



Arbetsrapport

Från Skogforsk nr. 868–2015

Systemkostnader, logistik och kvalitetsaspekter för sju försörjningskedjor för stubbränslen

System costs, logistics and quality aspects
relating to seven supply chains for stump fuel

Anders Eriksson, SLU; Henrik von Hofsten och Lars Eliasson, Skogforsk

Arbetsrapport

Från Skogforsk nr. 868-2015

I serien Arbetsrapport finns bakgrundsmaterial, metodbeskrivningar, resultat, analyser och slutsatser från både pågående och avslutad forskning.

Titel:

Systemkostnader, logistik och kvalitetsaspekter för sju försörjningskedjor för stubbränslen.

System costs, logistics and quality aspects relating to seven supply chains for stump fuel.

Bildtext:

Dopstادت DW-3060 Büffel med trumsikt SM-518 matad med en stor separatlastare. Utanför bild finns även en hjullastare för att stacka materialet.

De mindre mörka högarna i förgrunden är bortsiktat material medan det rena stubbränslet hamnat till vänster utanför bild.

Ämnesord:

Stubbränsle, systemkedja, kostnadseffektivitet, systemsimulering.

Stump fuel, system chain, cost-effectiveness, system simulation, comminution.

Redigering och formgivning:

Ingegerd Hallberg

© Skogforsk 2015

ISSN 1404-305X



SKOGFORSK

Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala

Tel: 018-18 85 00 Fax: 018-18 86 00

skogforsk@skogforsk.se

skogforsk.se



Anders Eriksson, Tekn Lic, civ.ing. i Energisystem. Doktorand på SLU (Inst. för Energi och Teknik) inom området simulering av skogsbränslesystem, främst med fokus på systemeffektivitet.



Henrik von Hofsten, är skogstekniker och har jobbat på Skogforsk i drygt 25 år inom ett flertal olika projekt. Under de senaste tio åren har det främst handlat om teknik och metod för stubbskörd. På senare tid har det även handlat om teknik och metod för landsvägstransporter med särskilt fokus på HCT-fordon.



Lars Eliasson, docent. Arbetar på skogforsk med teknik och metodutveckling inom skogsbränsleområdet.

Abstract

The system chains used in association with stump harvest have so far been largely based on experiences from logging residues and roundwood. No analyses have been carried out of whether these systems are actually appropriate.

In this study, we compiled data taken from a number of different studies and created a total of seven possible system chains for grinding and transport of stump fuel. We used a simulation tool that considers the random effects that arise in a system chain during the course of one year.

The systems tested involved grinding with three different alternatives, and each grinding alternative had two transport alternatives. In the seventh (reference) system, loose stump parts were transported to the recipient where comminution took place.

The results show that the reference system quickly loses financial viability as transport distance increases, and should therefore not be used when the distance to the recipient is longer than approximately 50 km.

The most cost-effective system involved grinding the stumps at the landing and storing the ground material in piles without sieving. This material is later collected in chip trucks equipped with a knuckle boom loader. This system requires a good availability of chip trucks, particularly if transport distances are long.

Grinding and sieving at the landing increases the energy content by reducing the proportion of contaminants in the chips, but the system requires more machines at the landing. For these systems too, chipping on the ground for later collection with chip trucks equipped with a knuckle boom loader is generally more cost-effective than chipping directly into container trucks.

Innehåll

Sammanfattning	2
Bakgrund	3
Material och Metod	4
Studerade maskinsystem	5
Simuleringsmodellen.....	6
Antagna arbetsmetoder	9
Transportfordonen.....	9
Sönderdelningsmaskinerna.....	9
Indata för simuleringarna	12
Lastväxlarbil med släp och 3 containrar	12
Skopbil med släp.....	13
Grotbil med släp.....	13
Sönderdelningsutrustning och övriga maskiner på avlägg.....	14
Sällning och askhantering.....	15
Kostnads kalkyl.....	15
Resultat	16
Bränslehantering och sällning på avlägg.....	16
Levererat bränsle	17
Maskinanvändning under året.....	19
Kostnads kalkyl.....	21
Energibalans.....	23
Diskussion.....	24
Slutsats.....	27
Referenser	28

Sammanfattning

De systemkedjor som använts i samband med stubbskörd hittills, har i allt väsentligt byggts på erfarenheter från grot och rundvirke utan att några egentliga analyser av systemens lämplighet för stubbskörd gjorts. I detta arbete har vi använt data från ett flertal olika studier och satt ihop dem till sammanlagt sju tänkbara systemkedjor för hantering av stubbränsle. För ändamålet har vi använt ett datoriserat simuleringsverktyg som kan ta hänsyn till alla de slumpmässiga effekter som uppstår i en systemkedja under ett helt verksamhetsår. De system som testats är sönderdelning med tre olika alternativ där varje sönderdelningsalternativ haft två transportalternativ samt ett system med transport av lösa stubbdelar till industri för sönderdelning där.

Av resultaten framgår att systemet med lösa stubbdelar fort tappar i ekonomisk bärkraft med ökande transportavstånd och därför inte bör användas när avståndet till mottagaren är längre än ca 50 km. Mest kostnadseffektivt var att krossa stubbarna på avlägg och lagra materialet i hög utan någon form av siktning och att senare hämta materialet med skopflisbilar. Detta system kräver god tillgång på sådana lastbilar särskilt om transportavstånden är långa. Krossning och siktning på avlägget höjer energiinnehållet tack vare minskade andelar föroreningar i flisen men det innebär också att det krävs fler maskiner på avlägget för att systemet skall kunna fungera. Även för dessa system gäller att flisning på mark för senare hämtning med skopflisbil i regel är mer kostnadseffektivt än att flisa direkt i containerbilar.

Bakgrund

De försörjningskedjor för stubbar som använts vid stubbskörd i Sverige under de senaste åren, har framför allt kännetecknats av en god del av ”trial & error” vad gäller uppläggen. Mycket har grundats på antaganden, gissningar och bedömningar baserat på erfarenheter hämtade från rundvirkes- och grothantering. Systemet fungerar tekniskt och praktiskt men det finns mycket som kan göras för att det ska fungera bättre och till en lägre totalkostnad. Då stubbdelar tar mycket plats vid transport är transportkostnaderna förhållandevis höga, men det bör vara möjligt att sänka totalkostnaden för transport och sönderdelning genom att sönderdela stubbdelarna innan transport.

I dagens system för stubbhantering för energi fraktas vanligen hela stubbdelar till terminaler eller värmeverk med speciellt förstärkta lastbilar. Det okrossade materialet är svårkomprimerat, vilket gör det svårt att uppnå full lastvikt, vilket också innebär höga kostnader för landsvägstransporten och stort slitage på lastbilarnas lastutrymmen. Det finns studier som indikerar att sönderdelning på avlägg kan vara mycket konkurrenskraftigt, speciellt vid längre (mer än ca 50 km) transportavstånd (von Hofsten och Granlund, 2010).

Sönderdelningen av stubbdelarna till eldningsbar fraktion sker i dag nästan uteslutande på terminal, mycket beroende på att de krossar som används är för stora och tunga för att använda på avlägg. De kräver dessutom att man har minst en maskin som matar in stubbmaterialet i krossen och en som kan lasta eller stacka upp det krossade materialet. På senare år har det kommit fram några intressanta krossar som inte är större än att de kan användas även på avlägget även om de primärt är tänkta för terminalbruk.

Sommaren 2012 genomförde Skogforsk en fallstudie i samarbete med entreprenadföretaget TL-GROT AB i syfte att studera hur en systemkedja för stubbskörd skulle kunna fungera i praktiken om stubbarna krossas på avlägget i stället för på terminal (von Hofsten och Brantholm, 2013). Beroende på ogynnsamma förutsättningar under studietiden, främst brist på lämpliga avlägg för studien, blev resultaten otydliga.

Syftet med denna systemstudie är att fortsätta där man slutade 2012, men med ett annat angreppssätt där en omfattande teoretisk systemanalys med ingångsvärden från ett antal olika empiriska försök görs i stället för empiriska studier. På så vis kan kostnaderna analyseras samtidigt som känslighetsanalyser kan göras för att klargöra var de svaga länkarna i försörjningskedjan finns. Totalt kommer sex alternativa försörjningskedjor att jämföras med den traditionella metoden med lastbilstransport av stubbdelar och krossning hos mottagaren.

Material och Metod

Händelsestyrd simulering används bland annat vid studier av komplexa logistiksystem, och metoden har även använts vid studier av tillförselkedjor för olika biomassamaterial. En styrka med metoden är att den kan efterlikna riktiga systems slumpmässiga karaktär och därigenom i simuleringar beakta de följd-effekter slumpen kan skapa.

En dynamisk händelsestyrd simuleringsmodell för transport och sönderdelning av stubbar har utvecklats i programvaran ExtendSim inom ett ESS-finansierat doktorandprojekt. Modellen har använts för att studera ett antal olika försörjningskedjor (Eriksson m.fl., 2014a; Eriksson m.fl., 2014b; Eriksson m.fl., 2014c). För den här studien har en modifierad version utvecklats baserad på erfarenheter från de tidigare fältstudierna.



Figur 1.
En Scania R620 med CBI 5800 höghastighetskross. Krossen drivs av lastbilsmotorn.

STUDERADE MASKINSYSTEM

Sju olika metoder för transport och sönderdelning av stubbar har simulerats. I sex av försörjningskedjorna sker sönderdelningen av stubbar på avlägget och där har följande maskinalternativ använts för sönderdelningen:

1. **Lastbilsmonterad CBI 5800 (Figur 1).** Krossen har tidigare studerats i fält i Sverige (Eliasson m.fl., 2012) och i Finland (Nuutinen m.fl., 2014). Den karakteriseras av att den är robust och lätt att flytta mellan objekten då det bara rör sig om en enda enhet (kranen sitter på lastbilen). Däremot saknar den möjlighet till siktning.
2. **Komptech Crambo 6000 med integrerad stjärnsikt (C 6000), (Figur 5).** I analysen var krossen monterad på en semi-trailer som drogs och matades av en separatlastare. Ekipaget har studerats i Finland (Laitila och Nuutinen, 2013) och en av dess styrkor är att den inbyggda stjärnsikten kan separera flisen (acceptmaterialet) från sand och jord (rejektet) och därigenom producera ett renare bränsle. En konsekvens av det renare bränslet är dock att en del brännbar finfraktion följer med det utsorterade rejektet.
3. **Doppstadt DW-3060 Buffel i serie med en Doppstadt SM-518 trumsikt (framsidesbilden)** inkluderades i simuleringsstudien. En separatlastare antogs användas för att förflytta och mata krossen. Samma maskinsystem har tidigare studerats i fält av Skogforsk (von Hofsten och Brantholm, 2013).

Det krossade materialet har transporterats till industri med två olika lastbilsalternativ, lastväxlarbil respektive skopflisbil, för vart och ett av krossningsalternativen. Transportalternativen kan kortfattat beskrivas:

- a) **Lastväxlarbil med släp och tre containrar.** I systemet finns ett starkt beroendeförhållande mellan transport- och sönderdelningsenheterna. Krossen måste ha tomma containrar till materialet och med för många lastbilar vid avlägg uppstår lätt kösituationer. Ett sådant upplägg brukar beskrivas som ett **hett system**.
- b) **Flisbil med kran och flisskopa samt släp (Skopflisbil).** Detta system är i motsats till containersystemet ett så kallat **kallt system**, vilket innebär att sönderdelning och transport kan utföras oberoende av varandra. Det krossade materialet stackas upp på avlägg och skopflisbilen hämtar materialet senare.

För att lättare hålla isär systemen används fortsättningsvis en kombination av siffrorna och bokstäverna ovan, där siffrorna 1–3 anger typen av kross och bokstäverna a-b transportalternativen (Tabell 1).

Den traditionella metoden med lastbilstransport av stubbdelar och krossning hos mottagaren simulerades för att beskriva referensmetoden (Ref.). Transporten sker med en förstärkt grotbil (Figur 6.) bestående av lastbil med kran samt släp med robusta täckta sidor. Sönderdelningen görs med en elektrisk kross.

De olika systemen kräver ibland kompletterande maskiner för att lasta i och stacka upp flisen samt extra fordon vid maskinflyttar mellan objekten. Samtliga maskiner som antas arbeta i respektive system listas i Tabell 2.

Tabell 1.

Lista över de system som inkluderades i studien samt den systembeteckning som kommer att användas fortsättningsvis.

Lastbil/Kross	CBI 5800	C 6000	DW-3060	EI-kross
Lastväxlarbil med släp och tre containrar	1a	2a	3a	
Skopbil med släp	1b	2b	3b	
Grotbil med släp				Ref

Tabell 2.

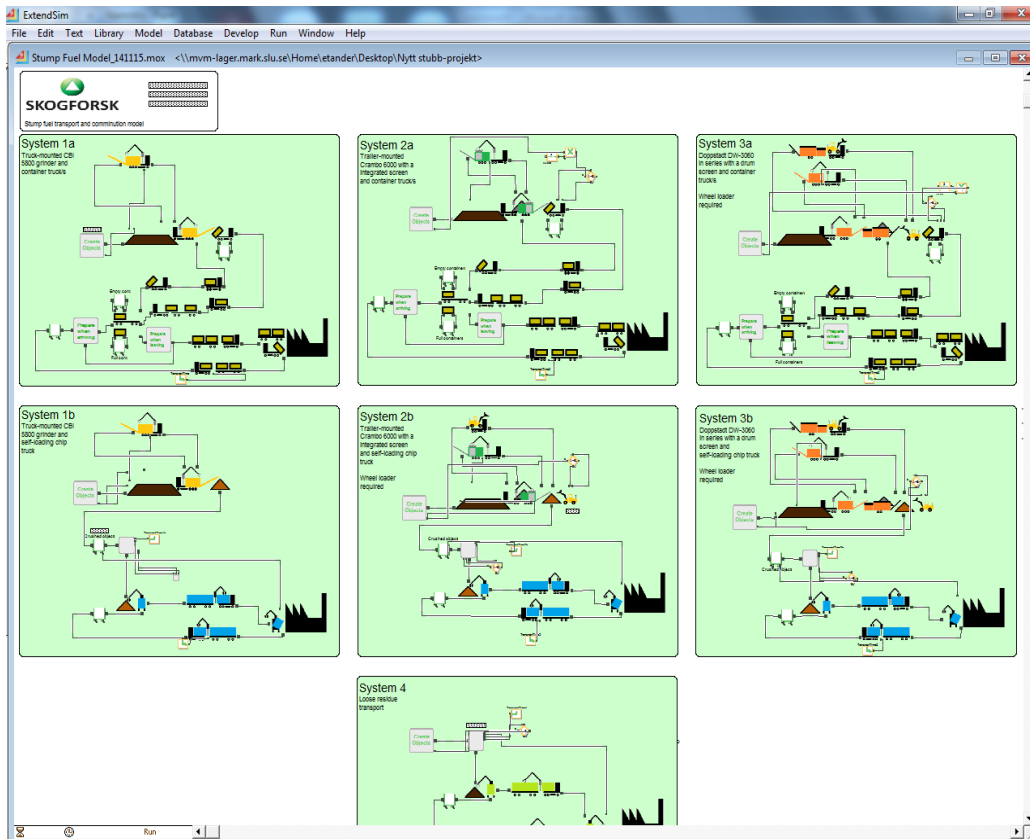
Ingående maskiner i vart och ett av de sju simulerade maskinsystemen.

1a	1b	2a	2b	3a	3b	Ref.
CBI 5800 Lastväxlarbil	CBI 5800 Skopbil	C 6000 Separatlastare Lastväxlarbil	C 6000 Separatlastare Lastmaskin Skopbil	DW-3060 Separatlastare Trumsikt Lastmaskin Lastväxlarbil	DW-3060 Separatlastare Trumsikt Lastmaskin Skopbil	Grotbil Stationär EI-kross

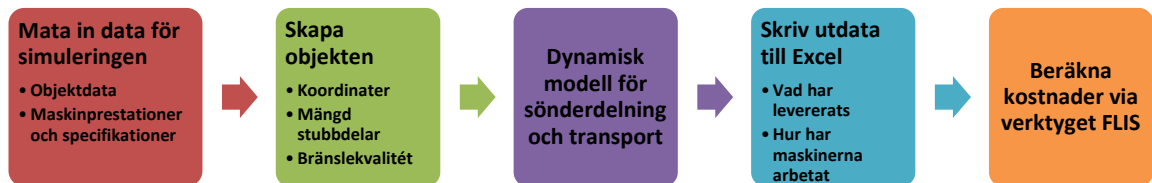
SIMULERINGSMODELLEN

I modellen simuleras alla sju maskinsystemen parallellt (Tabell 2) under en tidsperiod av ett år (Figur 2). Av årets 8 760 timmar antas maskinsystemen användas 2 560 kalendertimmar.

Modellen simulerar krossning och transport av stubbar från flera olika avlägg där all stubbkross levereras till en industri. Alla maskinsystem hanterar samma uppsättning avlägg och i samma ordning. De hanterar så många de hinner under årets schemalagda arbetstimmar med de produktionsförutsättningar som skapas av modellen. Här kan det således uppstå skillnader mellan systemen beroende på skillnader i maskinproduktivitet och hur effektivt maskinerna kan utnyttjas under året. Efter att modellen simulerat hur maskinerna arbetat under året görs kostnads-kalkyler som baseras på maskinernas utnyttjande enligt simuleringen (Figur 3). För kostnads-kalkylerna har kalkylverktyget FLIS använts (von Hofsten, 2006).



Figur 2.
Bild av framtagen simuleringsmodell som schematisk beskriver alla ingående komponenter i samtliga sju system samt visar hur de förhåller sig till varandra.



Figur 3.
Simuleringsmodellen och grundstrukturen för simuleringsstudien.

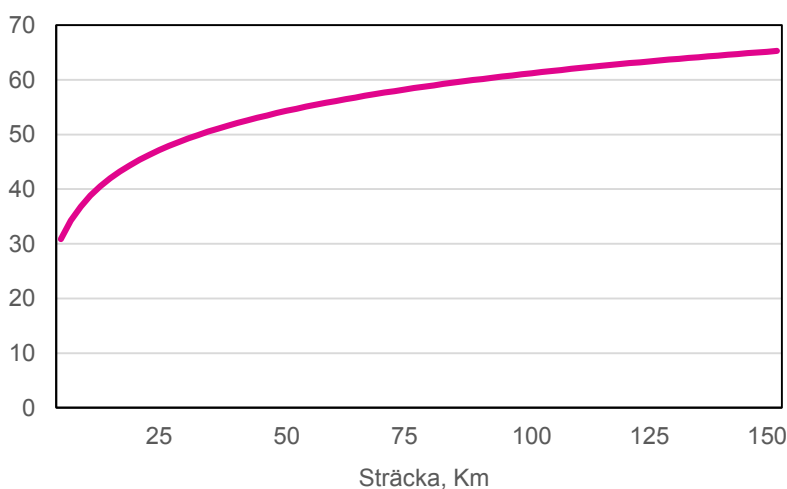
Vid uppstarten av modellen skapas en traktbank med information om var avläggen är belägna, hur mycket material som finns på vart och ett av dem samt vilken kvalitet materialet har. När traktbanken skapas slumpas avläggskoordinaterna fram inom en cirkel runt industrin med radien 80 kilometer och slingerfaktorn antogs vara 1,25, vilket ger ett maximalt transportavstånd på 100 kilometer. Koordinater (x, y) för avläggets position samt mängd biomassa (ton TS askfritt) slumpas fram utifrån på förhand definierade kriterier. Mängden askfri stubbved per avlägg antas ligga i intervallet 50–250 ton torrs substans (ton TS). Stubbdelarna på avläggen antas ha en fukthalt på 30 %, en askhalt på 8 % samt en fastvolymandel på 20 % för kluvna stubbdelar. Torr-/rådensiteten för föreningsfri stubbved antas vara 430 kg/m³ och det kalorimetriska värmevärdet 20,5 MJ/kg för askfri ved. Under simuleringen bär materialet från

ett avlägg med sig information om mängd, askhalt, fukthalt, fastvolymandel, torr-/rådensitet samt kalorimetriskt värmevärde för askfri stubbved. Därigenom har modellen tillräcklig information för att till exempel beräkna transportegenskaper och skatta energiinnehåll. Beroende på hur systemen hanterar materialet kan modellen ändra kvalitetsparametrarna, exempelvis om materialet siktas ändras bland annat askhalt och fukthalt enligt på förhand angivna specifikationer. De valda värdena är baserade både på tidigare publicerade studier samt på Skogforsks egna mätdata (Anerud, 2012; Laurila och Lauhanen, 2010; Ala-Fossi m.fl., 2007; Nylinder, 1979; Ranta och Rinne, 2006). Vid simuleringens start skapas initialt 250 avlägg för att garantera att traktbanken är stor nog för att, oavsett system, hålla maskinerna med arbete under ett helt år.

Tiden för flyttning av maskiner mellan avlägg består av en sträckoberoende komponent samt en komponent som är en direkt funktion av sträckan. Den sträckoberoende komponenten kan till exempel inkludera väntetid, lastning samt lossning av maskiner från trailer, eller andra liknande processer. Tiden för den sträckoberoende komponenten erhålls genom att aktuell sträcka divideras med den förväntade medelhastigheten. Sträckan fågelvägen mellan två avlägg eller mellan industri och avlägg erhålls genom koordinaterna och Pytagoras sats. För det faktiska avståndet via vägnätet multipliceras sträckan med en slingerfaktor som antas vara 1,25. Slingerfaktorn beskriver förhållandet mellan vägsträcka och faktiskt avstånd.

På samma sätt beräknas transportsträckorna för alla lastbilstransporter i modellen. Alla lastbilar förväntas hålla en medelhastighet som beror av körsträckan enligt Figur 4. Hur mycket material som maximalt kan lastas i varje container eller i varje flisbil bestäms av materialets egenskaper tillsammans med specifikationerna för ekipaget. Modellen fyller containrarna och flisbilen maximalt utifrån de givna vikts- och volymrestriktionerna (maximal bruttovikt, 60 ton). Sista lasset från varje objekt är dock undantaget, där den transporterade mängden biomassa kan vara mindre än den tillåtna.

Medelhastighet, Km/h



Figur 4.
Den förväntade medelhastigheten för lastbilarna, som funktion av transportsträckan.

När simuleringskörningen är slut skrivs information till Excel innehållande bland annat hur många timmar varje maskin arbetat under året samt vad som har levererats till industri i de sju olika systemen.

ANTAGNA ARBETSMETODER

Transportfordonen

- **Lastväxlarbilarna** antogs arbeta på samma sätt oavsett vilket krossningsalternativ transportsystemet är kopplat till. Arbetsgången kan beskrivas genom följande aktiviteter; åk mot aktuellt avlägg, vänta på din tur vid eventuell köbildning, koppla av släp och lasta av bilcontainern på lämpligt rangeringsställe, ta en container från släpet och åk till krossen, vänta tills containern fyllts, åk mot släpet, lasta den första fulla containern på släpet, ta den andra tomma containern från släpet och åk till krossen, vänta tills containern fyllts, åk mot släpet, lasta den andra fulla containern på släpet, ta den tredje tomma containern och åk till krossen, vänta tills containern fyllts, åk mot släpet, koppla släp och förbered för avfärd, åk mot industri samt avslutningsvis tippa flisen vid industri, en container i taget. I systemet arbetar ett förvalt antal bilar direkt mot en specifik kross och mot en specifik industri.
- **Skopbilarna** antogs också arbeta också på samma sätt oavsett krossningsalternativ. Arbetet kan beskrivas av aktiviteterna; åk mot aktuellt avlägg, lasta flisen med egen kran, åk mot industri samt avslutningsvis sidtippa av bränslet. Åk sedan mot aktuellt avlägg igen och fortsätt lasta stubbkross alternativt vänta tills ett nytt objekt är färdigkrossat.
- **Grotbilarna** antogs arbeta snarlikt skopbilarna; åk mot aktuellt avlägg, lasta stubbdelarna med egen kran, åk mot industri samt avslutningsvis lasta av stubbdelarna med kran.

Sönderdelningsmaskinerna

Beträffande de tre krossningsalternativen skiljer sig deras arbetsorganisation åt en del beroende på transportalternativ. Arbetsflödet i modellen för respektive kross beskrivs översiktligt nedan.

CBI 5800 mot lastväxlarbil (1a)

- Åk till aktuellt objekt.
- Förbered för krossning.
- Vänta på tom container.
- Krossa så länge det finns material kvar på avlägget och så länge container inte är full, upprepa (c) och (d) tills materialet är slut.
- Packa ihop maskinen.
- Åk till nästa objekt samt börja om på (b).

CBI 5800 mot skopbil (1b)

- a) Åk till aktuellt objekt och förbered för krossning.
- b) Krossa så länge det finns material kvar.
- c) Packa ihop maskinen.
- d) Åk till nästa objekt, förbered för krossning och börja om på (b).

Crambo-krossen mot lastväxlarbil (2a)

- a) Åk till aktuellt objekt.
- b) Förbered för krossning.
- c) Vänta på tom container.
- d) Krossa och sikta så länge det finns material kvar på avlägget och så länge containern inte är full, upprepa (c) och (d) tills materialet är slut.
- e) Packa ihop maskinen.
- f) Åk till nästa objekt samt börja om på (b).



Figur 5.
Crambo 6000 vid värmeverket i Värnamo. Acceptflis till vänster och utsållad reject till höger.

Crambo-krossen mot skopbil (2b)

- a) Åk till aktuellt objekt och förbered för krossning.
- b) Vänta på lastmaskin.
- c) Krossa samt sikta så länge det finns material kvar.
- d) Packa ihop maskinen.
- e) Åk till nästa objekt.
- f) Etablera maskinen samt börja om på (b).

För lastmaskinen i systemet antogs arbetet bestå av följande aktiviteter:

- i. Vänta på transportbil, lasta, flytta samt etablera på aktuellt objekt.
- ii. Vänta på krossen.
- iii. Hantera krossat material.
- iv. Vänta på transportbil, lasta, åk till nästa objekt samt etablera, börja om på (ii).

Doppstadt-krossen mot lastväxlarbil (3a)

- (a) Packa ihop maskinen, åk till aktuellt objekt, etablera maskinen.
- (b) Vänta på lastmaskin och trumsikt.
- (c) Vänta på tom container.
- (d) Krossa så länge det finns material kvar på avlägget och så länge containern inte är full, upprepa (c) och (d) tills materialet är slut
- (e) Packa ihop maskinen, åk till nästa objekt, etablera maskinen samt börja om på (b).

För lastmaskinen och trumsikten i systemet antogs arbetet i modellen bestå av att:

- i. Vänta på transportbil, lasta, transportera samt etablera systemet på aktuellt objekt.
- ii. Vänta på krossen.
- iii. Sikta samt hantera krossat material så länge krossen arbetar, upprepa (ii) och (iii) tills materialet är slut.
- iv. Vänta på transportbil, lasta, åk till nästa objekt samt etablera, börja om på (ii).

Doppstadt-krossen mot skopbil (3b):

- (a) Packa ihop maskinen, åk till aktuellt objekt, etablera maskinen.
- (b) Vänta på lastmaskin och trumsikt.
- (c) Krossa så länge det finns material kvar.
- (d) Packa ihop maskinen, åk till nästa objekt, etablera maskinen samt börja om på (b).

För lastmaskinen och trumsikten i systemet antogs arbetet i modellen bestå av att:

- i. Vänta på transportbil, lasta, transportera samt etablera systemet på aktuellt objekt.
- ii. Vänta på krossen.
- iii. Sikta samt hantera krossat material så länge krossen arbetar, upprepa (ii) och (iii) tills materialet är slut.
- iv. Vänta på transportbil, lasta, åk till nästa objekt samt etablera, börja om på (ii).

Indata för simuleringarna

Då verkliga system studeras över tid framkommer det ofta att processer och aktiviteter har en variation i hur lång tid det tar att utföra dem. Genom att studera en maskin i arbete kan man få en djupare förståelse för dess användning och beskriva variationerna i tidsåtgång per producerad enhet. Genom att använda dessa fördelningar i simuleringsmodellen kan modellen på ett mer realistiskt sätt efterlikna verkligheten. Om det saknas tillräckligt med data för få fram en sannolikhetsfördelning är det en bra metod att i stället försöka få en bild av variationen kring medelvärdet genom andra källor så som experter, operatörer, studier av liknande system eller genom processens karakteristik. Skattningar, gjorda av personer som är bekanta med systemen, är ofta värdefulla eftersom de kan ge indikationer på extrema värden samt förväntade värden. Triangulära sannolikhetsfördelningar (Triang (Min. Mode. Max.) där mode representerar modalvärdet eller "normalvärdet", används ofta i situationer med begränsad kännedom om en maskins prestanda.

Lastväxlarbil med släp och tre containrar

Lastväxlarekipaget förväntades totalt kunna transportera tre containrar varav en på bilen och två på släpet, och varje container antogs rymma 40 m³. Lastvikten på ekipaget antogs vara 30 ton och inköspriset 2,9 Mkr inklusive containrar (Mortazavi och Johansson, 2013). Antagna sannolikhetsfördelningar för tiden för respektive aktivitet anges i Tabell 3, vilken är baserad på tidigare studier (Liss, 2006) samt Skogforsks egna mätningar. Bränsleförbrukningen vid körning antogs vara 5,0 l/mil och vid lastning och lossning 7,0 l/timme.

Tabell 3.
Antagen tid i minuter för aktiviteter i containersystemet.

Lastväxlarbil	Triangular		
	Min.	Mode.	Max.
Lasta av containrar	5	7,5	10
Lasta 1 tom container	0,5	1,5	2,5
Åk mot kross	0,5	2,0	3,5
Åk mot rangerplats	0,5	2,0	3,5
Rangering 1 full bil-släp	1,5	2,0	2,5
Förbered för avfärd	3,0	4,0	5,0
Tippa bränsle vid industri, inklusive inmätning	30	37	65

Skopbil med släp

Skopbilen förväntades maximalt kunna transportera 120 m³ totalt i bil och släp med en maximal lastvikt på 30 ton och ha ett inköpspris på 3,7 Mkr (Mortazavi och Johansson, 2013). Antagna sannolikhetsfördelningar för tiden för respektive aktivitet anges i Tabell 4, vilken är baserad på tidigare studier (Liss, 2006) samt Skogforsks egna mätningar. Bränsleförbrukningen vid körning antogs vara 5,0 l/mil respektive 6,72 l/timme vid lastning och lossning.

Tabell 4.
Antagen tid i minuter för aktiviteter i skopbilssystemet.

Skopbil	Triangular		
	Min.	Mode.	Max.
Lasta bil och släp på avlägg	40	55	75
Lasta av vid industri, inklusive inmätning	20	25	65

Grotbil med släp

Grotbilen (referensen) med släp antogs maximalt kunna lasta 140 m³ med en maximal lastvikt på 27 ton och ha ett inköpspris på 4,8 Mkr (Mortazavi och Johansson, 2013). Antagna sannolikhetsfördelningar för tiden för respektive aktivitet anges i Tabell 5, vilken är baserad på tidigare studier (Mortazavi och Johansson, 2013, Ala-Fossi m.fl., 2007, Ranta och Rinne, 2006) samt Skogforsks egna mätningar. Bränsleförbrukningen vid körning antogs vara 5,2 l/mil och vid lastning och lossning 6,72 l/h.

Tabell 5.
Antagen tid i minuter för aktiviteter i grotbilssystemet.

Grotbil	Triangular		
	Min.	Mode.	Max.
Lasta bil och släp på avlägg	40	55	75
Lasta av stubbdelar hos industri	40	55	75



Figur 6.
Grotbil med förstärkta plåtsidor lastar stubbdelar för vidaretransport till värmeverk.

Sönderdelningsutrustning och övriga maskiner på avlägg

De antagna värdena i studien (Tabell 6) baseras på tidigare studier (Nuutinen m.fl., 2014; Laitila och Nuutinen, 2015; Ala-Fossi m.fl., 2007; Nylinder, 1979; Fogdestam m.fl., 2012; Eliasson m.fl., 2012; Laitila m.fl., 2015). Krossning är en förutsättning för att kunderna ska kunna använda bränslet i sina anläggningar. Dessutom erhålls bättre transportegenskaper eftersom fastvolymandelen ökar. Här antogs en fastvolymandel på 30 % efter sönderdelning oavsett maskinval.

Tabell 6.
Antagen produktivitet (Ton torrvt/h) för de olika krossarna samt omställningstider i minuter för att förbereda maskinerna för transport till nästa avlägg (exklusive vägtransporten).

Krossar	Triangular		
	Min.	Mode.	Max.
Produktivitet hos krossar, Ton torrvt/h.			
– CBI 5800	14	17	22
– C 6000	10	13	18
– DW 3060	13	16	21
Omställningstid krossar, min.			
– CBI 5800	20	30	40
– C 6000	20	30	40
– DW 3060	45	60	75
Omställningstid övriga, min.			
– Lastmaskin på transportbil.	60	90	120
– Lastmaskin på transportbil samt koppla trumsikt efter.	105	135	150

De fasta tiderna (omställningstid) som inte beror av sträckan inkluderar aktiviteter som väntan på trailer eller lastväxlare, lastning och lossning av maskiner samt förberedelse för avfärd.

Krossarna antogs i medeltal gå sönder eller få ett oförutsett stopp var 6,5 timme, som i medeltal varade i 0,75 timmar. Det motsvarar cirka 11,5 % av tiden. Liknande tider finns angivna för andra sönderdelningsmaskiner (Spinelli och Visser, 2009; Aman m.fl., 2011). Längden på dessa tider antas vara exponentialfördelade (expo (medel)) i modellen med medelvärdena 6,5 respektive 0,75 enligt ovan, d.v.s. att slumpen styrs så att de flesta stopp är relativt korta medan några blir längre.

Sällning och askhantering

Sällning med trumsikten från Doppstadt respektive Crambos inbyggda stjärnsikt, har tidigare studerats (Fogdestam m.fl., 2012; von Hofsten och Brantholm, 2013; von Hofsten och Granlund, 2010; Laitila och Nuutinen, 2015). För Doppstadtkonceptet anges en rejektandel på mellan 20 och 30 % av torrvikten och askhalter i acceptmaterialet på 1,4 – 1,9 % finns beskrivna även om både rejektandel och askhalt ibland varit betydligt högre. Crambokonceptet har visat att den kan sänka askhalten från 3–6 % till omkring 1,0 – 1,5 % i det färdiga acceptmaterialet. Stickprov på rejektmaterial visade på en askhalt mellan 32 % och 75 % och fukthalten hos rejektet låg i intervallet 12 till 22 %. Fukthalten i acceptmaterialet låg mellan 18 och 38 %.

Vid beräkningar på sällning utgår den här studien från massbalans och således antas alla komponenter från det ursprungliga materialet antingen hamna i högen med rejekt- eller acceptmaterial. Askhalten antogs sjunka från en ursprunglig askhalt på 8 % till 1,5 % i acceptmaterialet oavsett sällningsmetod. För Doppstadtssystemet antogs andelen bortsållat torrt material vara 25 % och fukthalten i rejektmaterial antogs vara 10 procentenheter högre än i ursprungsmaterialet. För Crambosystemet antogs andelen bortsållat torrt material vara 10 %. Fukthalten i rejektmaterial antogs för Crambo-konceptet vara 10 procentenheter lägre än hos ursprungsmaterialet.

Askan som uppkom efter förbränningen, antogs behöva transporteras bort fem mil från värmeverket med en bulkbil, med lastvikten 15 ton. Samma bränsleförbrukning antogs gälla för lastväxlar- och skopflisbilarna.

Kostnads kalkyl

Kostnads kalkylerna gjordes på liknande vis som finns beskrivet i bland annat Ackerman m.fl. (2014). Skogforsks kostnads kalkylverktyg FLIS (von Hofsten, 2006) användes för att göra kalkylerna. En kalkylränta på 5 % och ett restvärde på 10 % för maskinerna samt en ekonomisk livslängd på 15 000 G_0 -timmar antogs genomgående. Värden som maskinutnyttjande, körsträcka och prestationer skickades från simuleringsmodellen direkt till FLIS. Utöver de 2 560 timmar som maskinsystemen simuleras antogs lastbilarna och lastmaskinen årligen arbeta med andra saker 1 440 timmar, vilket motsvarar en total schemalagt arbetstid på 4 000 timmar. En kostnad för värmeverkets askhantering på

430 kr/ton tillkommer. Kostnaden för storskalig sönderdelning med stationär elkross antas vara 9,5 SEK/MWh och elförbrukningen på den samma 5,5 KWh/ton vid aktiv krossning.

Tabell 7.

Antagna investeringskostnader och bränsleförbrukningar för de ingående maskinenheterna.

	Investering Milj. kr	Bränsle- förbrukning, l/h	
CBI-5800	6,4	68,6	
Crambo 6000	4,8	73,5	
DW-3060	4,3	32,7	
SM-518	1,5	8,4	Trumsikt i serie med DW-3060.
Lastbil med kranilastning av krossen.	2,25	7,0	I kombination med C 6000 och DW-3060.
Lastmaskin.	1,9	10,0	I system 2b och 3b.
Extra lastväxlarbil.	650 kr/h		Endast i samband med flytt av lastmaskinen.

Resultat

Resultaten från simuleringarna beskriver både kvantitativt och kvalitativt vad som hänt under ett års arbete, var maskinerna arbetat, hur de har använts, vad de levererat samt till vilken kostnad. Givet de skapade objekten blev medeltransportavståndet 67 km, det maximala transportavståndet 100 km och det närmaste objektet 5 km bort.

Inledande simuleringar gjordes för att bestämma ett lämpligt antal transportfordon i vart och ett av systemen. Tre bilar var ett rimligt antal för alla system utom för systemet med en CBI 5800 lastbilskross och självlastande flisbilar (1b) där fyra flisbilar krävdes för att hinna köra in allt material som krossades.

BRÄNSLEHANTERING OCH SÄLLNING PÅ AVLÄGG

Systemen baserade på CBI 5800 samt det som transporterade lösa stubbdelar, lastade material med en fukthalt på 30 % och en askhalt på 8 %, d.v.s. samma egenskaper som hos ursprungsmaterialet. Givet de ingående sållningsförutsättningarna för Crambo 6000 med stjärnsikt hamnade 4 % av den askfria torrsubstansen i rejekthögen. Samtidigt sänktes askhalten i det sållade materialet till 1,5 % (Tabell 8). För trumsikten hamnade 20 % av den askfria torrsubstansen i rejekthögen, då askhalten på acceptmaterialet sänktes till 1,5 %. Skillnaden i ”sållningseffektivitet” beror på använt indata vilken kommer från tidigare genomförda studier. Fler studier krävs för att med större säkerhet kunna fastställa skillnaderna mellan sållningsalternativen.

Tabell 8.

Effekterna av krossning och sällning av stubbdelar räknat på 1 ton torrt, askfritt material som delats upp i en accept- och en rejektfraktion.

Maskinsystem	Beståndsdel/ Bränsleegenskap	Fraktion		
		Ingående	Accept	Rejekt
C 6000 med stjärnsikt.	TS askfritt, kg	1 000,0	963,6	36,4
	Aska, kg	87,0	14,7	72,3
	Vatten, kg	465,8	438,7	27,2
	MC, %	30,0	31,0	20,0
	AC, %	8,0	1,5	66,5
DW 3060 med trumsikt.	TS askfritt, kg	1 000,0	803,0	197,0
	Aska, kg	87,0	12,2	74,7
	Vatten, kg	465,8	284,7	181,2
	MC, %	30,0	25,9	40,0
	AC, %	8,0	1,5	27,5

Både för C 6000 och DW 3060 är mängden rejekt högre vid krossning mot skopflisbil jämfört med lastväxlarbil. Orsaken är att årsproduktionen ökar på grund av mindre väntetid, vilket medför att mängden rejekt också blir större. Andelen rejekt av den totalt producerade flisen är dock densamma oavsett vilket lastbilsalternativ som används.

LEVERERAT BRÄNSLE

Den lastade och levererade energimängden per lastbil skilde sig inte nämnvärt åt mellan alternativen som transporterade sönderdelat material (1, 2 och 3). Däremot levererade referenssystemet ca 16 MWh mindre per lass (Tabell 9).

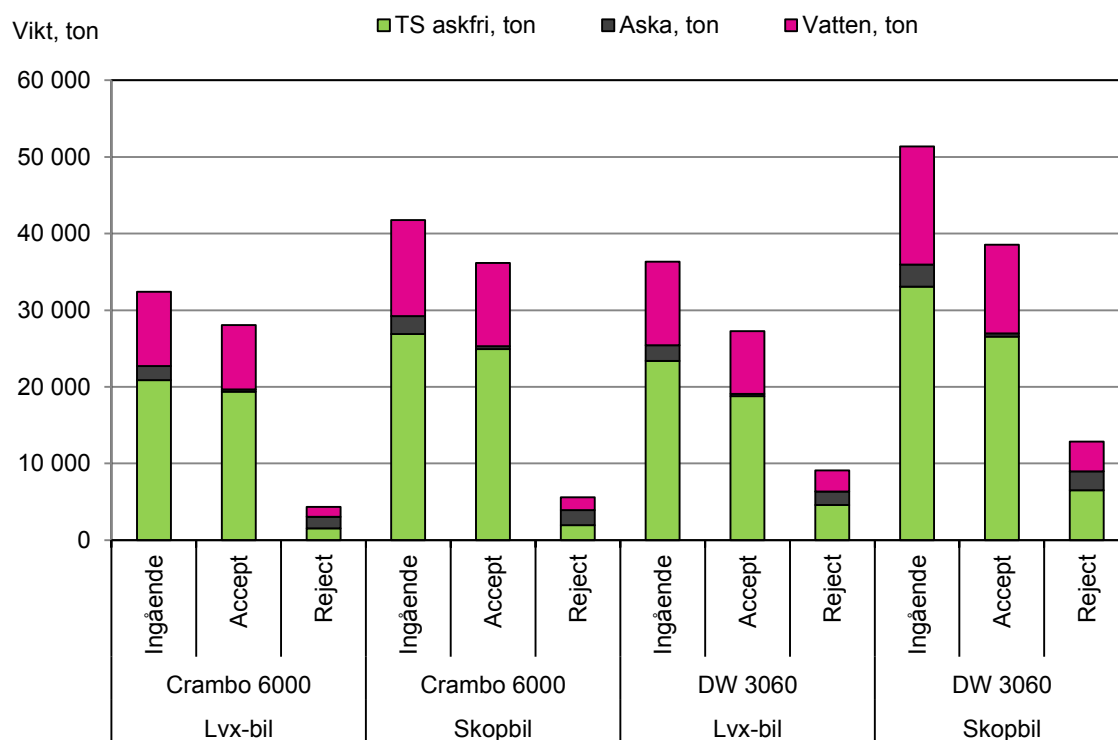
Tabell 9.

Medelvärde för levererad energi per vända till slutkunden (MWh) för de olika systemen samt mängd vatten, TS askfritt material och aska per lass.

System	Levererat per vända			
	Energi, MWh	Vatten, ton	TS askfritt, ton	Aska, ton
1a	74.0	6.88	14.77	1.28
1b	74.0	6.88	14.76	1.28
2a	74.1	6.42	14.76	0.22
2b	74.0	6.42	14.75	0.22
3a	74.1	6.34	14.58	0.22
3b	74.3	6.35	14.60	0.22
Ref.	58.2	5.41	11.61	1.01

Ett resultat från simuleringarna var att givet samma krossningsalternativ levereras mer bränsle om skopflisbilar används jämfört med containerekipagen eftersom krossen aldrig behöver vänta på skopflisbilen. Beträffande de askabildande materialen som körs in till slutkunden framkom en tydlig skillnad mellan de system som siktat materialet på avlägg (2 och 3) och de som inte gör det (1 och Ref.) (Tabell 10).

Sållningen medförde att mellan 1 510 och 2 450 ton föroreningsaska blev kvar i skogen i vart och ett av systemen 2a, 2b, 3a och 3b (Figur 7). Denna aska är oönskat material som man därmed slipper transportera först till värmeverket och sedan därifrån. Sållningen på avlägg resulterade också i att energi från det bortsållade askfria materialet gick förlorat. För C 6000 var den energimängden 7 430 MWh för system 2a och 9 680 MWh för system 2b. Motsvarande energi för Doppstadtkonceptet var 21 600 MWh för system 3a och 30 350 MWh för system 3b.



Figur 7. Årsproduktion för de system som tillämpar siktning vid avlägg fördelat på torrt askfritt material, askmängd samt vatten, och uppdelat på ingående material, acceptmaterial och reject.

Tabell 10.

Levererad energi till slutkunden (MWh) för de olika systemen per år samt totalt mängd torrt askfritt material och aska.

System	Energi, MWh	TS askfritt, ton	Aska, ton
1a	108 514	21 660	1 883
1b	168 633	33 660	2 927
2a	96 454	19 225	293
2b	125 677	25 050	381
3a	95 242	18 727	285
3b	133 808	26 311	401
Ref	102 526	20 465	1 780

MASKINANVÄNDNING UNDER ÅRET

Många av systemens maskiner är beroende av varandra, vilket gör att en maskins användning påverkas av en annan, men en maskin kan också hindras från aktiv användning av andra orsaker såsom maskinhaverier, servicearbeten och maskinflyttar. Krossarna på avlägg som arbetar mot en skopbil hade generellt en högre andel aktiv krosstid (Tabell 11), vilket kan förklaras av att de inte är beroende av att en skopbil finns på plats under krossningen.

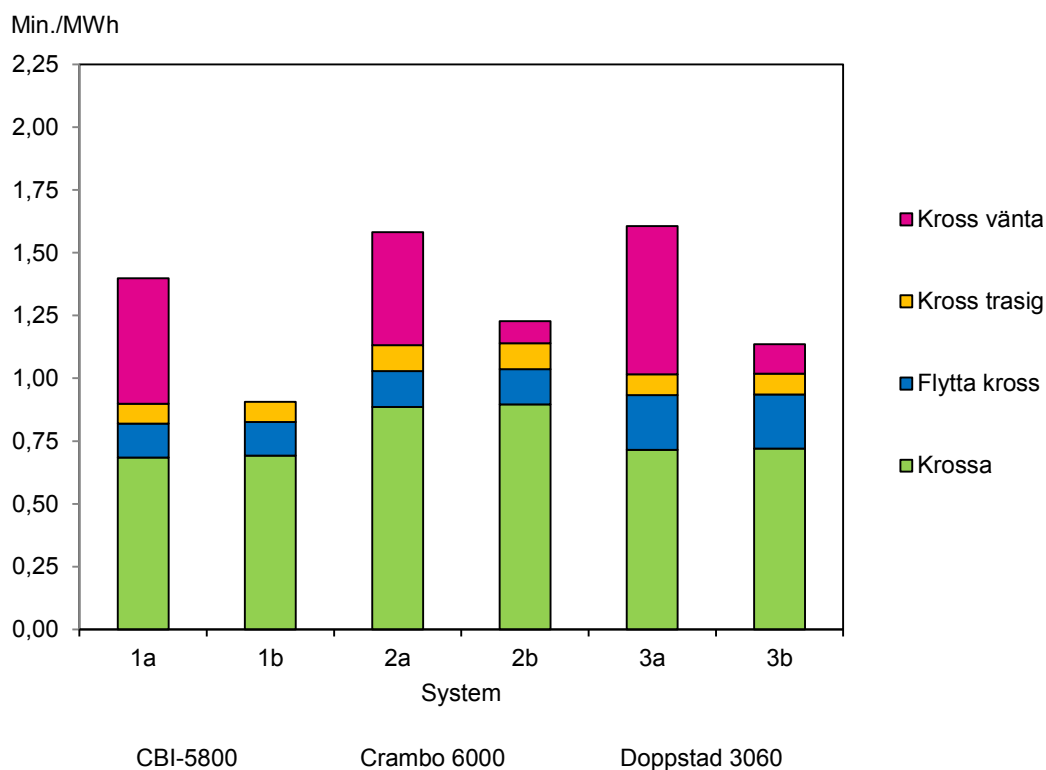
Tabell 11.

Maskinanvändning för alla ingående maskiner i varje system. Maskinanvändningen är definierad som den del av tiden som en maskin gör det den är avsedd att göra i förhållande till övrig tid. För krossarna samt övriga avläggsmaskiner definierades haverier, maskinflyttar samt väntetid som inaktiv tid. För lastbilarna definierades väntetider som inaktiv tid.

System	Maskin	Användning, %
1a	Lvx.bil	90,2
	Kross	48,8
1b	Skopbil	87,9
	Kross	76,5
2a	Lvx.bil	85,0
	Kross	56,0
2b	Skopbil	96,8
	Kross och Lastmaskin	73,7
3a	Lvx.bil	83,1
	Kross, lastmaskin och trumsikt	44,5
3b	Skopbil	97,3
	Kross, lastmaskin och trumsikt	64,0
Ref.	Grotbil	99,6

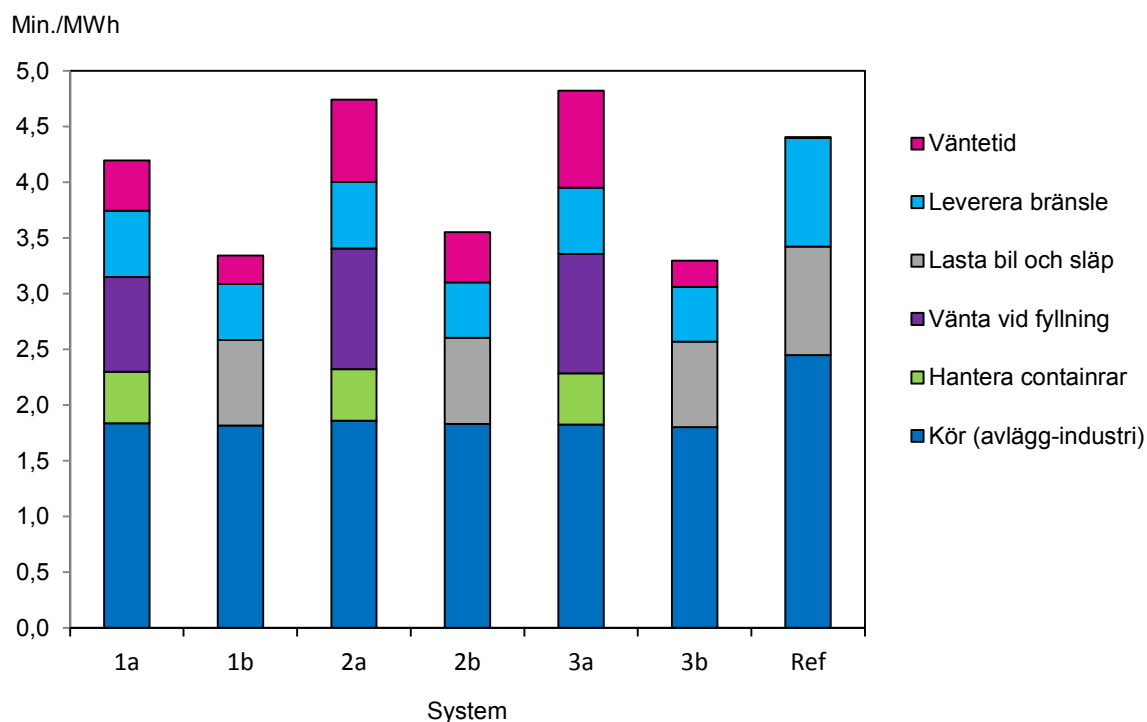
För en och samma kross användes lika mycket tid per producerad MWh stubb-kross för att krossa stubbdelarna, oavsett transportalternativ. Den stora skillnaden mellan systemen låg i tiden då krossen väntar på andra maskiner (Figur 8). Det fanns också skillnader i tid per producerad MWh stubbkross mellan de tre krossarna. Vidare var skillnaderna över året små vad gäller flyttningstider,

haveritider med mera. För containersystemen uppstod väntetid främst då krossen måste vänta på en ny container att fylla. För systemen med sällning kunde väntetid uppstå då inte alla maskiner som krävs för arbetet var på plats samtidigt, till exempel om lastmaskinen inte hunnit fram efter att man flyttat till ett nytt avlägg.



Figur 8.
Tidsåtgång per levererad MWh för krossarnas olika aktiviteter hos de system som krossar materialet innan vidaretransport.

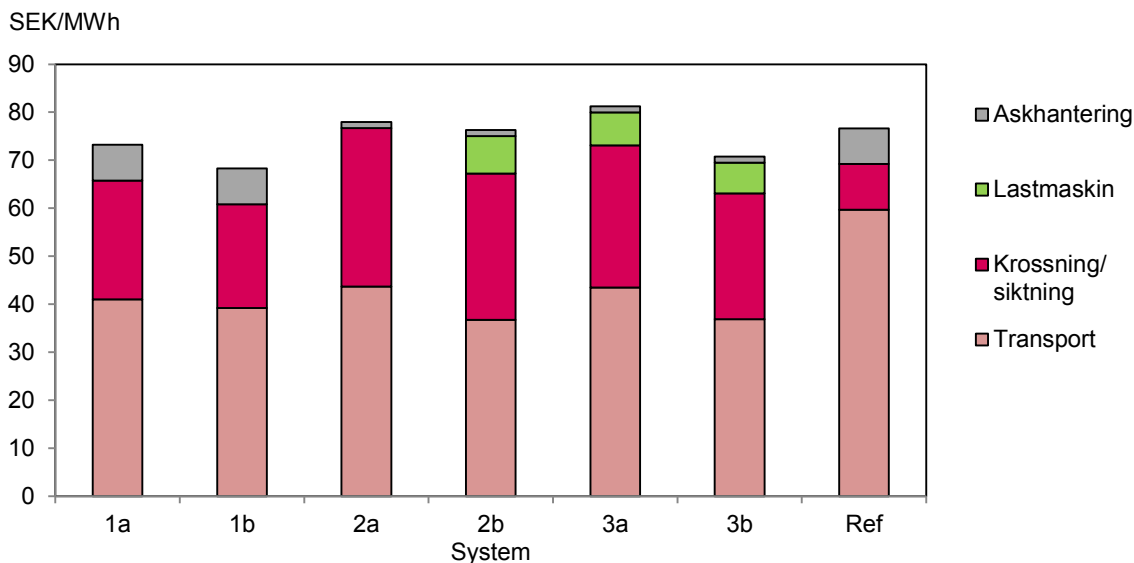
Beträffande effektiv körtid fanns ingen skillnad i tidsåtgång per levererad MWh mellan lastväxlarbilarna och skopbilarna. Däremot fanns skillnader mellan de system där man sönderdelar stubbarna på avlägget och referenssystemet med sönderdelning vid industri. Referenssystemet behövde cirka 0,6 minuter mer per MWh för transporten av osönderdelat material. Den längre tiden är en direkt konsekvens av skillnaden i energidensitet (MWh/m^3 eller MWh/ton). Hos vart och ett av systemen kan väntetid uppstå. En generell trend som framkom var att lastväxlarssystemen hade längre väntetider. Merparten av den tiden var i kösituationer vid avlägg (Figur 9). För skopbilssystemen bestod merparten av den uppkomna väntetiden av väntan på färdiga objekt att köra in till kund. Färre skopbilar i systemen hade minskat den tiden men då hade å andra sidan inte allt sönderdelat material hunnit köras in till kund under året. Väntetiden då containrarna fylls står också för en betydande del av containerbilens arbete. Den är direkt beroende av hur snabbt krossen kan fylla containrarna.



Figur 9.
Tidsåtgång per levererad MWh för lastbilarnas olika aktiviteter.

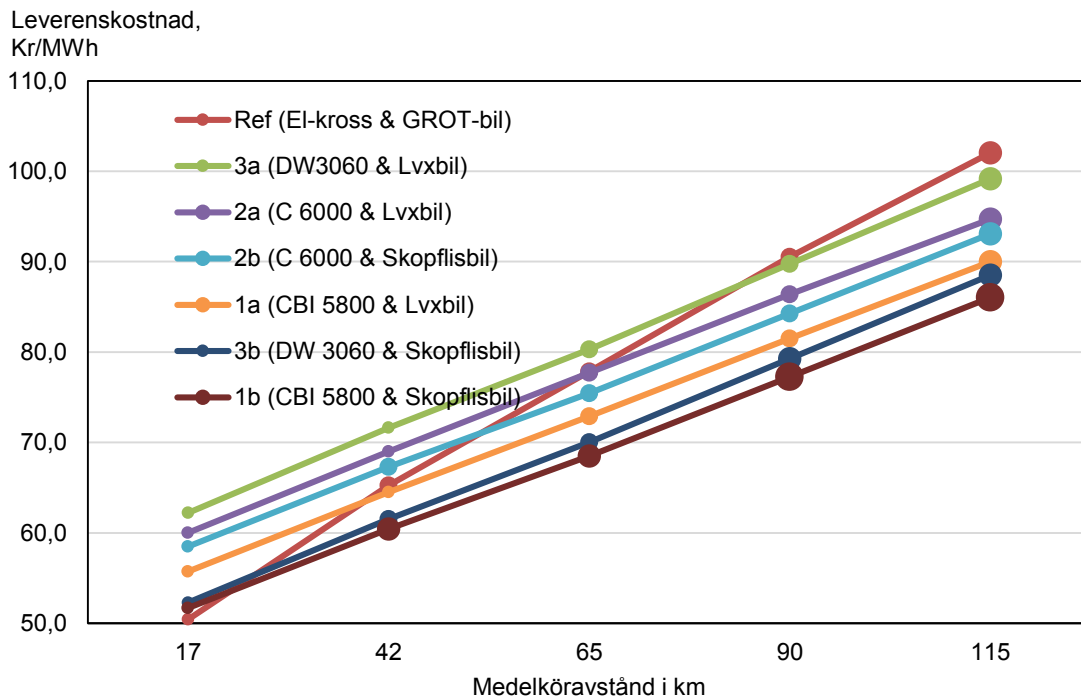
KOSTNADSKALKYL

En generell trend är att kostnaden för lastbilarna blev lägst i de system som använde sig av skopflisbilar (Figur 10). Systemen med lastväxlarbilar var generellt dyrare och alternativet med en grotbil dyrast, sett till endast lastbilarnas bidrag. Generellt står lastbilstransporterna för mer än hälften av kostnaden i alla systemen utom två där de står för knappt hälften. Transport av okrossat material är ett undantag där transportkostnaden svarar för en betydligt större andel av totalkostnaden. Sällningen resulterade i att en mindre mängd föroreningsaska levererades till industri, vilket gjorde att kostnadsposten för askhantering blev betydligt lägre för de systemen (System 2 och 3). I de fall en lastmaskin krävdes för att hantera materialet på avlägg steg kostnaderna markant. Trumsikten orsakade däremot inte en så stor kostnadsökning eftersom ingen extra maskinförare behövdes till den.



Figur 10. Systemkostnad i kr per levererad MWh för de simulerade systemen baserat på ett års produktion. Transport inkluderar även lastning och lossning.

För att i någon mån få en uppfattning om de simulerade systemens känslighet för tillgänglig transportkapacitet gjordes en förenklad körning där varje system transportoptimerades för fem olika medeltransportavstånd (Figur 11) där linjemarkörernas storlek indikerar hur många lastbils ekipage som krävs för att systemet skall fungera nöjaktigt.

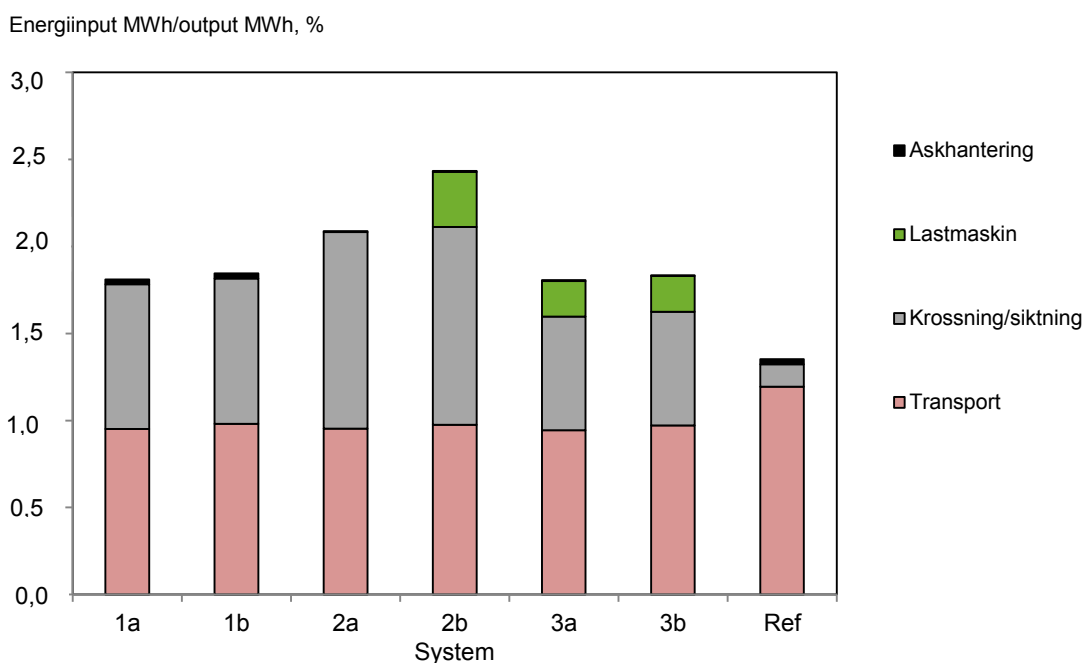


Figur 11. Kostnadsutvecklingen för de olika systemen vid fem olika medeltransportavstånd. Storleken på markörerna indikerar antalet lastbils ekipage i systemet. De minsta prickarna = 2 lastbilar och de största 5 lastbilarna (används endast i system 1b på medeltransportavstånd från 90 km). Observera att Y-axeln börjar vid 50 Kr/MWh.

Av Figur 11 framgår att alla systemens leveranskostnader ökar linjärt och parallellt med varandra utom hos referenssystemet där grotbil och krossning på industri simulerats. På grund av de lägre lastvikterna ökar systemets kostnader fort med ökande transportavstånd. De flesta system klarar sig bra med 2–3 lastbilskeppage upp till 90 km medelavstånd, därefter krävs ett fjärde eki-
page, och för system 1b även ett femte. Allt förutsatt att det producerade materialet körs till industri under samma verksamhetsår.

ENERGIBALANS

Energibalansen i termer av tillförd energi i form av diesel eller elektricitet som funktion av utvunnen energi i form av stubbflis framgår av Figur 12. Simuleringarna visade att dieselinsatsen låg på 1,2 – 2,4 liter per levererad MWh för de studerade systemen. I procent räknat svarade hela energiinsatsen, el inkluderat, för 1,3 – 2,4 % av den levererade energin. Huvuddelen av energiinsatsen skedde i de två delaktiviteterna landsvägstransport samt i aktiv krossning.



Figur 12.

Energibalans hos de olika systemen uttryckt som insatt energi i form av diesel eller el i förhållande till levererad energi hos stubbränslet. Transport inkluderar även lastning och lossning.

Diskussion

Det är svårt och blir snabbt kostsamt att praktiskt studera händelseförlopp som är så pass komplexa som sönderdelning och vidaretransport men simulering ger en möjlighet att studera hur maskinerna i de olika systemen interagerar och hur kostnaderna påverkas. En simulering är dock beroende av att maskinerna i modellen agerar på samma sätt som en faktisk maskin och att man har tillgång till realistiska indata. Men även om analysen inte kan ses som en exakt beskrivning av verkligheten i alla tänkbara avseenden, så är trender och nivåer normalt korrekta.

Då det gäller stubbdelar är det i dag egentligen bara referenssystemet som används, d.v.s. transport med grotbil i kombination med en stor el- eller diesel-driven kross hos mottagaren. Därutöver har någon enstaka entreprenör krossat på avlägg, då främst med CBI 5800 respektive Crambo 6000. Tillgången på studiedata från dessa inskränker sig till några enstaka försök. Doppstadt DW-3060 Büffel är studerad vid flera tillfällen men bara i något fall i kombination med trumsikten och på avlägg. Eftersom det funnits en stark önskan om att minska kostnaderna i hanteringskedjan valdes systemen så som de skulle kunna se ut om några år då tekniken är på plats, d.v.s. med krossning på avlägg, alternativt transport osönderdelat till terminal med el-kross. En systemlösning som inte testats i detta arbete är krossning på avlägg där krossen direktlastar flisen i en flisbil. Det är osannolikt att ett sådant system skulle kunna fungera i närtid eftersom de krossar som finns i dag inte klarar att lasta direkt i en flisbil som står parallellt med eller uppbackad mot krossen. Detta orsakas av att utmatningsbanden är både korta och har för dålig kastlängd för att kunna fylla en flisbil bakifrån. En möjlighet hade kunnat vara att lasta flisbilen med hjullastaren som ingår i några system, men även hjullastaren måste fylla från sidan, vilket kräver utrymme. Dessutom innebär höjden på flisskåpen att en stor hjullastare måste användas, vilket ökar kostnaderna ytterligare.

En grundläggande frågeställning i det storskaliga fältförsöket med krossning på avlägg (von Hofsten och Brantholm, 2013) var att studera förutsättningarna att effektivt sönderdela stubbdelarna på avlägget i syfte att reducera totalkostnaden för krossning och landsvägstransport. Då maskinerna ändå var på plats testades att sälla eller sikta stubbflisen samtidigt för att förbättra kvaliteten och därigenom höja värdet på flisen. Med det begränsade datamaterial som samlades in gick det inte att dra några generella slutsatser men mycket av det maskindata som insamlades har legat som grund för simuleringarna.

Sållning ökar kvaliteten på den levererade flisen då särskilt askhalten reduceras kraftigt, men man förlorar samtidigt en del finkornigt brännbart material. Totalt sett ökar energivärdet men den minskade askhalten gör också att bränslet är attraktivare för värmeverken. Sållningen kan i vissa fall förädla ett bränsle, som inte skulle accepterats av kunden på grund av för hög askhalt, till ett högkvalitativt bränsle. Ytterligare en vinst med att sålla bort föroreningarna i skogen är att där kan de enkelt spridas ut där avlägget legat och man behöver inte transportera bort det som aska från värmeverket. Avigsidan är att en viss del brännbart material följer med föroreningarna och blir kvar på avlägget. Hur stor andel av detta som är vedmaterial och hur mycket som är humus, barr och småkvistar är inte utrett men klart är att detta är ett tveksamt material för många värmeverk även om det innehåller en del energi.

Å andra sidan innehåller rejektet sannolikt en hel del växtnäring som bör vara kvar på hygget, förutsatt att rejektet kan jämnas ut så att näringsämnen inte bara rinner ner i diket. Det är troligt att rejektandelarna i de studier som använts som indata i simuleringarna till stor del beror på kvaliteten i ursprungsmaterialet och endast till en mindre del på de använda maskinerna. Därmed inte sagt att valet av maskiner och maskininställningar inte påverkar resultatet. Tvärtom, erfarenheterna från de studier som gjorts på Skogforsk av Doppstadt DW-3060 Büffel visar att det finns mycket som tyder på att mängden brännbar finfraktion kan begränsas om man ökar målfraktionen för stubbkrossen. Vid en målfraktion kring 300 mm blir det knappt någon finfraktion alls av vedmaterialet (von Hofsten och Brantholm, 2013). En så grov målfraktion kan dock medföra att vissa värmeverk inte kan ta emot flisen utan ytterligare sönderdelning.

Alla system där man krossar stubbdelarna på avlägg blir kostnadseffektivare med skopflisbilar som transportörer jämfört med containerbilar. Orsaken är att krossen kan operera oberoende av skopflisbilen, vilket främst innebär att krossens tid för väntan på lastbilar minimeras. Lägst kostnad per MWh får systemet med CBI 5800 och skopflisbil. Detta beror inte så mycket på att CBI 5800 producerar mer än de andra krossarna utan snarare på att den är enklare och billigare att flytta mellan avlägg då både kran och kross är monterad på samma lastbil. Att kostnadsskillnaden inte är större beror mest på att CBI 5800 inte siktar materialet, vilket ger en högre askhalt och därmed ett lägre energiinnehåll per ton stubbkross.

Alla analyserade system i denna simulering arbetar med tre lastbilar, undantaget system 1b (4 bilar), vilka är schemalagda lika många timmar över året. Vad dessa bilar levererar under året skiljer sig dock åt beroende på vändtid, kvantitet och kvalitet. Mängden bränsle som levereras är således en funktion av tidsåtgång för aktiviteterna under vändan, hur mycket material som kan lastas samt vilken kvalitet det levererade materialet har. Den årliga maskin användningen påverkar det ekonomiska utfallet och för att få en realistisk ekonomisk kalkyl och ett fullt årsarbete för förarna har vissa av maskinerna, exempelvis lastmaskinerna och lastbilarna, antagits arbeta utanför de simulerade systemen under lågsäsong. I praktiken är det vanligt att man kan hitta andra externa uppdrag för många maskiner men i vilken omfattning så sker är svårt att skatta. Exempelvis kan krossarna användas för sönderdelning av en stor variation av material, inte bara skogsråvara. i detta fall har dock inga externa uppdrag antagits för krossarna.

Balansen mellan krossen och transportkapaciteten hos de heta systemen, d.v.s. de system där krossen flisar direkt i containrar, har i tidigare studier visat sig ha en stor påverkan på den slutgiltiga kostnaden (Eriksson m.fl., 2014b). Eftersom det bara finns hela bilar att tillgå i modellen kan man hamna i en situation där varken 2 eller 3 bilar ger en bra balans. Där hade man i verkligheten tagit ett lass per skift på en extrabil, d.v.s. 2,5 bil/skift för att få ett bra flöde. En konsekvens av detta blir att vissa system hamnar närmare sin optimala balans än andra, vilket kan göra att vissa system, just i det simulerade scenariot, kan se bättre ut i förhållande till andra system än de i själva verket är. Dock får val av avstånd från avlägg till mottagande industri anses som representativa för Sverige då de väl stämmer överens med det faktiska medeltransportavståndet för primära skogsbränslen som år 2010 var 69 km (Andersson och Frisk, 2013). Den simuleringsmetod som använts här har nackdelen av att det är svårt att få in en lastbil som bara delvis kör mot en kross, vilket annars är ganska vanligt i verkligheten.

När containrar och lastväxlarbilar används tillsammans med traktorburna flishuggar är det vanligt att flera containrar ställs ut på avlägget som kan fyllas av flishuggen medan lastväxlarbilen gör annat. I dagsläget finns inga krossar som har den möjligheten. En möjlighet som inte testats i dessa analyser är att ha någon form av skyttel på avlägget som kan hantera containrarna så att krossen kan arbeta utan att lastväxlarbilen är där, förutsatt att tomma containrar finns. En tidigare simuleringsstudie har visat på minskade väntetider för krossen vid ett sådant upplägg (Eriksson m.fl., 2014c). Dock fås en extra kostnad för ännu en maskin i systemet. Dessutom är det ofta svårt att hitta plats att ställa ut en större mängd containrar på marken inom rimlig närhet till avlägget.

Vi gjorde även en simulering där de olika systemens känslighet för tillgänglig transportkapacitet studerades för fem olika medeltransportavstånd, (Figur 8). Det visade sig att de flesta system klarar sig bra med 2–3 lastbilsbesättning upp till avstånd kring 90 km därefter krävs ofta ett fjärde besättning för att inte krossarna skall behöva vänta i för stor utsträckning. Undantaget var system 1b där CBI 5800 krossen är så produktiv att det behövs 5 skopflisbilar för att hålla jämna steg när medeltransportavståndet är över 90 km. Detta förutsatt att allt material som flisas ska köras in under samma verksamhetsår.

Beträffande energiinsatsen i form av diesel, som låg på 1,2 – 2,5 l/MWh, ger det en dieselkostnad i intervallet 12–25 kr per MWh stubbränsle vid 10 kr/l för dieseln. Värderas stubbränslet till 175 kr/MWh så svarar den direkta kostnaden för diesel för ca 10 % av systemkostnaden. Dock är inte hela leveranskedjan studerad här utan endast från avlägg fram till kund. Viss förbättringspotential kan finnas genom maskinutveckling men den stora potentialen för minskad dieselförbrukning i systemet bör ligga i att välja objekt i en terminal eller industris närområde för att därigenom minska dieselkonsumtionen för transporterna.

Slutsats

Av de resultat som framkommit är det några som sticker ut. Kostnaderna för referenssystemet med grotbil och krossning vid industri ökar snabbare då transportavståndet ökar än vad kostnaderna för något av de andra systemen gör.

Av resultaten kan följande slutsatser dras:

- Referenssystemet bör inte användas på avstånd längre än ca 50 km.
- Användning av lastväxlarbilar och containrar blir fort dyrt. Det beror inte på avståndet utan mer på brist på tomma containrar på avlägget samt att man binder upp en lastbilsresurs för att hantera containrarna.
- System med många ingående maskinenheter bör undvikas.
- Flisning direkt på mark har i regel de lägsta kostnaderna, vilka måste vägas mot tillgången på skopflisbilar.

Referenser

- Ackerman, P., Belbo, H., Eliasson, L., De Jong, A., Lazdins, A. & Lyons, J. 2014. The COST model for calculation of forest operations costs. *International Journal of Forest Engineering*, 25, 75–81.
- Ala-Fossi, A., Ranta, T., Vartiamaäki, T., Laitila, J. & Jäppinen, E. 2007. Large-Scale Forest Fuel Supply Chain Based On Stumps And Terminals. Lappeenranta, Finland: Lappeenranta University of Technology and Finnish Forest Research Institute, 6.
- Aman, A. L., Baker, S. A. & Greene, D. W. 2011. Productivity and Product Quality Measures for Chippers and Grinders on Operational Southern US Timber Harvests. *International Journal Of Forest Engineering*, Vol. 22.
- Andersson, G. & Frisk, M. 2013. Skogsbrukets transporter 2010 [Forestry transports in 2010]. Arbetsrapport, Uppsala Skogforsk nr. 791–2013.
- Anerud, E. 2012. Stumps as fuel - the influence of handling method on fuel quality. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae (1652-6880)*, 2012:85.
- Eliasson, L., Granlund, P., von Hofsten, H. & Björheden, R. 2012. Studie av en lastbilsmonterad kross – CBI 5800 [Study of a truck-mounted CBI 5800 grinder]. Skogforsk Arbetsrapport nr. 775-2012.
- Eriksson, A., Eliasson, L., Hansson, P.-A. & Jirjis, R. 2014a. Effects of Supply Chain Strategy on Stump Fuel Cost: A Simulation Approach. *International Journal of Forestry Research*, 2014, Article ID 984395, 11.
- Eriksson, A., Eliasson, L. & Jirjis, R. 2014b. Simulation-based evaluation of supply chains for stump fuel. *International Journal of Forest Engineering*, 25, 1-14.
- Eriksson, A., Eliasson, L. & Jirjis, R. Simulation and modeling of wood chip container logistics at forest landings. In: BENNETOY, ed. *Bioenergy from Forest 2014*, 2014c Helsingfors 2014.
- Fogdestam, N., Granlund, P. & Eliasson, L. 2012. Grovkrossning och sällning av stubbar på terminal [Coarse grinding of stumps and sieving of the produced hog fuel]. Arbetsrapport, 768 2012.
- Laitila, J. & Nuutinen, Y. 2013. Demo report 4 – Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a Crambo 6000 grinder equipped with a star screen. INFRES - Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the EU (311881).
- Laitila, J. & Nuutinen, Y. 2015. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a low-speed double-shaft grinder and a star screen. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36, 19-32.
- Laitila, J., Ranta, T., Asikainen, A., Jäppinen, E. & Korpinen, O.-J. 2015. The cost competitiveness of conifer stumps in the procurement of forest chips for fuel in Southern and Northern Finland.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. 2010. Moisture content of Norway spruce stump wood at clear cutting areas and roadside storage sites. *Silva Fennica*, 44, 427-434.
- Liss, J.-E. 2006. Studier på nytt fordon för transport av skogsflis. Dalarna University, Wood Technology, Report, Arbetsdokument / Institutionen för matematik, naturvetenskap och teknik, Sweden.
- Mortazavi, R. & Johansson, J. 2013. Road Transport Vehicles for Hauling Uncomminuted Forest Energy Products in Sweden. *International Journal of Forestry Research*, 2013, 7.
- Nuutinen, Y., Laitila, J. & Rytönen, E. 2014. Grinding of Stumps, Logging Residues and Small Diameter Wood Using a CBI 5800 Grinder with a Truck as a Base Machine (Brief report). *Baltic Forestry*, 20, 176-188.

- Nylinder, M. 1979. Conversion factors. Fuelwood/oil. Rapport, Institutionen for Virkeslara, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Ranta, T. & Rinne, S. 2006. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. *Biomass and Bioenergy*, 30, 231-237.
- Spinelli, R. & Visser, R. J. M. 2009. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 33, 429-433.
- von Hofsten, H. & Brantholm, M.-Å. 2013. Kostnader och produktivitet i stubbskörd – En fallstudie [Productivity and costs in stump harvest systems – A case study]. Skogforsk Arbetsrapport 795.
- von Hofsten, H. & Granlund, P. 2010. Effektivare transporter om stubbarna grovkrossas på avlägg [Haulage gains from crushing stumps to coarse chips at landing]. Resultat Skogforsk.
- von Hofsten, H., Lundström, H., Nordén, B., & Thor, M. 2006. Systemanalys för uttag av skogsbränsle - ett verktyg för fortsatt utveckling. Skogforsk. Resultat no. 6.

Arbetsrapporter från Skogforsk fr.o.m. 2014

2014

- Nr 817 Arlinger, J., Brunberg, T., Lundström, H. & Möller, J. 2014. Jämförelse av JD1170E och JD1470E i slutavverkning hos SCA Skog AB hösten 2013. – Comparison of JD1170E and JD1470E in final felling at SCA Skog AB, autumn 2013. 29 s.
- Nr 818 Bergkvist, I., Friberg, G., Mohtashami, S. & Sonesson, J. 2014. STIG-projektet 2010–2014. The STIG Project, 2010-2014. 19 s.
- Nr 819 Björheden, R. 2014. Studie av Fixteri FX15a klenträdsbuntare. – Study of Fixteri FX15a small-tree bundling unit. 21 s.
- Nr 820 Löfroth, C. & Brunberg, T. 2014. Bränsleförbrukningen hos rundvirkesfordon 2008 och 2013. Fuel consumption of roundwood vehicles in 2008 and 2013. 12 s.
- Nr 821 Jönsson, P., Hannrup, B., Gelin, O. & Löfgren, B. 2014. Utvärdering av sågenheten R5500 med avseende på kaptid och energiåtgång. – Evaluation of the R5500 sawing unit in terms of bucking time and fuel consumption. 24 s.
- Nr 822 Eliasson, L. & Johannesson, T. 2014. Effekten av olika bottensäll på prestation, bränsleförbrukning och flisens fraktionsfördelning för flishuggarna Kesla 645 och Eschlböck. Biber-92. – Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for the chippers Kesla 845 and Eschlböck Biber-92. 18 s.
- Nr 823 Eliasson, L., Lombardini, C., Granlund, P., Magagnotti, N. & Spinelli, R. 2014. Prestation och bränsleförbrukning för en lastbilsmonterad Pezzolato PTH 1200/820 flishugg. – Performance and fuel consumption of a truck-mounted Pezzolato PTH 00/820 chipper. 12 s.
- Nr 824 Iwarsson-Wide, M., Grönlund, Ö. 2014. Lastindikatorer och lastbärarvägar. 15 s. – Load indicators and weighing devices on load carriers 12 s.
- Nr 825 Sikström, U. 2014. Föryngring av gran under högskärm: Försöksverksamhet vid Bergvik Skog-Uppföljning 2013. – Regeneration of Norway spruce under shelterwood: Comparison of two types of thinning at the preparatory felling. 48 s.
- Nr 826 Englund, M. 2014. Mätning av mental arbetsbelastning – En metodstudie. 27. – Measurement of mental workload-A method study. 31 s.
- Nr 827 Jönsson, P., Björheden, R. & Eliasson, L. 2014. Destinering och lägesbyten för att effektivisera transportererna av sko gsfis. – Destination and location exchange will reduce transportation distance. 11 s.
- Nr 828 Barth, A., Holmgren, J., Wilhelmsson, L. & Nordström, M. 2014. – Evaluation of single tree based estimates with terrestrial laser scanning in Sweden.
- Nr 829 Jacobson, S. 2014. Asktilförsel och dess påverkan på trädens tillväxt och näringsstatus. – Revision av sex fältförsök. – Effect of application of wood ash on tree growth and nutrient status-Revision of six field experiments 32 s.
- Nr 830 Björheden, R. 2014. Proceedings of the Nordic Baltic Conference OSCAR14. Solutions for Sustainable Forestry Operations, June 25-27, NOVA Park Conference, Knivsta, Sweden. – Proceedings från den Nordiska Baltiska konferensen OSCAR14 Solutions for Sustainable Forestry Operations, June 25–27, 2014, NOVA Park Conference, Knivsta, Sverige. 114 s.
- Nr 831 Widinghoff, J. 2014. Kontinuerlig uppföljning av drivmedelsförbrukning och lastfyllnadsgrad för ETT- och ST-fordon. – Continual monitoring of fuel consumption and load utilisation of ETT and ST-vehicles. 21 s.

- Nr 832 Fridh, L. 2014. Utvärdering av fukthaltsmätare METSO MR Moisture Analyser. – Evaluation of the METSO MR Moisture Analyser. 8 s.
- Nr 833 Eliasson, L., Lundström, H. & Granlund, P. 2014. Bruks 806 STC. – En uppföljande studie av prestation och bränsleförbrukning. – A performance and fuel consumption when chipping logging residues of beech 10 s.
- Nr 834 Sonesson, J., Berg, S., Eliasson, L., Jacobson, S., Widenfalk, O., Wilhelmsson, L., Wallgren, M. & Lindhagen, A. SLU. Konsekvensanalyser av skogsbrukssystem. – Täta förband i tallungskogar. 105 s.
- Nr 835 Eliasson, L. 2014. Flisning av bränsleved och delkvistad energived med en stor trumhugg–CBI6400. – Chipping of stem wood and partly delimbed energy wood using a large drum chipper, CBI 6400, at a terminal. 12 s.
- Nr 836 Johansson, F., Grönlund, Ö., von Hofsten, H. & Eliasson, L. 2014. Huggbilshaverier och dess orsaker. – Chipper truck breakdowns and their causes. 12 s.
- Nr 837 Rytter, L. & Lundmark, T. 2014. Trädslagsförsök med inriktning på biomassaproduktion – Etapp 2. – Tree species trial with emphasis on biomass production. 20 s.
- Nr 838 Skutin, S.-G. 2014. Simulering av TimberPro drivare med lastanordning i slutavverkning. – Drivare med automatisk lastning och nytt arbetssätt. – Simulation of TimberPro harwarder with loading device in final felling.-Harwarder with automatic loading and new method of working. 19 s.
- Nr 839 Fridh, L. 2014. Evaluation of the METSO MR Moisture Analyser. – Utvärdering av fukthaltsmätare METSO MR Moisture Analyser. s. 8.
- Nr 840 Andersson, G. & Svenson, G. 2014. Viktsutredningen del 2. Vägning för transportvederlag. – Weight study Part 2. Weighing for transport remuneration.
- Nr 841 Mullin, T. J. 2014. OPSEL 1.0: a computer program for optimal selection in forest tree breeding. – Opsel 1.0: Dataprogram för optimalt urval i skogsträdsförädlingen s. 20.
- Nr 842 Persson, T. & Ericsson, T. 2014. Projektrapport. Genotyp – Miljösamspel hos tall i norra Sverige. – Projektnummer 133. – Genotype-environment interactions in northern Swedish Scots pine. 12 s.
- Nr 843 Westin, J., Helmersson, A. & Stener, L.-G. 2014. Förädling av lärk i Sverige – Kunskap slägeo och material. Genetic improvement of larch in Sweden – knowledge status and seed materials. 55 s.
- Nr 844 Hofsten von, H., Nordström, M. & Hannrup, B. 2014. Kvarlämnade stubbar efter stubbskörd. – Stumps left in the ground after stump harvest 15 s.
- Nr 845 Pettersson, F. 2014. Rönjings- och gallringsförbandets samt gödslingsregimens (ogödslat/gödslat) effekter i tallskog på skogsproduktion och ekonomi. – Effects of spacing (pre-commercial thinning and thinning) and fertilisation regime (unfertilised/fertilised) on production and economy in Scots pine forest. 69 s.
- Nr 846 Pettersson, F. 2014. Behovet av bortillförsel vid kvävegödsling av barrskog på fastmark. – Boron additive needed in nitrogen fertilisation of coniferous forest on mineral soil. 32 s.
- Nr 847 Johannesson, T. 2014. Grövre bränsle en omöjlig uppgift? – Larger fuel chips an impossibility. – Biomass Harvest and Drying Training Seminar Fond du Lac Reservation Cloquet, Minnesota. s. 16.
- Nr 848 Johannesson, T., Olson, S., Nelson, C. and Zagar, B. 2014. Biomass Harvest and Drying Education Fond du Lac Reservation Cloquet, Minnesota. – Utbildning i skörd och hantering av skogsbränsle för Fond du Lac Reservation Cloquet, Minnestota 13 s.

- Nr 849 Jönsson, P., Eliasson, L. & Björheden, R. 2014. Location barter may reduce forest fuel transportation cost. – Destinerings- och lägesbyten för att effektivisera transporterna av skogsflis. s 10.
- Nr 850 Englund, M., Häggström, C., Lundin, G. & Adolfsson, N. 2014. Information, struktur och beslut – En studie av arbetet i gallringsskördare och skördetröska. – Information, structure and decisions – a study of the work done by thinning harvesters and combine harvesters.
- Nr 851 Berlin, M., Ericsson, T. & Andersson-Gull, B. 2014. Plantval – manual med implementeringsteknisk bakgrund. – Plantval – manual and background to technical implementation. 57 s.
- Nr 852 Jansson, G. & Berlin, M. 2014. Genetiska korrelationer mellan tillväxt- och kvalitetsegenskaper- – Genetic correlations between growth and quality traits. 26 s.
- Nr 853 Hofsten von, H. 2014. Utvärdering av TL-GROT AB's stubbaggregat. – Evaluation of the TL-GROT AB stump harvester 10 s.
- Nr 854 Iwarsson Wide, M., Nordström, M. & Backlund, B. Nya produkter från skogsråvara- En översikt av läget 2014. – New products from wood raw material-Status report 2014. 62 s.
- Nr 855 Willén, E. 2014. Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata. – Mobile measurement system for collecting tree and stand data. 34 s.
- 2015**
- Nr 856 Widinghoff, J. 2015. Logistiklösning för delkvistat sortiment – Lätta skyddsplåtar på virkesbilar för transport av träddeklar och delkvistade sortiment. – Lightweight side-shields on timber trucks transporting partly delimbed energy wood. 15 s.
- Nr 857 Hannrup B, Bhuiyan N. Möller J.J. 2015. Rikstäckande utvärdering av ett system för automatiserad gallringsuppföljning. – Nationwide evaluation of a system for automated follow-up of thinning.
- Nr 858 Frisk, M., Rönnqvist, M. & Flisberg, P. 2015. Vägrust – Projektrapport. 2015. – Vägrust – Project Report. 48 s.
- Nr 859 Asmoarp, V. & Jonsson, R. 2015. Fokusveckor 2014. Bränsleuppföljning för tre fordon inom ETT-projektet, ST-RME, ETT1 och ETT2. – Monitoring fuel consumption of three rigs in the ETT project: ST-RME, ETT1 and ETT2 42 s.
- Nr 860 Ring, E., Bishop, K., Eklöf, L., Högbom, L., Laudon, S., Löfgren, J., Schelker, R. & Sørensen, R. 2015. The Balsjö Catchment Study – Experiental set-up and collected data. 50 s.
- Nr 861 Asmoarp, V., Nordström, M. & Westlund, K. 2015. Stämmer väglagervolymer? – En fallstudie inom projektet "Skogsbrukets digitala kedja". 17 s.
- Nr 862 Möller, J.J., Bhuiyan, N. & Hannrup, B. 2015. Utveckling och test av beslutsstöd vid automatiserad gallringsuppföljning. 38 s.
- Nr 863 Jonsson, R. 2015. Prestation och kvalitet i blädning med skördare och skotare.
- Nr 864 Englund, M., Adolfsson, Niklas., Mörk, A., & Jönsson, P. 2015. Distribuerad arbetsbelysning – LED öppnar nya möjligheter för belysning hos arbetsmaskiner.
- Nr 865 Hofsten von, H. & Funck, Johanna 2015. Utveckling av HCT-fordon i Sverige. – HCT, heavier vehicle, truck design, ST, ETT. 28 s.

- Nr 866 Fridh, L. 2015. Utvärdering av fukthaltsmätare PREDIKTOR Spektron Biomass. – Evaluation of the Prediktor Spektron Biomass moisture content analyser. 10 s.
- Nr 867 Fridh, L. & Öhgren, J. 2015. Förstudie Automatisk skäppmätning av flis med laser.
- Nr 868 Eriksson, A., Hofsten von, H. & Eliasson, L. 2015. Systemkostnader, logistik och kvalitetsaspekter för sju försörjningskedjor för stubbränslen. – System costs, logistics and quality aspects relating to seven supply chains for stump fuel. 29 s.

SKOGFORSK

– Stiftelsen skogsbrukets forskningsinstitut

arbetar för ett lönsamt, uthålligt mångbruk av skogen. Bakom Skogforsk står skogsföretagen, skogsägareföreningarna, stiftelsen, gods, skogsmaskinföretagare, allmänningar m.fl. som betalar årliga intressentbidrag. Hela skogsbruket bidrar dessutom till finansieringen genom en avgift på virke som avverkas i Sverige. Verksamheten finansieras vidare av staten enligt särskilt avtal och av fonder som ger projektbundet stöd.

FORSKNING OCH UTVECKLING

Två forskningsområden:

- Skogsproduktion
- Virkesförsörjning

UPPDRAG

Vi utför i stor omfattning uppdrag åt skogsföretag, maskintillverkare och myndigheter.

Det kan gälla utredningar eller anpassning av utarbetade metoder och rutiner.

KUNSKAPSFÖRMEDLING

För en effektiv spridning av resultaten används flera olika kanaler: personliga kontakter, webb och interaktiva verktyg, konferenser, media samt egen förlagsverksamhet med produktion av trycksaker och filmer.

Från Skogforsk nr. 868–2015



www.skogforsk.se