



Skörd av övergrov salix med skogsbrukets maskiner

Harvesting of large diameter willow with forest machines

Dan Bergström, Fulvio Di Fulvio, Kalvis Kons & Tomas Nordfjell

Arbetsrapport 334 2011

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
901 83 UMEÅ
www.slu.se/srh
090/7868100



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-334-SE

Skörd av övergrov salix med skogsbrukets maskiner

Harvesting of large diameter willow with forest machines

Dan Bergström, Fulvio Di Fulvio, Kalvis Kons & Tomas Nordfjell

Arbetsrapport 334
Skoglig resurshushållning

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2011

ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-334-SE

Sammanfattning

Om en salixodling innehåller stammar med en diameter i stubbhöjd (dsh) grövre än 5-7 cm får konventionella direktflisande skördemaskiner tekniska problem. I dagsläget finns det i Sverige arealer med salix som växt sig övergrov. I dessa odlingar kan skörd med skogsmaskiner vara ett alternativ.

Syftet med denna studie var att mäta produktiviteten på konventionella skogsmaskinsystem, anpassade för skörd av ”klena” stammar i gallringsskog, vid skörd av övergrov salix, samt att jämföra dessa systems kostnadseffektivitet mot konventionella system för salixskörd.

Ett skördare-skotaresystem och ett en-maskinsystem (drivare) studerades vid skörd av normal och övergrov salix. Det normala området innehöll 36 ton torrsubstans (TS) per ha, en diameter i stubbhöjd (dsh) i medeltal och maximalt på 2,7 cm respektive 6,1 cm. Det övergrova området innehöll 56 ton TS/ha, en dsh i medeltal på 3,1 cm respektive 10,0 cm. Jämförande systemanalyser utfördes mot både konventionella och teoretiska salixskördesystem (baserades på litteraturdata) i normal, övergrov och mer övergrov (75 ton TS/ha) salix.

Fältstudien visade att typ av odling hade störst effekt på skördarens produktivitet (tonTS/timme) vilken i medeltal blev 56% högre i det övergrova området jämfört mot det normala. Produktiviteten på skotaren påverkas främst av skotningsavståndet. Drivaren hade låg produktivitet som dock ökade med 36% i den övergrova odlingen. Drivaren påverkas också kraftigt av skotningsavståndet.

Systemanalysen visade att skördare-skotaresystemet gav ett positivt netto i alla typodlingar, men att drivaresystemet gav ett negativt netto i alla typodlingar. Analysen visar tydligt att konventionella system för salixskörd blir mer kostnadseffektiva i alla typodlingar än skogsmaskinsystemen. Salixdirektflisningssystemet gav högst netto i det normala och övergrova området. Ett teoretiskt salixbuntskördaresystem gav högst netto i det mer övergrova området.

Trenden är att systemet med salixdirektflisning och ett teoretiskt system med salixhelstamskörd och direktlastning minskar i kostnadseffektivitet med ökad biomassa/ha, men att skogsmaskinsystemen och salixbuntskördaresystemet ökar i kostnadseffektivitet med ökad biomassa/ha.

Skogsmaskiner är i dagsläget inte ett kostnadseffektivt val vid skörd av salix, och kommer förmodligen aldrig att bli det heller. Dock utgör skogsmaskiner ett robust alternativ som alltid fungerar oavsett hur gamla och övergrova salixodlingar har blivit.

Nyckelord: energiskog, bioenergi, skördare, skotare, drivare, direktflisning, effektivitet

Abstract

If the stems diameters at stump/cutting height (dsh) in salix plantations exceeds 5-7 cm conventional agricultural harvesters based on direct-chipping suffers from decreased efficiency. Currently in Sweden there are areas of salix plantations of such over-grown character. A cost-efficient alternative in such plantations/stands can be to use forest harvesting machines.

Therefore, the objective of this study was to measure the productivity of forest thinning machine systems, adopted for small diameter trees, in the harvesting of over-grown willow plantations. The purpose was also to compare the cost-efficiency of these systems with willow harvesting systems based on agricultural machines.

A harvester-forwarder system and a one-machine system (harwarder) were studied in salix plantations of both normal and over-grown type. The normal stand contained 36 ODt/ha and had an average and maximum dsh of 2.7 cm and 6.1 cm, respectively. The over-grown stand contained 56 ODt/ha and had an average and maximum dsh of 3.1 cm and 10.0 cm, respectively. Comparative analyses to both conventional and hypothetical agricultural machine harvesting systems were performed in normal, over-grown and more-over-grown (75 ODt/ha) stands.

The field study show that the forest harvester productivity (ODt/hour) was mostly affected by the type of stand (harvested biomass/ha) and was 56% higher in the over-grown stand when compared to the normal stand. The forwarders productivity was mainly affected by the forwarding distance. The harwarders productivity was extremely low and it was also affected by the forwarding distance, however it was 36% higher in the over-grown stand when compared to the normal stand.

In the system analyses it was found that the harvester-forwarder system gave a positive net income in all willow stands, while the harwarder system gave a negative result in all the stands. It was found that the agricultural systems, in general, were more cost-efficient in all stands compared to the forest machine systems. The agricultural harvesting system with direct chipping gave the highest net income in the normal and over-grown stand, while a hypothetical bundle-harvesting system gave the highest net income in the more-over-grown stand. The trends show that the harvesting systems with direct-chipping and a hypothetical system with whole-stem-harvesting and direct-loading decrease their cost-efficiency when the biomass removal per hectare increases; while the forest machine systems and the bundle-harvesting system increase their cost-efficiency when the biomass per hectare increases.

Currently, conventional forest machine harvesting systems are not a cost-efficient alternative compared to the conventional agricultural direct-chipping system in over-grown salix stands. However, forest machines are a robust and reliable alternative that will always function regardless of thickness of stems and amount of biomass to be harvested.

Keywords: short-rotation, bioenergy, harvester, forwarder, harwarder, direct-chipping, efficiency

Innehållsförteckning

Inledning	5
Bakgrund	5
Teknik för skörd av salix	5
Övergrov salix – en trend och ett problem!	7
Skogsbruksteknik för skörd av klena stammar	8
Syfte	10
Material och Metoder	11
Fältstudier	11
Pilotstudie	11
Ranstastudien	15
Övrigt	23
Systemanalyser	23
Studiedesign och begränsningar	23
Typodlingar	23
Studerade maskinsystem	24
Resultat	29
Fältstudier	29
Pilotstudien	29
Ranstastudien	30
Systemanalyser	35
Diskussion	38
Fältstudier	38
Drivning	38
Arbetskvalitet	40
Systemanalyser	41
Känslighetsanalys	43
Utvecklingsaspekter	44
Slutsatser	45
Tillkännagivanden	46
Referenser	47

Inledning

Bakgrund

Forskning och utveckling på odlingar av snabbväxande pil och vide (salix), med kort rotationstid initierades under 60-talet, då med fokus på biomassa för pappers- och massaindustrin. Den globala oljekrisen på 70-talet medförde dock att fokus ändrades mot energiändamål (Nordh 2005). Under sent 80-tal anlades de första kommersiella energiskogsodlingarna av salix och i mitten på 90-talet odlades salix på ca 16 000 ha i Sverige (Rosenqvist et al. 2000). År 2010 odlas energiskog på ca 12 000 ha i Sverige (Paulrud et al. 2010), men trots att odlingsarealerna är minskande i Sverige så förväntas arealen energigrödor (däribland salix) att öka i Europa de närmsta åren (Anon. 2007).

I Sverige beräknas en energiodling av salix vara ekonomiskt produktiv i ca 20-25 år, vilket ger 6-7 skördar med 3 till 4 års intervaller (Magnusson 2009). Energiskogen gödslas regelbundet vart eller vart annat år och i goda växtförhållanden kan skörden bli 8-10 ton torrsbstans (TS) per ha och år i Sverige (Gigler et al. 1999). I övriga Europa och i Nordamerika varierar produktionen mellan 2 till 13,5 ton TS/ha och år (se Mitchell et al. 1999). Biomassaproduktionen per ha är positivt korrelerad med antalet etablerade sticklingar/ha, upp till ca 20 000 st/ha (Bergkvist & Ledin 1998). I dagsläget etablerar man 12 000 sticklingar/ha i dubbla radmönster med 1,5/0,75 m avstånd mellan raderna och 0,5-0,9 m mellan sticklingar i raden (Mola-Yudego 2011). Detta planteringsmönster har medfört att plantering nu sker helt mekaniserat, samt att skördearbetet har effektiviserats (Mitchell et al. 1999). Medelstorleken på en odling i Sverige är ca 10 ha (Rosenqvist et al. 2000). Skörden sker under vinterhalvåret, november till april, och under påföljande vår utvecklas nya skott från anlag på stubbarna (Mitchell et al. 1999). Vid skörden är det viktigt att stubbarna inte spricker så att återväxten hämmas (Danfors & Nordén 1992, Magnusson 2009). Det innebär att sågande avskiljning är att föredra framför klippande/skärande om träden är mer än 4 cm grova. Sättet att hantera stammarna vid avskiljning är också viktigt, t.ex. om de böjs så att det uppstår spänningar i stammen, så spricker stubben då stammen avskiljts till hälften (Danfors & Nordén 1992).

När salix skördas har den vanligtvis en fukthalt på 50-60% (av rå vikt) och ett effektivt värmevärde på ca 19,6 MJ/kg TS (Jirjis 2005). Vid en fukthalt av 50% har salix således ett värmevärde av ca 4,8 MWh/ton TS. Salix har i genomsnitt en askhalt på ca 0,2-0,3% (av torr massa) där barken drar upp medelvärdet med en askhalt på ca 2,7% (Dzurenda et al. 2010). Andelen bark minskar från 32% till 24% om diametern på stammarna ökar från 1 till 3 cm (Adler et al. 2008). Lagring av helskott ger mindre substansförluster jämfört med lagring av flis (Jirjis 2005). Dessutom höjs bränsle kvaliteten vid lagring av helskott då materialet torkar till en betydligt lägre fukthalt (Nurmi 1995).

Teknik för skörd av salix

Utvecklingen av teknik för skörd av salix tog fart under mitten av 80-talet och sedan dess har ett flertal prototyper och kommersiella produkter tagits fram (Danfors 1992). Den idag mest använda kommersiella skördetekniken består av maskiner utrustade med chassimonterade skärbord och flisningsutrustning för kontinuerlig skörd och direktflisning (Mitchell et al. 1999, Nordh & Dimitriou, 2003). Vanligtvis flisas biomassan direkt i en container (flisbalja) buren av

en parallellt gående flisskyttel (vanlig lantbrukstraktor med kärra), vilken transporterar flisen till t.ex. åkerkant. Ett drivningssystem består vanligtvis av en salixskördare och minst två flisskyttlar. Ett sådant system kan vid skörd av 25 ton TS/ha uppnå en produktivitet av 16 ton TS per effektiv arbetstimme (Danfors & Norden 1995b). Skärborden klarar att skära enstaka stammar upp till en diameter av 6-7 cm (Nordh & Dimitriou 2003).

I dagsläget anses tillförlitligheten på konventionella direktflisningssystem vara dålig, t.ex. pga. obärgad mark vid planerad skörd, vilket medför en fördyrad skörd (Magnusson 2009). Dessutom medför direktflisning att systemet blir relativt ”hett”, dvs. sönderdelad biomassa kan inte lagras någon längre tid utan betydande substansförluster (Jirjis 2005) och flisen måste därför vidaretransporteras med korta ledtider (Mitchell et al. 1999). Detta innebär att skörden i regel utförs då efterfrågan på flisen är hög. Nettointäkten från en salixodling beror idag till stor del av kostnaderna vid skörd, vilket vanligtvis uppgår till ca 50% av den totala produktionskostnaden (Sims 2002). Det har konstaterats att det är en absolut nödvändighet att utveckla bättre teknik och den önskade teknikutvecklingen syftar till att både utveckla 1) dagens ”heta” konventionella system där helskotten kontinuerligt fälls, direktflisas och korttidslagras vid åkerkant och 2) ett nytt ”kallare” system för skörd av helskott där materialet också eventuellt buntas i samband med skörden innan lagring och vägtransport (Eriksson 2008, Magnusson 2009). Det finns chassimonterade skärbord för kontinuerlig skörd av helskott (typ Empire 2000), men tekniken för integrerad fällning, buntning och transport av helskott av salix är outvecklad (se Mitchell et al. 1999). Inom branschen råder det idag skilda meningar om vilket av dessa två principiellt skilda system som har störst potential att kostnadseffektivisera skörd av salix (Magnusson 2009).

Det årliga maskinutnyttjandet för salixskördare överstiger vanligtvis inte ca 800 maskintimmar (G_{15} tid; effektiv arbetstid inklusive avbrottstid kortare än 15 min) per år, vilket motsvarar ca en tredjedel jämfört med maskinutnyttjandet inom skogsbruket (Tabell 1).

Tabell 1. Exempel på årligt maskinutnyttjande och motsvarande maskinkostnader för jordbruksmaskiner vid skörd av salix och skogsmaskiner vid uttag av skogsbränsle i gallring
Table 1. Examples of annual utilization and corresponding hourly cost of the machines used in harvest of salix on agriculture land and thinning of fuel wood in forestry

	Maskinutnyttjande	Källa	Maskinkostnad*
	(G ₁₅ -timmar/år)		(kr/G ₁₅ -timme)
Skördare, skogsbruk	2361	(Nurminen et al. 2009)	852
Skotare, skogsbruk	2500	(Nurminen et al. 2009)	704
Drivare, skogsbruk	2430	a)	796
Flisskördare, salix	400	(Danfors & Nordén 1995a)	3465
	600	c)	2569
	768	(Danfors & Nordén 1995b)	2177
Stamskördare, salix	375	(Danfors & Nordén 1995a)	2270
	600	c)	1657
	675	(Danfors & Nordén 1995b)	1543
Buntskördare, salix	375	b)	1155
	600	c)	1027
	675	b)	1003
Traktor med vagn, jordbruk + salix	1500	(Talbot & Suadicani 2005)	560

a) Beräknat för ett medelvärde av skördaren och skotaren, b) antaget samma årliga utnyttjande som för stamskördaren, c) antaget ”årligt värde.” *Baserat på en investeringskostnad av: Skördare (skogsbruk) 2850000 kr; Skotare (skogsbruk) 2250000 kr; Drivare (skogsbruk) 2700000 kr; Flisskördare (salix) 3900000 kr; Stamskördare (salix) 2223000 kr; Traktor med vagn (jordbruk + salix) 750000 kr.

Övergrov salix – en trend och ett problem!

Till följd av de senaste årens mildra vintrar i Sverige, som inneburit obärliga marker, har många odlingar blivit stående ett år extra och blivit ”övergrova” (se Fig. 1). Dessutom har de senaste växtförädlingsprogrammen resulterat i nya, ännu mer snabbväxande kloner, vilket i kombination med bättre odlingsteknik och praktisk erfarenhet sannolikt kommer att ge ännu högre avkastning per ha och år (Mola-Yudego 2011). Innebörden av detta blir att man skördar med antingen kortare avverkningscykler eller skördar grövre stammar (Nordh & Dimitriou 2003). Medeltillväxtens kulmination på de tidigare klonerna av salix uppnåddes vid 4-6 år enligt Willebrand et al. (1993), men uppnås sannolikt redan vid 2-3 år med dagens förädlade kloner (pers. komm. Nils-Erik Nordh 2011).



Figur 1. Övervuxen salixodling med 5-åriga skott på 15-åriga rötter; ”i bästa fall” till vänster och ”i sämsta fall” till höger. Foto: Lars Christersson.

Figure 1. Overgrown salix plantations with 5-year-old shoots on 15-year-old stumps; to the left “the best case”, and to the right “the worst case”. Photo: Lars Christersson.

Om salixodlingen innehåller stamdiametrar grövre än ca 5-7 cm, får direktflisande skördemaskiner tekniska problem, och vid grövre diametrar blir det definitivt stopp (Nordh & Dimitriou 2003, Magnusson 2009). Studier på likartad skörd av tvåårig poppel, med en medeldiameter av 4 cm i skärtytan, visade att maskinens G_{15} tid till 10% bestod av avbrottstid (Spinelli et al. 2008). De tekniska begränsningarna blev speciellt tydliga när äldre och grövre planteringar skördades; skördarens tekniska utnyttjandegrad (TU) uppnådde endast 65% av G_{15} tid, dvs. 35% avbrottstid (Spinelli et al. 2008).

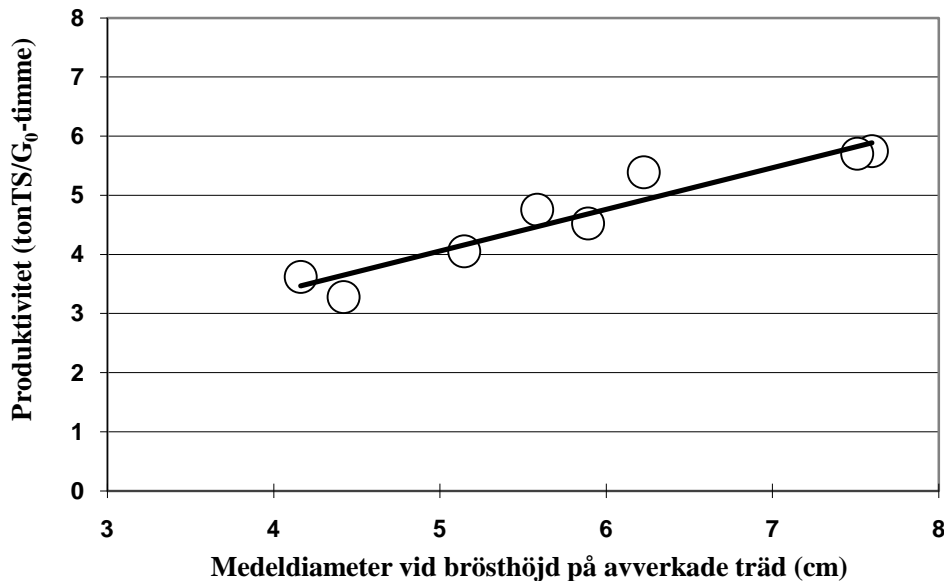
I dagsläget finns det ett ”akut” behov av att till en ”rimlig” kostnad skörda salix som växt sig övergrov, p.g.a. t.ex. utebliven skörd, (Magnusson 2009). Att utnyttja skogsmaskiner för skörd av övergrov salix kan vara ett alternativ. En möjlig fördel med att använda konventionella skogsmaskiner, förutom att de kan hantera grova stammar, är att de kan användas i skoglig avverkning resterande del av året. Det innebär i sin tur att man kan uppnå en årlig användningstid överstigande 2500 G_{15} - timmar per år, vilket i sin tur medför relativt låga timkostnader trots höga kostnader för maskininvestering.

Skogsbruksteknik för skörd av klena stammar

Under senare år har teknik för skörd av skogsbrukets ”klena stammar” (< 12 cm) utvecklats. Fällningsarbetet sker med en standard gallringsskördare utrustade med ackumulerande fällaggregat med vilka ett flertal stammar fälls och ackumuleras i varje krancykel för att sedan högläggas vid stickvägkant. En del av dessa aggregat är även anpassade för att aptera trädhögen/bunten till lämplig längd. Den efterföljande uttransporten sker med en standard rundvirkesskotare. Vid hantering av okvistade träd eller träddeklar kan skotaren vara utrustad med gripsåg för kapning av långa träd samt med ett komprimerande lastutrymme för ökat lastutnyttjande (Bergström 2009). Det finns även kombinationsmaskiner som både skördar och skotar materialet, s.k. drivare. Dessa maskiner lämpar sig bäst vid relativt små avverkningsobjekt med korta skotningsavstånd och hög frekvens av maskinförflyttningar mellan avverkningsobjekten (Talbot et al. 2003). Ofta är drivaren en standard skotare utrustad med ett aggregat anpassat för både fällning och lastning. Det finns även specialbyggda drivare som i

regel har en kran som är bättre anpassad för fällningsarbetet och kan dessutom vara utrustade men en vridbar hytt så att den på ett bra sätt kan arbeta med kranen i alla riktningar. Skotaren är designad för att arbeta bakåt med kranen, dvs. ej i färdriktningen. Den specialbyggda drivaren är betydligt mer kompetent vid fällningsarbete jämfört den skotarbaserade drivaren som är tämligen begränsad i sitt arbete. Storleken på de basmaskiner som används i klena förstagallringa varierar i stort och således varierar även möjligheten att skörda med lång kranräckvidd (ca 10-11 m). Små skördare används ofta vid beståndsgående skörd mellan två stickvägar där träden fälls mot stickvägen och en stickvägsående skotare bär ut materialet. Större skördare arbetar alltid från stickväg.

Vid fällningsarbete i klen gallring med ackumulerande aggregat ökar produktiviteten med: ökad storlek på de avverkade träden (se Fig. 2) och ökad gallringsstyrka (Kärhä et al. 2005); ökad förekomst av att flera träd fälls i ett moment (Johansson & Gullberg 2002); ökad förekomst av ackumulering (Liss 1999). Produktiviteten på detta fällningsarbete varierar mellan 0,5-3,7 ton TS per produktiv arbetstimme (G_0 -timme; en timme av effektivt arbete exklusive avbrottstid) beroende på beståndstyp, maskiner och system (Gullberg et al. 1998, Liss 1999, Kärhä et al. 2005). Under de senaste åren har forskning rörande utveckling av teknik och metoder för krankorridor-gallring utförts (Bergström 2009). Metoden innebär att man mellan stickvägar avverkar träd i smala stråk, ca 1 m breda och 10 m långa, vilket medför att kranarbetet kan förenklas och således rationaliseras. Mellan dessa stråk lämnas sedan 1,5-2 m orört. Resultat från simuleringar på framtida mer anpassad teknik visar att man kan öka produktiviteten mer än dubbelt jämfört med dagens teknik och metoder. Denna framtida teknik avverkar träd under en kontinuerlig kranrörelse, dvs. alla träd i en korridor fälls, ackumuleras och högläggs i en krancykel vid stickväg (Bergström 2009). Det finns flera exempel på hur rationell krankorjordeteknik för kontinuerlig fällning och ackumulering kan utvecklas (Bergström 2009, Forsberg & Wennberg 2011). Fältstudier på konventionell teknik, standard gallrings-skördare (Valmet 911.1) och ett ackumulerande fällaggregat (Bracke C16.a), visar att produktiviteten redan idag kan öka med 16% om man skördar i krankorridor istället för, som i normalfallet, selektivt (Bergström et al. 2010a).



Figur 2. Produktiviteten på en skördare utrustad med ett ackumulerande fällaggregat i bioenergigallring av klena skogsbestånd som en funktion av den avverade trädets storlek (efter Bergström 2009).

Figure 2. Productivity of a harvester equipped with accumulating felling head in forest fuel thinning of small diameter trees as a function of tree size harvested (after Bergström 2009).

Vid skörd av salix på jordbruksmark så skall alla stammar fällas och således kan rationella kranrörelser användas och att ingen hänsyn till kvarvarande stammar måste tas. Dessutom är marken jämn och utan hinder som kan störa arbetet, vilket är vanligt i skogsbruket. Man kan därför förvänta sig att produktiviteten vid både fällnings- och skotningsarbetet blir något högre vid skörd av salix jämfört med motsvarande gallring, på skogsmark (dvs. vid samma uttagsvolym/ha). Dessutom är salix odlad med givna avstånd mellan både rader och stolar vilket innebär att arbetet kan systematiseras/förenklas vilket ytterligare förenklar planering och utförandet av arbetet. Detta torde även ge fördelar vid skotningsarbetet där buntarna kan placeras med givna avstånd, samt att inga kvarvarande stammar står ”i vägen” vid lastningsarbetet.

En drivare (Ponns Buffalo Dual) utrustad med ett flerträdshanterande klipp-gripaggregat har dock använts vid praktisk skörd av ett sjuårigt övervuxet salixbestånd utanför Falköping (Arkelöv 2010). Stammarna fälldes och direktlastades samt transporterades till fältkant för lagring i vält med en och samma maskin. Trots att det var ett klippande aggregat fick man i huvudsak rena snittytor utan sprickbildning. Maskinföraren ansåg att tekniken fungerade bra för denna typ av avverkning. Några ytterligare resultat från den studien redovisades tyvärr inte.

Syfte

Syftet med denna studie var att i fält mäta produktiviteten på konventionella skogsmaskinsystem, anpassade för skörd av ”klena” stammar, i skörd av övergrov salix, samt beräkna skördekostnaden och jämföra dessa mot jordbrukets konventionella system för salixskörd.

Material och Metoder

Fältstudier

Två separata fältstudier genomfördes. Den första genomfördes september 2010 i Umeå kommun i två försöksodlingar som skulle avvecklas och som var kraftigt övergrova. Detta var en pilotstudie inför den planerade större fältstudien. Den fältstudien, Ranstastudien, genomfördes november-december 2010 i Sala kommun i en odling som innehöll områden av övergrov karaktär.

Pilotstudie

Studieområde och beståndsdata

Studieområdet var beläget på Röbbäcksdalen (63°48'N, 20°13'E) och utgjordes av två separata odlingar, odling 1 och 2. Båda odlingarna var planterade med kloner av *Salix viminalis* och *Salix dasyclados*. Odling 1 hade en areal av 2041 m², blev etablerad år 1990 och var senast skördad år 1997. Odling 2 år hade en areal av 1926 m², blev etablerad åren 2000 och 2001 och var senast skördad ett år efter plantering, dvs. år 2001 och 2002.

Odlingarna blev inventerade enligt följande: cirkelproveytor med en radie av 2 m lades systematiskt ut i respektive odling; i varje cirkelprovyta mättes sedan antal stolar, stammar per stol, diameter i stubbhöjd och diameter på stolen vid 50 cm höjd (Fig. 3 & Tabell 2). Under försöken togs 40 provträd för framtagande av biomassafunktioner samt bestämning av fukthalten. Stammarnas diameter i stubbhöjd (dsh) (cm) och råvikt mättes enligt Verjwist och Telenius (1999), därefter utfördes regressionsanalys vilket gav funktion (1):

$$\text{Stamvikt (kg TS)} = \exp(-14,127 + \text{dsh} \times -0,022) / (\text{dsh} + 1)^{-4,064}. \quad (1)$$

Från varje provträd togs trissor som vägdes råa, ugnstorkades i 105 °C i 24 timmar och vägdes torra. Fukthalten beräknades till 46% (sd 4,2) av rå vikt. För beräkning av biomassan (torrvikt) användes även Hytönen et al. (1995) funktioner anpassade för gödslad *Salix dasyclados*:

$$\text{Stamvikt (g TS)} = 0,0023 \times (\text{dsh}^2 \times \text{h})^2; \text{ dsh anges i mm och höjden i cm.} \quad (2)$$

Tabell 2. Beståndsegenskaper för salixodling 1 och 2 använda i pilotförsöket

Table 2. Characteristics of plantations 1 and 2 used in the pilot experiments

	Odling 1 (SLU, 37:1)	Odling 2 (Lantmännen, 38:1)
Skördad yta (m ²)	2042	1926
Tid sedan förra skörden (år)	12	8
Stolar per ha	3580	13993
Stammar per stol	2,5	4,5
Stammar per ha	8950	62969
Diameter 10 cm ovan mark (cm)	8,1	4,3
Höjd (m)	7,4	6,8
Avstånd mellan rader (m)	-	0,75 -1
Avstånd mellan plantor (m)	-	0,75
Biomassa ¹ , (ton TS/ha)	89	99
Biomassa ² , (ton TS/ha)	74	94

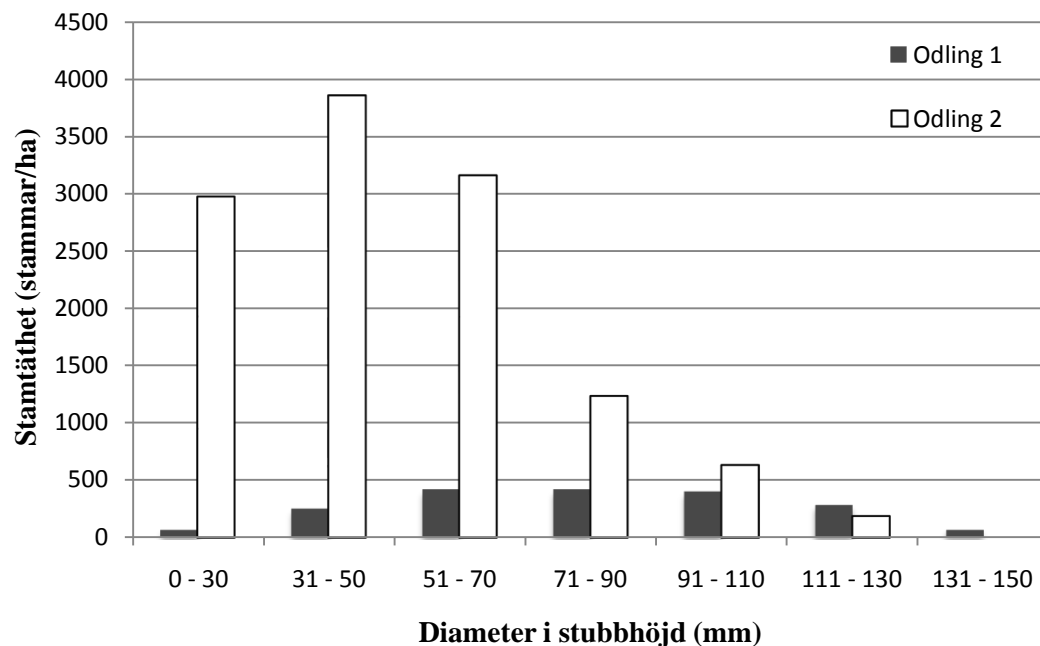
¹ Baserat på framtagen funktion i studien, funktion 1. ² Baserat på Hytönen et al. (1995) funktioner anpassade för gödslad *Salix dasyclados*.

I odling 1 var stammarna krokiga, stolarna var yviga och några planteringsrader återfanns inte (Fig. 3, till vänster). Odling 2 hade ett mer normalt utseende, dvs. med raka stammar i tydliga rader (Fig. 3, till höger).



Figur 3. Utseende på stolarna i de olika odlingarna; till vänster odling 1 och till höger odling 2.
Figure 3. Appearance of stools in the different plantations; to the left plantation 1 and to the right plantation 2.

I odling 1 så var 83% av stammarna grövre än 5 cm i stubbskåret och i odling 2 var motsvarande värde 43% (Fig. 4).



Figur 4. Antal stammar per ha fördelat på diameterklasser (Odling 1; totalt 8950 stammar/ha, Odling 2; totalt 62969 stammar/ha).

Figure 4. Number of stems per ha per diameter class of stems/ha (Plantation 1; in total 8,950 stems/ha, Plantation 2; in total 62,969 stems/ha).

Studerad maskin och tidsstudier

Den studerade maskinen var en Ponsse dual (Ponsse Oy, Finland) utrustad med ett ackumulerande klippagregat, Ponsse EH25 (Ponsse Oy, Finland) (Fig. 5). Maskinen hade en massa på 17,8 ton, var 2,99 m bred, hade en kranlängd på 10 m och en maxlast på 14 ton. Lastutrymmets lastarea var 4,5 m² med en längd på 5 m. Aggregatet kunde klippa stamdiametrar upp till 30 cm och hade en gripöppning av 130 cm. Dess maximala motoreffekt var 205 kW och aggregatet krävde en hydraulikeffekt på 50kW. Maskinen var utrustad med åtta arbetsstrålkastare, två på kranen och sex på hytten.



Figur 5. Den studerade maskinen i pilotförsöket; Ponsse Dual utrustad med Ponsse EH25, ackumulerande klippaggregat.

Figure 5. The studied machine in the pilot study; Ponsse Dual equipped with the accumulating felling head Ponsse EH25.

I studien arbetade maskinen som en drivare. Maskinen arbetade med kranen snett bakåt från körriktningen för att uppnå så korta kranrörelser som möjligt. Maskinen fällde stammarna ca 3 m in i beståndet och direktlastade. När fullt lass var uppnått (upp till stakarnas höjd) transporterades biomassan till åkerkant för lossning i välta. I studien användes två förare, båda erfarna av gallringarbete inom skogsbruket. Förarna arbetade på likartat sätt. I odling 1 var skotningsavståndet 380 m (till bilväg) och i odling 2 var avståndet 170 m (till åkerkant), dvs. biomassan från odlingarna lades i två olika vältor.

Drivarens arbetstid mättes med en fältdator (Allegro Field PC[®]) utrustad med programvara för tidsstudier (SDI; Skogforsk) och datainsamlingen utfördes av en erfaren tidsstudieman. Vid tidsstudien mättes tiden kontinuerligt och arbetet delades upp i olika arbetsmoment (Tabell 3).

Tabell 3. Definitioner på studerade arbetsmoment på drivaren. Om två arbetsmoment överlappar registreras arbetsmomentet med högst prioritet, dvs. 1 före 2 etc.

Table 3. Definitions of time elements used for the harwarder time study, if two work elements overlap, it is registered prior to 2 etc.

Arbetsmoment	Beskrivning	Prioritet
<i>Krancykel</i>	Startar när en tom kran rör sig mot stammarna; stammar fälls och ackumuleras; och momentet slutar när stammarna är lastade	1
<i>Ompositionering</i>	Startar när maskinens hjul rör sig och slutar när hjulen stannar.	2
<i>Körning lastad</i>	Startar när maskinens hjul rör sig och slutar när maskinen stammar på avlägg vid bilväg/åkerkant.	2
<i>Lossning</i>	Startar när maskinen stannat på avlägg och slutar när hela lasset är lossat och kranen är positionerad på lastutrymmet.	2
<i>Körning olastad</i>	Startar när maskinen hjul rör sig och slutar när maskinen stammar vid en studieyta för lastning/skörd.	2
<i>Övrigt</i>	Annat arbete, t.ex. upplockning av tappade stammar.	3
<i>Avbrott</i>	T.ex. korta raster, reparationer.	4

Försöken utfördes under vecka 38-39, i både dagsljus och mörker. Vid tiden för försöken hade ingen avlövnning skett. Den skördade biomassan vägdes med kranvåg i samband med transport till värmeverk ca 2 månader efter skörd.

Övrigt

För beräkningar av energimängden skördad salix användes ett effektivt värmevärde på 18,3 MJ/kgTS (torr massa) och för omräkningar från TS till fast volym (m³f) användes en torr-rådensitet på 390 kgTS/m³f (Ringman 1996). Vid en fukthalt av 46% blev det beräknade effektiva värmevärdet 4,50 MWh/tonTS. För beräkningar av drivningskostnaden användes en maskinkostnad (med förare) på 1000 kr per arbetad timme (inklusive korta avbrott) och en flyttkostnad på 2000 kr. Priset på salix, osönderdelat vid bilväg (åkerkant), sattes till 210 kr/m³f (enligt Norra Skogsägarnas prislista (Anon. 2010)). Vilket gav ett värde av 122 kr/MWh för salix, osönderdelat vid bilväg.

Ranstastudien

Studieområde

Studieområdet var lokaliserat i Ransta (59°49'N, 16°38'E), Västmanlands län. Odlingen hade en areal av 17,2 ha och blev etablerad år 2000 med kloner av ”Tora” (*Salix viminalis* L.).

Sticklingarna hade planterats med 60 cm avstånd mellan sig och i ett radavstånd av 75 och 125 cm, vilket beräknas ge ca 16 700 stolar/ha. Odlingen etablerades för en livslängd av 20 år med 5 år mellan skördarna, vilket ger fyra skördar. Vid tiden för försöken, november-december 2010, hade den andra skörden av odlingen blivit fördröjd med 1 år, dvs. från 5 till 6 år. Odlingen hade ett markförhållande på 1.1.1, enligt Berg's (1992) terrängklassificering; dvs., marken var jämn, hade inga störande hinder och uppvisade god bärighet (markens ytlager var torr och ”något” frusen).

För försöken avsattes ett område av ca 3,6 ha som bestod av områden av både ”normal” och ”övergrov” karaktär (skillnaden i tillväxt ansågs bero på olika tillgång på markvatten). Dessa områden inventerades i systematiskt utlagda provytor av 12 m² på 10 m avstånd. I varje provyta inmättes antal stolar, stammar/stol samt höjd och dsh (endast på skott ≥ 1 cm) på stammarna (se Tabell 4). Mängd biomassa per stam, stol och hektar skattades genom att 35 provträdd (stammar) av olika dsh och höjd vägdes råa, detta enligt Verwijst och Telenius (1999). Följande funktion skapades för beräkning av stammarnas TS:

$$\text{Stamvikt (kg TS)} = \exp(-11,483 + \text{dsh} \times -0,012) / (\text{dsh} + 1)^{-3,321}; \text{ dsh anges i mm. (3)}$$

Av provträddens stamdel togs sedan trissor (ca 20 cm långa) för bestämning av biomassans fukthalt; trissorerna vägdes råa, ugnstorkades i 103 °C i 24 timmar och vägdes sedan torra. Fukthalten beräknades till 50,4% (sd 1,6) av rå vikt.

Biomassan per ha beräknades även med Hytönen et al. (1995) funktioner beskrivna ovan (funktion 2).

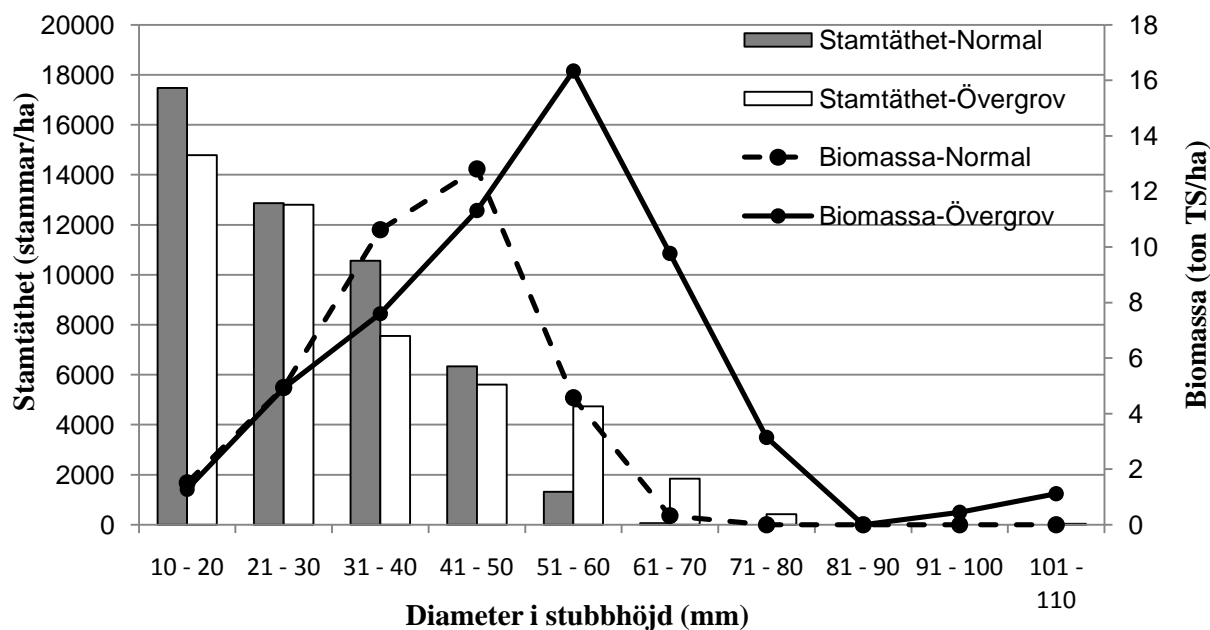
Tabell 4. Beståndskaraktäristik på de två typodlingarna, "normal" och "övergrov" i medelvärden, samt medelvärdet för båda odlingarna

Table 4. Characteristics of the two type plantations, "normal" and "overgrown" in average values, and average values for both plantations

	"Normal"	"Övergrov"	Medel
Stolar per ha	13815	12765	13290
Stammar per stol	3,5	3,7	3,6
Stammar per ha	48353	47231	47792
Diameter i stubbhöjd (cm)	2,7	3,1	2,9
Höjd (m)	5,4	6,0	5,7
Årlig medeltillväxt (ton TS/ha och år)	6,0	9,3	7,7
Biomassa ¹ (ton TS/ha)	36	56	46
Biomassa ² (ton TS/ha)	41	62	52

¹ Baserat på framtagen funktion i studien, funktion 3. ² Baserat på Hytönen et al. (1995) funktioner anpassade för gödslad *Salix dasyclados*.

I den "normala" typodlingen/området hade den grövsta stammen en dsh av 6,1 cm och i det "övergrova" 10,0 cm. I den "övergrova" typodlingen var 15% av stammarna > 5 cm vilket motsvarade 55% av biomassamängden, och i det "normala" var 3% av stammarna > 5 cm, vilket motsvarade 14% av biomassamängden (Fig. 6).



Figur 6. Fördelning av stammar och biomassa per ha i diameterklasser för de två typodlingarna "normal" och "övergrov".

Figure 6. Distribution of stems and biomass per ha in diameter classes for the two type plantations "normal" and "overgrown".

Maskiner och system

Vid fältstudierna användes en skördare och en skotare. Skotaren användes även som drivare under försöken. Skördaren var en Valmet 911.1 (Komatsu Forest AB, Sverige) vilken hade en massa på 15,2 ton, hade fyra hjul, en bredd på 2,7 m och en motoreffekt på 129 kW (Fig. 7, till vänster). Skördaren var utrustad med en 9,8 meters Cranab CRH 16 kran (Cranab AB, Sverige) och Bracke C16.a (Bracke Forest AB, Sverige), ackumulerande fällaggregat. Fällaggregatet hade en massa på 500 kg och kunde kapa stammar upp till 26 cm i diameter, vilket den gjorde med en cirkulär klinga av en diameter på 80 cm och försedd med en sågkedja. Maskinen var utrustad med åtta arbetsstrålkastare, två på kranen och sex på hytten. Skotaren var en Timberjack 1210B Pendo (John Deere Forestry Oy, Finland) vilket hade en massa på 15,5 ton, hade åtta hjul (två boggiepar), en bredd på 2,8 m och en motoreffekt på 114 kW (Fig. 7, till höger). Skotaren var utrustad med en 10 meters Loglift 71 FT kran (Loglift Jonsered AB, Sverige). Lastutrymmet hade en lastarea av 4,2 m². Skotaren var utrustad med en grotgrip med en griparea av 0,36 m². Maskinen var utrustad med tio arbetsstrålkastare, två på kranen och åtta på hytten. När skotaren användes som en drivare ersattes grotgripen med en Naarva Grip 1500-25E klipp-grip (Pentin Paja Oy, Finland) som kunde klippa stammar upp till 25 cm i diameter med ett ”giljotinblad”.



Figur 7. Till vänster skördaren, Valmet 911.1, och till höger skotaren, Timberjack 1210B Pendo, som även användes som drivare.

Figure 7. The Valmet 911.1 harvester (to the left) and the Timberjack 1210B Pendo forwarder (to the right) which also was used as a harwarder.

Under försöken studerades tre olika maskinarbeten och tre olika maskinförare användes. Maskinarbetena var: fällning med skördare; skotning med skotare; och fällning och skotning med drivare. Skördaren kördes av en och samma förare under hela försökstiden vilken hade två års erfarenhet med det ackumulerande fällaggregatet i energigallringar, men hade inte tidigare arbetat i salixodling. De två andra förarna körde skotaren: förare ett hade fyra års erfarenhet av skotningsarbete och förare två hade sex års erfarenhet. Förare ett körde även skotaren när den var utrustad som drivare och av detta arbete hade han två års erfarenhet.

Avstånden mellan körstråk var 10-12 m (5-6 rader) vid studier på skördaren (och skotaren) och var 4-6 m (2-3 rader) vid studier av drivaren (Fig. 8 & 9). Skördaren studerades vid skörd av antingen 5 eller 6 dubbelrader, således skördades alltid 2 rader framför maskinen och 3 eller 4 rader vid sidan (Fig. 8). De fällda stammarna lades i högar i ca 45 graders vinkel snett bakåt vid

sidan av maskinen med rotändan mot körstråket (Fig. 8). Studieytans storlek var ej bestämd i förväg utan i varje behandling så skulle skördarens produktiva arbetstid vara minst 0,5 timme och max 1 timme. Startpositionen och stoppositionen i varje studieyta markerades och sträckan/arean inmättes efter skörd.

Försöken med skördaren genomfördes som ett randomiserat blockförsök (3 block) med tre olika faktorer: beståndstyp (α) normal eller övergrovt); antal skördade dubbelrader (β) 5 eller 6); och arbetsmetod (γ) skörd framåt eller skörd från sida till sida (Fig. 8a-b)). Varje block innehöll således åtta olika behandlingar (Tabell 5). Behandlingseffekter och interaktionseffekter analyserades med ANOVA, detta med följande modell där blocken är nästlade i faktor (α), beståndstyp:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + c_{l(i)} + \alpha_i \beta_j + \alpha_i \gamma_k + \beta_j \gamma_k + \alpha_j \beta_j \gamma_k + \beta_j c_{l(i)} + \gamma_k c_{l(i)} + \varepsilon_{ijkl(i)}$$

där μ ger medelvärdet, α , β , γ anger effekter av faktorer, c anger blockeffekt och ε anger den slumpmässiga feltermen.

Tabell 5. Beskrivning av försöksdesign för experiment på skördaren. n = antal upprepningar (jmf. Fig. 8)

Table 5. Description of experimental design of harvester trials. n = number of repetitions (cf. Fig. 8)

	Normal				Övergrovt			
	5 rader		6 rader		5 rader		6 rader	
	Framåt ($n=3$)	Från vänster till höger ($n=3$)	Framåt ($n=3$)	Från vänster till höger ($n=3$)	Framåt ($n=3$)	Från vänster till höger ($n=3$)	Framåt ($n=3$)	Från vänster till höger ($n=3$)
Behandlings-kombination	Normal	Normal	Normal	Normal	Övergrovt	Övergrovt	Övergrovt	Övergrovt
	5 rader	5 rader	6 rader	6 rader	5 rader	5 rader	6 rader	6 rader
	Framåt	Från vänster till höger	Framåt	Från vänster till höger	Framåt	Från vänster till höger	Framåt	Från vänster till höger

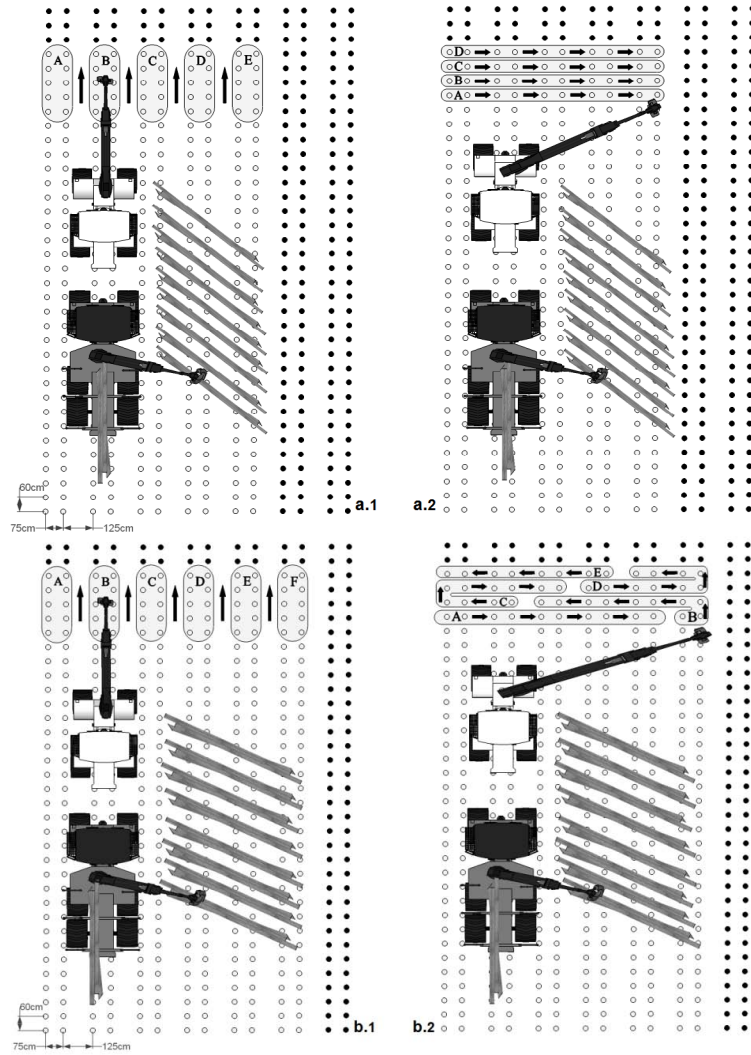
Efter att försöken med skördaren avslutats skotades materialet ihop. Försöken med skotaren genomfördes enligt följande: Skotaren körde i samma stråk som skördaren och lastade materialet separat från behandlingarna (normalt eller övergrovt och 5 eller 6 rader). Skillnaden mellan 5 och 6 rader var storleken på högarna (Fig. 8a-b). Skotaren lastade alltid till fullt lass, dvs. upp till stöttornas höjd. Om lasset inte blev fullt vid första studieytan körde maskinen fram till nästa studieyta med samma behandling och lastade. Proceduren upprepades till ett fullt lass uppnått. Därefter skotades materialet till väggkant och avlastades. Försöken med skotaren genomfördes med samma design som för skördaren, dvs, skotaren lastade biomassan från de olika behandlingskombinationerna enligt tabell 5. Observationsenheten var ett fullt lass. Under

försöken med drivaren arbetade maskinen endast vid sidan om sig och de fällda träden direktlastades på lastutrymmet (Fig. 9). När ett fullt lass uppnåddes skotades materialet till väggkant för avlastning. Försöket utfördes som ett randomiserat blockförsök (tre block) i den ”övergrova” odlingen, där effekterna av att skörda 2 dubbelrader eller 3 studerades (se Fig. 9). Som observationsenhet användes ett fullt lass, dvs. totalt studerades 6 fulla lass.

Försöket analyserades med ANOVA, med följande två-vägs modell:

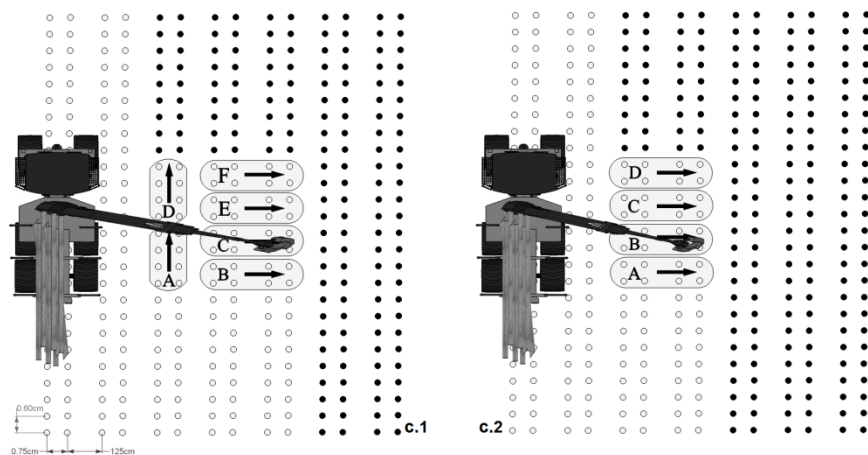
$$y_{ij} = \mu + t_i + b_j + e_{ij}$$

, där μ anger medelvärdet, t_i anger behandlingseffekt, b_j anger blockeffekt och e_{ij} anger den slumpmässiga feltermen. Utöver detta försök så skördades även ett block (två ytor/lass) i den ”normala” odlingen med drivaren. Medelvärdet över de olika behandlingarna i varje typbestånd jämfördes sedan med Tukey's t-test.



Figur 8. Beskrivning av arbetsmetodiken för skördaren (vit maskin) och skotaren (grå maskin) vid skörd av antingen 5 rader (a) eller 6 rader (b) och framför maskinen (a.1 & b.1) eller från vänster till höger (a.2 & b.2). Båda maskinerna arbetade i körriktning ”uppåt” i figuren. I a.1, a.2 och b.1. indikerar A-E(F) arbetsmönstret; rad A skördades först och dessa träd lades i högar vid sidan, sedan rad B osv. I b.2. indikerar A-E arbetsmönstret; först skördades stråk A, från vänster till höger och lades i högar, därefter B, nu från höger till vänster och lades i högar osv. Skotaren arbetade lika i både a och b, enda skillnaden var mängd biomassa per hög.

Figure 8. Description of the work methods used by the harvester (white machine) and forwarder (grey machine) at harvest of either 5 (a) or 6 (b) rows, in front of the machine (a.1 & b.1) or from left to right (a.2. & b.2). The machines work in an “up-word” direction in the figure. In a.1, a.2 and b.1 A-E(F) indicate work pattern; first was row A harvested and bunched, then row B etc. In a.2 A-E indicate work pattern; first was stems in row a harvested, from left to right, then bunched, then was stems in row B harvested, now from right to left, then bunched. The forwarder worked with the same method in both (a) and (b), the only difference were the amount of biomass per bunch.



Figur 9. Beskrivning av arbetsmetodiken för drivaren vid skörd av antingen 3 rader (c.1) eller 2 rader (c.2). Maskinen arbetade i körriktning ”uppåt” i figuren. I c.1 skördade maskinen först i raden närmast maskinen, yta A och, sedan skördades ytor B och C. Därefter skördades yta D, i raden närmast, sedan ytor E och F. Maskinen direktlastade biomassen från varje delyta, innan nästa yta i ordningen skördades.

Figure 9. Description of the harvester work harvesting either 3 rows (c.1.) or 2 rows (c.2). The machine worked in the driving direction, “up” in the figure. The alphabetic sequence of capital letters in each drawing show the sequence of crane cycles, the arrows show the direction of crane movements and the rounds show the felled surfaces per crane cycle. The machine direct-loaded the biomass after each surface had been harvested.

Tidsstudie

Maskinernas arbetstid mättes med en fältdator (Allegro Field PC[®]) utrustad med programvara för tidsstudier (SDI; Skogforsk). Tidsstudien utfördes av en erfaren tidsstudieman. Under maskinarbetet med skördaren observerades, per studieyta, antal stammar som ackumulerades per krancykel, antal krancykler, antal maskinpositioner och antal högar. Detta utfördes av en fältassistent. Under maskinarbetet med skotaren och drivaren observerades, per studieyta, antal lastade högar per maskinposition, lastningsavstånd och transportavstånd (skotningsavstånd) samt för drivaren så registrerades antal ackumulerade träd per krancykel. Om inte ett fullt lass kunde uppnås så mättes kvarvarande höjd på laststakarna.

Då vissa av skördarens arbetsmoment var relativt korta i tid, och därmed svåra att registrera, valdes frekvensstudie som studiemetod. Frekvensen sattes till 7 sekunder, dvs. var sjunde sekund registrerades rådande arbetsmoment med högst prioritet (Tabell 6). Under arbetet mättes även löptiden med ett tidtagarur, detta för att kunna kontrollera och korrigera för ”missar” i frekvensmätningen.

Tabell 6. Definitioner på studerade arbetsmoment på skördaren. Om två arbetsmoment överlappar registreras arbetsmomentet med högst prioritet, dvs. 1 före 2 etc.

Table 6. Definitions of time elements and priority used in frequency study of the harvester, if two work elements overlap, 1 is registered prior to 2 etc.

Arbetsmoment	Beskrivning	Prioritet
<i>Kran ut</i>	Startar när en tom kran rör sig mot stammarna och slutar när stammen är nådd.	1
<i>Fällning och ackumulering</i>	Startar när stammen är nådd och slutar när sista stammen i krancykeln är fälld (förflyttning till nästa stol är inkluderat).	1
<i>Kran in</i>	Startar när sista stammen i krancykeln är fälld och slutar när stammarna är lagda i högar på marken (även tillrättläggning av högen är inkluderat)	1
<i>Ompositionering</i>	Startar när maskinens hjul rullar och slutar när hjulen stannar.	2
<i>Övrigt</i>	Annat arbete, t.ex. upplöckning av tappade stammar.	3
<i>Avbrott</i>	T.ex. korta raster, byte av sågkedja.	4

Vid arbetstidsregistrering av skotaren och drivaren mättes tiden kontinuerligt. Detta med samma dator och programvara som ovan. Även här delades arbetet upp i arbetsmoment (Tabell 7).

Tabell 7. Definitioner på studerade arbetsmoment på skotaren (S) och drivaren (D). Om två arbetsmoment överlappar registreras arbetsmomentet med högst prioritet, dvs. 1 före 2 etc.

Table 7. Definitions of time elements used for the forwarder (S) and the harwarder (D) time study, if two work elements overlap, 1 is registered prior to 2 etc.

Arbetsmoment	Beskrivning	Prioritet
<i>Kran ut (D)</i>	Startar när en tom kran rör sig mot stammarna och slutar när stammen är nådd.	1
<i>Fällning och ackumulering (D)</i>	Startar när stammen är nådd och slutar när sista stammen i krancykeln är fälld (förflyttning till nästa stol är inkluderat).	1
<i>Lastning (D)</i>	Startar när sista stammen i krancykeln är fälld och slutar när högen är lagd på lastutrymmet.	1
<i>Lastning (S)</i>	Startar när en tom kran rör sig från lastutrymmet mot en hög och slutar när högen är lagd på lastutrymmet.	1
<i>Ompositionering (S-D)</i>	Startar när maskinens hjul rör sig och slutar när hjulen stannar.	2
<i>Körning lastad (S-D)</i>	Startar när maskinens hjul rör sig och slutar när maskinen nått avlägg vid bilväg.	2
<i>Avlastning (S-D)</i>	Startar när kranen når första stammarna på lastutrymmet och slutar när hela lasset är lossat och kranen är positionerad på lastutrymmet.	2
<i>Körning olastad (S-D)</i>	Startar när maskinen hjul rör sig och slutar när maskinen stannar vid en studieyta för lastning/skörd.	2
<i>Övrigt (S-D)</i>	Annat arbete, t.ex. upplöckning av tappade stammar.	3
<i>Avbrott (S-D)</i>	T.ex. korta raster, reparationer.	4

Maskinstudierna genomfördes under 8 arbetsdagar i både dagsljus och i mörker. Marken var under denna tid täckt med ett ca 5 cm tjockt lager av porös snö. Totalt skördades en yta av 1,75 ha, jämt fördelat på den ”normala” och det ”övergrova” typodlingen/området. Efter att maskinstudierna var avslutade inventerades studieytorna med avseende på stubbhöjd, antal skadade stubbar och spårdjup efter maskinerna. En skada definierades som att minst halva radien

på stubbens stamdel var delad/spräckt. Spårdjupet mättes från bottenytan upp till kanten på en sida av spåret. Inventeringen utfördes i 28 systematiskt utlagda ytor, varje yta 30 m lång och innehållandes 20 stolar.

Övrigt

Under januari 2011, cirka två månader efter att fältstudierna avslutats, användes den skördade biomassan, som lagts i vältor, vid test av buntningsutrustning (pers. komm. Hans Eriksson 2011). Biomassan buntades med GTK 5100 buntningsmaskin (Rogbico AB, Sverige). Totalt tillverkades 294 buntar med en total rå vikt av 234,34 ton, vilket ger en medelvikt per bunt av 790 kg. Buntarna var i medeltal 510 cm långa och hade en diameter av 75-80 cm. Räknat på en diameter av 77 cm ger det en volym av $2,37 \text{ m}^3$ per bunt och således uppnås en bulkdensitet av 332 kg/m^3 eller 166 kg TS/m^3 (baserat på 50% fukthalt).

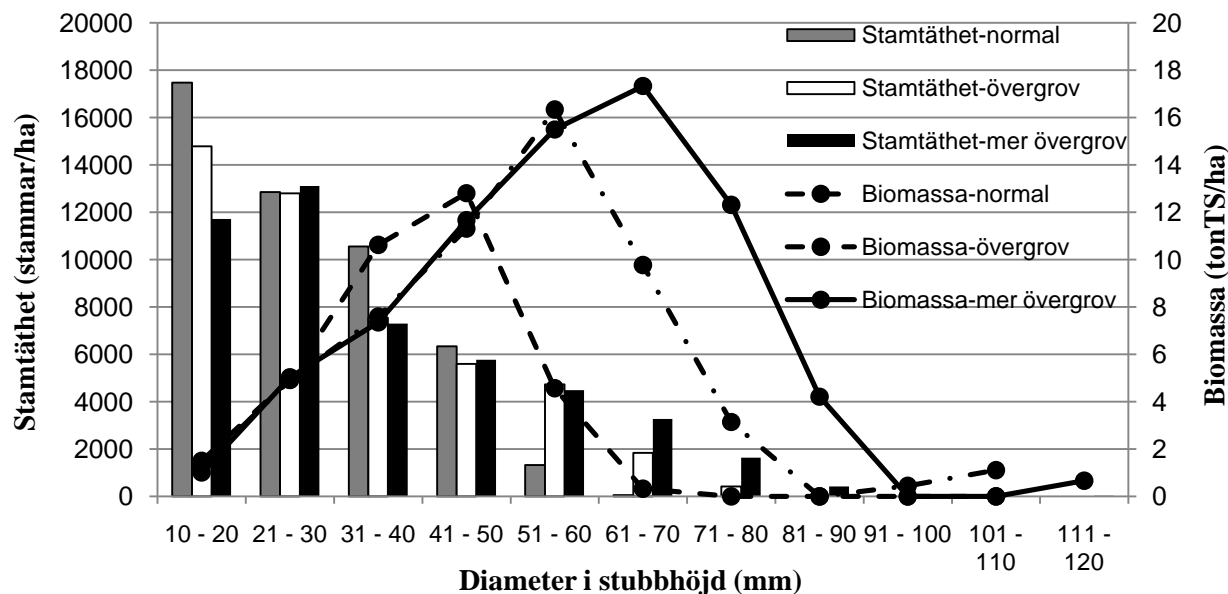
Systemanalyser

Studiedesign och begränsningar

Fem olika skördesystem jämfördes vid skörd av tre olika typodlingar av salix; ”normal”, ”övergrov” och ”mer övergrov”. Tre olika skördeprinciper ingick i studien; direktflisning, skörd av helstam och buntskörd. Studien avgränsades till att gälla skördekostnader till, och biomassaintäkter vid, vägkant/åkerkant för respektive bränslesortimenten flis i högar, helstam i välta och buntar i välta. Systemens uppbyggnad baseras på data från tidigare beskriven fältstudie (Ranstastudien) och litteraturläsa.

Typodlingar

Typodling ”normal” hade en dsh i medeltal av 2,7 cm och en biomassa av 36 ton TS/ha och typodling ”övergrov” hade en dsh i medeltal av 3,1 cm och en biomassa av 56 ton TS/ha (se Tabell 4 & Fig. 6). Typodling ”mer övergrov” var hypotetisk och konstruerades genom att skriva fram typodlingen ”övergrov” två växtsäsonger med antagandet att den årliga tillväxten var densamma som medeltillväxten för de sex tidigare åren: $56 \text{ ton TS/ha} / 6 \text{ år} = 9,3 \text{ ton TS/ha år}$, $9,3 \text{ ton TS/ha och år} \times 8 \text{ år} = 75 \text{ ton TS/ha}$ (diametern beräknades på liknande sätt). Dvs., typodling ”mer övergrov” hade en ålder av 8 år och beräknades ha en dsh i medeltal av 4,2 cm och en biomassa av 75 ton TS/ha. Figur 10 visar hur stamantalet och biomassan fördelar sig i olika storleksklasser för respektive typodlingar. I typodlingar ”normal”, ”övergrov” och ”mer övergrov” utgör stammar $> 5 \text{ cm dsh}$ respektive 3%, 15% och 21% av stamantal/ha. De grövsta stammarna i ”mer övergrov” uppnår en dsh av 12 cm.



Figur 10. Fördelning av stammar och biomassa per ha i diameterklasser för de tre typodlingarna "normal", "övergrov" och "mer övergrov".

Figure 10. Distribution of stems and biomass per ha in diameter classes for the three type plantations "normal", "overgrown" and "more overgrown".

Storleken på respektive typodlings skördade areal sattes till 10 ha. Det antogs även att maskinerna endast förflyttade sig parallellt med raderna och den skördade biomassen avlastades på endast ett avlägg per odling och i direkt anslutning till odlingens kant. Detta gav ett medeltransportavstånd av 250 m per odling.

Studerade maskinsystem

Maskiner och system

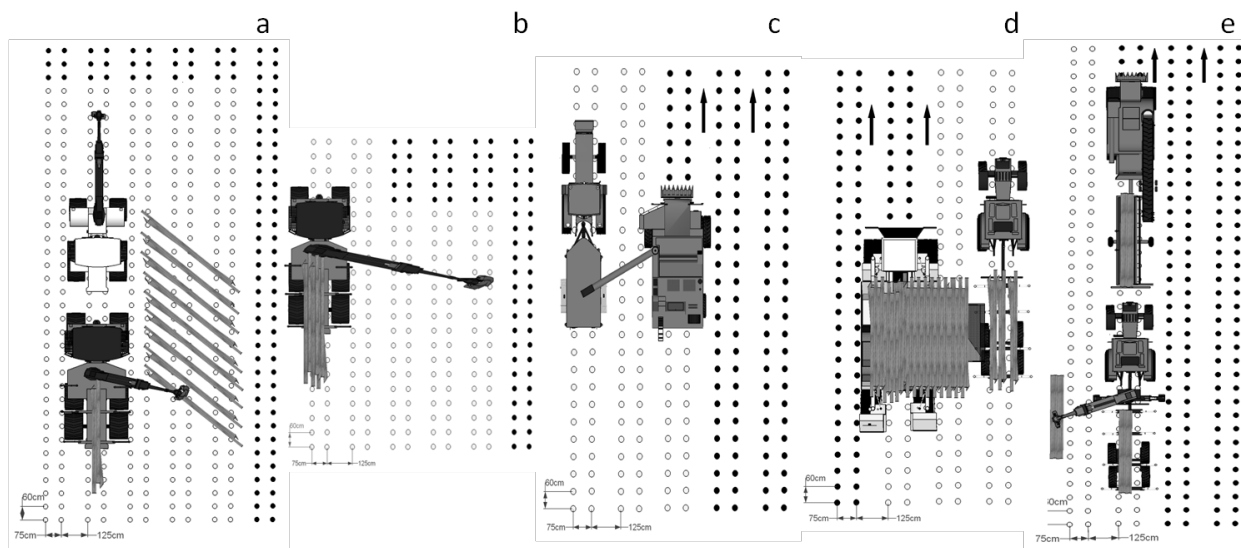
Två av de fem maskinsystemen utgjordes av skogsmaskinsystem: System 1 bestod av en skördare och en skotare och System 2 av en drivare (se Fig. 11a, b). Båda systemen skördade helstammar, från åker till åkerkant, enligt metoder beskrivna i Ranstastudien ovan.

System 3 motsvarade det konventionella direktflisningssystemet bestående av en Claas Jaguar utrustad med skärbordet HS-2 (Claas KGaA mbH, Tyskland) och två traktorer med tippvagnar/baljor (flisskyttlar) med en lastkapacitet av 30 m³ flisad bulkvolym vardera (se Fig. 11c). Salixskördaren fäller och direktflisar en dubbelrad per körslag och flisen blåses direkt ner i vid sidan parallellt gående flisskyttel, vilket vid fullt lass transporterar flisen till väggkant/åkerkant.

System 4 skördar helstammar (liknande prototypen Emipre 2000 (se Mitchell et al. (1999)) och består av en salixskördare som fäller och direktlastar helstammarna under kontinuerlig gång direkt på en vid sidan parallellt gåendes traktor med griplastarvagn (helstamskyttel) (se Fig. 11d). Systemet består av en skördare och tre helstamskyttlar, enligt rekommendationer av

Danfors och Nordén (1995b). Detta system är hypotetiskt och är designat med direktlastning av helstammar på skyttlar för ökad systemproduktivitet.

System 5 skördar helstammar och tillverkar buntar under kontinuerlig gång i fält. Buntarna transporteras sedan med traktor och griplastarvagn till väggkant/åkerkant (se Fig. 11e). Skördaren består av en standard traktor utrustad med fällningsutrustning och en efterföljande vagn utrustad med bunningsutrustning: konceptet baseras på en prototypmaskin (Loughry) studerad i skörd av energiodling på Nordirland beskriven av Mitchell et al. (1999) och har kompletterats med bunningsutrustning.



Figur 11. Schematisk beskrivning av de studerade skördesystemen: skogsmaskiner för skörd av helstam, a) skördare och skotare och b) drivare (se även Fig. 7-9); c) direktflisning med jordbruksskördare och flisskyttel; d) skörd av helstam med jordbruksskördare och direktlastning på helstamskyttel och; e) skörd och buntning av helstammar med traktor med fällningsutrustning samt vagn med bunningsutrustning och transport av buntar med traktor och griplastarvagn.
Figure 11. Schematic description of studied harvesting systems: whole stem harvesting with forest machines, a) harvester and forwarder and b) a harwarder (se also Figs. 7-9); c) cut and direct chipping with a forage harvester and a chip-shuttle; d) whole stem harvesting with a stem harvester and direct-loading on a whole-stem-shuttle; e) whole stem harvesting and bundling with a tractor quipped with a felling unit and a trailer equipped with a bundling unit and hauling to road side with a tractor and grapple-load-trailer.

Produktivitet

Tabell 8 visar en sammanställning över respektive maskiners produktivitet i de olika typodlingarna vilket sedan använts för kostnadsberäkningar. Produktivetsdata för skogsmaskinerna är hämtade från resultatavsnittet för Ranstastudien. För skogsmaskinerna i systemanalysen skördade skördaren och drivaren det maximala möjliga antalet dubbelrader per körslag; för skördaren blev det 6 rader (Fig. 8b.1-2) och för drivaren 3 rader (Fig. 9c.1). Dessa arbetsmetoder medför minimal andel körd/påverkad yta samt hög produktivitet. Per ha arbetade skördaren i 14 G_0 timmar och då denna tid inte ökade vid skörd av biomassatätare bestånd antages samma tidsåtgång för alla typodlingar. Skotarens tidsåtgång (G_0 -timmar) per ha ökade

med ökad biomassa per ha; i ”normal” 5,0 timmar, i ”övergrov” 7,8 timmar och i ”mer övergrov” 10,5 timmar. Drivarens tidsåtgång per ha ökade med ökad biomassa per ha, men något mindre än för skotaren. Tidsåtgången (G_0 tid) var 47,8 timmar i ”normal”, 54,9 timmar i ”övergrov” och 57,0 timmar i ”mer övergrov”. Förekomsten av avbrottsstid sattes till 5% av maskinarbetstiden (G_{15} -tid) för båda skogsmaskinsystemen och antas inte öka vid skörd av typodlingar med mer biomassa per ha då maskinerna är byggda för betydligt besvärligare förhållanden.

Produktiviteten på salixskördaren med direktflisning baserades på resultat från Danfors och Nordén (1995b) studie där man fann att maskintiden (G_{15} tid) ökade med 80% när man gick från att skörda 15 ton TS/ha till 40 ton TS/ha. Avbrottsstiden antas öka med 5% i den ”övergrova” odlingen och med 10% i den ”mer övergrova” odlingen, ökningarna är relativt G_{15} tiden i den ”normal” odlingen. Detta antagande baseras på resultat från Spinelli et al. (2008). Ytterligare 9% väntetid adderades till G_{15} tiden som ett resultat av att tre maskiner måste samverka, detta enligt resultat från Spinelli et al. (2009). Dvs., maskintiden för hela systemet var 1,8 och 3,0 samt 9,0 G_{15} -timmar/ha för respektive den ”normala”, ”övergrova” och ”mer övergrova” odlingen.

Produktiviteten på stamskördaren med direktlastning baserades på resultat från Danfors och Nordén (1995b) studie där de fann att G_{15} tiden ökade med 63% när man gick från att skörda 15 ton TS/ha till 40 ton TS/ha. Samma andel avbrottsstid, dvs. 5% och 10%, som för skördaren med direktflisning i olika typodlingar antogs. Dvs., maskintiden var 1,1 och 2,0 samt 6,3 G_{15} -timmar/ha för respektive den ”normala”, ”övergrova” och ”mer övergrova” odlingen. Eftersom systemet består av tre skyttlar antas ingen extra väntetid för skördaren.

Buntskördaren tidsåtgång var 7,7 G_{15} -timmar/ha vid skörd av 26 ton TS/ha, enligt resultat från Mitchell et al. (1999). Både skördarens framryckningshastighet och buntningen begränsas inte av biomassa/ha, dvs. G_{15} tid per ha antas således vara konstant oavsett typodling. Avbrottsstiden antas dock öka med 5% i den ”övergrova” odlingen och med 10% i den ”mer övergrova” odlingen. Dvs., maskintiden var 7,7 och 8,1 samt 8,5 G_{15} -timmar/ha för respektive den ”normala”, ”övergrova” och ”mer övergrova” odlingen.

För transport av buntad salix antogs buntarna en dimension enligt data beskrivet i Ranstastudien, Övrigt ovan, dvs. en längd av 510 cm, diameter av 77 cm en rå vikt av 790 kg (fukthalt 50%) vilket ger en bulkdensitet per bunt av 332 kg/m³. För transport till åkerkant/väggkant antogs traktorn vara utrustad med en griplastarvagn med möjlighet att lasta 12 buntar per lass, dvs. 9,4 råton/lass. Produktiviteten på transportarbetet baseras på en beräkningsmodell av Gullberg (1997) där koefficienter motsvarande en stor traktor och buntarnas dimensioner användes som indata. Maskintiden antogs innefatta en avbrottsstid av 5% (lika som för skotaren ovan), dvs. maskintiden var 3,8 och 5,1 samt 6,6 G_{15} -timmar/ha för respektive den ”normala”, ”övergrova” och ”mer övergrova” odlingen.

Tabell 8. Maskinernas antagna produktivitet i de olika typodlingarna*Table 8. Assumed productivity of the machines included in the different systems*

	Typodling		
	“normal”	“övergrov”	“mer övergrov”
Skördad biomassa (ton TS/ha)	36	56	75
Skördare (ton TS/G ₁₅ -timme)	2,4	3,8	5,1
Skotare (ton TS/G ₁₅ -timme)	6,8	6,8	6,8
Drivare (ton TS/G ₁₅ -timme)	0,7	1,0	1,3
Salixskördare, direktflisning (ton TS/G ₁₅ -timme)	20,5	18,9	8,3
Salixskördare, direktlastning helstam (stamskördare) (ton TS/G ₁₅ -timme)	32,8	28,5	11,9
Salixbuntskördare, helstam (ton TS/G ₁₅ -timme)	4,7	6,9	8,9
Traktor med griplastarvagn (ton TS/G ₁₅ -timme)*	9,5	10,9	11,4

*Vid skörd och transport av buntar och helstammar.

Kostnader

Timkostnaden för skogsmaskinerna och traktor med vagn (både för transport av flis, helstammar och buntar) baserades på data på årligt maskinutnyttjande redovisat i tabell 1. För salixskördare (direktflisning, stamskördare med direktlastning och buntskördare) antogs ett årligt maskinutnyttjande på 600 G₁₅-timmar. En kalkylränta på 6% och en ekonomisk livslängd på 6 år för skogsmaskinerna och 8 år för övriga maskiner antogs. Inköpspriset för medelstora skogsmaskiner som redovisas i Laitila (2008) användes och för motsvarande pris på salixskördaren med direktflisning användes data från Spinelli et al. (2009). Inköpskostanden för salixhelstamskördaren baserades på data för prototypmaskinen beskriven i Danfors och Nordén (1995a) vars kostnad har uppdaterade till dagens prisnivå enligt följande. Prisrelationen mellan salixbuntskördaren och en Claas Jaguar beskrivet i Danfors och Nordén (1995a) antogs vara densamma i nutid, dvs. en prisrelation på 57% mot en Claas Jaguar salixskördare med direktflisning. Priset på salixbuntskördaren baseras på priset av en traktor med vagn plus extra kostnader för en fällningsenhet och en buntningsenhet. Denna extrakostnad antogs vara av samma proportion som extrakostanden för en standard skotare utrustad med en fällningsenhet och en buntningsenhet, vilket enligt Kärhä et al. (2010) ger en ökad timkostnad på 83%. Dvs., om vi antar en timkostnad på en traktor med vagn på 560 kr/G₁₅-timme och en kostnadsökning för fällningsutrustning och buntningsutrustning med samma proportioner som för skotaren i Kärhä et al. (2010) så blir timkostnaden på buntskördaren 1027 kr/G₁₅-timme vid en årlig maskintidutnyttjande av 600 G₁₅-timmar. Inköpspriset på en traktor med vagn baseras på data från Spinelli et al. (2010) (se Tabell 1) där också en förarkostnad på 200 kr/G₁₅-timme inkluderats.

Till maskinkostnaderna tillkommer även kostnader för maskinflytt. För skogsmaskinerna antogs en flyttkostnad av 2000 kr per maskin och flytt, vilket kan ses som ett medelvärde för flyttkostnader inom skogsbruket i Sverige. Flyttkostnaden för salixskördare antogs vara samma som för skogsmaskinerna samt att flyttkostnaden för traktor med vagn inkluderats i flyttkostnaden för salixskördarna.

Intäkter

Skördade helstammar i vält vid bilväg hade ett pris av 550 kr/ton TS och baseras på ett marknadspris för träddelar på 220 kr/m³ fast (reviderat från 210 kr/m³ fast till 220 kr/m³ fast under studietiden (pers. komm. Mikael Forsman 2010), en rå densitet av 800 kg/m³ fast (enligt Norra Skogsägarnas prislista (Anon. 2010)) och en fukthalt på 50% (av rå vikt). Buntade helstammar i vält vid bilväg hade ett pris av 660 kr/ton TS och baserades på antagandet att priset relativt helstammar i vält vid bilväg ökar med 20%. Flisade helstammar i vält vid bilväg baserades på ett pris av 750 kr/ton TS vilket i sin tur baseras på ett marknadspris på 300 kr/m³ fast för biomassa som levereras i flisad form (enligt Norra Skogsägarnas prislista (Anon. 2010)).

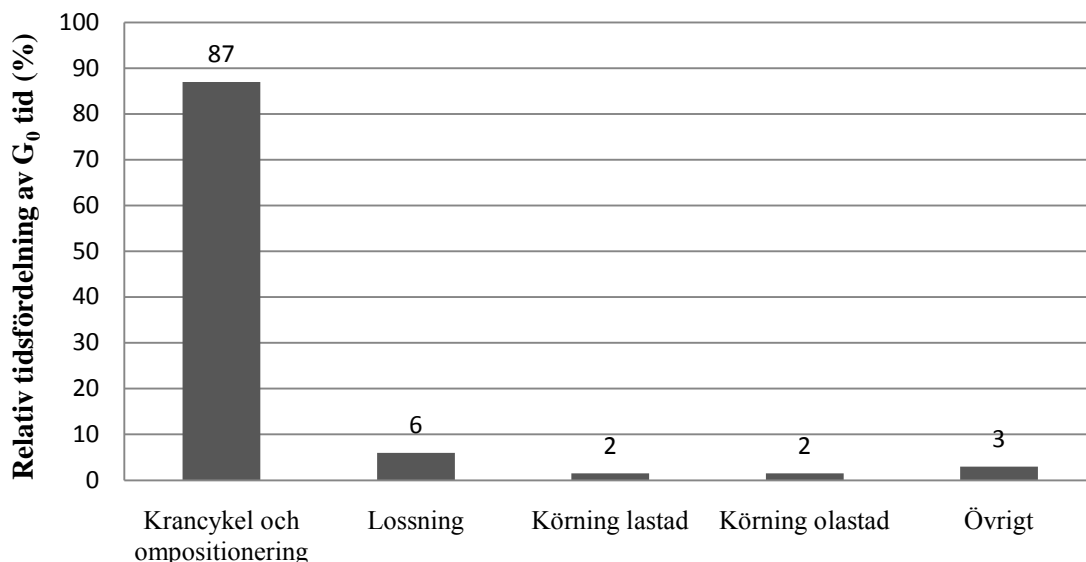
Resultat

Fältstudier

Pilotstudien

Med Hytönen et al. (1995) biomassafunktion beräknades den skördade biomassan till 15 ton TS (28 råton) i odling 1 och 18 ton TS (34 råton) i odling 2, vilket motsvarar ett uttag av 74 ton TS/ha (135 råton/ha) respektive 94 ton TS/ha (172 råton/ha). Med den i studien framtagna biomassafunktionen beräknades den skördade biomassan till 19 ton TS (34 råton) i odling 1 och 18 ton TS (33 råton) i odling 2. Den invägda biomassan var 26 råton i odling 1 och 35 råton i odling 2, vilket motsvarar 127 råton/ha respektive 171 råton/ha. Dvs, i odling 1 gav Hytönen et al. (1995) funktion 6% högre biomassa jämfört med invägningen och i odling 2 ca 1% mera än invägningen. I medeltal för båda odlingarna gav funktionen 4% mera biomassa än invägningen. I medel skördades en invägd massa av 149 råton/ha.

Totalt tidsstuderades drivaren i 18,5 G_{15} -timmar varav 4,5% utgjordes av avbrotts-tid. Den produktiva arbetstiden (G_0 tid; utan avbrott) var vid ett skotningsavstånd på 380 m 7,3 G_0 -timmar i odling 1 och 10,4 G_0 -timmar vid ett skotningsavstånd på 170 m i odling 2. I medel skördades 4,4 stammar > 1 cm per krancykel och det gick 58 krancykler per lass. I figur 12 ges fördelningen arbetad tid per arbetsmoment av total G_0 tid i medeltal för båda odlingarna.



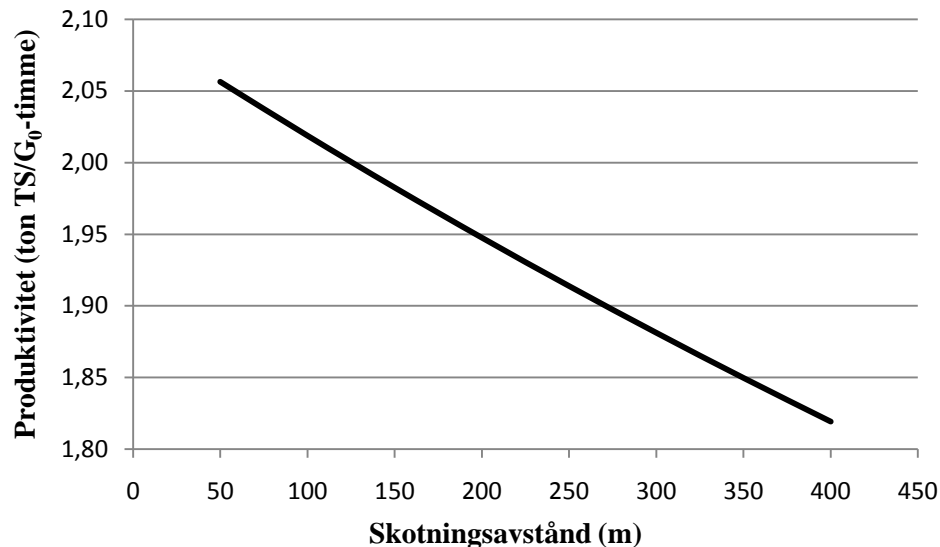
Figur 12. Tidsåtgång av effektiv arbetstid vid drivarens arbete uppdelat på arbetsmoment i medeltal för odling 1 och 2 och vid ett skotningsavstånd av 275 m.

Figure 12. Productive work time consumption of the harrowers work divided per work element in mean values for plantation 1 and 2 at a forwarding distance of 275 m.

Vid skörd i odling 1 observerades en ökad tidsåtgång pga. avkapning av uppräckta stubbar före lastning kunde ske, denna tid registrerades som Övrigt tid.

Totalt skördades 18 lass, varav 16 var fulla och 2 hade ca 80% av full lastvolym. I medeltal vägde ett lass 3,3 råton. Skördarbetet, exklusive körning med och utan last samt lossning, tog i medel 0,85 G_0 -timmar/lass. Maskinens körhastighet lastad var 1,8 m/s och olastad 1,6 m/s. I medel, för båda bestånden (medelskotningsavstånd 275 m), blev tidsåtgången 44,6 G_0 -timmar/ha vilket motsvarar en produktivitet av 3,3 råton/ G_0 -timme (1,8 ton TS/ G_0 -timme) .

Figur 13 visar hur produktiviteten, baserat på medelproduktiviteten, varierar beroende på skotningsavståndet.



Figur 13. Drivarens produktivitet som funktion av skotningsavståndet.

Figure 13. The harwarder productivity as a function of the forwarding distance.

Ranstastudien

Skördaren

Totalt skördade skördaren en areal av 1,46 ha som innehöll en biomassa av 132 råton (65,5 ton TS) vilket motsvarar 90,4 råton/ha eller 44,9 ton TS/ha.

Skördaren studerades i 19,54 G_0 -timmar. En liten mängd avbrottstid tillkom (0,3%) varför det motsvarade 19,60 G_{15} -timmar. I medeltal åtgick 70% av skördarens G_0 tid till arbetsmomentet ”fällning och ackumulering”, ca 25% till övrigt kranarbete och resterande tid utgjordes främst av momentet ”ompositionering” (Tabell 9). Vid skörd av 5 rader jämfört med 6 rader var tidsåtgången (s/stol) för ”fällning och ackumulering” 9% lägre , för ”ompositionering” 44% högre och 9% lägre för den totala tidsåtgången. Detta resulterade i att produktiviteten (stolar/ G_0 -timme) ökade med 10%, från 959 till 1055. Dock hade inte typ av bestånd (”normalt” eller ”övergrovt”) och arbetsmetod (”från ”vänster till höger” eller ”framåt”) någon effekt på tidsåtgången (s/stol), samt att inga kombinationseffekter av dessa hittades. Produktiviteten (ton TS/ G_0 -timme) ökade med 54%, från 2,7 till 4,2, dvs. när man gick från skörd av ”normal” odling till av ”övergrovt” odling. Ökningen är analog med ökad mängd biomassa/ha. I medeltal för båda typodlingarna var produktiviteten 3,5 ton TS/ G_0 -timme. I medeltal skördades 13,0 stolar/krancykel i den ”normala” odlingen och 8,8 stolar/krancykel i den ”övergrova” odlingen.

Tabell 9. Tidsåtgång (G_0 tid) för enskilda arbetsmoment för skördaren och produktiviteten för det totala arbetet vid skörd av 5 eller 6 rader. n =antal upprepningar. Standardavvikelse anges inom parenteser

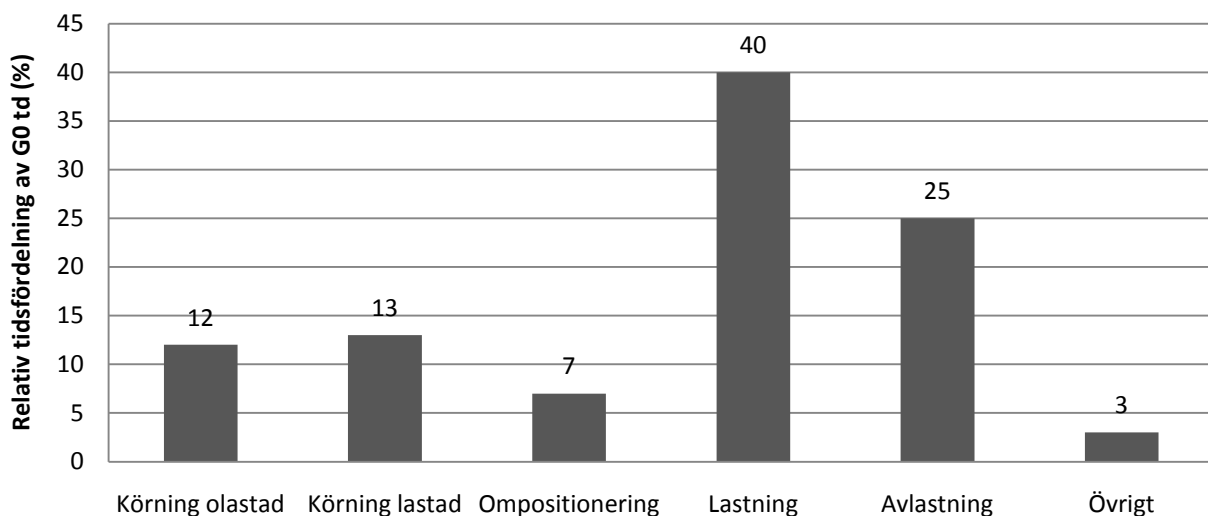
Table 9. Time consumption (delay time excluded) for respectively harvester's work elements and the productivity of total harvesting work in either 5 or 6 rows. n =number of repetitions. Standard deviations are given within brackets

	Behandling				p-värde
	5 rader		6 rader		
	(s/stol)	(%)	(s/stol)	(%)	
Kran ut	0,39	11,2	0,41	10,8	0,672
Fellning och ackumulering	2,40	69,4	2,71	71,5	0,010
Kran in	0,52	15,0	0,55	14,5	0,343
Ompositionering	0,13	3,9	0,09	2,4	0,012
Övrigt	0,01	0,4	0,03	0,7	0,071
Total tid	3,45	100	3,79	100	0,049
Tidsåtgång (G_0 -timme/ha)	12,7 (1,1)		14,0 (1,2)		0,044
Produktivitet (stolar/ G_0 -timme)	1055 (117)		959 (92)		0,034
Produktivitet (ton TS/ G_0 -timme)	3,6 (0,8)		3,3 (0,9)		0,073

Skotaren

Skotaren studerades i 7,03 G_0 -timmar. Cirka 8% avbrottstid tillkom varför det motsvarade 7,64 G_{15} -timmar. Skotningsavståndet varierade mellan 32 till 317 m och var i medeltal 163 m. I medeltal uppnådde skotaren ett fullt lass varje 47 m. Skotarens framryckningshastighet var 1,2 m/s vid körning olastad och 1,0 m/s vid körning lastad. Totalt skotades 25 lass, varav 22 fulla lass. I medeltal hade ett fullt lass en vikt av 5,3 råton (2,6 ton TS) vilket motsvarar en rå bulkdensitet av 220 kg/m³.

I figur 14 ges fördelningen av arbetad tid per arbetsmoment av total G_0 tid i medeltal för båda odlingarna.



Figur 14. Tidsåtgång (G_0 tid) vid skotningsarbetet uppdelat på arbetsmoment.

Figure 14. Time consumption (excluding delay time) of the forwarder work divided per work element.

I avlastningsarbetet åtgick i medeltal 4,66 G_0 -min/last (1,79 min/ton TS) och i medeltal hanterades 0,49 råton (0,25 ton TS) per krancykel. "Övrig" arbetstid motsvarade 0,22 G_0 -min/ton TS (0,58 min/last). Av det totala arbetet var det inga skillnader i effektivitet (G_0 tid/ton TS) mellan de tre behandlingarna, men vid kombination av odlingstyp och antal skördade rader uppvisades en signifikant skillnad ($p=0,035$): vid skotning i det "övergrova" beståndet i kombination med "5 rader" skiljde sig G_0 tiden signifikant mot kombinationerna "övergrovt" och "6 rader" och "normal" och "5 & 6 rader". Tidsåtgången (G_0 tid) för "övergrovt" och "5 rader" var 15% lägre i jämfört mot "övergrovt" och "6 rader". I medeltal, vid ett skotningsavstånd av 150 m, var skotarens tidsåtgång per ha 4,3 G_0 -timmar i det "normala" och var 6,7 G_0 -timmar i det "övergrova" beståndet. I medeltal, över alla behandlingar och vid ett skotningsavstånd av 150 m, var skotarens produktivitet 8,4 ton TS/ G_0 -timme.

I medeltal var koncentrationen av biomassa per bunt 42% högre i den "övergrova" odlingen jämfört den "normala" (Tabell 10). Detta medförde att i den "övergrova" odlingen behövdes i medel > 1 krancykler per bunt.

Tabell 10. Skotarens tidsåtgång i G₀ tid för de enskilda arbetsmoment som påverkas av faktorerna ”odlingstyp”, ”antal rader” och biomassakoncentration. n=antal upprepningar. Standardavvikelser anges inom parenteser

Table 10. Work time consumption (excluding delay time) of the forwarders work elements which are affected by the factors “type of plantation”, “number of rows”, and biomass concentration. n=number of repetitions. Standard deviations are given in brackets

	Behandling							
	“Normalt”				“Övergrov”			
	5 rader (n=6)		6 rader (n=6)		5 rader (n=6)		6 rader (n=6)	
	min/ton TS	%	min/ton TS	%	min/ton TS	%	min/ton TS	%
Ompositionering	0,53	17	0,55	17	0,54	14	0,47	14
Lastning	2,60	83	2,62	83	3,32	86	2,83	86
<i>Summa</i>	<i>3,13</i>	<i>100</i>	<i>3,17</i>	<i>100</i>	<i>3,86</i>	<i>100</i>	<i>3,30</i>	<i>100</i>
Koncentration av biomassa (ton TS/100 m)	3,60		4,32		5,60		6,72	
Massa per bunt (tonTS)	0,16 (0,01)		0,17 (0,04)		0,23 (0,02)		0,24 (0,02)	
Antal krancykler per bunt	1,00 (0,00)		1,00 (0,00)		1,04 (0,06)		1,13 (0,12)	
Antal buntar per maskinposition	1,13 (0,16)		1,16 (0,13)		1,10 (0,12)		1,14 (0,17)	

Drivaren

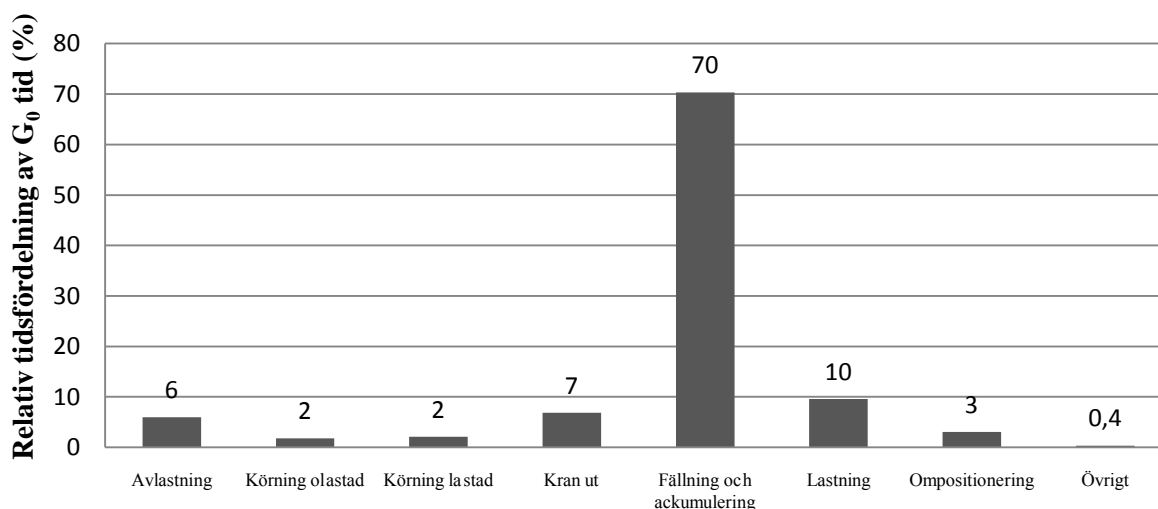
Drivaren studerades i 14,5 G₀-timmar. Cirka 4% avbrottstid tillkom varför det motsvarade 15,1 G₁₅-timmar. Totalt skördades en yta av 0,29 ha vilket motsvarade en biomassa av 28 råton (15 ton TS). Skotningsavståndet varierade mellan 45 och 280 m och var i medeltal 183 m. Totalt skördades 8 fulla lass, med en medelvikt av 3,6 råton (1,9 ton TS), vilket motsvarar en rå bulkdensitet på lasset av 148 kg/m³. I medeltal skördades och hanterades vid lastning 6,3 stolar/krancykel i den ”övergrova” odlingen och 9,0 stolar/krancykel i den ”normala”. I medeltal hanterades 54 kg (rå vikt) (27 kg TS) per krancykel vid fällning och direktlastning och 210 kg (rå vikt) (110 kg TS) per krancykel vid lossningsarbetet. Tidåtgången för lossningsarbetet var i medeltal 7,08 G₀-min/last motsvarande 3,93 G₀-min/ton TS. ”Övrig” tid utgjorde 0,44 G₀-min/last (0,25 min/ton TS). Faktorn “antalet rader” påverkade inte tidsåtgången för fällnings- och lastningsarbetet och total tidsåtgång, men ”typ av odling” hade dock en signifikant effekt (p<0,025); tidsåtgången (G₀- min/ton TS) för ”fällning ackumulering”, ”lastning” och ”total tid” blev högre i den ”normala” odlingen (Tabell 11). Figur 15 visar att arbetsmomentet ”fällning och ackumulering” utgjorde merparten av drivarens arbetstid, därefter ”lastning” och ”avlastning”.

Tabell 11. Tidsåtgången (G_0 tid) för drivarens arbete fördelat på arbetsmomenten som är relaterade till skördearbetet (dvs. skotning till avlägg och lossning är exkluderat).

Table 11. Work time consumption (excluding delay time) of the harwarders work divided on the work elements related to the harvesting work (i.e. forwarding to road side and un-loading work are excluded)

	Behandling					
	Övergrov				Normalt	
	2 rader (n = 3)		3 rader (n= 3)		2-3 rader* (n=2)	
	(min/ton TS)	(%)	(min/ton TS)	(%)	(min/ton TS)	(%)
Kran ut	3,50	7,0	4,96	9,7	4,88	6,8
Fällning och ackumulering	38,52	77,6	38,17	74,9	57,25	80,4
Lastning	5,45	11,0	6,25	12,3	6,91	9,7
Ompositionering	2,18	4,4	1,60	3,1	2,19	3,1
Summa tid	49,65	100	50,98	100	71,23	100

*Data från skörd av 2 eller 3 i den ”normala” odlingen har lagts samman då endast ett lass per behandling studerades.



Figur 15. Drivarens tidsåtgång (G_0 tid) uppdelat på arbetsmoment.

Figure 15. Time consumption (excluding delay time) of the harwarder work divided per work element.

I medeltal, vid ett skotningsavstånd av 150 m, var drivarens produktivitet 0,77 ton TS/ G_0 -timme i den ”normala” odlingen och 1,05 ton TS/ G_0 -timme i den ”övergrova”. Motsvarande tidsåtgång i den ”normala” odlingen var 46,8 G_0 -timme/ha och 53,3 G_0 -timme/ha i den ”övergrova”.

Arbetskvalitet

Höjden på kvarvarande stubbar blev i medeltal 18,6 cm (sd=7,9 cm) vid fällning med skördaren och 18,1 cm (sd=7,9) vid fällning med drivaren. Med skördaren blev 30% av stubbarna skadade

(delade/spräckta) och med drivaren 29%. Spårdjupet efter skördearbetet varierade mellan 0-28 cm och var i medeltal 6 cm (median 1,5 cm).

Systemanalyser

Av den totala skördekostnaden utgjorde kostnaden för skördearbetet (skördarna): 68% i skördare-skotaresystemet; 61% i salixdirektflisningssystemet; 73% i salixbuntskördarsystemet och; 36% i systemet med salixhelstamskörd och direktlastning (Tabell 12). För alla systemen utgjorde flyttkostnaden minde än 5% av totala kostnaden. Vid skörd av den ”mer övergrova” typodlingen jämfört mot den ”normala” ökade kostnaden per ton TS med 140% för salixdirektflisningssystemet och med 164% för systemet med salixhelstamsskörd och direktlastning. Däremot minskade systemkostnaden för salixbuntskördarsystemet, skördare-skotaresystemet och drivaresystemet med respektive 41%, 40% och 43%.

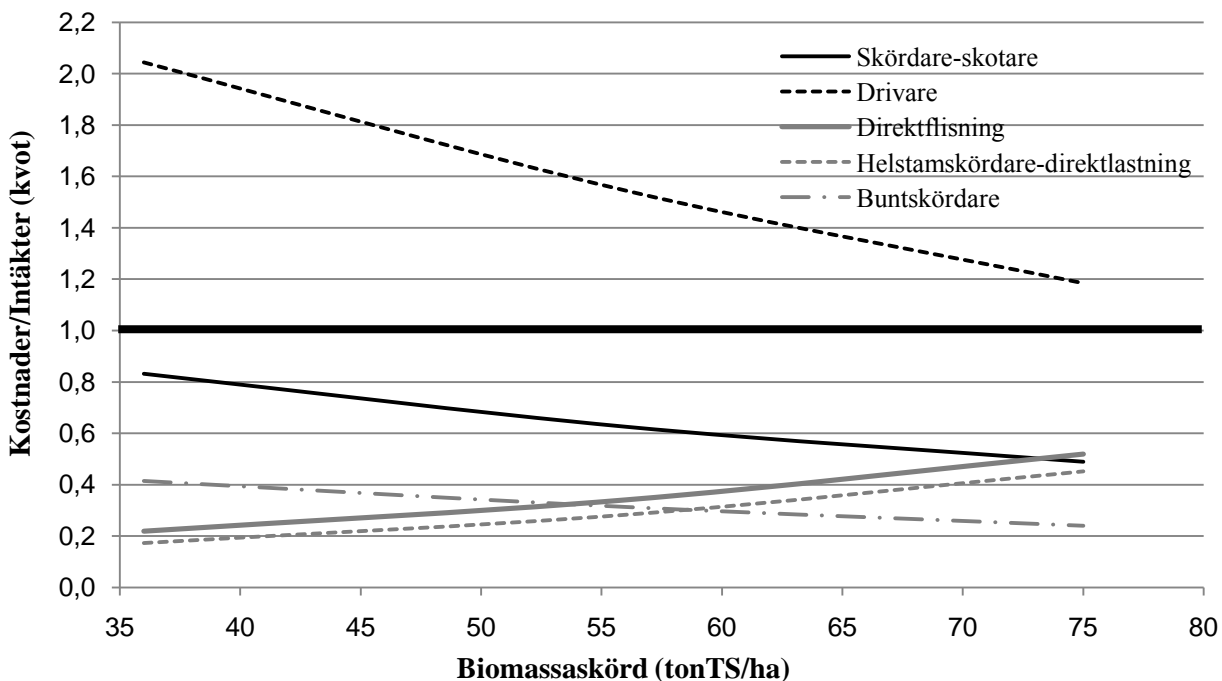
Kostnadsbilden för skogsmaskinsystemen och för salixbuntskördarsystemet med direktlastning blev mera gynnsamt vid ökad mängd skördad biomassa per ha. Det omvända gällde för övriga system (Fig. 16). Alla system förutom drivarsystemet uppvisade ett positivt resultat i alla typodlingar.

Salixdirektflisningssystemet uppnådde högst netto av alla system i den ”normal” och ”övergrova” odlingen medan salixbuntskördarsystemet gav högst intäkter i den ”mer övergrova” odlingen (Tabell 12). Nettot för salixdirektflisningssystemet minskade med 46% per ton TS från skörd av den ”normal” till den ”mer övergrova” odlingen, däremot ökade nettot 27% för skördare-skotaresystemet. Även salixbuntskördarsystemet uppvisade ett ökat netto med ökad biomassa per ha (Tabell 12). Skillnaden i netto mellan skördare-skotaresystemet och salixdirektflisningssystemet i den ”mer övergrova” odlingen var bara 10%, till fördel för direktflisningssystemet.

Tabell 12. Skördekostnad, intäkt och netto för de fem skördesystemen i den ”normala”, ”övergrova” och ”mer övergrova” typodlingen

Table 12. Harvesting costs, revenues and net incomes of the five harvesting systems in “normal”, “overgrown” and “more overgrown” plantations

<i>“Typodling”</i>	Skördesystem				
	Skördare- skotare	Drivare	Direkt- flisning	Helstam- direktlastning	Bunt- skördare
<i>“Normal”</i>					
Kostnader (kr/ha)	16637	40185	6686	3861	10214
Kostnader (kr/ton TS)	462	1116	186	107	284
Intäkter (kr/ha)	19800	19800	27000	19800	23760
Kostnader/Intäkter (%)	84	203	25	19	43
Netto (kr/ha)	3163	-20385	20315	15939	13546
Netto (kr/ton TS)	88	-566	564	443	376
<i>“Övergrov”</i>					
Kostnader (kr/ha)	18699	46081	11119	6768	11374
Kostnader (kr/ton TS)	334	823	199	121	203
Intäkter (kr/ha)	30800	30800	42000	30800	36960
Kostnader/Intäkter (%)	61	150	26	22	31
Netto (kr/ha)	12101	-15281	30881	24032	25586
Netto (kr/ton TS)	216	-273	551	429	457
<i>“Mer övergrov”</i>					
Kostnader (kr/ha)	20686	47841	33373	21248	12562
Kostnader (kr/ton TS)	276	638	445	283	167
Intäkter (kr/ha)	41250	41250	56250	41250	49500
Kostnader/Intäkter (%)	50	116	59	52	25
Netto (kr/ha)	20564	-6591	22877	20002	36938
Netto (kr/ton TS)	274	-88	305	267	493



Figur 16. Förhållandet mellan skördekostnaden och intäkten som funktion av biomassan per ha för de fem drivningssystemen. Den tjocka horisontella linjen vid 1,0 indikerar när kostnaden är lika som intäkten, d.v.s lönsamma drivningssystem ligger under denna linje.

Figure 16. The ratio of harvesting costs and revenues as a function of harvested biomass per ha for the five systems studied. The thick horizontal line at 1.0 indicates when the costs and income equals, i.e. profitable harvesting systems is under this line.

Diskussion

Fältstudier

Drivning

Tidsåtgången för skördaren per skördad areal, stol och stam skiljde sig inte mellan de två typodlingarna ”normal” och ”övergrov”, men produktiviteten (ton TS/G₀-timme) blev i medeltal 56% högre i den ”övergrova” odlingen. Denna ökning är till största del ett resultat av att den ”övergrova” odlingen hade 51% mer biomassa per ha jämfört den ”normala” odlingen. Dvs, skördarens effektivitet (mätt i antal avverkade stammar per tidsenhet) minskade inte pga. stammarnas storlek, vilket i sin tur ger en produktivitet utveckling som liknar en gallringsskördare i bioenergigallring (jmf. Fig 2). Tidsåtgången per stol för skördaren förändrades inte beroende på om man arbetade ”framåt i rad för rad” eller ”från sida till sida” (se Fig. 8). Vid skörd av fem eller sex rader spenderade skördaren ca 70% av arbetstiden på momentet ”fällning och ackumulering”, men vid skörd av fem rader så var tidsåtgången per stol ca 11% mindre än vid skörd av sex rader. Detta medförde en produktivitetsökning i medeltal av 9%. Detta visar att fällningsarbetet effektiviseras med kortare kransträckningar och ger således högre produktivitet (jmf. Ovaskainen 2009).

Vid försöken med skördaren så eftersträvade föraren fällning och ackumulering under en kontinuerlig kranrörelse, vilket medför ökad effektivitet i jämförelse med att fälla och ackumulera stammarna med stillastående kran (Bergström 2009). Det noterades under försöken att hastigheten vid kontinuerlig fällning och ackumulering av stammarna minskade något med ökad stamdiameter, men att ackumuleringen av stammarna fungerade bättre (mindre mängd störtid). Detta kommer av att vid skörd av relativt klena stammar (dsh < 3 cm) kan man avskilja stammarna med högre hastighet, men att ackumuleringen då inte hinner med att greppa stammarna på ett tillfredställande sätt. För att till fullo utnyttja den möjliga fällningshastigheten som det studerade aggregaten kan prestera så måste ackumuleringsfunktionen anpassas för detta (se Forsberg & Wennberg 2011). Det observerades även att det var svårt att få utrymme mellan stolarna radvis för att positionera skördarens aggregat för att greppa stammarna för avskiljning på ett önskat sätt. Problemet tenderade att öka om stammarna i en stol dessutom hade växt i olika riktningar. Om kontinuerlig fällning och ackumulering alltid tillämpas radvis bör detta problem minimeras jämfört med fällning av stolar vinkelrätt raderna (jmf. Fig. 8 a.1 & a.2). Vid fällningsarbetet med skördaren så blev sikten för att positionera aggregatet och sikten för att se hur/om aggregatet avskiljde stammarna generellt sämre ju klenare stammar som fälldes. Sikten blev också reducerad ju längre ut från maskinen som föraren arbetade, vilket medförde att tidsåtgången ökade med ökat antal rader som skördades. Skördarföraren upplevde att fällningsarbetet var mycket mer psykiskt ansträngande jämfört med motsvarande arbete i energigallring. Detta kan bero på att antalet träd som skall fällas och ackumuleras per tidsenhet i salixodlingar är betydligt fler vilket kräver en högre koncentration, jämfört med gallring i skog. Detta medför i slutändan att förarens uthållighet och effektivitet över tiden minskar. För att komma ifrån detta problem kan delar av kranarbetet delautomatiseras t.ex. genom att föraren istället endast kontrollerar aggregatets riktning och hastighet, och att avskiljning och ackumulering av stammarna sker via automatik. För detta krävs även att aggregatets kapacitet anpassas så att en hel stol, dvs. alla stammar i en stol i en rad eller två, fälls och ackumuleras i ett moment, som om det vore ett träd. En fördel med salixskörd i jämförelse med energigallring i

skog är att alla stammar skall fällas, dvs. föraren behöver inte fundera på vilka stammar som är mest lämpliga att spara.

De enskilda faktorerna ”typbestånd”, ”arbetsmetod” och ”antal skördade rader” påverkade inte skotarens effektivitet. Men vid skotning av den ”övergrova” odlingen och i kombination med ”6 rader” så reducerades tidsåtgången med 15% jämfört med ”övergrova och 5 rader” och 18% jämfört med medlet för den ”normala” odlingen. Detta kan förklaras av att i den ”normala” odlingen åtgick alltid endast en krancykel per hög jämfört med upp till i medeltal 1,04 krancykler i den ”övergrova och 5 rader” samt 1,13 i den ”övergrova och 6 rader”. Trots att föraren spenderade i medeltal fler krancykler per ton TS i ”6 rader” så blev tidsåtgången lägre än vid ”5 rader”. Detta är ologiskt, men kan förklaras av att föraren vid lastning av högarna i ”övergrova och 6 rader” planerade för flera krancykler, medan han vid ”övergrova och 5 rader” försökte gripa hela högen. Detta resulterade i extratid pga. störningar (t.ex. tappade stammar som måste plockas upp) (Tabell 10). För att optimera skotningsarbetet skall storleken på en hög (t.ex. diameter och massa) överensstämma med kapaciteten på kranen och gripen, samt att placeringen av högarna relativt skotarens kranpelare och lastutrymme skall optimeras för att minimera kranrörelserna. I detta fallet hade det sannolikt varit en fördel och skotarens grip hade varit större. I förlängningen innebär detta att även skördarens och skotarens arbetsmetoder skall synkroniseras för optimal effektivitet på systemet (se Gullberg 1997).

Drivarens effektivitet (tid per ton TS) i Ranstastudien påverkades inte av antalet skördade rader (se Fig. 9) men blev ca 40% högre vid skörd av den ”övergrova” odlingen jämfört den ”normala” odlingen. Detta resulterade i en produktivitetsökning av ca 36%. Drivaren skördade 6,3 stolar per krancykel i den ”övergrova” odlingen och 9,0 i den ”normala” odlingen, vilket är 28% respektive 31% lägre jämfört med skördaren. Att effekten av typodling blir mindre för drivaren jämfört med skördaren beror på att effektiviteten på fällningsarbetet med klipp-gripen minskar något vid skörd av grövre stammar. Drivarens lastvikt var i medeltal 32% lägre än skotarens lastvikt. Detta beror på att vid lastning med skotarens ris-grip så trycks bunten ner i lastutrymmet samtidigt som gripen släpper bunten (lasset komprimeras), till skillnad mot klipp-gripen som endast ”släpper” biomassan på lastutrymmet. För att öka lastutnyttjandet vid skotning av salix kan skotaren/drivaren utrustas med komprimerande laststakar (se Nordén 1984, Nordén 1991, Bergström et al. 2010b). Sådan komprimering kan även med fördel användas även om lastning utförts med ris-gripen, dvs. en ”extra” komprimering kan utföras.

Vid transportarbetet med både skotaren och drivaren (samma basmaskin) ”släpades” de långt utstickande topparna i marken (se Fig. 7, till höger). Detta medför ökat motstånd (ökad belastning) samt ökad risk för biomassaförluster och kontaminering. För att undvika detta kan man konstruera ett utskjutande stöd som förlänger lastutrymmets längd. I Pilotstudien var drivarens körhastighet lastad 13% högre än vid körning olastad, 1,8 m/s respektive 1,6 m/s, vilket med största sannolikhet är en effekt av förarens beteende. Motsvarande resultat i Ranstastudien visar det omvända, och normala, dvs. att körhastigheten ökade och var 20% högre olastad än lastad. Avlastningsarbetet för skotaren och drivaren i Ranstastudien förenklades när maskinerna placerades parallellt med vältan jämfört vid placering vinkelrätt mot vältan. En parallell placering medför kortare kranrörelser samt att tappade stammar hamnar direkt i vältan och behöver således inte plockas upp från marken igen. I praktiken finns det dock sällan utrymme för att avlasta skotaren/drivaren parallellt mot vältan, det normala är att avlastning sker vinkelrätt.

Avskiljningshastigheten på klipp-gripen (Naarva Grip 1500-25E) som användes av drivaren i Ranstastudien var mycket låg jämfört med de andra studerade avskiljningsaggregaten. Dessutom var ackumuleringsfunktionen manuellt manövrerad vilket medförde ett frekvent ”joy-stick” arbete. Detta arbete upplevdes av föraren som mycket påfrestande. De två andra studerade fällningsaggregaten, Bracke C16a och Ponsse EH25, hade dock båda en automatiserad ackumulering. Klipp-gripens förmåga att gripa om stammar vid lastningsarbete var, relativt den anpassade ris-gripen, låg, vilket medförde att avlastningsarbetet för drivaren blev relativt tidskrävande. Dvs., det kombinerade aggregatet var ineffektivt vid både fällnings- och avlastningsarbetet.

Odling 1 i pilotstudien var inte representativ för övergrov salixodling i Sverige. Odling 2 var något mera representativt med raka stammar och stolarna var radvisa med givna avstånd mellan raderna (se Fig. 3). Respektive odlingsareal var begränsat för studier, ca 0,2 ha i båda fallen. Under studien hade ingen avlövnning skett vilket är normalfallet vid skörd av salix. Marken var dock torr och hade god bärighet. Odlingen i Ranstastudien var representativ för en normal och något övergrov salixodling i Sverige. För studiens syfte hade det dock varit bra om den övergrova arealen hade varit än mer övergrov för att få rätt på hur skördarens produktivitet påverkas av detta. Av de använda skogsbruksteknikerna använda i både Pilotstudien och Ranstastudien var klipp-gripen (Naarva Grip 1500-25E) inte representativt för professionellt skördarbete, utan kan betraktas som ett ”extra” jordbruksredskap för traktorer med kran. Däremot är både Bracke C16a, Ponsse EH25 och ris-gripen aggregat som använts inom skogsbruket av professionella förare.

Arbetskvalitet

I Ranstastudien så ingick det att stubbhöjden skulle hållas så låg som möjligt. Detta var svårt för förarna att hantera, speciellt vid arbetet med drivaren. Under försöken blev förarna ständigt påmind av tidstudiemannen. Då låga stubbar även är viktigt inom skogsbruket är det ”märkligt” att förarna hade svårt att hålla låga stubbar. Sannolikt hade föraren av drivaren problem med att nivellera aggregatet, dvs. hålla det parallellt med marken och på så sett komma nära marken. Dessutom var marken täckt med ett tunt lager med snö vilket sannolikt påverkade förarnas möjligheter att åstadkomma låg stubbhöjd eftersom det var svårt att bedöma snödjupet och således marknivån. Stubbhöjden i Ranstastudien blev något lägre vid skörd med klipp-gripen jämfört det sågande aggregatet. Skördarföraren var mer försiktig och ville inte riskera ”sågning” i mark, vilket slöar kedjan. Klippar är relativt okänsliga för jord och stenkontakt. Trots detta så var skillnaden i stubbhöjd mycket liten, 0,5 cm i medeltal. Sannolikt bör stubbhöjden bli reducerad efter en längre inlärningsperiod och utan snö. Det noterades även att när skördarföraren fällde stammarna i stolar radvis, från maskinen och utåt, så ökade stubbhöjden med ökat avstånd. Detta beroende på att aggregatet hela tiden förflyttades över och i linje med stolarna (se Fig. 8 a.1 & b.1). Det blev inte några skillnader i antal skadade stubbar mellan teknikerna, men för båda blev 30% av stubbarna skadade. Detta kan vara både teknik och arbetsmetodrelaterat. T.ex. så fällde skördaren ibland två stolar i ett moment vilket innebar att en del av stammarna var något böjda vid avskiljningsmomentet och att dessa stubbar då blev spräckta. Resultaten visar att spårdjupen var låga och de varierade mellan 0-28 cm och var i medeltal 6 cm (median 1,5 cm). Under studietillfället var markytan något frusen vilket bidrog till ökad bärigheten vilket i sin tur resulterar i liten markpåverkan. För att minska marktrycket kan skogsmaskinernas boggie utrustas med band. Detta används med fördel på skotaren.

Efter maskinstudierna inventerades det skördade området i Ranstastudien, både ”normala” och ”övergrova” odlingen, i 5 st/ha och 100 m² stora ytor där antalet kvarvarande stammar, både fällda och ståendes, räknades. I medeltal lämnades totalt (både liggande och stående) 1260 stammar/ha med en dsh mellan 1-5 cm och av vilka de flesta var närmare 1 cm i dsh. Denna kvarvarande biomassa uppskattas inte överstiga 1,2 ton TS/ha, dvs. ca 2% av total biomassa. I jämförelse med bioenergigallring i skogsbruket är förlusten liten där substansförluster upp till 10% anses godtagbart.

I Pilotstudien så observerades det vid fällningsarbetet att de klenaste stammarna (< ca 2 cm) tenderade att bli oklippta och istället uppryckta med rotdelar vid ompositioneringen av aggregatet. Detta medför att biomassan blir kontaminerad av jord och således får bränslet en förhöjd askhalt. Denna problematik har även observerats inom skogsbruket i energigallringar vid fällning av klena och gruppställda träd, liknade salixstolar. Rottryckning relateras både till arbetsmetodik och aggregatkonstruktion. Föraren tenderar att överskatta aggregatets kapacitet gällande ackumulering och avskiljning och klena stammar tenderar till att ”kila fast” mellan skärstål och mothåll. Ackumulerande aggregat som avskiljer med sågande enheter har betydligt mindre problem med rottryckning, vilket också observerades vid skörd med det sågande aggregatet i Ranstastudien.

I Ranstastudien skördades som mest sex rader per passage med skördaren och som mest tre rader med drivaren, dvs. maskinerna passerade över 1 av 6 dubbelrader och 1 av 3 dubbelrader (16% respektive 33% av arealen). Detta skall jämföras med konventionella salixskördesystemet som kör och skördar på varje dubbelrad per passage. Detta betyder att andelen påverkad mark blir betydligt mindre vid skörd med skogsmaskiner.

Under försöken i Ranstastudien observerades att förarna, som var ovana vid salixskörd, blev mer och mer effektiva ju längre tid som de fick praktisera de arbetsmetoder de instruerats i. Av detta skäl fick därför förarna god tid på sig att köra in sig på arbetsmetoderna innan experimenten utfördes. Trots detta så observerades en fortsatt ökning av effektiviteten som dock inte påverkade produktiviteten signifikant. Under arbetets gång observerades även att stubbhöjden reducerades något ju längre tid som förlöpte. Motsvarande inlärningseffekter noterades dock inte för skotningsarbetet. Detta beror nog på att skotningsarbetet i studien är mycket likt normalt skotningsarbete i energigallringar. Under studien arbetade förarna under både dagsljus och mörker (i belysning från maskinen) men någon tydlig effekt av detta har inte observerats. Arbetsmetoderna som förarna använde i både Pilotstudien och Ranstastudien är ”snarlika” normalt maskinarbete i energigallring. Den stora skillnaden är att de i salixodlingen inte behöver ta hänsyn till kvarvarande stammar som kan vara i vägen för arbetet eller kan bli skadade pga. ovarsamhet. Studier på förareffekten vid gallringsarbete med skördare visar att produktiviteten mellan förare kan skilja sig upp till ca 40%. Alla förare var erfarna av gallringsarbete och var väl motiverade till att medverka i försöken, vilket ger hög produktivitet, men var oerfarna av skörd i salixodling, varför produktiviteten totalt sett bedömdes som relativt representativ.

Systemanalyser

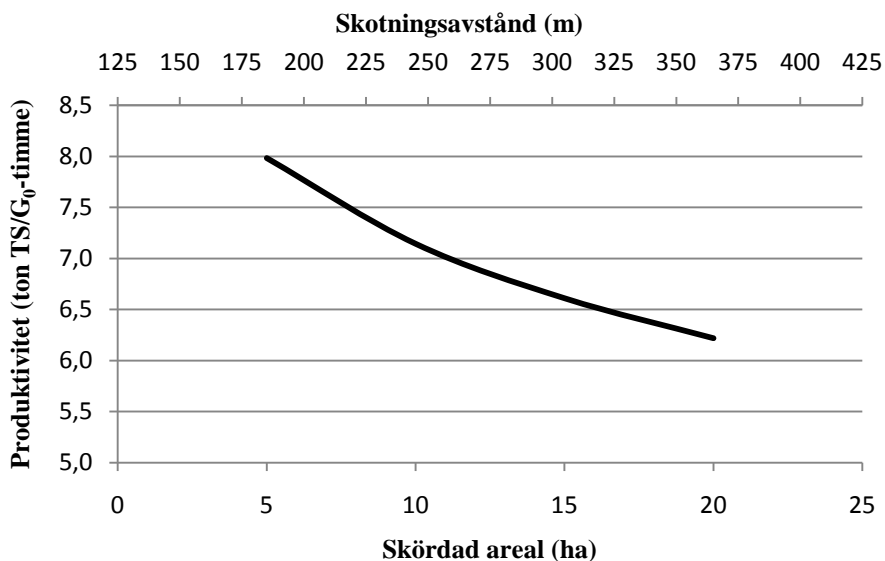
Salixskördesystemen gav ett positivt netto i alla typodlingar. Av skogsmaskinsystemen så gav skördare-skotaresystemet ett positivt netto i alla typodlingar men drivaresystemet gav ett negativt netto i alla typodlingar. Resultaten visar tydligt att salixskördesystemen generellt är mer

kostnadseffektiva i alla typodlingar jämfört med skogsmaskinsystemen. Salixdirektflisningssystemet ger högst netto i den ”normala” och ”övergrova” odlingen och salixbuntskördarsystemet ger högst netto i den ”mer övergrova” odlingen. Trenden är att systemet med direktflisning och helstamskörd med direktlastning minskar i kostnadseffektivitet med ökad biomassa/ha, men att skogsmaskinsystemen och salixbuntskördarsystemet uppvisar en positiv trend. Direktflisningen och helstamskörd med direktlastning ”straffas” i detta fall av minskat TU pga. ökad stamdiameter som ger mer driftsstörningar. För skogsmaskinsystemen förblir TU oförändrat vid ökad biomassa/ha (ökad medelstam). Anledningen till att buntskördarsystemet ökar sin kostnadseffektivitet med ökad medeldiameter, trots minskat TU, är att G_0 tiden per ha har antagits vara konstant oberoende av biomassa/ha och att bunningshastigheten/kapaciteten inte begränsas vid de olika typodlingarna (jmf. Mitchell et al. 1999). Produktiviteten för skördaren med direktflisning, helstamskördaren med direktlastning och buntskördaren baserades på litteraturdata från studier i normala bestånd med en biomassa mellan 15 till 40 ton TS/ha (Danfors & Nordén 1995b). Produktiviteten för de övergrova förhållandena i rådande studie baserades därför på en extrapolation av dessa litteraturdata samt antaganden om avbrottstid under dessa förhållanden. Eftersom avbrottstiden (minskat TU) för dessa system slår hårt på systemkostnaden kan man därför förvänta sig andra resultat om respektive avbrottstider ändras. Men i litteraturen kan man inte finna information som tyder på att avbrottstiden skulle ändras på annat sätt än antaget i föreliggande studie.

Den i litteraturen studerade helstamskördaren ”Empire 2000” är idag inte en kommersiell produkt; prototypen studerades i enkla fältstudier och vilket gav indikationer på dess potential (Danfors & Nordén 1995b). Detta koncept behöver studeras vidare för att bedöma dess fulla potential. Således baseras analysen av detta system mestadels på antaganden på prestationer. Vid design av systemet togs dock stor hänsyn till både prestationer på kommersiell- och prototyp teknik från litteraturen.

Föreliggande studie visar tydligt att skogsmaskinsystemen blir mer produktiva ju grövre stammar/mer biomassa som skördas. Även om skogsmaskinsystemen är långt ifrån lika produktiva som salixskördarsystemen under normala salixförhållanden så kan dess kapacitet med fördel användas vid avveckling/nyetablering av salix. Det finns stor möjlighet att förlänga den sista produktionsperioden med ett antal år för att få en sista skörd med högre biomassainnehåll vilket ger betydligt högre netto vid skörd.

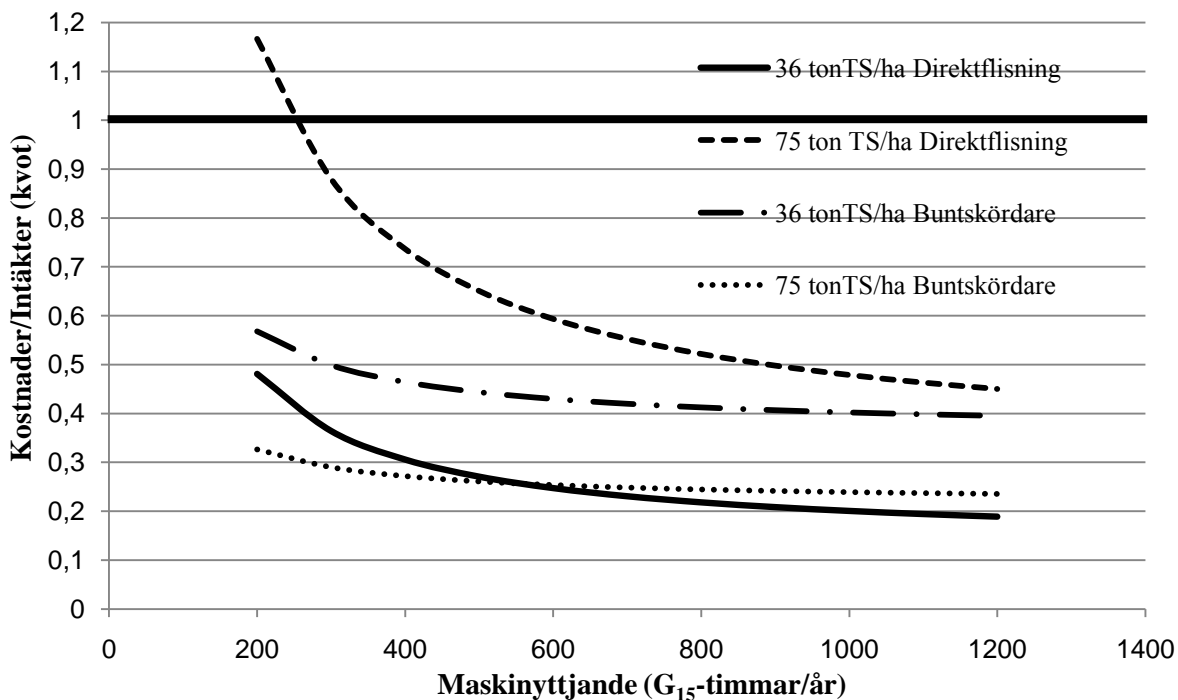
I föreliggande studie så antogs en skördad areal av 10 ha vilket ger en medelproduktivitet på skotarens arbete på 7,1 ton TS/ G_0 -timme. Skotningsavståndet baserades på att endast ett avlägg användes som ger ett teoretiskt skotningsavstånd på 250 m. För att öka produktiviteten på skotningsarbetet kan man använda sig av flera avlägg. T.ex. om en areal av 20 ha skall skördas och ett avlägg används får skotaren ett medeltransportavstånd på 360 m vilket ger en produktivitet på 6,2 ton TS/ G_0 -timme (Fig. 17). Om man använder 2 avlägg blir motsvarande resultat 250 m skotningsavstånd (2×10 ha) och en produktivitet på 7,1 ton TS/ G_0 -timme. Om arealen skördas med 4 avlägg (4×5 ha) blir motsvarande skotningsavstånd 180 m och produktiviteten 8,0 ton TS/ G_0 -timme. Således ökar produktiviteten med 15% med två avlägg och 29% med 4 avlägg. Om man i föreliggande studie istället skulle använda två avlägg skulle produktiviteten på skotningsarbetet öka med 13%. Ju större skördad sammanhängande areal desto mer viktigt med flera avlägg.



Figur 17. Skotarens produktivitet som funktion av teoretiskt skotningsavstånd/skördad areal.
Figure 17. The forwarder productivity as a function of a theoretical forwarding distance/harvested areal.

Känslighetsanalys

För att belysa hur nettointäkten ändras för salixdirektflisningssystemet och salixbuntskördarsystemet beroende på det årliga maskinutnyttjandet utfördes en känslighetsanalys. Den årliga maskintiden för respektive system varierades mellan 200-1200 G₁₅-timme/år (Fig. 18; se Tabell 1 för indata). En kvot < 1 ger ett positivt netto. För båda systemen minskar kvoten/kostnaderna med ökad årligt maskinutnyttjande. För direktflisningssystemet ökar kostnaderna kraftigt när man understiger 400-500 timmar/år. Buntskördarsystemet är däremot betydligt mindre känsligt för variationer i årligt maskinutnyttjande. Vid 36 ton TS/ha (normala förhållanden) och med ökat maskinutnyttjande per år så blir direktflisningssystemet betydligt mer kostnadseffektivt, men det omvända råder vid skörd av 75 ton TS/ha (övergrovt).



Figur 18. Förhållandet mellan kostnader och intäkter som funktion av årligt maskinutnyttjande och biomassaskörd per ha för salixdirektflisningssystemet och salixbuntskördaressystemet. Den tjocka horisontella linjen vid 1,0 indikerar när kostnaden är lika som intäkten, d.v.s lönsamma drivningssystem ligger under denna linje.

Figure 18. The cost to income ratio as function of the annual utilization and biomass removal, for salix harvesting systems with direct chipping or stem-bundling. The thick horizontal line at 1.0 indicates when the costs and income equals, i.e. profitable harvesting systems is under this line.

Utvecklingsaspekter

Den mer kontrollerade jordbruksmarken är ett resultat av modifiering av t.ex. skogsmark där ojämnheter, stenar och block etc. har tagits bort för att odling och skörd skall vara möjlig och kunna genomföras på ett effektivt sätt. Inom jordbruket är redskapen vid skörd chassi- eller vagnsmonterade och grödan skördas under kontinuerlig framdrivning. Dessutom är grödan relativt träd enkel att skära av, samt att ”kalavverkning” av hela den odlade arealen tillämpas. Dessa principiella skillnader, mellan jord- och skogsbrukets arbetsmetoder, medför att respektive maskiners lämplighet i varandras arbetsområden är begränsade, i alla fall om man skall uppnå hög effektivitet. Men, då skogsmaskinerna med lätthet klarar att ta sig fram i jordbrukets miljö finns det därför större möjligheter att använda dessa maskiner på jordbruksmark, än vice versa. Således utgör jordbruksmark inget problem för framförande av skogsmaskiner.

Skogsmaskiner kan vara bärare av ett flertal olika redskap som t.ex. kranpetsmonterade skördaraggregat, fällaggregat, gripapar, gripsågar, planteringsutrustning samt chassimonterad utrustning som t.ex. harv, variabel breddning av lastutrymmet för ökad lastvolym, komprimerande laststakar för t.ex. avverkningsrester och träddelar, buntningutrustning och flisningsutrustning etc. Man kan anta att det finns skogsbrukstekniska lösningar som direkt, eller

efter modifieringar, kan användas i system för helskottskörd av salix med t.ex. övergrov karaktär och att dessa, under vissa förhållanden, kan vara ett kostnadseffektivt alternativ till konventionella jordbruksmaskinsystem för skörd av salix.

I skrivande stund pågår forskning och utveckling av teknik och metoder för kostnadseffektiv skörd av klena stammar i tidiga gallringar (se Bergström 2009, Forsberg & Wennberg 2011). Denna utveckling syftar till att effektivisera fällningsarbete, hantering och transporter. Principiellt innebär detta fällningsarbete att alla stammar i ett område av t.ex. 10 m² (10 m långt och 1 m brett) skall fällas och ackumuleras under en kontinuerlig kranrörelse, dvs. i ett moment. I föreliggande studie arbetade skördarföraren på ett liknande sätt där han eftersträvade en kontinuerlig rörelse under fällning och ackumuleringsarbetet. Arbetsmetoden för gallring skulle med fördel kunna optimeras mot salixskörd då dessa planteringar är systematiska med givna avstånd mellan både plantor och rader och därmed erbjuder en relativt störningsfri miljö för hög effektivitet på maskinarbete.

Efter fällningsarbetet i skog skall träd, som ofta har yviga grenar, hanteras och transporteras effektivt. Detta innebär i realiteten att högar med stammar måste ”brytas ihop” (knäckkvistas) innan de lastas samt att lasten sedan komprimeras med t.ex. komprimerande laststakar för högre lastvikter (se Bergström et al. 2010b). Inom skogsbruket finns det även kommersiell teknik för buntning av klenstammar/grot/träddelar vilket ger stora logistiska fördelar vid långa transporter och långtidslag. Resultaten från buntningstudien med GTK 5100 buntningsmaskin gav buntar med en bulkdensitet av 332 kg/m³ (vid en fukthalt på 50%). Studier på buntning av råa (ca 50% fukthalt) klena träd, träddelar och grot resulterar i bulkdensiteter mellan ca 240-540 kg/m³ (Jylhä 2004, Pettersson & Nordfjell 2007). Buntar av trädbiomassa av hög densitet kan tillverkas utan att allt för stora krafter används. De kan långtidslagras utan större substansförluster; de kan, relativt löst material, flisas/krossas med hög produktivitet (se Nordfjell & Liss 2000).

Litteraturdata låg till grund för val av antalet flisskyttlar och stamskyttlar och deras andel avbrottsid och påverkan på salixskördesystemens TU. Hur t.ex. antalet skyttlar, andel avbrottsid och transportavståndet påverkar systemets TU och kostnader blev inte studerat. Dessa effekter kan dessutom antas vara mer eller mindre stora beroende på maskinval, produktivitet, maskinkostnader etc. (se Talbot & Suadican 2005). I ett utvecklingsperspektiv bör alla dessa variabler beaktas för att ge möjligheter till optimering av nuvarande och framtida system. En viktig aspekt i systemanalyser av system med beroende maskiner, som t.ex. direktflisning med två flisskyttlar, är att de väntetider som uppstår pga. ändrat transportavstånd, produktivitet eller TU också inkluderas i analysen (se Lindroos 2009).

Slutsatser

Ett skogligt avverkningsystem bestående av en skördare och en skotare båda anpassade för skörd av klena stammar (energigallring) ger ett positivt netto vid skörd av övergrov salix med dagens priser på skogsbränslen. Drivaresystemet har dock för låg produktivitet vilket resulterar i ett negativt netto. Både skördaren och skotarens produktivitet kan med rätt arbetsmetodval ge ytterligare produktivitetsökningar och således minskade kostnader. För båda systemen så ökar produktiviteten och således nettot med ökad biomassa per ha.

Skogsmaskiner är dock inte ett kostnadseffektivt val vid skörd av salix, och kommer förmodligen aldrig att bli det heller. Dock utgör skogsmaskiner ett robust alternativ som alltid fungerar oavsett hur förväxta/övergrova salixodlingar har blivit. I riktigt övergrova (8-10 cm) och biomassarika (> 70 ton TS/ha) så kan en lämpligt utrustad skogsskördare och en skotare vara det i dagsläget enda realistiska skördealternativet. Om tillräckligt stora arealer av sådana salixbestånd är ett faktum så kan de möjligen utgöra sysselsättning för en skogsentreprenör under en del av året. Maskinerna används i så fall några månader per år i salixskörd och i vanligt skogsarbete under resten av året.

Om man skall utveckla en skogsskördare för skörd av salix så måste fällnings- och hanteringsarbetet ske mycket rationellt. Den forskning och utveckling som i nuläget pågår inom skogssektorn syftar till att utveckla teknik för kontinuerlig fällning och ackumulering av klana stammar med kranspetsteknik samt rationell hantering (t.ex. genom komprimering och/eller buntning) av biomassan för ökad transporteffektivitet. Därför kan det vara av intresse för salixindustrin att medverka och/eller bevaka denna utveckling.

Tillkännagivanden

Detta projekt har finansierats av Energimyndigheten inom ramen för programmet ”Uthållig tillförsel och förädling av biobränsle”. Författarna vill tacka Hans Eriksson, Västeräng Lantbruk AB, för hjälp vid koordinering av fältförsöken i Ransta, Sala. Vi tackar även verksamhetsledare Sverker Johansson på Maskinringen i Hälsingland AB, samt de förare som på ett engagerat sätt medverkade i försöken i Ransta. Slutligen tackar vi Norra Skogsägarna och inblandade maskinförare för samarbetet vid Pilotförsöket på Röbbäcksdalen, Umeå.

Referenser

- Adler, A., Dimitriou, I., Aronsson, P., Verwijst., T. & Weih, M. 2008. Wood fuel quality of two *Salix viminalis* stands fertilised with sludge, ash and sludge-ash mixtures. *Biomass and Bioenergy* 32: 914-925.
- Anon. 2007. European Commission 2007. Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future. Communication from the commission to the council and the european parliament. COM(2006) 848. Brussels, 2007. 20 pp.
- Anon. 2010. Prislita energisortiment. Prislita 158E 04. Norra Skogsägarna.
- Arkelöv, O. 2010. Skörd av övervuxen Salix. *Bioenergi* nr. 1, 2010, sid 24-25.
- Berg, S. 1992. Terrain classification system for forestry work. The Forest Operations Institute of Sweden, Kista. 28 pp. ISBN 91-7614-078-4.
- Bergkvist, P. & Ledin, S. 1998. Stem biomass yields at different planting designs and spacings in Willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 14(2): 149-156.
- Bergström, D. 2009. Techniques and systems for boom-corridor thinning in young dense forests. Doctoral thesis. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae* 2009:87.
- Bergström, D., Bergsten U. & Nordfjell, T. 2010a. Comparison of Boom-Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots Pine Stands. *Silva Fennica*, 44:669-679.
- Bergström, D., Nordfjell, T. & Bergsten, U. 2010b. Compressing processing and load compression of young Scots pine and birch trees in thinnings for bioenergy. *International Journal of Forest Engineering* 21(1): 31-39.
- Danfors B. 1992. Salixodling Maskiner, arbetsmetoder och ekonomi. Jordbrukstekniska institutet. Sundell B, Ringstad K, eds.Uppsala. 75pp. In Swedish.
- Danfors, B. & Nordén, B. 1992. Teknikutvärdering av energiskogsskördare. Jordbrukstekniska institutet. JTI-rapport 150. Uppsala.
- Danfors, B., Norden, B. 1995a. Harvesting techniques and logistics of short rotation energy forestry. Jordbrukstekniska institutet. JTI-rapport 200. Uppsala.
- Danfors, B. & Nordén, B. 1995b. Sammanfattande utvärdering av teknik och logistik vid salixskörd. Jordbrukstekniska institutet. JTI-rapport 210. Uppsala.
- Dzurenda, L., Geffertova, J. & Hecl, V. 2010. Energy Characteristics of Wood-Chips Produced from *Salix Viminalis* - clone ULV. *Drvna Industrija* 61(1): 27-31.
- Eriksson, H. 2008. Teknik för komprimerande helskottskörd av Salix i buntform – Förstudie. Projekt E06-624, Värmeforsk Service AB. ISSN 1653-1248. 41 pp.
- Forsberg, J. & Wennberg, R. 2011. Teknikutveckling av aggregat för kontinuerlig ackumulerande skörd i unga skogar. Examensarbete. Luleå tekniska universitet.

- Gigler, J. K., Meerdink, G. & Hendrix, E. M. T. 1999. Willow supply strategies to energy plants. *Biomass and Bioenergy* 17: 185-198.
- Gullberg, T. 1997. Time consumption model for off-road extraction of shortwood. Inst för skogsteknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Garpenberg. Uppsatser och Resultat 297. ISSN 0282-2377.
- Gullberg, T., Johansson, J. & Liss, J.-E. 1998. Studie av system EnHar vid uttag av skogsenergi i unga bestånd – Hamrestudien. Arbetsdokument nr 9, 1998 Garpenberg. Skogsindustriella institutionen, Högskolan Dalarna.
- Hytönen, J. 1995. Ten-year biomass production and stand structure of *Salix* ‘aquatica’ energy forest plantation in southern Finland. *Biomass and Bioenergy* 8(2): 63-71.
- Jirjis R. 2005. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 28:193-201.
- Johansson, J. & Gullberg, T. 2002. Multiple tree handling in the selective felling and bunching of small trees in dense stands. *International Journal of Forest Engineering* 13(2): 25-34.
- Jylhä, P. 2004. Feasibility of an adapted tree section method for integrated harvesting of pulpwood and energy wood in early thinning of Scots pine. *International Journal of Forest Engineering* 15(2): 32 – 42.
- Kärhä, K., Jouhio, A., Mutikainen, A. & Mattila, S. 2005. Mechanized energy wood from early thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 16 (1): 15-26.
- Kärhä, K., Jylhä, P. & Laitila, J. 2010. Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling. *Biomass and Bioenergy* (in press).
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fennica*, 42(2): 267-283.
- Lindroos, O. 2009. Bestensystemets konkurrensförmåga – jämfört med vanligt skördare-skotaresystem. Fakta skog. Rön från Sveriges lantbruksuniversitet, Nr 10, 2009.
- Liss, J.-E. 1999. Studie av system EnHar vid uttag av skogsenergi i unga bestånd – L:a Främsbacka. Arbetsdokument nr 8. Högskolan Dalarna. (In Swedish).
- Mitchell, C.P., Stevens, E.A. & Watters, M.P. 1999. Short-rotation forestry – operations, productivity and costs on experienced gained in the UK. *Forest Ecology and Management* 121: 123-136.
- Magnusson, L. 2009. Teknik för skörd av *Salix*: status och utvecklingsbehov. Slutrapport 2009-05-20. EnerGia Konsulterande Ingenjörer AB.
- Mola-Yudego, B. 2011. Trends and productivity improvements from commercial willow plantations in Sweden during the period 1986-2000. *Biomass and Bioenergy*, 35, 446-453.
- Nordén, B. 1984. Komprimeringsutrustning till skotare. Forskningsstiftelsen, Skogsarbeten, Resultat nr 11.

- Nordén, B. 1991. Komprimering av träddeklar och trädrester vid skotning och vidaretransport. Forskningsstiftelsen, Skogsarbeten, Stencil.
- Nordfjell, T. & Liss, J-E. 2000. Compressing and drying of bunched trees from a commercial thinning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 284-290.
- Nordh, N. & Dimitriou, I. 2003. Harvest techniques in Europe. IEA Bioenergy, Task 30. *Short Rotation Crops for Bioenergy: New Zealand, 2003*, 115-120.
- Nordh, N. E. 2005. Long term changes in stand structure and biomass production in short rotation willow coppice. Doctor's dissertation. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae* 2005: 120. ISSN 1652-6880, ISBN 91-576-6919-8.
- Nurmi, J. 1995. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. *Biomass and Bioenergy* 8(4): 245-249.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2009. Applying the activity-based costing to cut-to-length timber harvesting and trucking. *Silva Fennica* 43(5): 847-870.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Doctors dissertation. *Dissertationes Forestales* 79. ISSN 1795-7389. ISBN 978-951-651-247-4.
- Paulrud, S., Rönnbäck, M., Gunnarsson, C., & Olsson, J. 2010. Utvärdering av salixodlars erfarenheter och attetyder till odling. Energiteknik, SP, Rapport 2010:7. Borås. ISBN 978-91-86622-13-8. ISSN 0284-5172.
- Pettersson, M. & Nordfjell, T. 2007. Fuel quality during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass and Bioenergy* 31: 782-792.
- Ringman, M. 1996. Trädbränslesortiment – definitioner och egenskaper. Institutionen för virkeslära. SLU, Umeå. Rapport 250. ISSN 0348-4599.
- Rosenqvist, H., Roos, A., Ling, E. & Hektor, B. 2000. Willow growers in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 18: 137-145.
- Sims, R. 2002. The brilliance of bioenergy in business and in practice, James & James (Science Publishers) Ltd, Unithed Kingdom. ISBN 1-902916-28 X.
- Spinelli, R., Nati, C. & Magagnotti, N. 2008. Harvesting Short-Rotation Poplar Plantations for Biomass Production. *Croatian Journal of Forest Engineering* 29: 129-139.
- Spinelli, R., Nati, C. & Magagnotti, N. 2009. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass and Bioenergy*, 33, 817-821.
- Spinelli, R. & Magagnotti, N. 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea Abies* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 69-77.

Talbot, B., Nordfjell, T. & Suadicani, K. 2003. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation. *International Journal of Forest Engineering* 14(2): 31-43.

Talbot B. & Suadicani, K. 2005. Analysis of Two Simulated In-field Chipping and Extraction Systems in Spruce Thinnings. *Biosystems Engineering* 91(3): 283-292.

Verwijst T. & Telenius, B. 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121: 137-146.

Willebrand, E., Ledin, S. & Verwijst, T. 1993. Willow coppice systems in short rotation forestry: Effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production. *Biomass and Bioenergy* 4(5): 323-331.

Personlig kommunikation

Nils-Erik Nordh. 2011. SLU, Uppsala.

Hans Eriksson. 2011. Västeräng Lantbruk AB.

Mikael Forsman. 2010. Norra skogsägarna, Umeå.