer av hinder, t.ex. ledningsstolpar och större stenblock. I modellen kan olika typer av hinder läsas in från en fil med uppgifter om hindrens x- och y-koordinater, samt deras bredd ( $b$ ) i x-led, se figur 3.4. Eftersom avverkningsmaskinens position ( $x_m, y_m$ ), liksom hindrens positioner ( $x_h, y_h$ ) och bredd ( $b$ ) är kända, kan två linjer beräknas, vilka avgränsar en yta som antas vara onåbar för kranens arbete. I modellen antas maskinen göra en kort förflyttning framåt (2 m; tidsåtgång 7 s i enlighet med Eliasson (1999)), när alla träd som går att ta bort inom räckviddsområdet är klara, för att nå stammar som finns inom det avgränsade området, t.ex. stammen med koordinaterna  $x_t, y_t$  i figur 3.4.



Figur 3.4. Med utgångspunkt från koordinaterna för maskinen ( $x_m, y_m$ ) och hindret ( $x_h, y_h$ ), samt hindrets bredd ( $b$ ), kan en yta tas fram inom vilken det antas att det finns onåbara stammar. För t.ex. den vänstra avgränsningskurvan gäller  $k_{-b/2} = (y_h - y_m) / (x_{-b/2} - x_m)$ ,  $m_{-b/2} = y_h - k_{-b/2}x_{-b/2}$ . Om  $x_t > x_m$ ,  $y_t < y_{-b/2}(x_t)$  och  $y_t > y_{+b/2}(x_t)$  antas trädet vara onåbart för maskinen. Detsamma gäller om  $x_t < x_m$ ,  $y_t > y_{-b/2}(x_t)$  och  $y_t < y_{+b/2}(x_t)$ , samt vid  $x_t = x_m$ ,  $y_t < y_h$ . För att kunna avverka onåbara träd, antas i modellen att maskinen behöver förflytta sig 2 m.

Maskinernas arbetstider specificeras i modellen. Man kan t.ex. ange att arbetsdagen börjar kl 8.00 och slutar kl. 17.00. Tidpunkten för dagens slut påverkas dock av hur många träd som återstår (om bara enstaka träd återstår arbetar maskinen tills beståndet är klart), och hur långt det är till platsen där maskinen ska parkeras. I modellen antas att maskinen körs tillbaka till beståndscentrum och parkeras där efter arbetsdagens slut. I modellen kan också tider för t.ex.

lunchpauser specificeras, exempelvis att föraren ska ta 45 min lunchrast efter kl. 12.00. Rasterna är ej fastlåsta vid en viss tidpunkt, utan de tas när det är lämpligt; om maskinföraren exempelvis är upptagen med en vägtransport, så genomförs transporten i sin helhet innan rasten tas.

Modellen registrerar hur länge maskinerna är sysselsatta med avverkning, hur lång tid som åtgår för transporter på väg, hur lång tid som åtgår för transporter inom/längs beståndet, hur lång tid som åtgår för lunchpauser m.m., samt hur lång tid som maskinen ej är aktiv (p.g.a. nattvila, etc). Några resultatparametrar, som ej är tidsrelaterade, är totala antalet stammar och total mängd torrs substans som har avverkats, samt totala antalet uppställningsplatser (se även avsnitt 3.3).

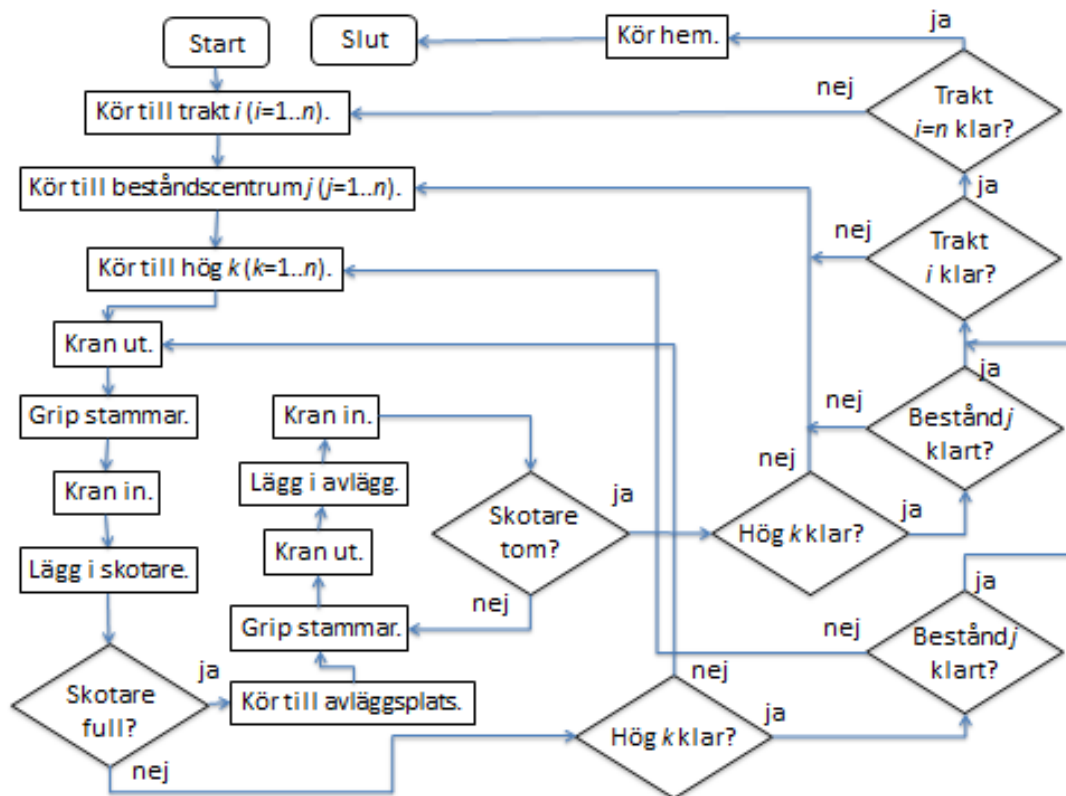
### 3.2.2. Skotning

Skotarens uppgift är att samla in de träd som avverkningsmaskinen har lagt i högar vid avverkningen, och att sedan transportera dessa till en avläggsplats. Som tidigare nämnts, har dessa arbetsoperationer tagits med i modellen, eftersom prestandan vid hantering av sly kan avvika kraftigt från prestandan vid konventionell hantering av t.ex. rundvirke. Det är rimligt att anta att skotarens arbete är oberoende av när avverkningsmaskinen har utfört sitt arbete, d.v.s. det har antagits i modellen att det inte uppstår några väntetider mellan avverkning och skotning.

Varje hög som avverkningsmaskinen lämnar efter sig registreras i modellen med avseende på traktnummer, beståndsnummer, uppställningsplatsens nummer, uppställningsplatsens x-koordinat samt antal stammar, genomsnittligt *dbh* och totalt innehåll av torrs substans i högen. De fyra första variablerna beskriver var varje enskild hög är lokaliserad, och de tre sista beskriver vad högen innehåller. Vid modellering av skotarens arbete är det på så sätt känt exakt var högarna finns och vad de innehåller.

Algoritmerna för skotarens arbete har visualiserats i figur 3.5. Skotaren kör först från sin hemmastation till den första traktens första bestånd. Där kör den fram till den första högen och samlar upp materialet tills lasset är fullt, eller tills högen är borttagen, då den kör fram till nästa hög. Vid fullt lass kör maskinen till traktens avläggsplats (det har antagits att avläggen är lokaliserade till varje trakts centralpunkt) och lastar av lasset där. Maskinen kör från hög till hög i varje bestånd, från bestånd till bestånd inom varje trakt, och från trakt till trakt tills allt är klart. Därefter kör den till hemmastationen igen.

Arbets schemat, med startid och senaste sluttid på dagen, samt lunchrast, är samma som för fällaren. Skotaren parkeras vid aktuell trakts centralpunkt (avläggsplats) vid dagens slut.



Figur 3.5. Flödesschema för skotarens arbetsoperationer.

Den totala prestandan hos maskinen antogs vara beroende av tidsåtgången för följande arbetsmoment (Grönlund & Eliasson, 2019): kran ut, grip, sammanföring, kran in, släpp och tillrättaläggning, förflyttning under lastning, förflyttning till avlägg, lossning, förflyttning med tomt lastutrymme samt övrig (produktiv) tid. Prestandan påverkas också av lastvikt, gripvolym vid lastning och vid lossning, transporthastigheterna under lastning och vid tomt respektive fullt lastrede samt av avstånden mellan högarna och mellan bestånd/högar och avläggsplats. För att få rimliga och tillförlitliga värden på dessa prestandaparametrar, har data använts från studier med liknande typer av biomassa.

Fernandez-Lacruz m.fl (2013) studerade produktiviteten och lönsamheten vid skörd av sly för bioenergiändamål i kraftledningsgator. Bestånden i de undersökta provytorna hade en medel-*dbh* från 2,3 cm till 4,7 cm och biomassamängden varierade från 19 till 36 ton TS per ha. I studien användes en Valmet 890.1 (Komatsu Forest AB) för skotning av de fällda träden till avlägg. Maskinen hade en maximal lastkapacitet på 18 ton och tvärsnittsytan på lastutrymmet var 6 m<sup>2</sup>. Kranens grip hade en griparea på maximalt 0,30 m<sup>2</sup>. Resultaten visade bl.a. att full last innehöll ca 4,5 ton färskt material (2,5 ton TS), vilket visar att volymen snarare än vikten är en begränsande faktor vid hantering av sly jämfört med t.ex. hantering av rundvirke. Den genomsnittliga mängden i varje grip vid lastning och lossning var 114 kg TS resp. 268 kg TS. De genomsnittliga körhastigheterna med tom last var 5,0 km/tim, under lastning 1,4 km/tim och med full last 4,0 km/tim. Vid en lassvikt på 2,52 ton TS och ett transportavstånd på 100 m, tog lastningen (kran ut, grip, sammanföring, kran in, släpp och tillrättaläggning) 3,2 min/ton TS, förflyttningen under lastning 2,1 min/ton TS, lossningen 1,1 min/ton TS och övrig produktiv tid 0,51 min/ton TS (Fernandez-Lacruz m.fl., 2013),

I en annan produktivitetstudie vid skörd av normalt (n) skördemogen och förvuxen (f) energiskog (*Salix*) användes en skotare (Timberjack 1210 B Pendo) för att transportera fällda helskott till fältkanten (Di Fulvio m.fl., 2012). Stammarnas genomsnittliga diameter vid stubbskäret var 2,7 cm (n) resp. 3,1 cm (f) och skördenivån 36 ton TS/ha (n) resp. 56 ton TS/ha (f). Helskotten lades i högar av fällaren med i genomsnitt 170 kg TS (f) respektive 230 kg TS (f) i varje hög. Skotaren hade en maximal lastkapacitet på 14 ton och lastredet hade en tvärsnittsarea på 4,2 m<sup>2</sup>. Kranens griparea var 0,36 m<sup>2</sup>. Resultaten visade att ett fullt lass i genomsnitt rymde 4,8 ton färskt material (2,6 ton TS) (n) resp. 5,7 ton färskt material (2,7 ton TS) (f). Antalet krancykler vid lastning var i genomsnitt 1,00 (d.v.s. 0,17 ton TS/grip) (n) och 1,08 (d.v.s. 0,21 ton TS/grip) (f) per hög och totalt 15 (n) resp. 13 (f) per lass. Körhastigheten med tomma lass var 4,3 km/tim och 3,6 km/tim med fulla lass. Lastningen (kran ut, grip, sammanföring, kran in, släpp och tillrättaläggning) tog 2,61 min/ton TS (n) resp. 3,07 min/ton TS (f) och förflyttningen under lastning 0,54 min/ton TS (n) resp. 0,51 ton TS/min (f). Lossningen krävde 10,8 krancykler/lass och den tog 4,66 minuter i genomsnitt. Mängden per krancykel var i genomsnitt 0,25 ton TS. Övrig produktiv tid var 0,6 min/lass (Di Fulvio m.fl., 2012).

Baserat på ovanstående studier (Di Fulvio m.fl., 2012; Fernandez-Lacruz m.fl., 2013), data från Grönlund & Eliasson (2019) och allmänna produktionsnormer för skotare (Brunberg, 2004), antogs i basscenariot att maximal lastkapacitet var 2,5 ton TS, maximal mängd TS i gripen vid lastning och lossning var 150 kg resp 250 kg, körhastigheten under lastning var 4 km/tim, körhastigheten med tom last vid bestånd och på väg var 10 km/tim resp. 20 km/tim. Vid full last antogs hastigheterna vara hälften så stora som vid körning med tom last. Körhastigheten under lastning är högre än vad som är normalt vid t.ex. uttag av grot, eftersom det här handlar om körning på mark med bra terrängförhållanden, t.ex. längs väg-, åkermarks- och betesmarkskanter. Tidsåtgången för kran ut, grip, sammanföring, kran in, släpp och tillrättaläggning sammanfattades i tidsåtgången för begreppet ”lastning” ( $t_{lastn}$ ), vilken antogs vara 0,50 min/krancykel, varav 30 % av tiden antogs vara beroende av mängden TS (jfr t.ex. Eliasson & Lundström, 2011), d.v.s.  $t_{lastn} = 0,35 + x/150 \cdot 0,15$  (min/krancykel), där  $x$  (kg) är mängden TS som samlas upp i gripen. Tidsåtgången för lossning ( $t_{lossn}$ ) antogs vara 0,35 min/krancykel och övrig produktiv tid 1,0 min/lass.

### 3.3. Utdata från simuleringar

En stor mängd utdata kan erhållas från simuleringarna. Exempel på utdata för avverkningen är:

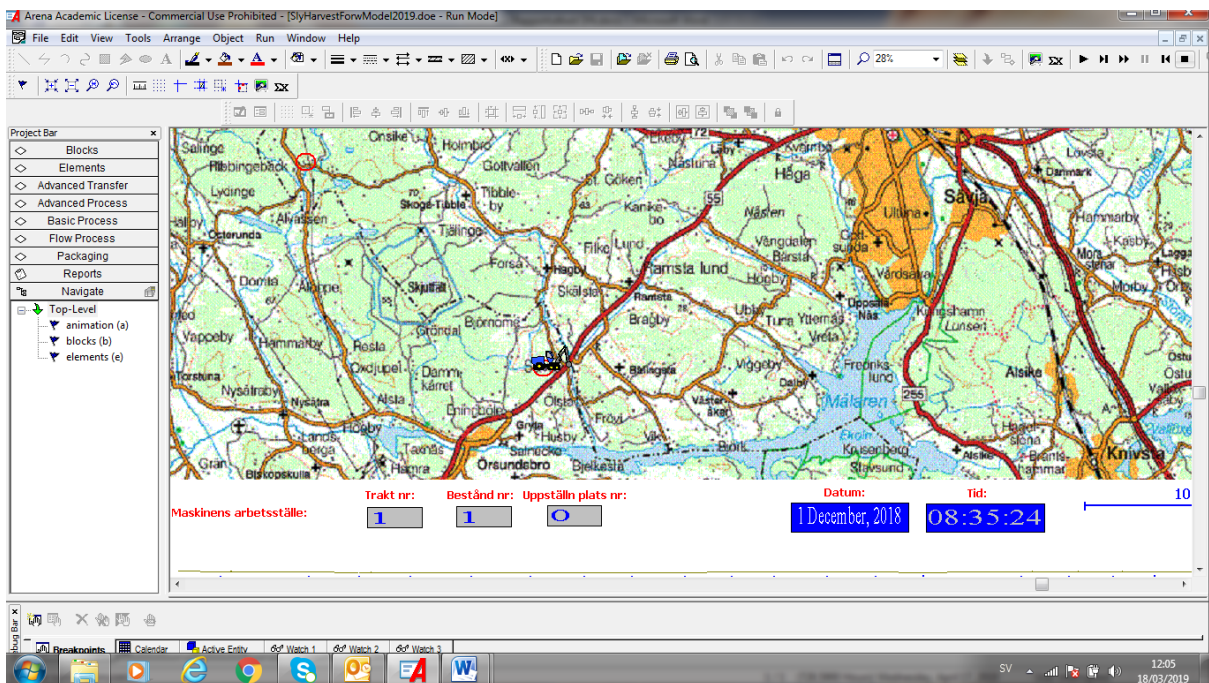
- Tid för alla vägtransporter (min)
- Tid för rörelsen ”Kran ut” (min)
- Tid för att greppa och avskilja stammar (min)
- Tid för kranrörelser mellan stammarna (min)
- Tid för ”Kran in” inkl. tid för lägga i hög (min)
- Tid för förflyttning i beståndet (min)
- Tid för pauser (min)
- Tid för förberedelser (och ev. efterarbeten) (min)
- Tid för ev. slumpmässiga avbrott (min)
- Antal avverkade stammar (st)
- Antal krancykler (st)

- Antal träd i varje krancykel (st)
- Antal uppställningsplatser (st)
- Antal skördade bestånd (st)
- Avverkad mängd TS (ton TS)
- Avverkningsprestation, uttryckt som  $G_0$ -tim/ha och som ton TS/ $G_0$ -tim.

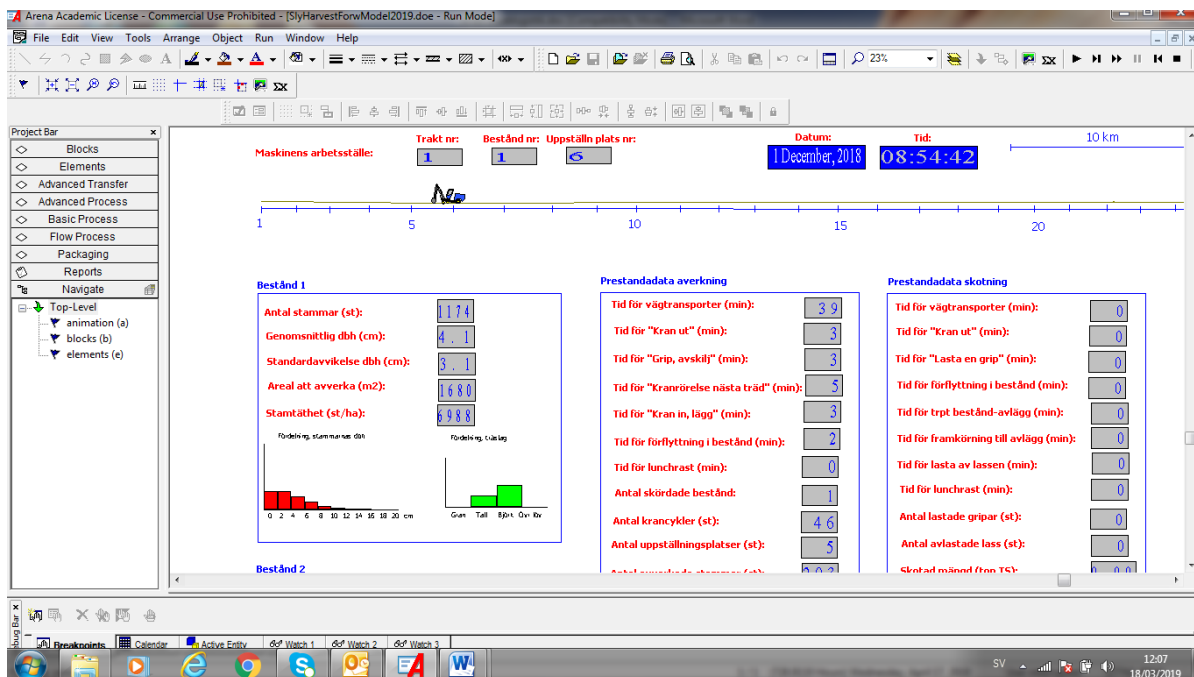
Exempel på utdata för skotningen är:

- Tid för transporter mellan hemmastation och traktcentra, samt mellan traktcentra (min)
- Tid för förberedelsearbeten (min)
- Tid för transporter mellan bestånd och avläggsplatser (traktcentra) (min)
- Tid för lastning (min)
- Antal lastade gripar (st)
- Tid för förflyttning i beståndet (min)
- Tid för lasta av ett lass (hänsyn tagen till lassets storlek) (min)
- Antal avlastade lass vid avläggsplatsen (st)
- Mängd TS avlastad vid avläggsplats (ton TS)
- Tid för raster (min)
- Tid för ev. slumpmässiga avbrott (min)
- Skotningsprestation, uttryckt som ton TS/ $G_0$ tim.

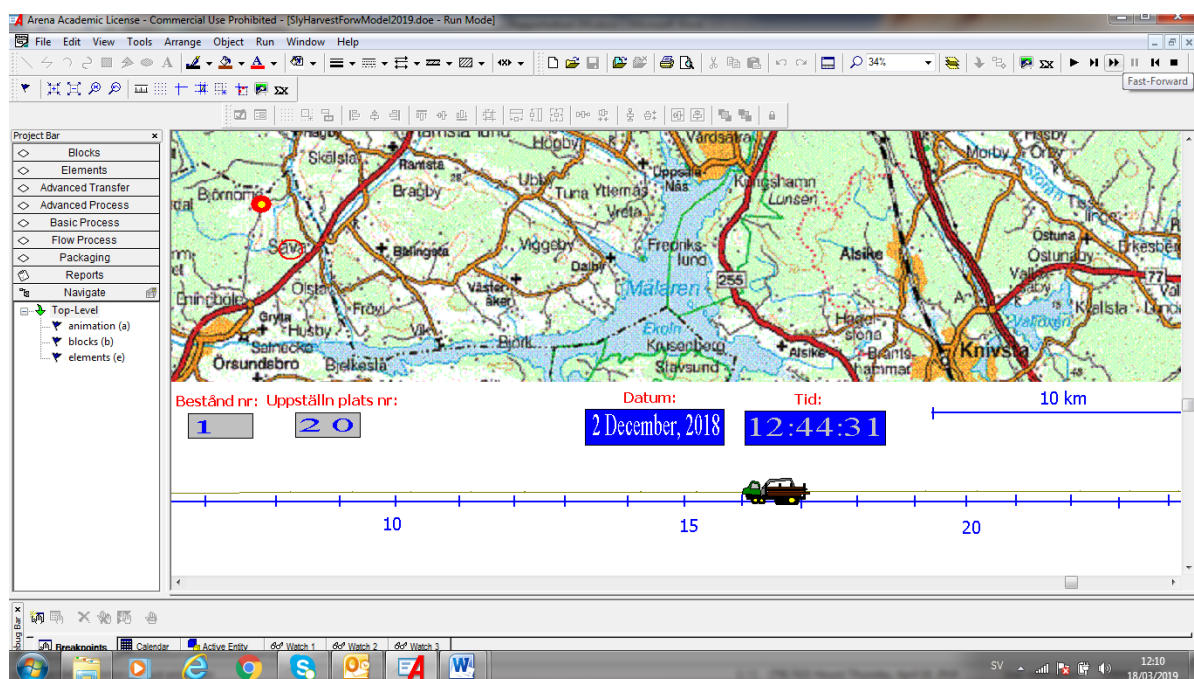
Simuleringsmodellen kan animeras/visualiseras, och på datorskärmen kan man därför följa hur arbetet fortskrider (se tre exempel på animeringar i figurerna 3.6-3.8).



Figur 3.6. Animeringsexempel 1: Här är basmaskinen på väg till en avverkningsplats norr om Örsundsbro i Uppsala län.



Figur 3.7. Animeringsexempel 2: Här avverkar basmaskinen vid uppställningsplats nr 6 i bestånd nr 1 i närheten av trakt nr 1 den 1 december kl 8.54.



Figur 3.8. Animeringsexempel 3: Här är skotaren på väg med ett lass från uppställningsplats nr 20 till trakt nr 1.

### 3.4. Ekonomiska beräkningar

Resultaten från simuleringarna kan sedan användas i en ekonomisk kalkylmodell för beräkning av åtgärdernas kostnader och lönsamhet. Inom projektet har ett digitalt kalkylverktyg utvecklats som kommer att finnas tillgängligt på Skogforsks hemsida ([www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se)). Kalkylverktyget låter användaren ange egenskaperna på en 25-

meterssträcka (se kapitel 5) genom att ange subjektiva värden på tre egenskaper: trädens diameter (liten, mellan eller stor), homogenitet (är det liten eller stor skillnad i storlek på träden på ytan) samt täthet (beroende på tidigare val ges 3-6 alternativ). Detta tillsammans med ett alternativ för sträckor utan träd ger totalt 29 typbestånd (typbeståndens egenskaper beskrivs i Bilaga B). Användaren visas då en bild av en 25-meterssträcka med dessa egenskaper. Användaren kan sedan ange längden på den sträcka som har dessa egenskaper och efter det upprepa proceduren och lägga till ytterligare sträckor till dess att hela den tilltänkta ytan är beskriven i verktyget. Därefter får användaren ange information om maskinkostnader, transportavstånd och energipris. Slutligen presenteras kostnader och intäkter för respektive del och den totala lönsamheten.

Vid kostnadsberäkningarna har arbetstiden från simuleringarna räknats om från produktiv tid (eller grundtid, vilket betecknas  $G_0$ ) till arbetstid inkl. avbrott på maximalt 15 min per timme ( $G_{15}$ ) med faktorn 1,5274 (Kuitto m.fl., 1994). Som underlag för beräkningen av skördarens kostnader användes data från simuleringarna av respektive 25-meterssträcka. Timkostnaden för maskinen anges av användaren.

Den tidsåtgång i skotningen som beräknats i den ekonomiska kalkylen använde den prestationsnorm som tagits fram av Brunberg (2004). Uttaget per hektar bestämdes genom omvandling av den simulerade avverkningsmängden till kubikmeter med hjälp av WeCalc. Antaganden gjordes att skotaren var en medelstor gallringsskotare med en lastkapacitet på 2,5 ton TS och att körhastigheten med fullt lass på väg var 10 km/h och 20 km/h med tomt lass.

I kapitlen 5 och 6 presenteras resultat med följande maskinkostnader. Den totala timkostnaden för fällaren har antagits vara 1 200 kr. Denna timkostnad gäller för en basmaskin inkl. kostnader för kran och fällaggregat, förare samt drivmedel. Motsvarande kostnad för skotaren har varit 950 kr/tim. Kostnaden för flisning beräknades vara 253 kr per ton TS och kostnaden för transport till en användare 247 kr per ton TS (Brunberg, 2014). Intäkterna för den sålda flisen var 170 kr/m<sup>3</sup>s (Energimyndigheten, 2017), vilket motsvarar 1 077 kr per ton TS.

## 4. VERIFIERING OCH VALIDERING AV SIMULERINGSMODELLEN

### 4.1. Verifiering

För att vara ett tillförlitligt redskap, ska en simuleringsmodell alltid verifieras. Detta innebär att man kontrollerar att modellen fungerar så som modellens konstruktörer har avsett (Kelton m.fl., 2007). Även om man har ägnat mycket tid till att verifiera en modell, kan man ändå inte vara helt säker på att modellen i alla situationer uppför sig så som det var tänkt.

I denna studie har modellen verifierats genom att följa flödet av entiteter genom de s.k. SIMAN-blocken, vilka utgör grundstrukturen i Arena. Detta har gjorts både manuellt och med hjälp av de verktyg ("watch", "highlight active module", m.m.) som finns i Arena för olika typ- och extremfall. Dessutom har modellen verifierats genom animering av simuleringarna. Genom att på datorskärmen ingående studera vad som händer vid simuleringarna, kan man steg för steg analysera modellens arbete och upptäcka eventuella avvikelser. Exempel på aktiviteter som tyder på buggar i modellen är en maskin som plötsligt kör till "fel" bestånd eller ett arbete som sker under "otillåtna" förhållanden. Efter verifieringarna bedömdes modellen ha tillräcklig tillförlitlighet utifrån dess syfte.

### 4.2. Validering

Validering innebär att man kontrollerar hur väl modellen beskriver relevanta egenskaper hos den verklighet (det system) som ska studeras (Kelton m.fl., 2007). Vid valideringar jämförs alltså modellens resultat med mätningar som har gjorts i det verkliga systemet. Valideringar har gjorts med två studier som underlag, dels för röjning längs en väggkant i Jämtland (Iwarsson Wide, 2009b) och dels för röjning längs en väggkant i Ångermanland (Edlund, 2009). I båda fallen gjordes tidsstudier med ackumulerande skördeaggregat. Det finns endast ett fåtal fältstudier av röjning av sly under svenska förhållanden, och dessa två studier valdes med tanke på att relativt noggranna data finns om både bestånd och själva skördeoperationerna.

#### 4.2.1. Studien av Iwarsson Wide (2009b)

Den första valideringsstudien gäller röjning av sly/träd längs en väggkant norr om Krokombäcken i Jämtland med en Valmet 911 utrustad med ett Bracke-aggregat (Bracke C16). Aggregatet hade en klinga med en självsträckande sågkedja som kan såga av flera stammar i samma rörelse. Beståndsspecifika fältmätningar och övriga yttre förhållanden, liksom tidsstudier av maskinens prestanda, beskrivs i en rapport av Iwarsson Wide (2009b). Mer detaljerad data finns också i ett opublicerat arbetsmaterial (av Maria Iwarsson Wide, Skogforsk).

Före tidstudierna lades 30 st 1,0 meter breda provytor ut längs vägen var 15:e meter på en sträcka av totalt ca 450 m (Iwarsson Wide, 2009b). Provytorerna var 7 m djupa. Inom provytorna klavades samtliga stammar, och brösthöjdsdiameter och trädslag noterades. För ett antal utvalda stammar mättes också höjden i syfte att ta fram representativa höjdkurvor. Tidstudierna genomfördes därefter; dock avverkades inte hela sträckan inom studien utan endast längs en väggkantsträcka på totalt ca 240 m (med 17 provytor). På den tidstuderade sträckan var stamtätheten 6 990 stammar per hektar, och antalet stammar som ingick i validerings-simuleringarna var därför  $6\,990 \cdot (240\text{ m} \cdot 7\text{ m} / 10\,000\text{ m}^2/\text{ha}) = 1\,174\text{ st}$ .

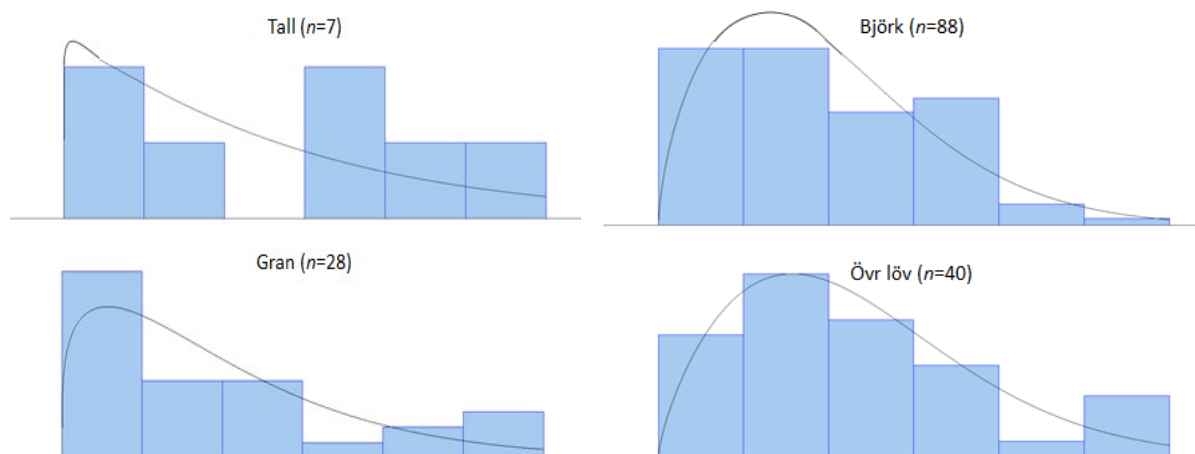


I beståndsgeneratoren tilldelades de 1 174 stammarna trädslag, *dbh*, höjd och positioner i x- och y-led inom den simulerade sträckan (240 m) med hjälp av data från mätningarna i alla provytorna. Skälet till att alla 30 provytorna användes som dataunderlag var möjligheten att få ett större antal observationer (*n*) vid skattning av trädslagsfördelningen och Weibullfördelningens parametrar. Beståndet hade hög homogenitet med avseende på trädslag och brösthöjdsdiameter; exempelvis var *dbh* i genomsnitt 3,9 cm i de 17 första provytorna och 4,1 cm (standardavvikelse 2,7 cm) i alla de 30 provytorna.

Björk var det vanligaste trädslaget, följt av övriga lövträd och gran (tabell 4.1). Eftersom det fanns data om *dbh* för enskilda stammar, användes Arena-programmets ”Input Analyser” för att ta fram Weibull-fördelningarnas  $\alpha^*$ - och  $\beta^*$ -värden (tabell 4.1) genom analys av data från de 30 provytorna (figur 4.1). Med tanke på resultaten från inmätningarna (tabell 4.1) och beståndets uppskattade maximala ålder, sattes ett max-värde på *dbh* på 14 cm (värdet på  $\gamma$  antogs vara 0).

Tabell 4.1. Weibull-fördelningarnas  $\alpha^*$ - och  $\beta^*$ -värden, samt feluppskattning, för respektive trädslag utifrån uppmätta *dbh*-data (totalt 163 stammar på 30 provytor)

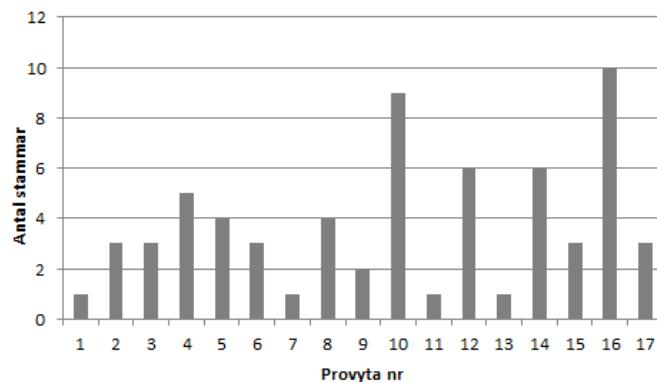
Trädslag	Dbh, data från mätningar				Weibull-parametrar		
	Antal (andel inom parentes)	Medelv. (cm)	Stdavv. (cm)	Max (cm)	$\alpha^*$	$\beta^*$	Square error
Tall	7 (4,3 %)	5,0	4,1	10,4	1,04	5,10	0,074
Gran	28 (17,2 %)	4,0	3,3	11,1	1,24	4,27	0,032
Björk	88 (54,0 %)	4,0	2,5	11,2	1,62	4,44	0,014
Övriga lövträd	40 (24,5 %)	4,3	2,6	10,1	1,72	4,79	0,009
Alla uppmätta träd	163 (100 %)	4.1	2.7				



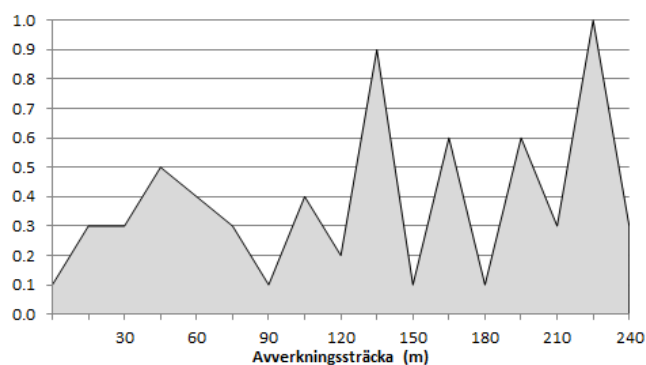
Figur 4.1. Histogram (med sex intervall) för uppmätta brösthöjdsdiametrar och anpassning av Weibull-fördelningar (se tabell 4.1) för tall, gran, björk och övrigt löv (obs, histogrammens y-axlar ej skalensliga med varandra).

Stammarnas positioner i x-led bestämdes genom en kontinuerlig sannolikhetsfördelning  $Z_C(x)$  (figur 4.3) som bildades med hjälp av ett histogram över antalet stammar inom varje provyta

(figur 4.2) för sträckan 0 till 240 m. Positionen i x-led bestämdes alltså genom att ett slumpstal först genereras från en likformig sannolikhetsfördelning (med gränsvärdena 0 och 240), och sedan genereras ett slumpstal  $u$  ( $u \in [0,1]$ ) från en likformig sannolikhetsfördelning. Om  $u < Z_C(x)$  blir x-koordinaten godkänd (se även avsnitt 2.3). Stammarnas position i y-led bestämdes från en likformig sannolikhetsfördelning i intervallet 0 till 7 m. För beräkning av minsta tillåtna avstånd mellan stammarna och torrsubstansmängder användes samma metoder som finns beskrivna i avsnitten 2.3 och 2.4.



Figur 4.2. Histogram över antalet uppmätta stammar i de olika provytorna längs sträckan 0-240 m.

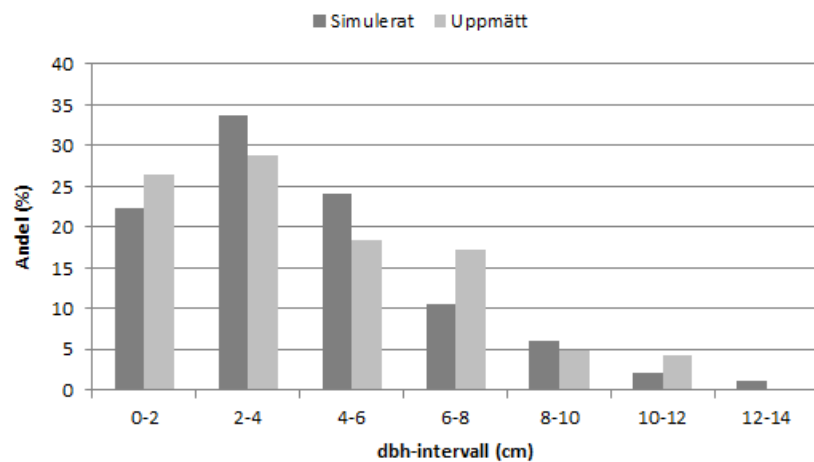


Figur 4.3. Kontinuerlig sannolikhetsfördelning  $Z_C(x)$  för trädens placering i x-led längs sträckan 0-240 m.

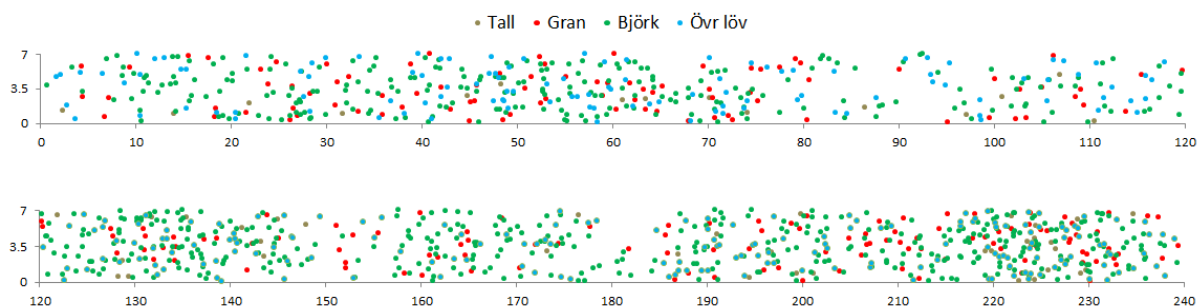
Eftersom det fanns en slumpmässig variation i genomsnittligt dbh (då antalet simulerade träd inte var "oändligt" många ( $n = 1174$ )), simulerades tio replikationer i beståndsgeneratoren. Den simulering som resulterade i dbh-värden (medelvärde och standardavvikelse) som låg närmast de uppmätta värdena valdes för användning i avverkningsmodellen. Vid tidstudierna hade fällaren en vikarmskran på 9,7 m (Iwarsson Wide, 2009b), och det antogs att maximal räckvidd var 9 m och att maximalt avstånd i djupled var 8 m, vilket gav ett värde på  $BL_x$  (figur 3.3) på 4,1 m. I övrigt användes de indata för avverkningsmodellen som finns beskrivna för basscenariot i avsnitt 3.2.

Det valda genererade beståndet hade en något lägre standardavvikelse för dbh jämfört med vad som uppmättes i provytorna (tabell 4.1), och andelen träd med dbh i storleksklassen 6-8 cm var lägre (figur 4.4). De simulerade trädpositionerna visas i figur 4.5. Vid simuleringarna

stod stammarna särskilt tätt vid 135 m och 225 m (figur 4.5), vilket förklaras av mätresultaten i figur 4.2.



Figur 4.4. Andel av simulerad (Weibull-fördelning,  $n=1174$ ) och uppmätt ( $n=163$ ) dbh för olika 2 cm-klasser.



Figur 4.5. Stammarnas simulerade positioner längs den röjda vägsträckan på totalt 240 m (med röjningsdjupet 7,0 m).

Den simulerade mängden torrsubbstans (4,83 ton, d.v.s. 28,7 ton TS/ha) (tabell 4.2) baserar sig på de biomassa-funktioner som finns beskrivna i appendix A och på de data om enskilda träd ( $dbh$  och  $h$ ) som erhöles från beståndsgeneratorm. Brösthöjdsdiametern för varje träd bestämdes här via Weibullfördelningar (tabell 4.1), vars indata kom från alla de uppmätta provytorna.

I studien av Iwarsson Wide (2009b) härrör mängden torrsubbstans från mätningar av höjden hos 28 träd inom de 30 provytorna, varefter kurvanpassningar gjordes för att ta fram trädslagsspecifika samband mellan  $dbh$  och  $h$ . Sedan beräknades mängden torrsubbstans hos alla träd inom provytorna med hjälp av Marklunds biomassa-funktioner (med två oberoende variabler; för kategorin övrigt löv användes samma funktioner som för björk). Därefter gjordes en skattning av mängden torrsubbstans per ha. Med träd från alla provytor som dataunderlag, beräknades mängden TS till 39,8 ton/ha och mängden på den avverkade ytan (0,168 ha) till 6,69 ton TS. Med enbart data för de träd som mättes inom de 17 provytor som blev avverkade, blev mängden TS 27,6 ton/ha och mängden TS på den avverkade ytan 4,64 ton TS. Det var alltså ganska stora skillnader i torrsubbstans mellan de olika provytorna (30 st).

Valen av höjd- och biomassafunktioner hade stor inverkan på beräknade torrsubstansmängder. Uppmätta höjdvärden visas i figur 4.6 ( $n = 28$ , ingen mätning gjordes för tall). Iwarsson Wide (2009b) fick fram följande höjdfunktioner genom kurvanpassning:

$$h_{gran} = 3.5337 \cdot \ln(dbh) - 0.6558 \quad (n = 4, R^2 = 0.94) \quad (4.1)$$

$$h_{björk} = 3.9231 \cdot \ln(dbh) - 0.1004 \quad (n = 19, R^2 = 0.93) \quad (4.2)$$

$$h_{övr löv} = 6.0432 \cdot \ln(dbh) - 3.8821 \quad (n = 5, R^2 = 0.96) \quad (4.3)$$

Dessa funktioner saknar dock intercept vid 1,3 m (brösthöjden), och höjden kan därför bli  $< 0$  vid  $dbh > 0$  (i Iwarsson Wides (2009b) studie sattes därför  $h = 0$  för dessa stammar). Om man anpassar andragradspolynom med interceptet 1,3 m, kan alla träd med  $dbh > 0$  tas med, och då får man:

$$h_{gran} = -0,015dbh^2 + 0,79dbh + 1,3 \quad (n = 4, R^2 = 0,89) \quad (4.4)$$

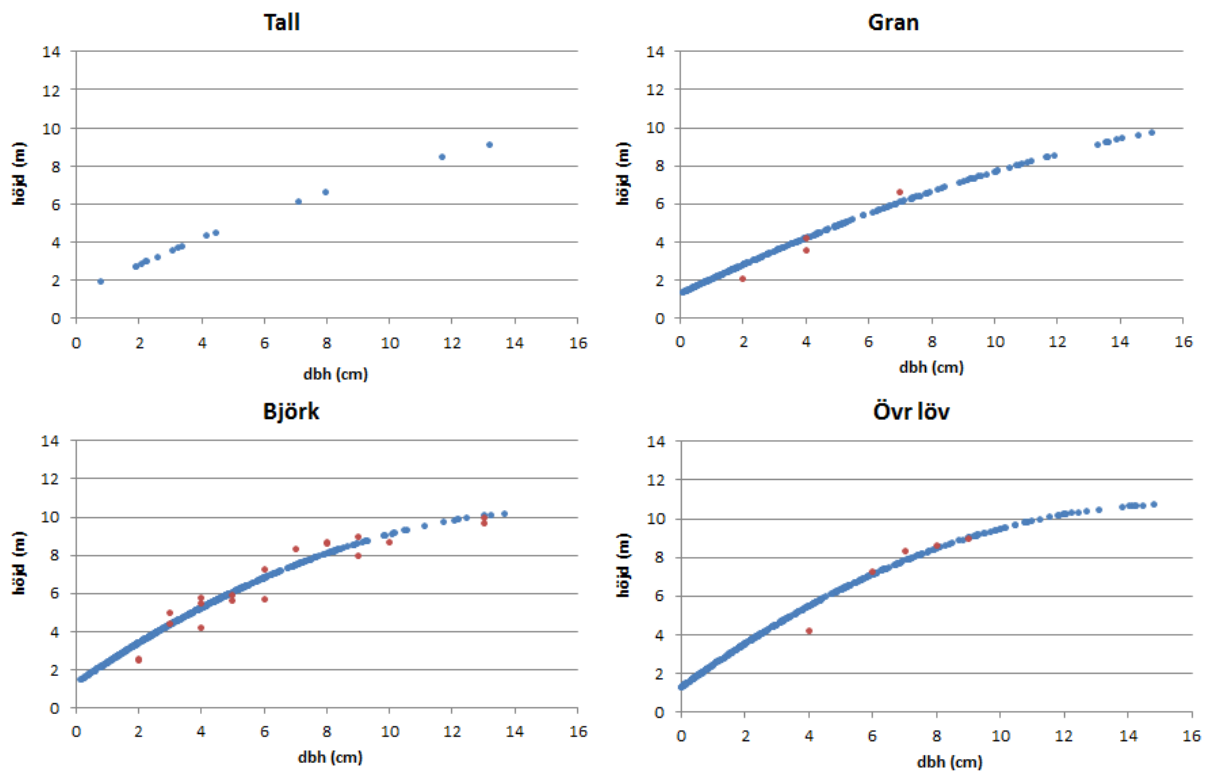
$$h_{björk} = -0,035dbh^2 + 1,13dbh + 1,3 \quad (n = 19, R^2 = 0,92) \quad (4.5)$$

$$h_{övr löv} = -0,038dbh^2 + 1,2dbh + 1,3 \quad (n = 5, R^2 = 0,87). \quad (4.6)$$

Resultaten från simuleringar ( $n = 1174$  stammar) med dessa andragradspolynom (ekv. 4.4-4.6) tillsammans med uppmätta värden ( $n = 28$ ), visas i figur 4.6. Eftersom höjddata saknades för tall, användes samma höjdfunktion för både gran och tall. Med hjälp av dessa höjdfunktioner (ekv. 4.4-4.6) och de biomassafunktioner som finns i appendix A, blev den simulerade mängden TS på den avverkade sträckan (240 m,  $n = 1174$ ) 5,52 ton, vilket motsvarar 32,8 ton TS/ha. Dessa mängder kan alltså jämföras med de värden som erhöles med hjälp av simuleringensmodellens "generella" höjdfunktioner (fig. 2.3-2.5) (28,7 ton TS/ha) och Iwarsson Wides (2009b) beräkningar (39,8 ton TS/ha resp 27,6 ton TS/ha).

I avverkningsmodellerna var antalet uppställningsplatser ungefär lika många som i tidsstudien (tabell 4.2). Antalet krancykler var ca 17 % högre i Iwarsson Wides (2009b) studie jämfört med antalet i simuleringarna (231 st). Vid en närmare granskning av antalet träd per krancykel, var andelen med ett, två eller tre träd per krancykel betydligt högre vid tidsstudien (figur 4.7), trots att brösthöjdsdiametrarna generellt var små. I Iwarsson Wides studie (2009b) var t.ex. andelen krancykler med tre eller färre träd ca 38 %, medan den var ca 18 % i simuleringarna. Eftersom den sista krancykeln före förflyttning till nästa uppställningsplats kan innehålla få träd (man avverkar den återstående "rest" som finns kvar inom räckhåll), redovisas i figur 4.7 det simulerade antalet träd per krancykel exkl. den sista krancykeln vid uppställningsplatsen. Som väntat blev skillnaderna ännu större mellan simulerade och observerade värden.

Iwarsson Wide (2009b) beskriver i sin rapport att behovet av röjning av sly (med stammar som ej nådde brösthöjd eller med  $dbh \approx 0$ ) bitvis var stort inom det studerade området. I tidsstudierna registrerades även tiden för röjning, men alla "krancykler" som ej resulterade i att ett träd kapades togs ej med i prestationstiden för uttag av bränsleved. Samtidig röjning av sly med  $dbh \approx 0$  kan alltså vara en trolig förklaring till den höga andelen krancykler med få stammar i tidsstudien.



Figur 4.6. Simulerade (blå prickar) och uppmätta trädhöjder (röda prickar;  $n = 4$  för gran,  $n = 19$  för björk,  $n = 5$  för övr löv) som funktion av dbh. I simuleringarna användes de höjdfunktioner som beskrivs i ekv. 4.4-4.6.

Iwarsson Wide (2009b) gjorde ingen uppdelning mellan momenten ”Kran ut”, ”Grip stam och avskilj” och ”Kranrörelse nästa träd”, så den totala tiden blev ca 117 min (alla krancykler med minst ett träd inkluderade) (tabell 4.2). Motsvarande simulerade tidsåtgång var ca 61 min. Det var alltså stor skillnad i tidsåtgång för dessa moment, medan skillnaderna var ganska små för ”Kran in och lägg” och ”Flytt mellan uppställningar”. Även om man räknar bort alla krancykler med få träd i aggregatet i tidsstudien, blir det en relativt stor skillnad för momenten ”Kran ut”, ”Grip stam och avskilj” och ”Kranrörelse nästa träd” (tabell 4.2).

Den arealrelaterade prestationen var 8,9 tim/ha vid simuleringarna och 14,2 tim/ha (alla krancykler) resp. 10,3 tim/ha (krancykler med tre eller färre träd ej medtagna) för tidsstudierna (tabell 4.2). Motsvarande torrsubstansrelaterade prestationer var 3,2 ton TS/tim i simuleringarna och från 1,9 ton TS/tim upp till 3,9 ton TS/tim vid tidsstudierna, beroende på hur man beräknar TS-mängden och vilka krancykler som tas med. I en annan tidstudie av Iwarsson Wide (2009a) med ett Ponsse-aggregat var prestationen 4,2 tim/ton TS (röjning, plock-och-fix-tid, störningar ej medtagna). Vid denna studie var genomsnittligt dbh högre (6,2 cm) jämfört med tidsstudien i Iwarsson Wide (2009b), medan stamtätheten var lägre (4 300 stammar/ha).

Tabell 4.2. Resultat från simuleringar och från tidsstudier av Iwarsson Wide (2009b)

	Simulering	Iwarsson Wide (2009b)
<i>Bestånd</i>		
Genomsnittligt dbh (cm)	4,1	4,1
Standardavvikelse dbh (cm)	2,6	2,7
Stamtäthet (st/ha)	6990	6 990
Areal (ha)	0,168	0,168
Mängd torrsubbans (ton TS)	4,83	4,64 <sup>d</sup> /6,69 <sup>e</sup>
<i>Avverkningsdata</i>		
Antal avverkade stammar	1174	1 174
Antal uppställningsplatser	28	29
Antal krancykler <sup>a</sup>	231	270/256/221/167
<i>Tidsåtgång</i>		
Kran ut (min) <sup>a, b</sup>	15,4	116,6/114,1/103,9/84,3
Grip stam och avskilj (min)	20,0	
Kranrörelse nästa träd (min)	25,2	
Kran in och lägg (min) <sup>a, c</sup>	21,6	22,1/21,1/18,8/14,5
Flytt mellan uppställningar (min)	7,4	4,9
Summa (min) <sup>a</sup>	89,6	143,6/140,1/127,6/103,7
<i>Prestation</i>		
Prestation, arearelaterad (tim/ha) <sup>a</sup>	8,9	14,2/13,9/12,6/10,3
Prestation, TS-relaterad (ton TS/tim) <sup>a</sup>	3,2	1,9 <sup>f</sup> 2,8 <sup>g</sup> /2,0 <sup>f</sup> 2,9 <sup>g</sup> /2,2 <sup>f</sup> 3,2 <sup>g</sup> /2,7 <sup>f</sup> 3,9 <sup>g</sup>

<sup>a</sup> För studien av Iwarsson Wide (2009b) visas resultaten då det fanns minst en stam/minst två stammar/minst tre stammar/minst fyra stammar i krancykeln.

<sup>b</sup> Värdena för studien av Iwarsson Wide (2009b) gäller momenten "Kran ut", "grip stam och avskilj" och "Kranrörelse nästa träd".

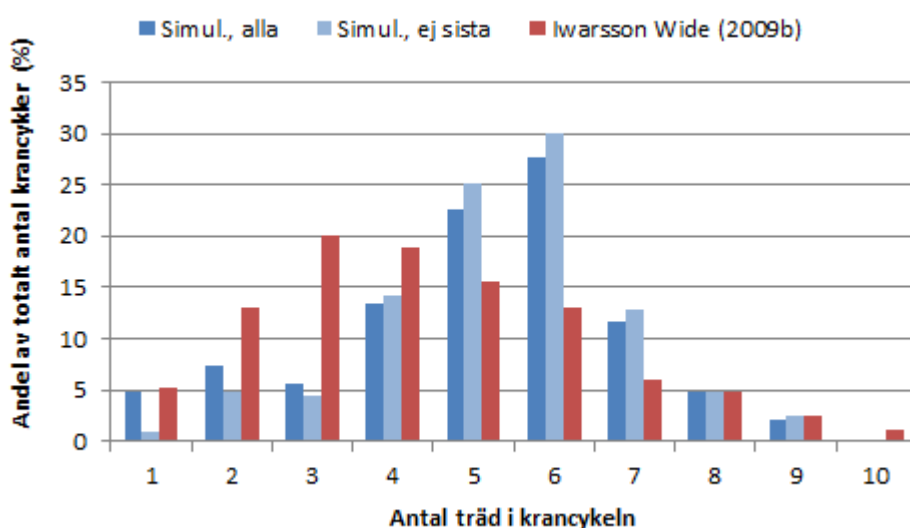
<sup>c</sup> Inkl "ordna hög".

<sup>d</sup> Mängden TS baseras på dataunderlaget från de 17 provytorna.

<sup>e</sup> Detta värde baseras på dataunderlaget från de 30 provytorna. I rapporten av Iwarsson Wide (2009b) anges dock 6,22 ton TS.

<sup>f</sup> Dessa prestationer baseras på en TS-mängd på 4,64 ton TS.

<sup>g</sup> Dessa prestationer baseras på en TS-mängd på 6,69 ton TS.



Figur 4.7. Andel av totala antalet krancykler som funktion av antalet träd i krancykeln för alla simulerade krancykler (231 st), alla simulerade krancykler utom den sista på varje uppställningsplats (203 st) samt vid tidsstudien av Iwarsson Wide (2009b) (270 st).

#### 4.2.2. Studien av Edlund (2009)

I studien av Edlund (2009) undersöktes röjning längs en skogsväg i Örnsköldsviks kommun (63°44'N, 18°26'E) med en Rottne H8 utrustad med ett ackumulerande aggregat av typen Naarva-grip 1500-25 EH. En handburen dator (Husky Hunter) användes i tidsstudien för att registrera typ av arbetsoperation i en tidsupplösning på hundradelar av en minut (centiminuter). Föraren var van vid både maskintypen och att arbeta med väggkantsröjning.

Tre ”behandlingar” ingick i studien (Edlund, 2009); ”klen”, ”mellan” och ”grov”, med genomsnittliga brösthöjdsdiametrar på 2,1 cm, 3,2 cm samt 3,8 cm. I denna validering användes data från behandlingen ”grov”. Denna behandling innehöll tre parceller som vardera hade en längd på 50 m och ett avverkningsdjup på 2,5 m. I varje parcell lades provtagningsbälten ut var femte meter. Dessa bältesytor hade en bredd på 1,0 m, och här mättes trädens brösthöjdsdiameter (på bark), höjd, antal (stamdensitet) och andelen barr- och lövträd (tabell 4.3). Med uppgifter om *dbh* och höjd beräknades mängden torrsubstans inom varje parcell med hjälp av Ulvcronas biomassafunktion (Edlund, 2009). Efter flisning av träden vägdes flisen på en fordonsvåg (ett lass från varje parcell), och tre prover togs ur varje lass för torkning i torkugn och efterföljande bestämning av fukt- och torrsubstanshalter.

Tabell 4.3. Brösthöjdsdiameter (*dbh*), höjd, antal stammar per ha, andel barr- och lövträd samt mängden torrsubstans per ha för de röjda parcellerna A, B och C. Data baseras på tio provtagningsbälten (varje bälte var 1 m x 2.5 m) i varje parcell (Edlund, 2009).

Par-cell <sup>a</sup>	<i>Dbh</i>		Höjd		Antal stammar		Torrsubstans	
	Medel <sup>b</sup> (cm)	Std- avv <sup>c</sup> (cm)	Medel (m)	Std- avv <sup>c</sup> (m)	Medel (per ha)	Andel barr-/ lövträd (%)	Ulvcrona <sup>d</sup> (ton TS/ha)	Vägd <sup>e</sup> (ton TS/ha)
A	5.7	4.6	5.5	3.3	11,900	28/72	162.5	104.3
B	3.7	4.4	3.4	2.9	14,400	33/67	115.1	111.8
C	3.0	3.4	3.5	2.5	24,800	13/87	117.2	76.1

<sup>a</sup> varje parcell var 50 m x 2.5 m = 0.0125 ha.

<sup>b</sup> aritmetiskt medelvärde av diametern på bark i brösthöjd.

<sup>c</sup> standardavvikelse.

<sup>d</sup> beräknad torrsubstanshalt enligt Ulvcronas biomassafunktion (Edlund, 2009):  $DM = 10^{a+b*lndbh*lnh}$ , där  $a = -0.61492$  och  $b = 0.190018$  för tall,  $a = -0.35641$  och  $b = 0.166383$  för gran samt  $a = -0.65123$  och  $b = 0.194774$  för björk.

<sup>e</sup> Stammarna flisades i november, tre månader efter skörd. Flislasten vägdes på fordonsvåg efter flisningen vid varje sträcka. Tre prover togs från varje last för torkning i ugn före bestämning av fukt- och torrsubstanshalt.

De Weibull-parametrar  $\beta^*$  och  $\alpha^*$  (tabell 4.4) som användes i beståndsgenerators baserades på de uppmätta medelvärdena  $\bar{x}$  och standardavvikelseerna  $s$  (tabell 4.3), vilka användes i en numerisk lösare (Weibullfördelningen, 2020). Värdet på  $\gamma$  sattes till 0 och ett maximalt *dbh*-värde (25 cm) användes i beståndsgenerators för att undvika extrema värden (beståndens ålder uppskattades till ca 30 år (Edlund, 2009)). Eftersom det inte fanns några uppgifter om trädslag i parcellerna (endast uppgifter om andelen barr-/lövträd var tillgängliga), antogs det att barrträden bestod av tall och att lövträden bestod av björk, och att de statistiska uppgifterna om *dbh* gällde för båda dessa trädslag. Det antogs också att det inte fanns några luckor och fällningshinder i beståndet. Eftersom antalet träd ( $n$ ) var relativt begränsat (särskilt för parcellerna A och B) (tabell 4.4), simulerades tio replikationer i beståndsgenerators. Den replikation vars medelvärde och standardavvikelse var närmast de uppmätta värdena användes sedan i skördesimuleringarna.

I skördesimuleringarna användes de data om tidsåtgång m.m. som finns beskrivna för basscenariot i avsnitt 3.2. I simuleringarna antogs att parcellerna A, B och C skördades efter varandra i en enda skördeoperation (i tidsstudien skördades troligen parcellerna var för sig, men resultatet, uttryckt i tidsåtgång per ha, redovisas totalt för hela behandlingen ("grov"), d.v.s. totalt för alla parceller).

Tabell 4.4. Indata och resultat från beståndsgeneratoren: antal träd i varje parcell (med arean 0.0125 ha), använda Weibull-parametrar och resulterande medelvärden och standardavvikelser för brösthöjdsdiametern (dbh) samt mängden torrsbstans (TS) (simuleringsresultaten gäller för den replikation vars dbh-värden (medel och SA) var närmast de uppmätta värdena

Parcell	Antal träd <sup>a</sup> <i>N</i>	Weibull-parametrar			Simuleringsresultat		
		$\beta^*$	$\alpha^*$	$\gamma$	Dbh, medel (cm)	Dbh, std- avv. (cm)	TS-innehåll (ton TS/ha)
A	149	6.12	1.25	0	5.6	4.8	126.1
B	180	3.38	0.84	0	3.7	4.4	92.2
C	310	2.82	0.88	0	3.0	3.4	101.0

<sup>a</sup> beräknades med hjälp av parcellarean 0.0125 ha och de stamantal per ha som redovisas i tabell 4.3.

Den simulerade totala tidsåtgången var något lägre (ca 7 %) jämfört med den uppmätta (tabell 4.5). Tiden för "Kran Ut", "Ackumulering, avskiljning" och "Kran in" var något lägre jämfört med tidsstudien, medan tiden för "Ompositionering" var något högre. Eftersom antalet kran-cykler var högre vid simuleringen, blir tiden för varje moment av "Kran ut" och "Kran in" ännu kortare. Den mängd torrsbstans som beräknades vid simuleringen ligger närmare den invägda flismängden än den mängd som Edlund (2009) uppskattade med hjälp av Ulvcronas biomassafunktion. Eftersom det inte är känt hur stora TS-förlusterna var mellan avverkning och vägning av lastad flis, är det svårt utifrån denna jämförelse att avgöra vilken precision och tillförlitlighet den använda biomassamodellen har.

Tabell 4.5. Uppmätta (Edlund, 2009) och simulerade prestandadata

	Uppmätta resultat	Simulerade resultat
Tidsåtgång		
Kran ut (min)	9,0	7,4
Ackumulering, avskiljning (min)	25,9	25,1
Kran in (min)	12,6	10,8
Ompositionering (min)	4,3	4,8
Totalt (min)	51,8	48,0
Totalt (G <sub>0</sub> tim/ha)	23,0	21,3
Antal kran-cykler	103	111
Skördad mängd (ton TS)	4,93 <sup>a</sup> /3,65 <sup>b</sup>	3,99 <sup>c</sup>
Maskinprestanda (min/ton TS) <sup>d</sup>	10,5/14,2	12,0

<sup>a</sup> beräknad biomassamängd enl. Ulvcronas biomassafunktion (Edlund, 2009) (se tabell 4.3).

<sup>b</sup> beräknad TS i flisat och bortforslat material (vägning på fordonsvåg och ugnstorkning av prover) (se tabell 4.3).

<sup>c</sup> beräknad biomassamängd enl. biomassafunktionerna i Appendix A.

<sup>d</sup> skördeprestanda baserat på biomassamängderna i ovanstående rad.



#### 4.2.3. Slutsatser

Valideringarna visade att det kan bli stora skillnader i beräknad mängd torrsubstans per arealenhet, beroende på dataunderlaget (t.ex. medelvärden och standardavvikelser för  $dbh$ ) och valet av höjd- och biomassa-funktioner. Om det är stor spridning i  $dbh$ , d.v.s. en stor standardavvikelse, ökar sannolikheten för att man kan få några enstaka stora träd. Ett fåtal stora träd kan påverka avverkningsvolymen mycket starkt. Med de höjd- och biomassa-funktioner som används i simuleringsmodellen, får t.ex. en björk med  $dbh = 3,0$  cm en TS-mängd på 1,3 kg, medan en björk med dubbelt så stor  $dbh$  (6,0 cm) får en TS-mängd på 6,3 kg, dvs i detta fall ger en fördubbling av  $dbh$  nästan en femfaldig ökning av mängden torrsubstans. Vid låga värden på kvoten  $\bar{x}/s$ , och därmed låga värden på formparametern  $\alpha$  i en Weibull-fördelning, kan det därför vara motiverat att införa ett max-värde på  $dbh$ , men då riskerar man å andra sidan att (det aritmetiska) medelvärdet på  $dbh$  för de simulerade träden sjunker.

Valet av höjdfunktioner kan också få en viss betydelse för det slutliga resultatet. Av figurerna 2.3-2.5 framgår det att trädens höjd, som funktion av brösthöjdsdiametern, kan variera ganska mycket. Även valet av biomassa-funktioner har betydelse, se t.ex. figur 2.17. Den använda positioneringsmetoden har sina svagheter; exempelvis tar den inte explicit hänsyn till trädens kronutbredning, och metoden för att bestämma minsta tillåtna avstånd mellan träden bygger på en enstaka studie under tyska förhållanden. Valideringarna indikerar dock att bestånds-generatorn är ett tillräckligt bra verktyg med tanke på studiens syfte.

Det finns ett stort antal faktorer som påverkar den faktiska avverkningsprestationen i ett bestånd, och som kan vara svåra att beakta i en simuleringsmodell. Några exempel på sådana faktorer är förarens skicklighet och erfarenhet, beståndets faktiska homogenitet med avseende på trädslag, ålder och täthet, hinder i form ledningsstolpar eller träd som ska sparas, terrängens beskaffenhet, vädret och eventuell snöförekomst, markens bärighet, maskinens tekniska/funktionella status, mängden torrsubstans som finns i ett aggregat när det är "fullt" (dvs. när krancykeln ska avslutas), etc. En viktig tidsfaktor som framkom vid jämförelsen med Iwarsson Wides (1999b) studie var röjning av sly med  $dbh = 0$ . Det är naturligt att man gör en allmän röjning/"tillsnyggning" av t.ex. åkerrenen eller vägkanten när man avverkar de lite större stammarna med  $dbh > 0$ . En slutsats från valideringarna av skördearbetet var att behålla den modellstruktur och de prestationsparameterar som finns beskrivna i avsnitt 3.2 för basscenariot, men att också i högre grad beakta tiden för röjning ( $t_{röjn}$ ) i simuleringarna när så är relevant.

## 5. RÖJNING AV OLIKA BESTÅNDSTYPER LÄNGS VÄGKANTER

I detta kapitel beskrivs 29 olika beståndstyper som har genererats och sedan visualiserats i programvaran Heureka. Bestånden är 25 m långa och 5 m breda och kan antas vara lokaliserade längs vägkanter, men också längs t.ex. åker- eller betesmarkskanter som ska röjas. Avverkningen av dessa typbestånd har sedan simulerats med syfte att ta fram data om prestanda och kostnader. Om man t.ex. har en väggkant som ska röjas, kan man alltså uppskatta skördekostnaderna för hela röjningssträckan genom att sätta ihop ett antal typbestånd som täcker hela den valda sträckan, och sedan addera kostnaderna för alla valda typbestånd.

### 5.1. Beskrivning av typbestånd

Varje typbestånd har en areal på 0,0125 ha (längd 25 m, röjningsdjup 5 m). Stamtätheterna varierar från 2 500 stammar/ha upp till 20 000 stammar/ha (tabell 5.1). Ett typbestånd har även en stamtäthet på 300 stammar/ha med syfte att representera ett mycket glest bestånd (bestånd 10,0/7,0/0,3; beteckningarna betyder här medel-*dbh*/standardavvikelse-*dbh*/antal stammar per ha i hundratal). Det antogs att trädslagsfördelningen var 30 % tall, 5 % gran och 65 % björk för samtliga beståndstyper, och att den maximala brösthöjdsdiametern var 30 cm. Inga på förhand bestämda luckor fanns i bestånden, förutom eventuella slumpmässiga luckor som uppstod vid positioneringen. Det antogs också att det inte fanns några röjningshinder i form av stolpar, träd som ska sparas, etc.

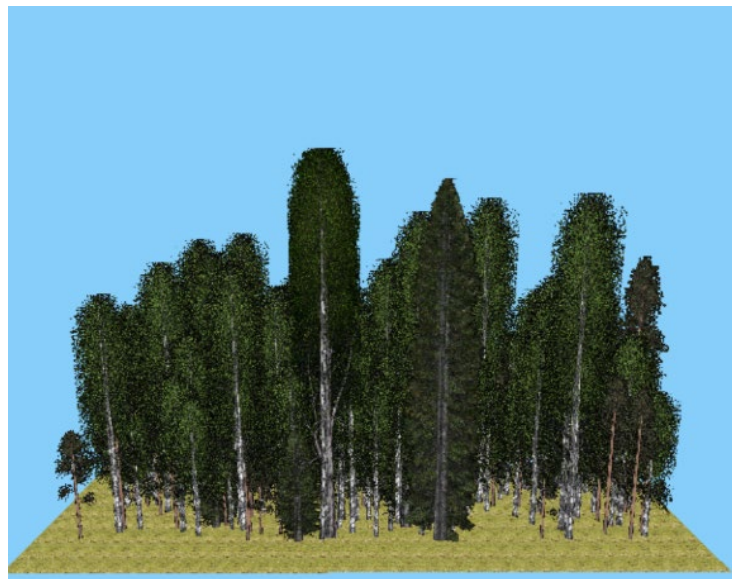
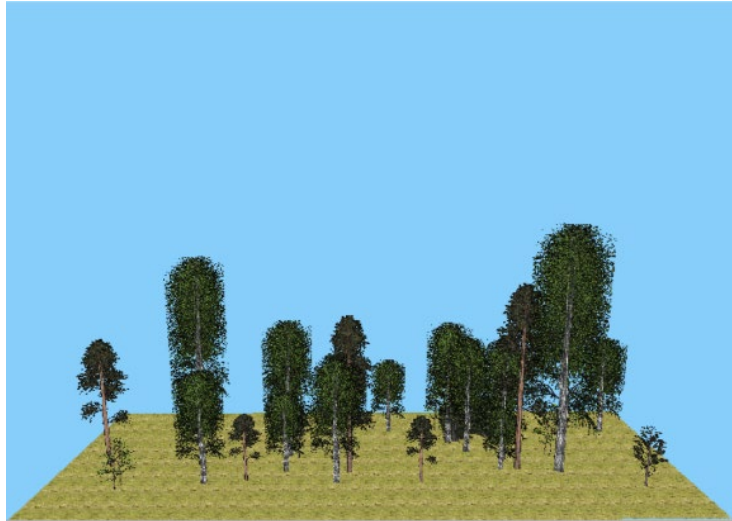
För varje bestånd bestämdes ett förväntat medelvärde och en förväntad standardavvikelse för brösthöjdsdiametern (tabell 5.1). Weibull-fördelningar användes i beståndsgeneratoren för att ta fram brösthöjdsdiametrarna, med parametrar som togs fram enligt den metod som beskrivs i avsnitt 2.2. Eftersom antalet träd inom varje yta var relativt litet, gjordes flera simuleringar (replikationer) för att få fram en replikation med de förväntade värdena på medelvärde och standardavvikelse med en tolerans på max  $\pm 0.05$  cm (tabell 5.1). En särskild algoritm konstruerades i beståndsgeneratoren för att snabbt hitta den sökta replikationen (antalet replikationer varierade från 2 till 1 330 (för beståndstypen 10,0/7,0/0,3 i tabell 5.1)). För t.ex. beståndsytan 4,0/3,0/25 med 31 träd behövdes 122 replikationer (en analogi: om man säger att medellängden för alla tolvåringar i ett land är 150 cm med standardavvikelsen 25 cm, så kan man behöva leta ganska länge i landet innan man hittar en klass på 31 elever som råkar ha precis dessa värden (inom en viss tolerans)).

Ett viktigt skäl till att använda hög precision för toleransnivån var att skördeprestationerna ofta relateras till mängden avverkad torrsubstans. Vid valideringarna i avsnitt 4 framkom det att inte bara medelvärdet på *dbh*, utan också standardavvikelsen (spridningen) har mycket stor inverkan på den totala mängden torrsubstans. I detta sammanhang kan det därför vara lämpligt att också använda begreppet grundtytvägd brösthöjdsdiameter (tabell 5.1), som tar hänsyn till trädens tvärsnittareor (som i sin tur påverkar mängden torrsubstans) i förhållande till grundytan. Grundytan är summan av trädens tvärsnittsarea i brösthöjd (1,3 m) och anges i  $m^2$  per ha.

Exempel på visualiserade beståndsytor visas i figur 5.1 (visualiseringar av alla typbestånd finns i Appendix B).

Tabell 5.1. Beskrivning av de olika beståndstyperna. Beståndsbeteckningen avser medel-dbh/standardavvikelse-dbh/stamtäthet i hundratal.  $D_{gv}$  betecknar grundtyevägd medeldiameter. "Utfall" avser de värden som erhöles från den simuleringsreplikation som resulterade i ett värde i intervallet "mål"  $\pm 0.05$  cm

Bestånds- typ	Stam- täthet (st/ha)	Antal sim. stammar	Medel- dbh, mål (cm)	Medel- dbh, utfall (cm)	Stdavv- dbh, mål (cm)	Stdavv- dbh, utfall (cm)	$D_{gv}$ (cm)	Simulerad mängd TS (kg)
4,0/3,0/25	2 500	31	4,00	3,97	3,00	3,00	8,2	134
4,0/3,0/50	5 000	63	4,00	3,97	3,00	2,99	7,9	275
4,0/3,0/75	7 500	94	4,00	3,98	3,00	2,99	7,8	413
4,0/3,0/100	10 000	125	4,00	3,97	3,00	2,97	8,0	546
4,0/3,0/150	15 000	188	4,00	3,98	3,00	2,98	8,0	825
4,0/3,0/200	20 000	250	4,00	3,98	3,00	3,02	8,2	1 095
4,0/4,5/25	2 500	31	4,00	3,95	4,50	4,51	12,7	223
4,0/4,5/50	5 000	63	4,00	4,00	4,50	4,48	14,9	432
4,0/4,5/75	7 500	94	4,00	3,95	4,50	4,50	13,6	673
4,0/4,5/100	10 000	125	4,00	4,00	4,50	4,52	13,6	903
4,0/4,5/150	15 000	188	4,00	4,02	4,50	4,46	12,4	1 328
4,0/4,5/200	20 000	250	4,00	3,99	4,50	4,48	13,6	1 727
7,0/4,0/25	2 500	31	7,00	7,05	4,00	3,97	10,7	393
7,0/4,0/50	5 000	63	7,00	7,00	4,00	3,95	11,0	796
7,0/4,0/75	7 500	94	7,00	7,05	4,00	4,03	11,4	1 187
7,0/4,0/100	10 000	125	7,00	6,97	4,00	3,97	11,1	1 558
7,0/4,0/150	15 000	188	7,00	6,96	4,00	4,05	11,1	2 361
7,0/5,0/25	2 500	31	7,00	6,98	5,00	4,97	13,6	453
7,0/5,0/50	5 000	63	7,00	6,96	5,00	5,00	13,2	936
7,0/5,0/75	7 500	94	7,00	6,98	5,00	5,00	13,1	1 404
7,0/5,0/100	10 000	125	7,00	6,96	5,00	4,95	13,4	1 814
7,0/5,0/150	15 000	188	7,00	6,98	5,00	4,98	13,4	2 723
10,0/5,0/25	2 500	31	10,00	9,97	5,00	4,97	13,8	789
10,0/5,0/50	5 000	63	10,00	9,97	5,00	4,99	14,2	1 591
10,0/5,0/75	7 500	94	10,00	9,97	5,00	5,02	14,9	2 367
10,0/7,0/0,3	300	4	10,00	9,98	7,00	6,98	16,4	108
10,0/7,0/25	2 500	31	10,00	9,95	7,00	6,96	19,1	933
10,0/7,0/50	5 000	63	10,00	9,98	7,00	6,97	18,8	1 826
10,0/7,0/75	7 500	94	10,00	9,98	7,00	7,02	18,4	2 876



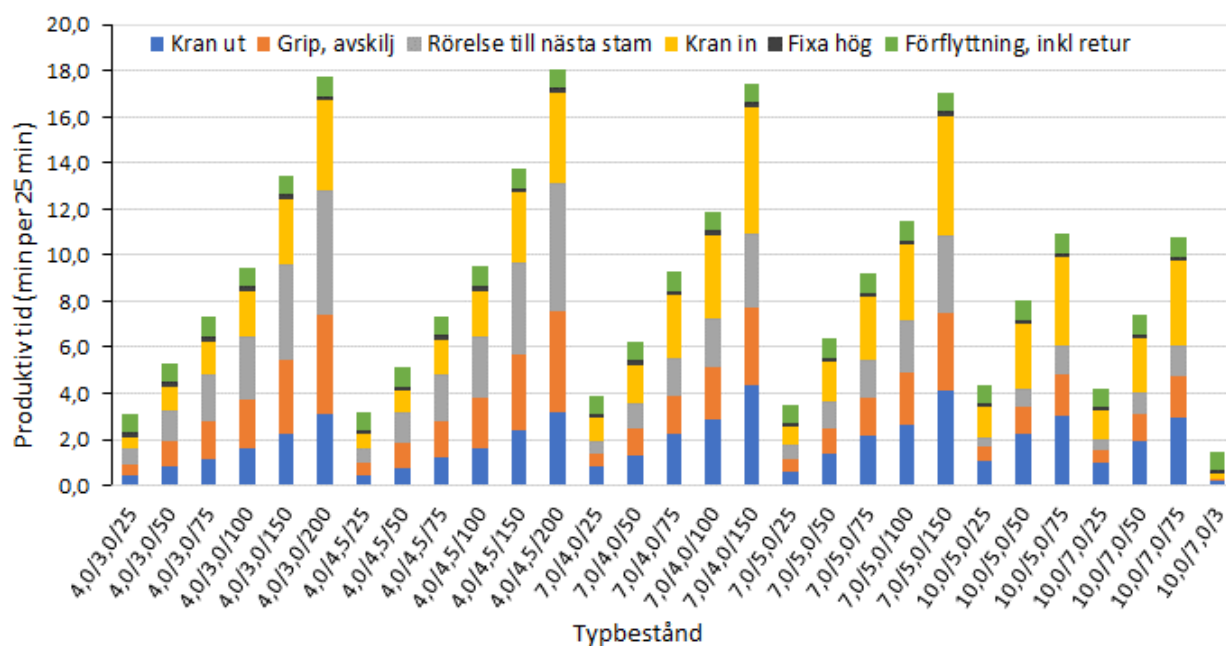
*Figur 5.1. Heureka-visualisering av beståndet 4,0/3,0/25 (medel-dbh/standardavvikelse-dbh/antal stammar per ha i hundratal) med en beräknad TS-mängd i stammar och grenar på 134 kg (ca 11 ton TS/ha) (överst), beståndet 7,0/4,0/150 med 2 360 kg TS (ca 189 ton TS/ha) (mitten) samt beståndet 10,0/7,0/0,3 med 108 kg TS (ca 9 ton TS/ha) (nederst).*

## 5.2. Resultat - prestanda vid skörd av typbestånden

Avverkningen av varje typbestånd simulerades för 10 st 25 m-bitar i rad för att undvika kanteffekter, varefter prestanda och kostnader beräknades per 25 m-bit. Endast avverkningen analyserades, och enbart den tid som maskinen var i beståndet inkluderades, exempelvis ingick ej tid för transport till och från beståndet. När det gäller tiden för förflyttning, ingick både tiden för förflyttning mellan uppställningsplatserna och tiden för förflyttning tillbaka till beståndscentrum efter sista uppställningsplatsen.

Vid avverkningssimuleringarna var värdet på  $BL_x$  5,5 m (kranens maximala räckvidd i x-led, se figur 3.3), då det antogs att den hade en maximal effektiv räckvidd på 9 m och att avståndet fällare-röjningsyta var max 2 m. I övrigt gäller alla de indata som finns beskrivna för grundscenariot i avsnitt 3.

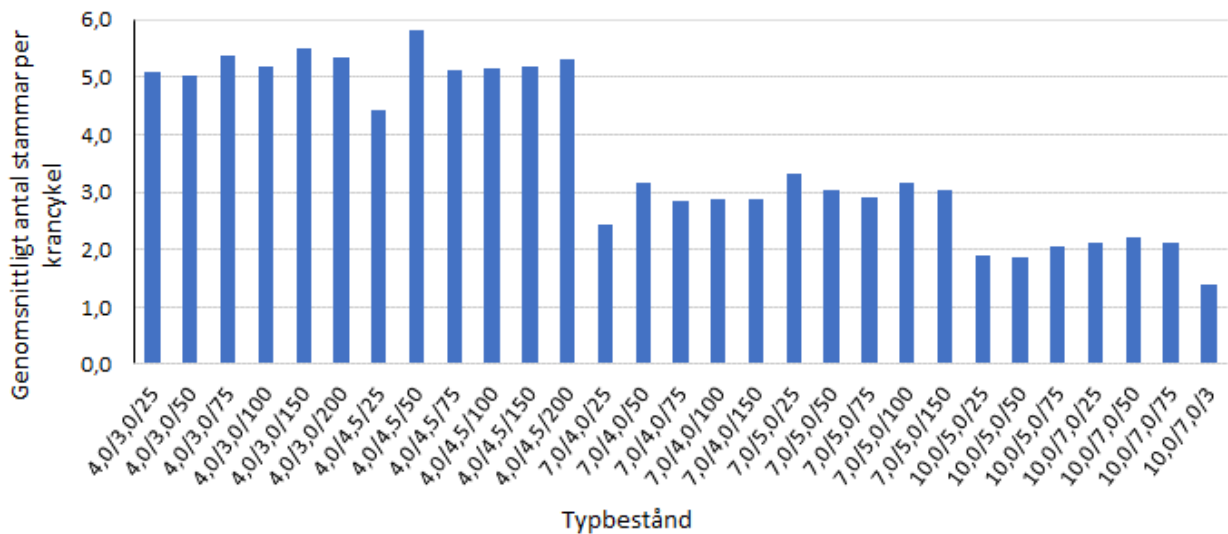
Den totala tidsåtgången vid avverkningen av de 29 typbestånden varierade starkt beroende på antalet stammar (figur 5.2). För bestånd med klana och täta stammar tog momentet ”rörelse till nästa stam” längst tid, medan momentet ”kran in” var mest tidskrävande för bestånd med grövre stammar. Antalet uppställningsplatser varierade från 20 till 23 (vid simulering av 10 ’bitar’ i rad) och tiden för framflyttning (i absoluta tal) skiljde därför inte nämnvärt mellan de olika beståndstyperna. För det mycket glesa beståndet (10,0/7,0/0,3) svarade dock ”förflyttning” för mer än hälften av den totala tidsåtgången (figur 5.2).



Figur 5.2. Tidsåtgång (produktiv tid;  $G_0$ -min per 25 m) för olika delmoment vid avverkning av typbestånden.

Antalet träd per krancykel är en viktig produktivitetsparameter. Ju fler stammar av en viss diameter som ett aggregat har vid tömning, desto högre kan produktiviteten bli. Det genomsnittliga antalet stammar per krancykel varierade från 1,4 till 5,8 (figur 5.3). Antalet stammar

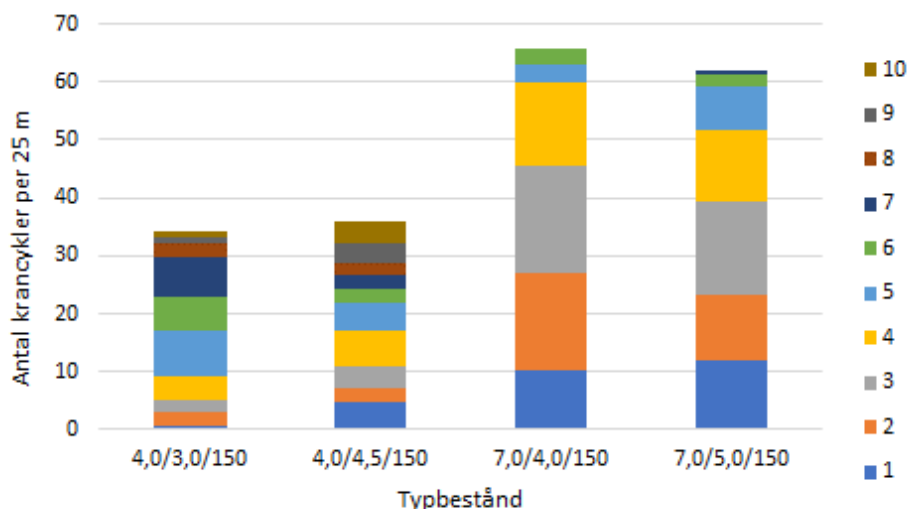
per krancykel var i genomsnitt runt fem för medel-*dbh* 4,0 cm, i genomsnitt runt tre för medel-*dbh* 7,0 cm och i genomsnitt ca två för medel-*dbh* 10,0 cm.



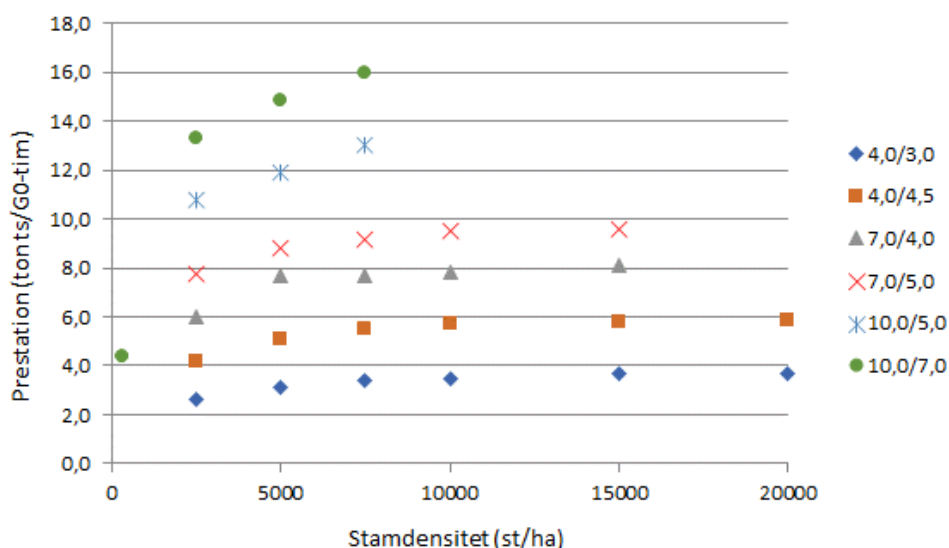
Figur 5.3. Genomsnittligt antal stammar per krancykel för de olika typbestånden.

Antalet krancykler kan variera stort, även för typbestånd med samma stamtäthet (figur 5.4). Skillnaderna är främst beroende av stammarnas brösthöjdsdiameter; både av medel-*dbh* och standardavvikelsen för *dbh*. Dessutom kan positioneringen av stammarna ha betydelse. Om det exempelvis är enstaka stammar kvar före förflyttning till nästa uppställningsplats, blir antalet stammar i den sista krancykeln av naturliga skäl också få. Av figur 5.4 framgår som väntat att bestånd med grövre stammar får högre andel krancykler med få stammar. För bestånden 7,0/4,0/150 och 7,0/5,0/150 fanns inga krancykler med fler än sex resp sju stammar, medan andelsfördelningen var mer jämn för de två bestånden med klenare stammar (figur 5.4). Eftersom antalet stammar i krancyklerna baseras på gjorda antaganden i modellen, har en känslighetsanalys gjorts för aggregatvolymen (se nedan).

Avverkningsmodellerna visade också som väntat att prestationen uttryckt i ton TS per produktiv timme ( $G_0$ -tim) är starkt beroende av stammarnas brösthöjdsdiameter och täthet (figur 5.5). Vid ca 10 000 stammar/ha tycks dock kurvan plana ut, medan en ökad diameter på träden i princip alltid är fördelaktigt. Det mycket glesa beståndet (10,0/7,0/0,3) innehöll en stor björk med *dbh* = 19,5 cm (figur 5.1), men trots ett stort virkesutbyte blev prestationen förhållandevis låg (figur 5.5), delvis p.g.a. att mycket tid, relativt sett, krävdes för förflyttningar (figur 5.2).

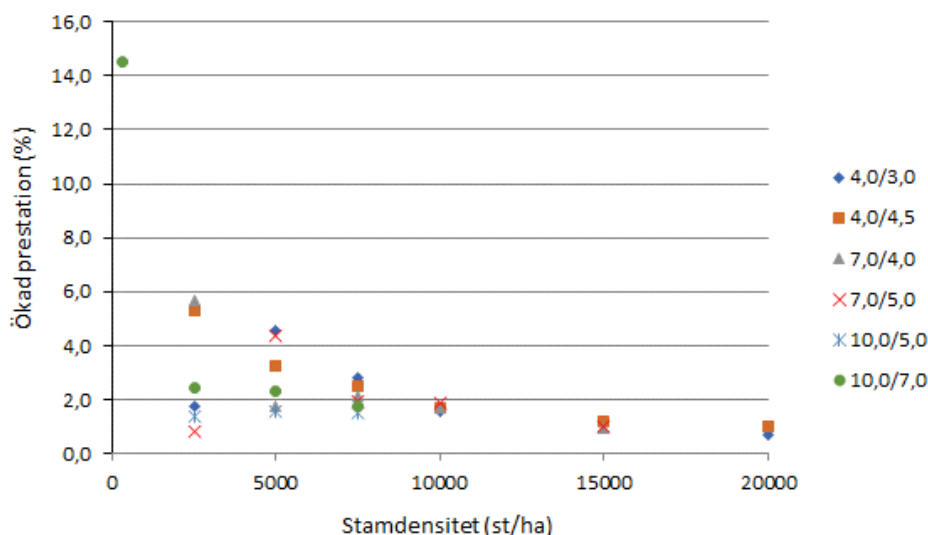


Figur 5.4. Antalet krancykler per 25 m röjningssträcka, beroende på antalet stammar i krancykeln, från en stam i krancykeln upp till tio stammar, för fyra olika typbestånd med samma stamtäthet (15 000 stammar/ha).



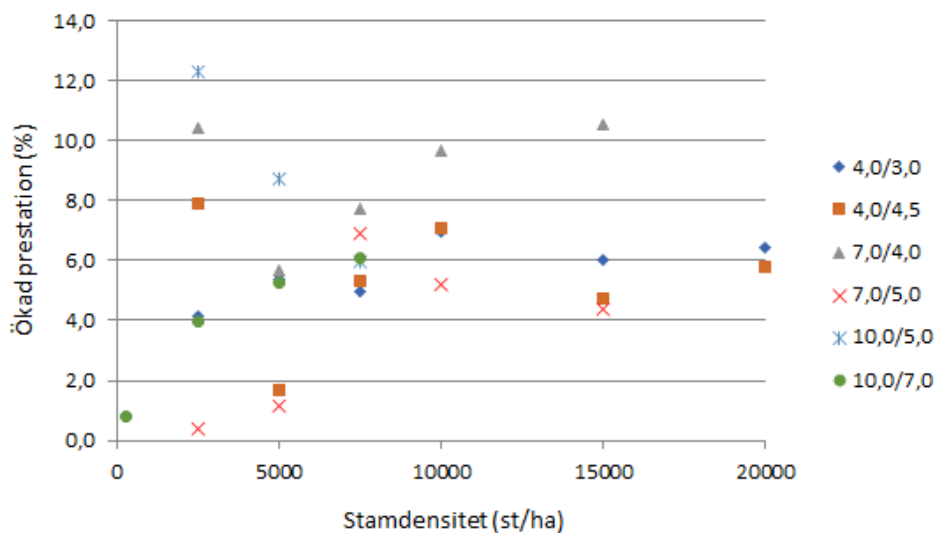
Figur 5.5. Avverkningsprestation i ton TS per produktiv timme (G0-tim) för typbestånden som funktion av stamdensiteten. Beteckningarna t.h. avser medel-dbh/standardavv.-dbh.

Känslighetsanalyser visade att en ökning av kranens räckvidd med 30 % ökade den genomsnittliga prestationen (alla typbestånd medtagna) med 2,6 %. För glesa bestånd (upp till ca 5000 stammar/ha) var bilden mer splittrad (figur 5.6). Denna splittrade bild kan troligen förklaras av slumpmässiga variationer, eftersom den tycks vara mer uttalad ju färre träd som står i bestånden (dessutom handlar det om enstaka procentenheter i skillnad). Man kan dock konstatera att längre räckvidd tycks ha mindre betydelse ju tätare stammarna står.



Figur 5.6. Procentuell förändring i prestation (baserat på ton TS/G<sub>0</sub>-tim) för de olika typbestånden när den effektiva kranlängden ökar med 30 % (till 7.15 m).

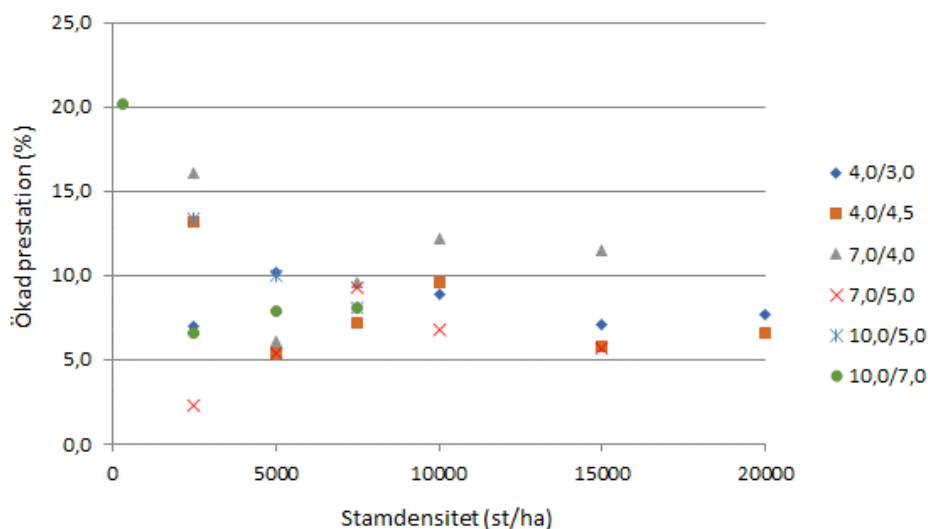
En ökning av fällaggregatets volymhållande förmåga (se antaganden i avsnitt 3.2) med 30 %, ökade prestationen med i genomsnitt 5,9 % (alla beståndstyper medtagna). Utifrån figur 5.7, är det dock svårt att se några entydiga samband mellan ökad prestation och stamtäthet/genomsnittlig (aritmetisk) brösthöjdsdiameter. En ökad aggregatvolym är fördelaktigt, men detta måste bl.a. vägas mot ett eventuellt ökat tidsbehov för kranrörelser mellan träden.



Figur 5.7. Procentuell förändring i prestation (baserat på ton TS/G<sub>0</sub>-tim) för de olika typbestånden när fällaggregatets volymhållande förmåga ökar med 30 % (se avsnitt 3.2).

Vid simuleringar med både 30 % längre räckvidd och 30 % större aggregatvolym, ökade prestationen med i genomsnitt (för alla typbestånden) 8,8 % (figur 5.8). Man kan notera att det fanns synergieffekter av dessa åtgärder för de glesa bestånden (300 resp 2500 stammar/ha), d.v.s. prestationsökningen var större när båda åtgärderna genomfördes samtidigt jämfört med om man summerar prestationsökningarna för åtgärderna var för sig.

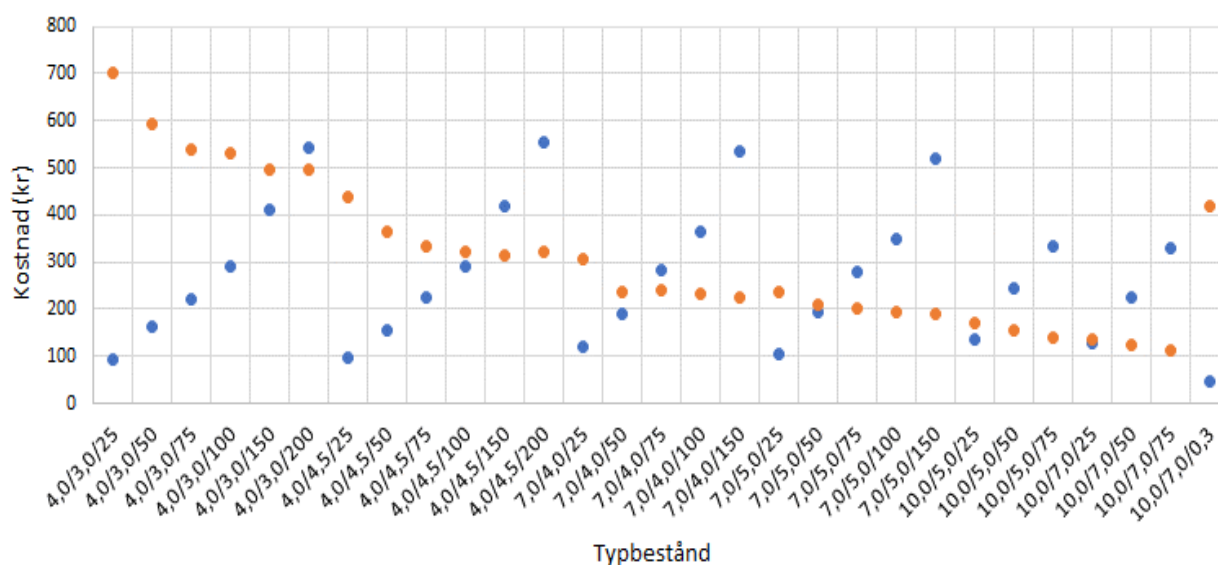




Figur 5.8. Procentuell förändring i prestation (baserat på ton TS/G<sub>0</sub>-tim) för de olika typbestånden när både kranens räckvidd och fällaggregatets volym ökar med 30 %.

### 5.3. Resultat - avverkningskostnader

Avverkningskostnaderna skilde sig markant mellan de olika typbestånden, både med avseende på kostnad per 25 m-bit och per avverkad mängd TS (figur 5.9). Simuleringarna av skördarens arbete för avverkning visade på ett tydligt samband mellan total kostnad och antalet stammar som avverkades. Däremot styrdes kostnaden per avverkat ton torrsubstans av en kombination av storlek på träd och antal träd som avverkades (lägst kostnad vid avverkning av ett stort antal grova träd och vice versa).



Figur 5.9. Kostnad för avverkning per 25 m (blå punkter) och per ton skördad TS (orange punkter) för de olika typbestånden. Tidsbehovet har här räknats om till G<sub>15</sub>-timmar (d.v.s. avbrott ingår i arbetstiden). Endast avverkning ingår; transporter/inställelsekostnader, skotning, flisning, m.m. är ej inräknat.

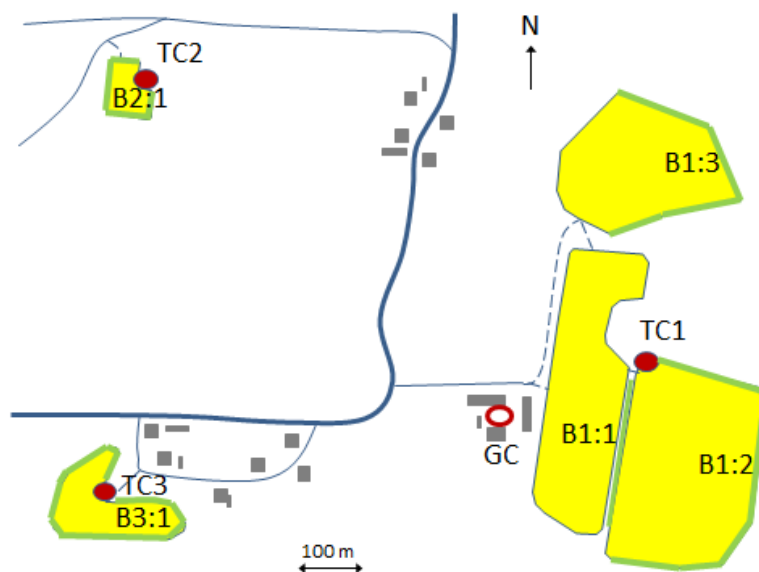
Siffror på prestanda och kostnader presenteras för varje typbestånd i Appendix B.

## 6. RÖJNING LÄNGS ÅKERMARKSKANTER – EN FALLSTUDIE

Syftet med analyserna i detta kapitel var att undersöka röjning av åkerkanter i ett gårds- perspektiv, d.v.s. i ett helhetsperspektiv för en enskild gård. En fallstudie har gjorts för en gård där röjning ska göras längs ett dike och längs kanterna på fyra odlingsfält. Jämförelser görs mellan olika strategiska val, t.ex. användning av en maskinkedja motsvarande det grundscenario som finns beskrivet i kapitel 3 och konventionell motormanuell röjning (röjsåg/motorsåg). Kostnaderna jämförs sedan med direkta intäkter från försäljning av slyflis och indirekta intäkter i form av ett ökat skördeutbyte på de fältkanter som röjs.

### 6.1. Systemöversikt och beståndsbeskrivning

I fallstudien ingick fem röjningsobjekt (en dikeskant och fyra åkerkanter) och tre traktcentra, där avläggarna var belägna (figur 6.1). Generellt var röjningsytorna (totalt 0,65 ha) ganska kraftigt igenväxta (totalt 5 912 stammar med ett totalt TS-innehåll på 41,5 ton). Simuleringar gjordes för både avverkning och skotning till avläggarna, och alla transporter ingick för dessa operationer. För att få en uppfattning om avstånden i figur 6.1, så var transportavståndet mellan gårdscentrum (GC) och traktcentrum 1 (TC1) 0,25 km, mellan TC1 och TC2 1,72 km, mellan TC2 och TC3 1,78 km och mellan TC3 och GC 0,81 km.



Figur 6.1. Översiktsbild för fallstudien med ett gårdscentrum (GC), tre traktcentra (TC1, TC2, TC3) (avläggsplatser) och fem röjningsbestånd (gröna linjer: B1:1 längs ett dike, 310 m x 1,5 m med två längre luckor i beståndet; B1:2 längs en åkerkant, 700 m x 3 m; B1:3 längs en åkerkant, 500 m x 3 m; B2:1 längs en åkerkant 260 m x 3 m med röjningshinder i form av 5 ekar; B3:1 längs en åkerkant 550 m x 3 m med röjningshinder i form av 6 elstolpar).

Bestånden genererades i beståndsgeneratormen med olika trädslagsfördelningar, stamdensiteter, och brösthöjdsdiametrar (se tabellerna 6.1-6.2). Röjningsytorna var rektangulära med samma (likformiga) sannolikhet över hela ytan ( $Z_R(x,y) = 1,00$ ), förutom för luckorna i bestånd B1:1

(figur 6.2). Beståndet B3:1 hade jämförelsevis många stammar och en stor grundtyevägd medeldiameter, vilket resulterade i en torrsubstansmängd som var betydligt större än i de andra beståndsyorna (tabell 6.2).

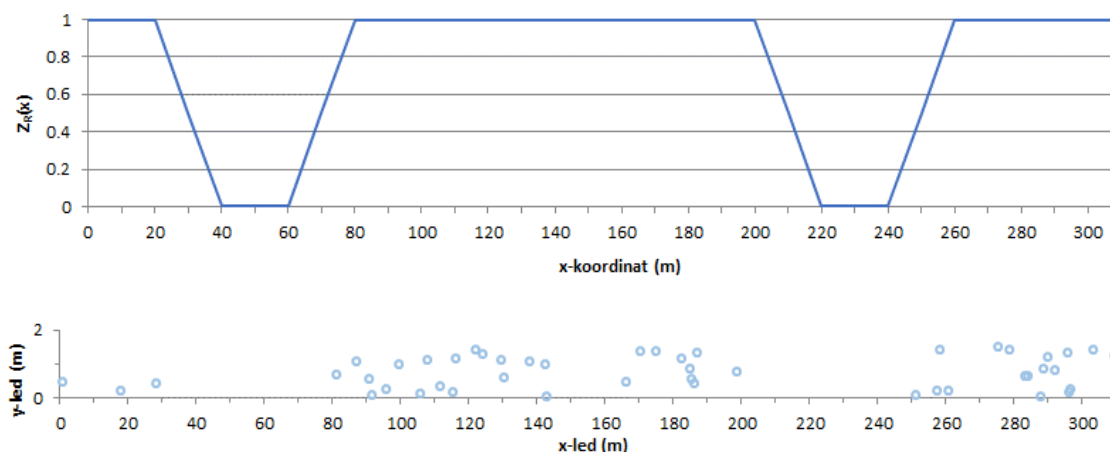
Tabell 6.1. Beskrivning av de fem simulerade röjningsbestånden

Be- stånd	Beskrivning	Trädslag	Stamdensitet (st/ha)
B1:1	Dike, 310 m x 1,5 m	Övr. löv 100 %, några större luckor	1 000
B1:2	Fältkant, 700 m x 3 m	Gran 5 %, björk 40 %, övr. löv 55 %	7 500
B1:3	Fältkant, 500 m x 3 m	Gran 10 %, björk 50 %, övr. löv 40 %	15 000
B2:1	Fältkant, 260 m x 3 m	Björk 40 %, övr. löv 60 %, hinder-5 ekar	5 000
B3:1	Fältkant, 550 m x 3 m	Björk 50 %, övr. löv 50 %, hinder-8 stolpar	10 000

Tabell 6.2. Sammanfattning av resultat från beståndsgenereringen

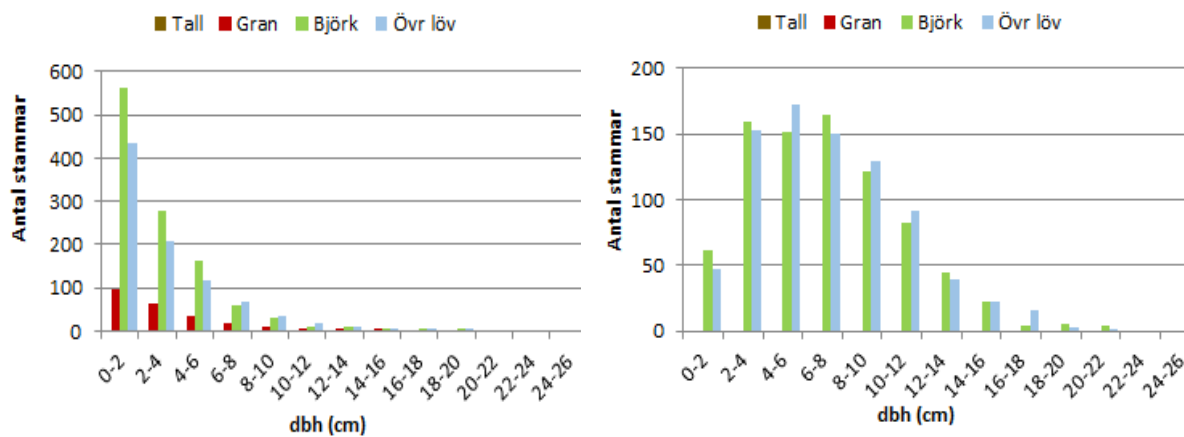
Be- stånd	Areal (m <sup>2</sup> )	Antal stammar	Medel- <i>dbh</i> (cm)	Standardavvi- kelse- <i>dbh</i> (cm)	Grundtyevägd medeldiameter (cm)	Mängd TS (ton)
B1:1	465	47	9,7	6,8	17,8	2,13
B1:2	2 100	1 575	3,9	2,8	7,7	6,70
B1:3	1 500	2 250	3,0	2,9	8,6	7,66
B2:1	780	390	5,0	3,0	8,3	2,61
B3:1	1 650	1 652	6,9	3,8	10,8	22,44
Summa	6 495	5 914	4,5 <sup>a</sup>			41,54

<sup>a</sup> medelvärde för 5 914 stammar.



Figur 6.2. Sannolikhetsfördelning för bestånd B1:1 i x-led ( $Z_R(x)$ ) (överst) och resulterande positionering av stammarna (enbart övrigt löv) (nederst) (obs, i nedre figuren är axlarna i x- och y-led ej skalensliga).

I beståndsgeneratoren antogs Weibull-fördelningens formparameter ( $\alpha$ ) vara 1,0 för alla trädslag i bestånd B1:3. Resultaten för brösthöjdsfördelningarna liknar därmed exponentiellt avtagande kurvor (figur 6.3), d.v.s. en mycket hög andel av stammarna hade en liten brösthöjdsdiameter. Formparametern för bestånd B3:1 antogs vara 1,8 för alla trädslag. När det gäller dessa kurvors utseende, kan man därför ana vissa likheter med normalfördelningar.



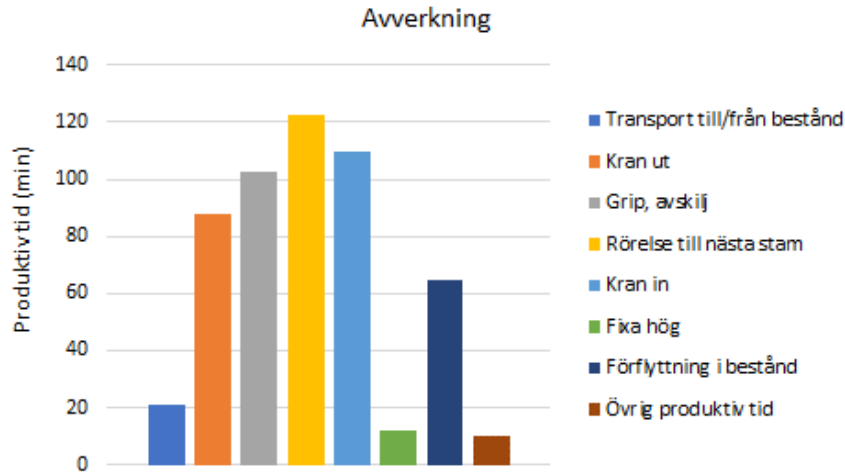
Figur 6.3. Fördelning av antalet stammar i olika dbh-klasser för bestånd B1:3 (t.v.) och bestånd B3:1 (t.h.).

## 6.2. Resultat - prestanda och kostnader

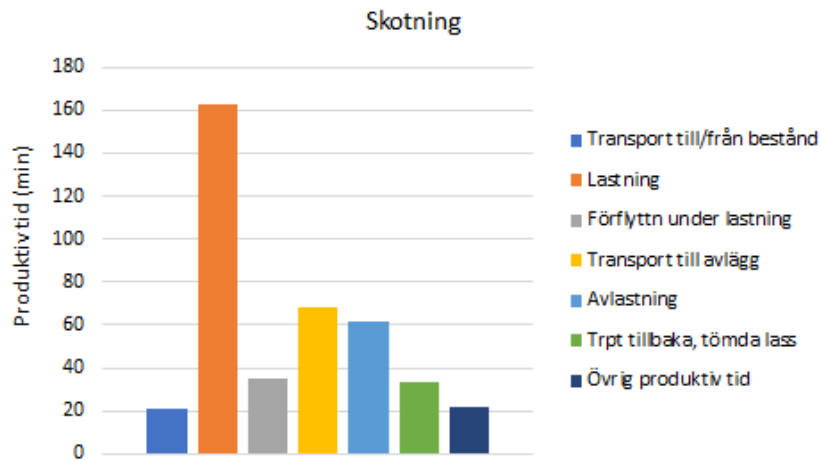
Simuleringar gjordes för avverkning och skotning av bestånden. All maskindata är samma som beskrivs för basscenariot i avsnitt 3.2. Eftersom bestånden endast är 1,5-3 m djupa, så antogs dock att den effektiva räckvidden ( $BL_x$ ) var 7,5 m. Dessutom ingår tid för förberedelser för varje påbörjat bestånd (2,0 min för fällaren och 1,0 min för skotaren) i simuleringarna. Dessa tidsbehov ingår i kategorin ”övrig produktiv tid” nedan. Prestanda uttrycks i produktiv tid ( $G_0$ ) medan kostnaderna baseras på total arbetstid inkl. avbrott kortare än 15 min per timme ( $G_{15}$ -tim).

Simuleringarna visade att avverkningsmaskinens andel av ”nyttigt” skördearbete (kran ut/in, kranrörelser mellan stammar, grip/avskilj) var förhållandevis hög (82 %) i förhållande till tiden för transporter, förflyttningar, m.m. (18 %) (figur 6.4). Även skotarens tid för lastning och avlastning visade på en relativt hög nyttjandegrad (figur 6.5), då andelen total tid för lastning och avlastning samt övrig produktiv tid var drygt 60 %. En förklaring är att traktcentra (avläggsplatserna) i detta fall låg nära de röjda bestånden. Totalt körde skotaren ut 17 lass med en genomsnittlig vikt på 2,4 ton TS (i simuleringarna var maxlasten 2,5 ton TS), vilket tyder på ett högt utnyttjande av skotarens lastvolym.

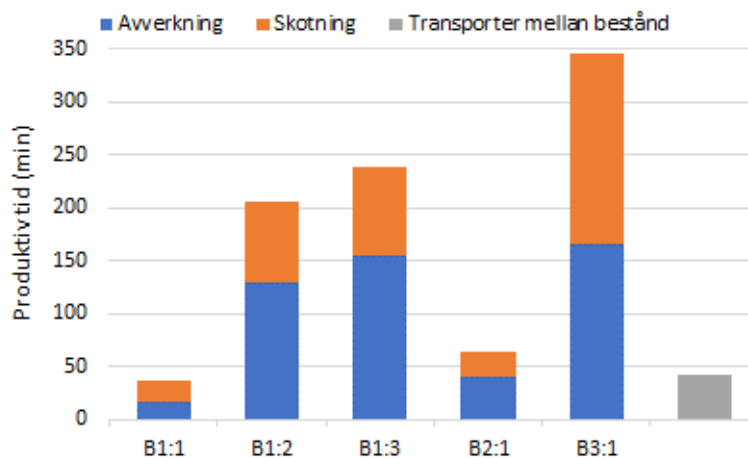
Andelen tid för avverkning och skotning för de enskilda bestånden visas i figur 6.6. Avverkningen stod för mer än hälften av det totala tidsbehovet för B1:2, B1:3 och B2:1, vilket speglar de lägre grundtyevägda medeldiametrarna för dessa bestånd jämfört med bestånden B1:1 och B3:1 (tabell 6.2). Antalet lastade grip, lossade grip och skotarlass från B1:1 var 22, 9 resp. 1, och från B3:1 var de 169, 96, resp 9. I relation till antalet stammar, var dessa värden högre jämfört med B1:2, B1:3 och B2:1, d.v.s. ett högre antal grip per lass för B1:1, följt av B3:1 (och sedan resten av bestånden), indikerar att B1:1 och B3:1 innehöll grövre stammar, vilket också stämmer enligt tabell 6.2. Den totala tiden för fällarens och skotarens förflyttningar mellan gårdscentrum och bestånden och mellan bestånden var 44 min (figur 6.6).



Figur 6.4. Fördelning av total produktiv tid ( $G_0$ -min) för averkning vid röjning på en gård med fem slybestånd längs åkerkanter.



Figur 6.5. Fördelning av total produktiv tid ( $G_0$ -min) för skotning vid röjning på en gård med fem slybestånd längs åkerkanter.



Figur 6.6. Produktiv tid ( $G_0$ -min) för avverkning och skotning av de simulerade bestånden, samt total tid för transporter mellan bestånd och från/till gårdscentrum.

Prestationen, uttryckt i ton TS per G<sub>0</sub>-tim, var högst för bestånd B3:1 (tabell 6.3). Detta gäller både för avverkning och skotning, men också för skördad mängd i förhållande till total tidsåtgång för avverkning och skotning. Prestationen var också hög för bestånd B1:1, trots att här t.ex. fanns större luckor (figur 6.2). Förekomsten av luckor har alltså mindre betydelse, så länge som biomassauttaget är tillräckligt högt mellan luckorna. Den totala tiden för avverkning och skotning av alla bestånd, inkl. förflyttningar mellan bestånden, var 8,85 G<sub>0</sub>-tim resp. 6,75 G<sub>0</sub>-tim.

Tabell 6.3. Prestation (ton TS per G<sub>0</sub>-tim) för avverkning och skotning, samt för båda dessa arbetsoperationer tillsammans (d.v.s mängd biomassa i avlägg i relation till total tid för avverkning och skotning)

	B1:1	B1:2	B1:3	B2:1	B3:1
Avverkning	7,7	3,1	3,0	3,8	8,1
Skotning	6,2	5,2	5,6	6,6	7,5

Utifrån antagandet att kostnaden för skördaren var 1 200 kr per timme och att kostnaden för skotaren var 950 kr per timme (avsnitt 3.4), blev de totala kostnaderna för avverkning och skotning i detta fall 16 220 kr resp. 8 510 kr (tabell 6.4). Den totala kostnaden fram till värmeverk, inkl. kostnader för transporter och sönderdelning, blev 45 510 kr. Intäkterna för den sålda flisen blev 44 720 kr. Detta innebär att åtgärden innebar en total förlust på 790 kr. Beståndet B3:1 gav dock en vinst (tabell 6.4), och dessutom svarade detta bestånd för i grova drag hälften av både kostnaderna och intäkterna. Även bestånd B1:1 gav en vinst, trots att stammarna stod mycket glest (1000 stammar/ha), men å andra sidan var de grövre (medel-*dbh* 9,7 cm) än för övriga bestånd (tabell 6.2).

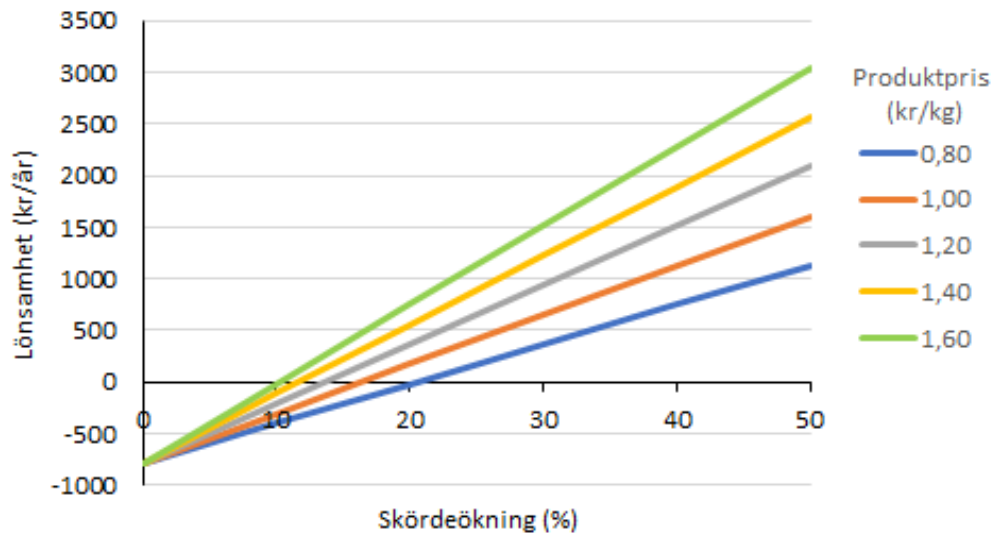
Kostnaden för motormanuell röjning är ca 4 000 kr/ha (avsnitt 3.4). Om man skulle röja motormanuellt (utan att sälja biomassan), skulle förlusten (d.v.s. kostnaden) bli ca 2 600 kr (tabell 6.4). Det är därför i detta fall bättre ekonomi i den maskinella avverkningen.

Tabell 6.4. Kostnader och intäkter (kr) för olika moment och bestånd.

	B1:1	B1:2	B1:3	B2:1	B3:1	Totalt
Avverkning	557	3 987	4 821	1 451	5 408	16 224
Skotning	464	1 612	1 781	637	4 012	8 506
Sönderdelning	539	1 697	1 939	661	5 685	10 522
Transport till industri	525	1 655	1 891	644	5 543	10 259
Summa kostnader	2 085	8 951	10 433	3 392	20 649	45 510
Intäkt	2 290	7 213	8 243	2 808	24 163	44 718
<b>Netto, mekaniserad avverkning</b>	<b>205</b>	<b>-1 738</b>	<b>-2 190</b>	<b>-584</b>	<b>3 514</b>	<b>-792</b>
Alternativkostnad, röjning	-186	-840	-600	-312	-660	-2 598

Om man antar att skörden av t.ex. vårkorn skulle öka med 30 % på en yta fem meter ut från de röjda fältkanterna (totalt ca 1,2 ha) p.g.a. minskad beskuggning och bättre odlingsförhållanden, skulle intäkterna öka med ca 1 700 kr/år (4 ton/ha, kornpris 1,2 kr/kg). Detta skulle göra slyskörden lönsam redan efter ett år, inkl. flisbränsleförsäljning, vid mekaniserad skörd. Om produktpriset antas vara 1,60 kr/kg, skulle röjningen vara lönsam vid en skördeökning på

10 %, och vid ett produktpris på 0,80 kr/kg, skulle röjningen vara lönsam vid en skördeökning på 20 % (figur 6.7). En slutsats är att vid skörd av sly är det viktigt att beakta både direkta och indirekta intäkter.



Figur 6.7. Lönsamhet för röjningen då hänsyn tas till procentuell skördeökning och produktpris (0,80-1,60 kr/kg) för vårkorn. Beräkningarna baserar sig på en röjningsförlust på 790 kr (totala flisintäkter 44 720 kr – totala röjningskostnader 45 510 kr), skördeökning på en total yta av 1,2 ha och en grundavkastning på 4 000 kg/ha.

## 7. DISKUSSION

Många känner igen bilden av att det svenska landskapet har blivit alltmer igenväxt av sly under de senaste decennierna. De potentialstudier som har gjorts bekräftar också detta; exempelvis ökade bruttomängden biomassa i sly med ca 26 TWh från år 1985 till år 2010 (Emanuelsson m.fl., 2014) (värdet gäller igenväxande åker, ängs- och betesmark, småbiotop åker, väg- och järnvägskanter samt kraftledningsgator). Den stående bruttomängden har uppskattas till ca 86 TWh, och den ekonomiskt och praktiskt uttagbara mängden till 5-10 TWh per år under de närmaste 10-20 åren (Andersson m.fl., 2016). Som en jämförelse kan nämnas att användningen av grot (grenar och toppar) som bränsle f.n. är 8-9 TWh per år och den uppskattade framtida potentialen 27-30 TWh per år (Skär, 2019). Som nämnts i avsnitt 1.1, finns det också många fördelar med ett väl avvägt uttag av sly; t.ex. när det gäller sysselsättning, miljö/emissioner och biologisk mångfald.

Eftersom det finns ”oändligt” många varianter på hur ett slybestånd kan se ut, t.ex. när det gäller trädslag, brösthöjdsdiameter, stamdensitet, geografisk utbredning (sträcka och röjningsdjup), röjningshinder (t.ex. i form av elstolpar), terrängförhållanden, etc., har en beståndsgenerator konstruerats som kan ta sådana faktorer i beaktande. Därmed blir det också möjligt att simulera och analysera en stor mängd olika röjningsförhållanden. I denna rapport har det getts några exempel på beståndstyper som kan studeras. De största osäkerheterna i beståndsgeneratoren torde gälla minsta tillåtna avstånd mellan olika stammar, särskilt vid mycket olikåldriga bestånd med trädslag med olika kronutbredning. I detta projekt användes data för lärk och bok från en studie i Tyskland (Pretzsch, 1997). Mer avancerade positioneringsmodeller har utvecklats (Kokkila, m.fl., 2002; Kershaw m.fl., 2010; Grabarnik & Särkkä, 2009; Lister & Leites, 2018), men den metod som har använts här bedömdes ge tillräcklig precision utifrån studiens syfte.

Fyra viktiga skillnader mellan röjning av sly och avverkning av skog handlar om: i) beståndens innehåll – d.v.s. slyträden/buskar står ofta mycket tätare och mängden TS per stam är ofta mycket mindre, ii) beståndens areal och form – slybestånden är ofta långa och smala och har en liten areal totalt sett, iii) beståndens homogenitet – det kan finnas stor variation inom slybestånden när det gäller trädslag och ålder och det kan vara stora luckor mellan träden/trädansamlingarna, iv) beståndens lokalisering – slybestånden är ofta utspridda i landskapet. Å andra sidan är terrängförhållandena ofta bättre vid röjning av sly; exempelvis kan maskinerna många gånger hålla sig på vägen vid röjning längs vägar, och vid röjning på f.d. åkermark, betesmark och ängsmark, kan marken ofta vara lätt framkomlig.

Vid utvecklingen av den dynamiska simuleringsmodellen har särskild hänsyn tagits till ovan nämnda faktorer. Exempelvis beaktas stamdensitetens inverkan genom att alla stampositioner är kända, och därmed kan avståndet och tidsåtgången för kranens förflyttningar mellan stammarna simuleras på ett detaljerat sätt. Maskinernas förflyttningar mellan uppställningsplatser och mellan bestånden och traktcentra kan också simuleras på ett detaljerat sätt. Denna helhets-syn; att inte bara beakta själva avverkningen eller själva skotningen, utan också transport-avstånden i landskapet, ökar modellens användbarhet vid studier av olika system för slyskörd.

Verifieringen och valideringen visade att den dynamiska simuleringsmodellen kan anses vara tillförlitlig, men att det också finns osäkerheter som är svåra att ta hänsyn till, t.ex. när det gäller tidsåtgången för röjning av sly och buskar som inte ger något bränsleutbyte. Vid valideringsstudier kan även förarens erfarenhet, skicklighet och ”dagsform” spela stor roll. Fernandez-Lacruz m.fl. (2013) hänvisar till några studier (Kärhä m.fl., 2004; Purfürst & Erler,



2011; Purfürst & Lindroos, 2011) som har visat att det kan förekomma stora skillnader mellan olika förarens produktivitet. Oavsett de osäkerheter som kan finnas vid valideringsstudier, kan dock den framtagna modellen vara till stor nytta i jämförande studier, där analyser av relativa förändringar är av större vikt än absoluta (och exakta) tal på prestanda och tidsåtgång. Den dynamiska simuleringsmodellen är dock inte ”allmänt” tillgänglig, eftersom det krävs en särskild programvarulicens och en viss programmeringskunskap för att kunna använda den.

I denna studie har röjning längs vägar och åkerkanter varit i fokus. Fernandez-Lacruz m.fl. (2013) rapporterar om en studie utanför Knivsta, där man röjde en kraftledningsgata med hjälp av en skördemaskin utrustad med ett ackumulerande aggregat, och en skotare som samlade upp stammarna och transporterade dem till avlägg. Bestånden avverkades i 13 försöksrutor, som dominerades av lövträd (90 %), och där den genomsnittliga tätheten var 16 000 stammar/ha, den genomsnittliga brösthöjdsdiametern 3,2 cm och den genomsnittliga trädhöjden 4,2 m. Skördeprestandan varierade från 43 G<sub>0</sub>-min/ton TS för träd med den genomsnittliga höjden 3,5 m, till 20 G<sub>0</sub>-min/ton TS för trädhöjden 6,1 m. Med avseende på genomsnittet för hela avverkningsområdet (stamtäthet 16 000 per ha, *dbh* = 3,2 cm, *h* = 4,2 m), var prestationen i genomsnitt 33 G<sub>0</sub>-min/ton TS. Den 25 m-bit som kommer närmast dessa förhållanden i vår studie var 4,0/3,0/150, där prestationen var högre (16,2 G<sub>0</sub>-min/ton TS (3,7 ton TS/G<sub>0</sub>-tim), se Appendix B) än i den studerade kraftledningsgatan. Kraftledningsgator ska enligt regelverket röjas med jämna mellanrum, och medel-*dbh* och därmed biomassauttaget per ha blir därför ofta lägre jämfört med t.ex. väggkantsröjning. Dessutom blir körmönstret annorlunda (i Fernandez-Lacruz m.fl. (2013) studie var t.ex. röjningsytans bredd 50 m) och terrängförhållandena är också oftast sämre.

Kraftledningsgator röjs vanligen motormanuellt, där kostnaden kan vara i storleksordningen 4 000-5 000 kr/ha (se bl.a. Fernandez-Lacruz m.fl. (2013)). Fernandez-Lacruz m.fl. (2013) visade i sin studie att mekaniserad röjning, då biomassan tas tillvara som bränsle, ger en lägre nettoförlust (ca -4 500 kr) än motormanuell röjning vid en trädhöjd på ca 6,0 m, vilket motsvarar en brösthöjdsdiameter på ca 5,2 cm (figur 2.5). Detta resultat är i linje med vad som har framkommit i denna studie (se kapitel 6), d.v.s. att det finns en brytpunkt vid medel-*dbh* kring 5 cm då mekaniserad skörd ger högre lönsamhet än motormanuell röjning.

I detta projekt har utgångspunkten varit en hanteringskedja bestående av en separat skördemaskin och en separat skotningsmaskin. I Finland har man testat skörd av sly med hjälp av en s.k. ”harwarder”, som både avverkar och transporterar stammarna till avlägget (Laitila & Väätäinen, 2020). Jämfört med ett två-maskinssystem, kan harwarder-maskinen vara särskilt lämplig när beståndsyterna är små och utspridda i landskapet, samtidigt som skotningsavståndet (sträckan som skotaren kör med tomt respektive fullt lass) är kort. Resultaten i studien visade att stubbdiametern och avstånden till avläggen var viktiga faktorer för den totala prestandan. Laitila och Väätäinen (2020) testade också skörd med hjälp av en s.k. spiral-klippare, som bl.a. är mindre energikrävande än en sågkedja. Spiral-klipparen fungerade bra och hade en produktivitet på 0,19-0,61 ha per G<sub>0</sub>-tim, men det fanns en tydlig produktivitetsminskning när den genomsnittliga stubbdiametern sjönk från 3,0 till 4,0 cm. Laitila och Väätäinen (2020) redovisar inga kostnader, men med vissa modifikationer i den befintliga simuleringsmodellen, skulle det vara möjligt att simulera och sedan kostnadsberäkna liknande skördesystem (harwarder med spiral-klippare) för olika beståndstyper under svenska förhållanden.

Vid slyskörd är det viktigt att också beakta de indirekta vinster i form av ökade intäkter eller minskade kostnader som röjningen innebär. I kapitel 6 visades att en ökad skörd längs

åkerkanter p.g.a. mindre beskuggning och snabbare upptorkning av åkerjorden kan ha en avgörande betydelse för åtgärdens lönsamhet. Rövning på betesmarker kan göra att man berättigas gårdsstöd/miljöersättningar, och rövning längs vägar ökar vägens livslängd genom att vägbanken får en bättre dränering. Skattningen av denna typ av effekter är dessvärre behäftade med stor osäkerhet. Detta bör dock inte vara skäl för att inte ta dem i beaktande.

Simuleringarna av olika typbestånd i kapitel 5 ger ett underlag för användarna av det kalkylverktyg som har tagits fram i projektet och som finns tillgängligt på Skogforsks hemsida: [www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se). Genom att kombinera ihop olika 25 m-bitar och sedan lägga in egna värden (timkostnader, transportavstånd, etc) i kalkylverktyget, kan man beräkna prestation och kostnader för det aktuella fallet. Det kan vara svårt att välja de mest lämpliga typbestånden utifrån de verkliga bestånd som ska avverkas, bl.a. beroende på att man saknar detaljerade data om de verkliga bestånden. Men genom att utgå från bilder (Appendix B) och enkla beskrivningar av typbestånden (täthet, genomsnittlig brösthöjdsdiameter, etc.), bör man ändå kunna få en någorlunda god uppfattning om hur stora kostnaderna kommer att bli. Eftersom vi har tagit fram relativt många typbestånd (i detta fall för vägkantsrövning), finns det också möjligheter att välja olika snarlika typbestånd och på så sätt göra känslighetsanalyser. Därmed kan man få en känsla för hur prestationer och kostnader kan variera i verkligheten.

## 8. SLUTSATSER

De fem viktigaste slutsatserna i projektet var:

- Den framtagna beståndsgeneratoren är ett användbart redskap för att ta fram fiktiva, men ändå verklighetstroga, beståndstyper för skörd av sly.
- Dynamisk simulering av slyskörd är ett effektivt sätt att jämföra olika skördesystem, och valideringarna visade att den modell som har tagits fram i detta projekt är tillräckligt tillförlitlig med tanke på modellens syfte. Med hjälp av modellen kan prestationen för en rad olika skördealternativ analyseras och utvärderas.
- Med utgångspunkt från de typbestånd som har tagits fram inom projektet, kommer kalkylverktyget, som finns på Skogforsks hemsida ([www.skogforsk.se](http://www.skogforsk.se)), ge goda möjligheter att uppskatta kostnaderna för rövning av sly längs vägar och åkerkanter.
- Lönsamheten för slytäkt är låg, och det är därför viktigt att tänka sig för innan beslut tas när det gäller val av maskinsystem (t.ex. maskinellt eller motormanuellt) och avverkningstidpunkt (t.ex. i år eller om fem år för att få ett högre biomassautbyte).
- I många fall uppstår betydande indirekta värden vid slyskörd. Det är dock svårt att kvantifiera dessa värden, men även bedömningar med stor osäkerhet är bättre än att avstå från bedömningar.

## LITTERATUR

- Aedo-Ortiz, D.M., Olsen, E.D. & Kellog, L.D. 1997. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: software evaluation. *Forest Products Journal*, 47, 36-41. Citerad av: Eliasson, L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science*, 45, 26-34.
- Almquist, A. 1973. *Simulation of logging machines*. Bulletin 9:136. Logging Research Foundation. Sweden.
- Andersson, R., Emanuelsson, U., Ebenhard, T., Eriksson, L., Hansson, P-A., Hultåker, O., Lind, T., Nilsson, D., Ståhl, G., Forsberg, M., & Iwarsson Wide, M. 2016. *Landsomfattande slytäkt – potential, hinder och möjligheter. Kortversion av en rapport*. CBM:s skriftserie nr 100. Centrum för biologisk mångfald (CBM), Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Asikainen, A. 1995. *Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems*. Academic Dissertation, Research Notes 38:86. Faculty of Forestry, University of Joensuu, Finland.
- Bailey, R.L. & Dell, T.R. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science*, 19, 97-104. Cited by: Shifley, S. & Lentz, E. 1985. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. *Forest Ecology and Management*, 13, 195-203.
- Berg, S., Bergström, D. & Nordfjell, T. 2014. Simulating conventional and integrated stump- and round-wood harvesting systems: a comparison of productivity and costs. *International Journal of Forest Engineering*, 25, 138-155.
- Bergström, D., Bergsten, U., Nordfjell, T. & Lundmark, T. 2007. Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica*, 41, 137-147.
- Bergström, D., Fernandez-Lacruz, R., Forsman, M., Lundbäck, J., Nilsson, Å. & Bredberg, C. 2015. *Slutrapport, Skog, Klimat & Miljö - ett projekt i Norr- och Västerbotten 2012-2014*. Länsstyrelsen Västerbotten.
- Borges, J.G., Nordström E.M., Garcia-Gonzalo, J., Hujala T. & Trasobares, A. (Eds.). 2014. *Computer-based tools for supporting forest management. The experience and the expertise world-wide*. Report of Cost Action FP 0804 Forest Management Decision Support Systems (FORSYS). Institutionen för skoglig resurshushållning, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå. ISBN: 978-91-576-9236-8.
- Brunberg, T. 2004. *Underlag till produktionsnormer för skotare*. Redogörelse från Skogforsk nr 3. Skogforsk, Uppsala.
- Brunberg, T. 2014. *Skogsbränslets metoder, sortiment och kostnader 2013*. Skogforsks webbresultat Nr 74-2014. Tillgänglig på: <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2014/Skogsbranslets-metoder-sortiment-och-kostnader-2013/> [2020-10-31]
- Claesson, S., Sahlén, K. & Lundmark, T. 2001. Functions for biomass estimation of young *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula spp.* from stands in northern Sweden with high stand densities. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16:2, 138-146, DOI: 10.1080/028275801300088206.
- Crookston, N.L. & Dixon, G.E. 2005. The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49, 60–80.
- Di Fulvio, F., Bergström, D., Kons, K. Nordfjell, T. 2012. Productivity and profitability of forest machines in the harvesting of normal and overgrown willow plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33, 25-37.

- Ebenhard, T., Forsberg, M., Lind, T., Nilsson, D., Andersson, R., Emanuelsson, U., Eriksson, L., Hultåker, O., Iwarsson Wide, M. & Ståhl, G. 2017. Environmental effects of brushwood harvesting for bioenergy. *Forest Ecology and Management*, 383, 85-98.
- Edlund, M. 2009. *Produktivitet och lönsamhet vid skogsbränsleuttag längs skogsbilvägar*. Arbetsrapport 243. Institutionen för skoglig resurshushållning, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Ehnström, B. & Holmer, M. 2009. *Sälg – livets viktigaste frukost*. CBM:s skriftserie 33. Centrum för biologisk mångfald (CBM), Uppsala. ISBN 978-91-89232-43-3.
- Eliasson, L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science*, 45, 26-34.
- Eliasson, L. & Lageson, H. 1999. Simulation study of a singlegrip harvester in thinning from below and thinning from above. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 589-595.
- Eliasson, L. & Lundström, H. 2011. *Skotning av färsk och hyggestorkad grot*. Arbetsrapport från Skogforsk nr 755. Skogforsk, Uppsala.
- Emanuelsson, U., Ebenhard, T., Eriksson, L., Forsberg, M., Hansson, P-A., Hultåker, O., Iwarsson Wide, M., Lind, T., Nilsson, D., Ståhl, G. & Andersson, R. 2014. *Landsomfattande slytäkt – potential, hinder och möjligheter*. Rapport CBM, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. 172 p.
- Energimyndigheten. 2017. *Energiläget i siffror 2017*. Tillgänglig på: <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2017/nu-finns-energilaget-i-siffror-2017/> [2017-09-28].
- Energimyndigheten. 2020. *Trädbränsle och torvpriser, per år exklusive skatt, från och med 1993, kronor/MWh fritt förbrukare, löpande priser*. Tillgänglig på: [http://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Tr%c3%a4dbr%c3%a4nsle-%20och%20torvpriser/Tr%c3%a4dbr%c3%a4nsle-%20och%20torvpriser/EN0307\\_2.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=c0291d9a-3700-4190-aa2b-ffd02b1a7e22](http://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Tr%c3%a4dbr%c3%a4nsle-%20och%20torvpriser/Tr%c3%a4dbr%c3%a4nsle-%20och%20torvpriser/EN0307_2.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=c0291d9a-3700-4190-aa2b-ffd02b1a7e22) [2020-09-02].
- Fernandez-Lacruz, R., Di Fulvio, F., & Bergström, D. 2013. Productivity and profitability of harvesting power line corridors for bioenergy. *Silva Fennica*, 47, artikel id 904.
- Goulet, D.V., Iff, R.H. & Sirois, D.L. 1979. Tree-to-mill forest harvesting simulation models: Where are we? *Forest Products Journal*, 29, 50-55.
- Grabarnik, P. & Särkkä, A. 2009. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions. *Ecological Modelling*, 220, 1232-1240. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.02.021.
- Grönlund, Ö. & Eliasson, L. 2019. Birch shelterwood removal – harvester and forwarder time consumption, damage to understory spruce and net revenues. *International Journal of Forest Engineering*, 30, 26-34.
- Han, Y-Y., Wu, B-G., Wang, K-Y., Guo, E-Y., Dong, C. & Wang, Z-B. 2016. Individual-tree form growth models of visualization simulation for managed *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 341-350.
- Huang, S., Ramirez, C., McElhaney, M. & Evans, K. 2018. F3: Simulating spatiotemporal forest change from field inventory, remote sensing, growth modeling, and management actions. *Forest Ecology and Management*, 415-416, 26-37. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.02.026.
- Huisman, M. 2001. *Reglering av vedartad vegetation utmed järnvägar och vägar – en litteraturstudie över kunskapsläget*. Rapport 247. Institutionen för lantbruksteknik, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. Tillgänglig på: <http://pub.epsilon.slu.se/3815/> [2020-09-30].

- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management*, 207, 5-18.
- Iwarsson Wide, M. 2009a. *Skogsbränsleuttag i vägkanter – Prestationsstudie, uttag av skogsbränsle i vägkant med Ponsse Dual med EH25*. Arbetsrapport 2009:696. Skogforsk, Uppsala.
- Iwarsson Wide, M. 2009b. *Skogsbränsleuttag i vägkanter, prestationsstudie - uttag av skogsbränsle i vägkant med Bracke C16*. Arbetsrapport 2009:692. Skogforsk, Uppsala.
- Iwarsson Wide, M. 2009c. *Skogsbränsleuttag med Bracke C16. Bränsleuttag med Bracke C16 i tall- respektive barrblandskog*. Arbetsrapport 2009:682. Skogforsk, Uppsala.
- Iwarsson Wide, M. 2009d. *Teknik och metod Ponsse EH25. Trädbränsleuttag med Ponsse EH25 i kraftledningsgata*. Skogforsk, Uppsala.
- Iwarsson Wide, M., Olofsson, K., Wallerman, J., Sjödin, M., Torstensson, P. O., Aasland, T., Barth, A. & Larsson, M. 2013. *Effektiv volymuppskattning av biomassa i vägkanter och ungskogar med laserdata*. Arbetsrapport 2013:804. Skogforsk, Uppsala.
- Jacobson, S., & Iwarsson Wide, M. 2012. *FLISavFLIS*. Tillgänglig på: <https://www.skogforsk.se/produkter-och-evenemang/verktyg/flisavflis/> [2018-10-08].
- Johansson, T. 1999a. Biomass equations for determining fractions of pendula and pubescent birches growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy*, 16, 223-238.
- Johansson, T. 1999b. Biomass equations for determining fractions of European aspen growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy*, 17, 471-480.
- Johansson, T. 2000. Biomass equations for determining fractions of common and grey alders growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy*, 18, 147-159.
- Johansson, C. 2011. *Lokalt producerad bioenergi vid ekologisk uthållig parkskötsel – exemplet Bulltofta rekreationsområde i Malmö*. Rapport 2011:1. Jordbruk – odlingssystem, teknik och produktkvalitet. Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Sweden. Tillgänglig på: [http://pub.epsilon.slu.se/5849/1/johansson\\_c\\_110311.pdf](http://pub.epsilon.slu.se/5849/1/johansson_c_110311.pdf) [2020-08-15].
- Jundén, L., Bergström, D., Servin, M. & Bergsten, U. 2013. Simulation of boom-corridor thinning using a double-crane system and different levels of automation. *International Journal of Forest Engineering*, 24, 16-23.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P. & Sturrock, D.T. 2007. *Simulation with Arena*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, Boston, USA.
- Kershaw Jr, J. A., Richards, E. W, McCarter, J. B. & Oborn, S. 2010. Spatially correlated forest stand structures: A simulation approach using copulas. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 120-128.
- Kokkila, T., Mäkelä, A. & Nikinmaa, E. 2002. A method for generating stand structures using Gibbs marked point process. *Silva Fennica*, 36(1), 265-277.
- Kuitto, P.J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. *Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus*. [Mechanized cutting and forest haulage]. Metsäteho Report 410. 38 p. På finska med engelsk sammanfattning.
- Kärhä, K., Rönkkö, E., Gumse, S-I. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 15, 43-56.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2020. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads. *Silva Fennica*, 54, no. 5, article id 10379. DOI: 10.14214/sf.10379.

- Law, A.M. & Kelton, W.D. 1991. *Simulation, modeling and analysis*. McGraw-Hill. New York, USA.
- Linkevičius, E., Borges, J.G. Doyle, M., Pülzl, H., Nordström, E-M., Vacik, H., Brukas, V., Biber, P., Teder, M., Kaimre, P., Synek, M. & Garcia-Gonzalo, J. 2018. Linking forest policy issues and decision support tools in Europe. *Forest Policy and Economics* (in press). Tillgänglig på: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.05.014> [2020-08-15].
- Lister, A.J. & Leites, L.P. 2018. Modeling and simulation of tree spatial patterns in an oak-hickory forest with a modular, hierarchical spatial point process framework. *Ecological Modelling*, 378, 37–45. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.03.012>. [2020-08-10].
- Marklund, L-G. 1988. *Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige*. Rapport 45. Institutionen för skogstaxering, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Nilsson, A. 2009. *Produktivitet och lönsamhet vid skörd av skogsbränsle i klen björkgallring*. Arbetsrapport 248. Institutionen för skoglig resurshushållning, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Opacic, L. & Sowlati, T. 2017. Applications of discrete-event simulation in the forest products sector: a review. *Forest Products Journal*, 67, 219-229.
- Pretzsch, H. 1997. Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management*, 97, 237-253.
- Pretzsch, H., Biber, P. & Ďurský, J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162, 3-21.
- Purfürst, F.T. & Erler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering*, 22, 15-22.
- Purfürst, F.T. & Lindroos, O. 2011. The correlation between long-term productivity and short-term performance ratings of harvester operators. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 32, 509-519.
- Repola, J., Ahnlund Ulvcróna, K. 2014. Modelling biomass of young and dense Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) dominated mixed forests in northern Sweden. *Silva Fennica*, vol. 48, no. 5, article id 1190. 21 p.
- Rockwell Automation. 2020. *Arena Simulation Software*. Tillgänglig på: <https://www.arenasimulation.com/> [2020-09-02].
- Santesson, M. & Sjunnesson, S. 1972. *Simulation model for thinning machines*. Research Notes no. 49. Department of Operational Efficiency, Royal College of Forestry Research. Stockholm. (In Swedish with English summary). Citerad av: Eliasson, L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science*, 45, 26-34.
- Seppälä, R. 1971. Simulation of timber-harvesting systems. *Folia Forestaha* No 125:30. Citerad av: Eliasson, L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science*, 45, 26-34.
- Shifley, S. & Lentz, E. 1985. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. *Forest Ecology and Management*, 13, 195-203.
- Shifley, S.R., He, H.S., Lischke, H., Wang, W.J., Jin, W., Gustafson, E.J., Thompson, J.R., Thompson, F.R., Dijak, W.D. & Yang, J. 2017. The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landscape Ecology*, 32, 1307–1325.
- Skär, M. 2019. *Grotuttaget igår, idag och dess potentiella framtid*. Examensarbete. Linnéuniversitetet, Växjö. Tillgänglig på: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1345999/FULLTEXT01.pdf> [2020-05-20]
- SLU. 2018. *Heureka systemet*. Tillgänglig på: <https://www.slu.se/institutioner/skoglig-resurshushallning/programprojekt/sha/heureka/heureka/> [2018-09-21].

- Sängstuvall, L., Bergström, D., Lämås, T. & Nordfjell, T. 2012. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27, 56-73.
- Svenska Kraftnät. 2010. *Avverkning av kanträd och underhållsröjning*. Faktablad. Svenska Kraftnät, Sundbyberg, Sweden. Tillgänglig på: <http://www.svk.se/> [2018-01-15].
- Söderbergh, I. & Ledermann, T. 2003. Algorithms for simulating thinning and harvesting in five European individual-tree growth simulators: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 39, 115-140.
- Talbot, B. & Suadican, K. 2005. Analysis of two simulated in-field chipping and extraction systems in spruce thinnings. *Biosystems Engineering*, 91, 283-292.
- Thurnher, C., Klopff, M. & Hasenauer, H. 2017. MOSES – a tree growth simulator for modelling stand response in Central Europe. *Ecological Modelling*, 352, 58-76.
- Valentine, H. T., Herman, D. A., Gove, J. H., Hollinger, D. Y. & Solomon, D. S. 2000. Initializing a model stand for process-based projection. *Tree Physiology*, 20, 393-398.
- Wang, J. & Greene, W.D. 1999. An interactive simulation system for modeling stands, harvests, and machines. *Journal of Forest Engineering*, 10, 81-99.
- Wang, J., Li, Y. & Miller, G. 2002. A 3D stand generator for central Appalachian hardwood forests. In: *Symposium on Statistics and Information Technology in Forestry*. IUFRO S 4.11 Conference, September 8-12. Blacksburg, Virginia, USA.
- Wang, J., LeDoux, C.B. & Li, Y. 2005. Simulating cut-to-length harvesting operations in Appalachian hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 16, 11-27.
- Wang, J., Sharma, B. D., Li, Y. & Miller, G. W. 2009. Modeling and validating spatial patterns of a 3D stand generator for central Appalachian hardwood forests. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 141-149.
- Weibullfördelningen. 2020. Tillgänglig på: <http://ovn.ing-stat.se/fordelningar/WeibSlid1.php> [2020-08-31].

## BILAGA A

### Biomassafunktioner

I modellen användes Repola och Ahnlund Ulvcronas (2014) biomassafunktioner, med torrvikten  $TV$  (kg) som beroende variabel och brösthöjdsdiametern  $dbh$  (cm) och höjden  $h$  (m) som oberoende variabler. Torrvikten  $TV_{i,j}$  beräknades för trädslagen tall ( $i=1$ ), gran ( $i=2$ ) och björk ( $i=3$ ) för träddelarna  $j$ : stammar ( $st$ ), levande grenar ( $lg$ ) och döda grenar ( $dg$ ).

$$TV_{1,st} = e^{(-3,010+7,999*dbh/(dbh+8)+2,959*h/(h+13))} \quad (A-1)$$

$$TV_{1,lg} = e^{(-2,949+15,444*dbh/(dbh+9)-6,350*h/(h+4))} \quad (A-2)$$

$$TV_{1,dg} = e^{(-8,323+16,150*h/(h+8))} \quad (A-3)$$

$$TV_{2,st} = e^{(-2,669+10,482*dbh/(dbh+10))} \quad (A-4)$$

$$TV_{2,lg} = e^{(-3,390+12,228*dbh/(dbh+8)-3,834*h/(h+8))} \quad (A-5)$$

$$TV_{2,dg} = e^{(0,485-13,888*dbh/(dbh+1)+21,131*h/(h+8))} \quad (A-6)$$

$$TV_{3,st} = e^{(-4,879+8,037*dbh/(dbh+2)+22,614*h/(h+12)-4,003*\ln(h))} \quad (A-7)$$

$$TV_{3,lg} = e^{(-4,190+11,826*dbh/(dbh+6)-3,939*h/(h+10))} \quad (A-8)$$

$$TV_{3,dg} = e^{(-8,905+9,635*dbh/(dbh+5))} \quad (A-9)$$

Johanssons (1999b) biomassafunktioner för asp antogs vara representativa för kategorin ”övriga lövträd” ( $i=4$ ):

$$TV_{4,st} = 0,000065*(dbh*10)^{2,739823} \quad (A-10)$$

$$TV_{4,lg} = 0,000515*(dbh*10)^{1,873298} \quad (A-11)$$



## BILAGA B.

Visualisering av typbestånd i Heureka (avsnitt 5.1). Beteckningarna (x/x/x) visar genomsnittlig dbh/standardavvikelse dbh/stamantal per ha i hundratal. Tidsåtgång ( $G_0$ -min), produktivitet ( $G_0$ -tim/ha och ton TS/ $G_0$ -tim) samt kostnad (kr) gäller per beståndsyta (25 m långa med röjningsdjupet 5,0 m), och enbart för avverkning (d.v.s. exkl. tid och kostnader för transporter till och från beståndet). Kostnaderna baseras på  $G_{15}$ -tim, med en omräkningsfaktor från  $G_0$ -tim på 1,53, och en timkostnad på 1 200 kr för skördemaskinen. Mer information om beståndsytorna finns i tabell 5.1.

### Typbestånd 4,0/3,0/25.

Tidsåtgång:  
3,1  $G_0$ -min.

Produktivitet:  
4,1  $G_0$ -tim/ha,  
2,6 ton TS/ $G_0$ -tim.

Avverkningskostnad:  
94 kr.

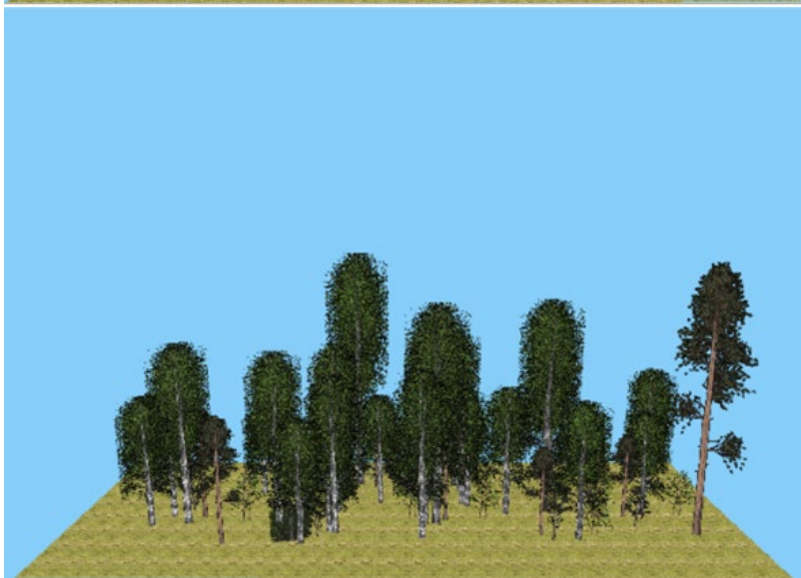


### Typbestånd 4,0/3,0/50.

Tidsåtgång:  
5,3  $G_0$ -min.

Produktivitet:  
7,1  $G_0$ -tim/ha,  
3,1 ton TS/ $G_0$ -tim.

Avverkningskostnad:  
163 kr.

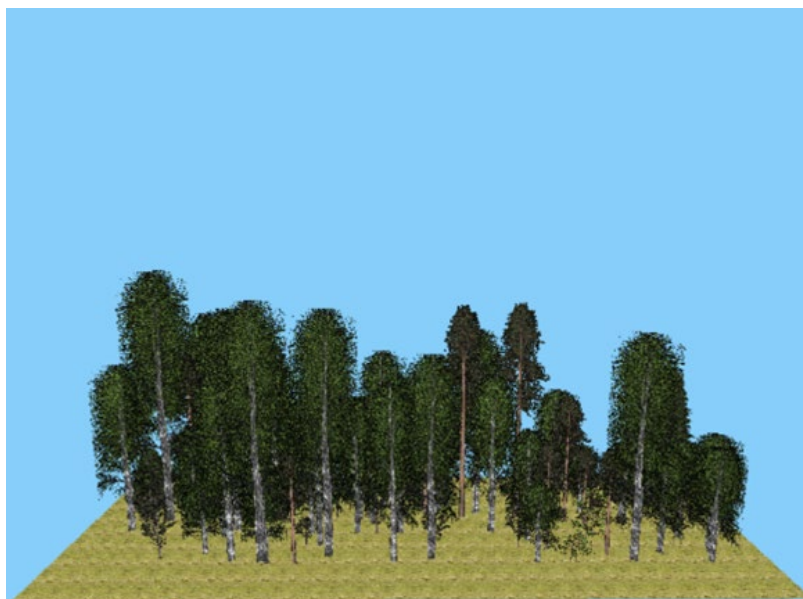


**Typbestånd**  
**4,0/3,0/75.**

Tidsåtgång:  
7,3 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
9,7 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
3,4 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
223 kr.

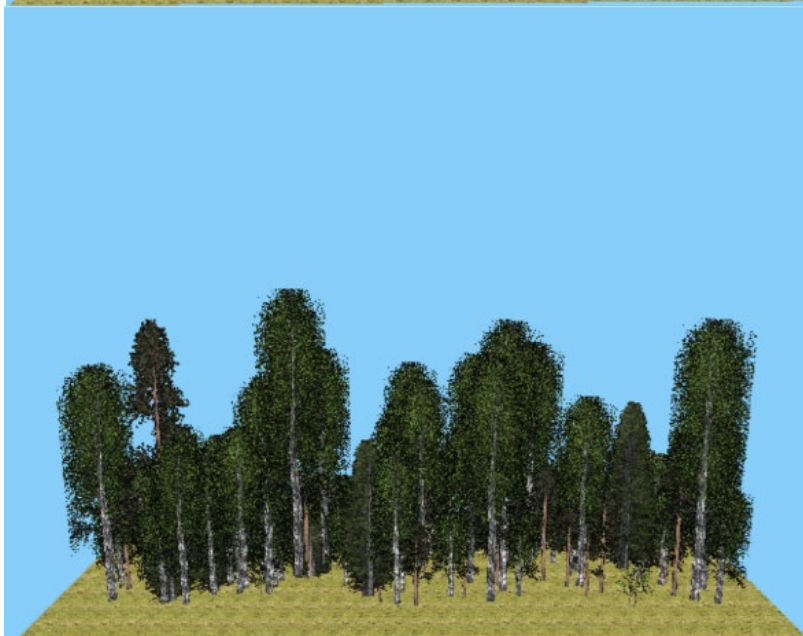


**Typbestånd**  
**4,0/3,0/100.**

Tidsåtgång:  
9,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
12,6 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
3,5 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
289 kr.

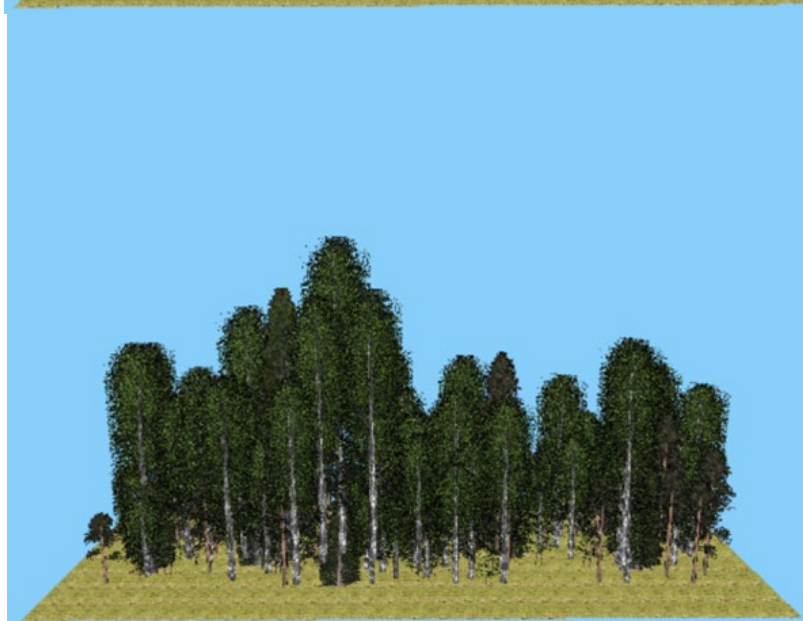


**Typbestånd**  
**4,0/3,0/150.**

Tidsåtgång:  
13,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
17,9 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
3,7 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
411 kr.



**Typbestånd**  
**4,0/3,0/200.**

Tidsåtgång:  
17,7 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
23,6 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
3,7 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
542 kr.



**Typbestånd**  
**4,0/4,5/25.**

Tidsåtgång:  
3,2 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
4,3 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
4,2 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
98 kr.



**Typbestånd**  
**4,0/4,5/50.**

Tidsåtgång:  
5,1 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
6,8 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
5,0 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
157 kr.



**Typbestånd  
4,0/4,5/75.**

Tidsåtgång:  
7,3 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
9,8 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
5,5 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
223 kr.



**Typbestånd  
4,0/4,5/100.**

Tidsåtgång:  
9,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
12,6 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
5,7 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
290 kr.



**Typbestånd  
4,0/4,5/150.**

Tidsåtgång:  
13,7 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
18,3 G<sub>0</sub>-  
tim/ha,  
5,8 ton  
TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverknings-  
kostnad:  
420 kr.



**Typbestånd**  
**4,0/4,5/200.**

Tidsåtgång:  
18,1 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
24,1 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
5,9 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
553 kr.

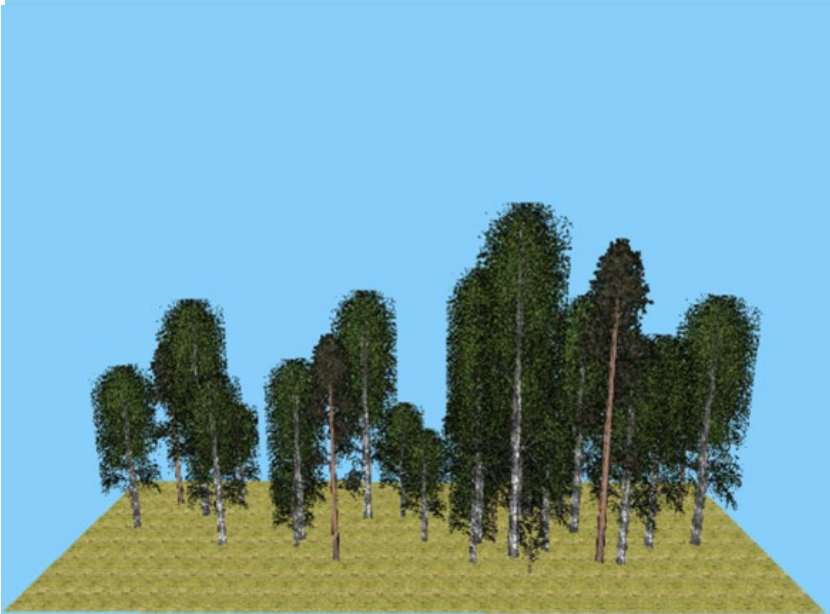


**Typbestånd**  
**7,0/4,0/25.**

Tidsåtgång:  
3,9 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
5,2 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
6,0 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
120 kr.



**Typbestånd**  
**7,0/4,0/50.**

Tidsåtgång:  
6,2 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
8,3 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
7,7 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
190 kr.

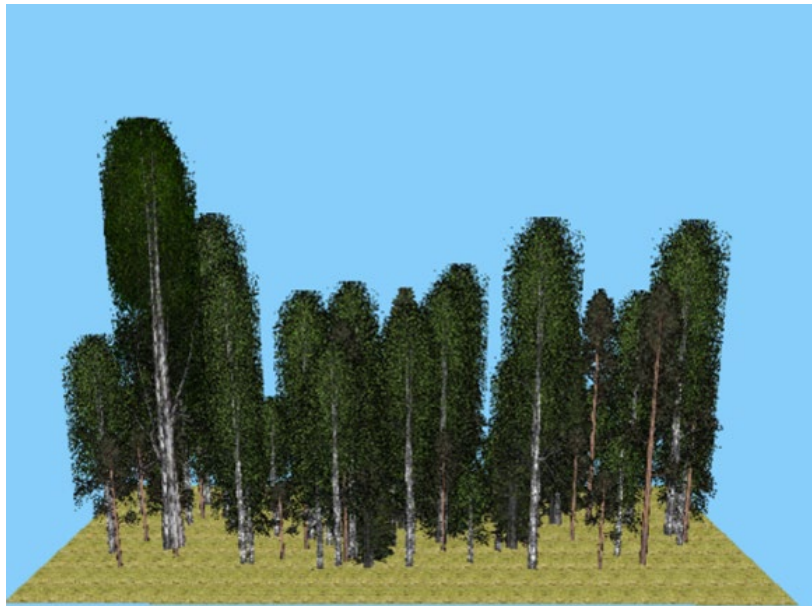


**Typbestånd  
7,0/4,0/75.**

Tidsåtgång:  
9,3 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
12,4 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
7,7 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
284 kr.

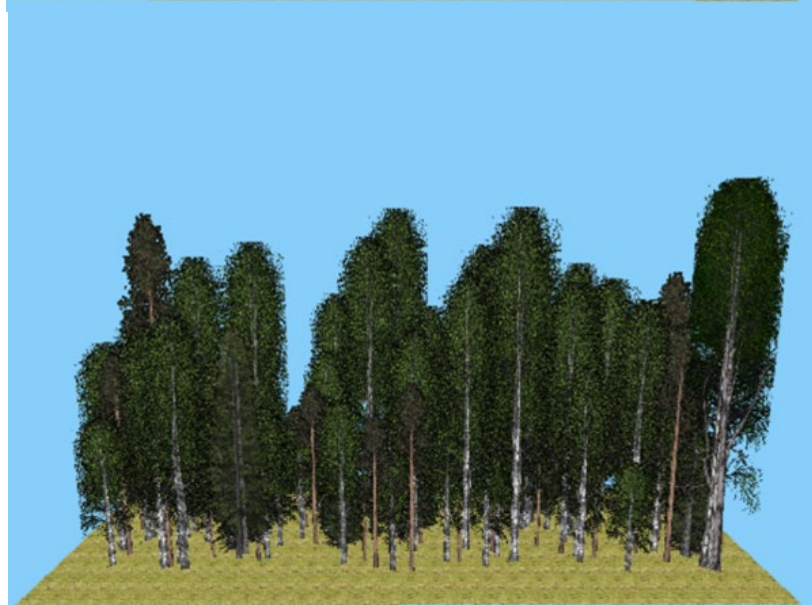


**Typbestånd  
7,0/4,0/100.**

Tidsåtgång:  
11,9 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
15,9 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
7,8 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
364 kr.



**Typbestånd  
7,0/4,0/150.**

Tidsåtgång:  
17,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
23,3 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
8,1 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
533 kr.



**Typbestånd  
7,0/5,0/25.**

Tidsåtgång:  
3,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
4,7 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
7,8 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
107 kr.



**Typbestånd  
7,0/5,0/50.**

Tidsåtgång:  
6,4 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
8,5 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
8,8 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
195 kr.

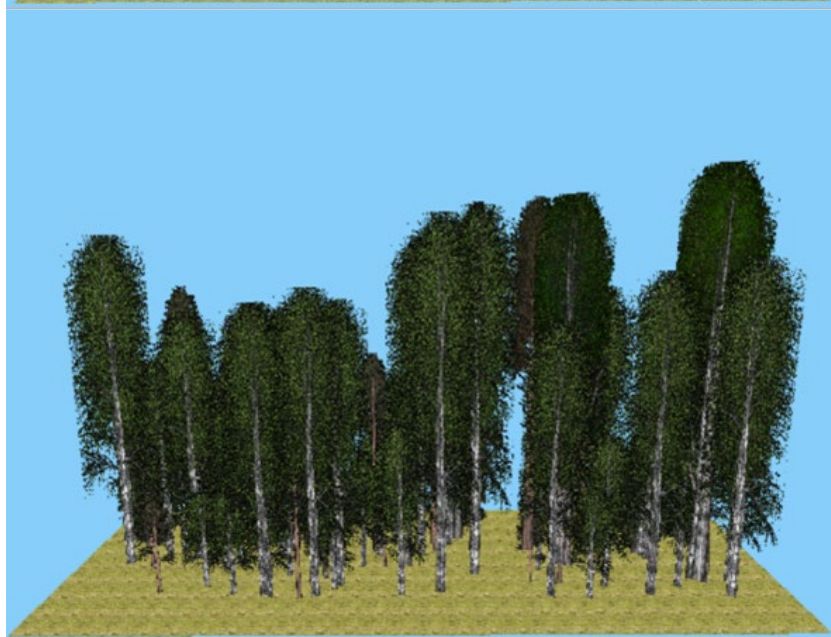


**Typbestånd  
7,0/5,0/75.**

Tidsåtgång:  
9,2 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
12,3 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
9,2 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
281 kr.

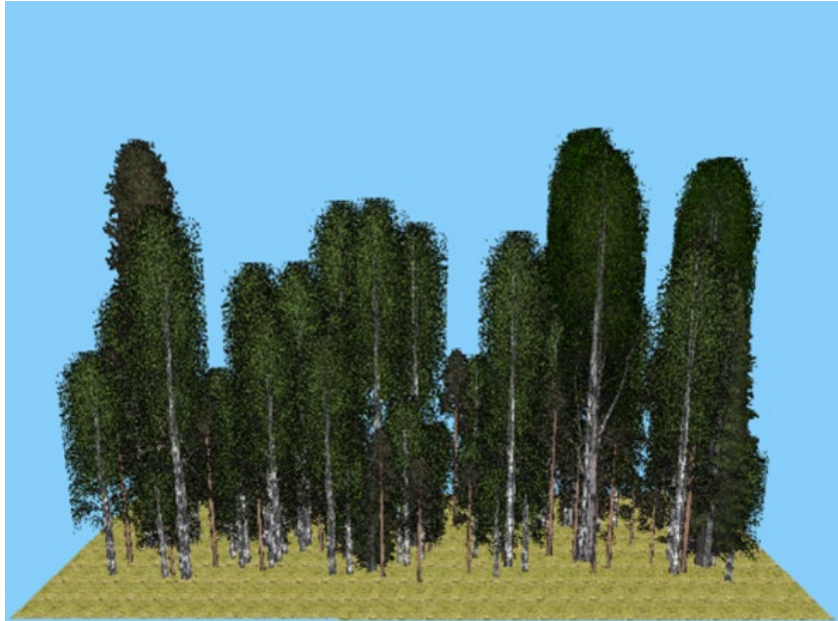


**Typbestånd  
7,0/5,0/100.**

Tidsåtgång:  
11,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
15,3 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
9,5 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
350 kr.



**Typbestånd  
7,0/5,0/150.**

Tidsåtgång:  
17,1 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
22,7 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
9,6 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
521 kr.



**Typbestånd  
10,0/5,0/25.**

Tidsåtgång:  
4,4 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
5,8 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
10,8 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
134 kr.





**Typbestånd**  
**10,0/5,0/50.**

Tidsåtgång:  
8,0 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
10,7 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
11,9 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
244 kr.



**Typbestånd**  
**10,0/5,0/75.**

Tidsåtgång:  
10,9 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
14,6 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
13,0 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
334 kr.



**Typbestånd**  
**10,0/7,0/25.**

Tidsåtgång:  
4,2 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
5,6 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
13,3 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
129 kr.



**Typbestånd  
10,0/7,0/50.**

Tidsåtgång:  
7,4 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
9,8 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
14,9 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
225 kr.



**Typbestånd  
10,0/7,0/75.**

Tidsåtgång:  
10,8 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
14,4 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
16,0 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
329 kr.



**Typbestånd  
10,0/7,0/0,3.**

Tidsåtgång:  
1,5 G<sub>0</sub>-min.

Produktivitet:  
2,0 G<sub>0</sub>-tim/ha,  
4,4 ton TS/G<sub>0</sub>-tim.

Avverkningskostnad:  
45 kr.





---

SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
Tel. 018-67 10 00  
[www.slu.se/energyandtechnology](http://www.slu.se/energyandtechnology)

SLU  
Department of Energy and Technology  
Box 7032  
S-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
Phone +46 18 671000

---