



# Utvärdering av skotning med påhängsvagn

*Evaluation of forwarding with a trailer*

**Ola Lindroos och Iwan Wästerlund**



Foto: Ola Lindroos

## **Rapport 1 2013**

---

Sveriges lantbruksuniversitet  
Institutionen för skogens biomaterial och teknologi  
S-901 83 UMEÅ

[www.slu.se/sbt](http://www.slu.se/sbt)

Tfn: 090-786 81 00

Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi



# Utvärdering av skotning med påhängsvagn

*Evaluation of forwarding with a trailer*

Ola Lindroos och Iwan Wästerlund

## Rapport 1 2013

---

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2014

Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

## **Förord**

Föreliggande studie har genomförts på uppdrag av och med stöd av Sveaskog. Val och genomförande av datainsamling, analys och presentation av resultat har dock helt styrts av undertecknade. Medel för projektets genomförande har erhållits från Sveaskog och från Sveriges lantbruksuniversitet, genom statsanslagen till Wästerlund.

Ett stort tack riktas till Fredrik Linder, Lars Djerf och de övriga personerna i Sveaskogs avverkningslag Älvalaget. Ert engagemang underlättade genomförandet av studien och era reflexioner över praktikaliteter kring användningen berikade studieresultaten. Tomas Jonsson, John Deeres distriktstekniker i Lycksele, tackas för hjälpen med att registrera bränsleförbrukningen. Inom Sveaskog Produktion tackas Ulf Johnsson, Urban Nordmark och Lennart Hult för assistans kring de praktiska arrangemangen, för förmedlande av data för modelleringen och för många givande diskussioner. Vi vill även tacka Kalvis Kons för assistansen under fältstudierna.

Umeå 2013-10-16

Ola Lindroos

Iwan Wästerlund

## Sammanfattning

Att utöka lastkapaciteten med hjälp av vagn(ar) efter ett dragfordon är givetvis ingen nyskapande innovation. Inom de flesta transportarbeten maximeras lastkapaciteten under de givna fysiska och ekonomiska begränsningarna. Påhängsvagn för skotare har testats tidigare och slutsatserna var att även om själva transporteffektiviteten ökade, så var lastningen av vagnen betydligt svårare än lastningen av själva skotaren. Kostnadseffektivitet uppnåddes därför bara vid relativt långa terrängtransportavstånd. Tack vare teknisk utveckling och ökat fokus på att begränsa markpåverkan finns det dock ett pånyttfött intresse för skotaryagnar. Dagens kranar är betydligt mer kraftfulla och det finns i dagsläget ett stort fokus på att minska skogsbrukets markpåverkan. Att fördela last på fler hjulaxlar skulle kunna vara ett sätt att minska skotningens markpåverkan.

Syftet med denna studie var därför att med hjälp av fältstudiedata jämföra skillnaderna i tidsåtgång, bränslekonsumtion samt markskador vid skotning med och utan påhängsvagn, samt med reducerad last (för att minimera markskador). Skillnaderna i tids- och bränsleåtgång nyttjades till ekonomiska jämförelser under olika skotningsförutsättningar. Den studerade skotarens lastade vanligtvis 15 ton, och vagnen ökade kapaciteten med 10 ton (dvs med 66%).

Att använda vagnen ökade tidsåtgången och bränsleförbrukningen under transportarbetet, men räknat per skotat ton behövdes 25-33% kortare tid samt 22-27% mindre bränsle jämfört med om transporten gjordes utan vagn. Att lasta och lasta av vagnen tog 44% respektive 94% mer tid och bränsle än att göra motsvarande arbete till och från skotarens lastutrymme. Om användningen av skotaryagnen är lönsam beror därför på transportavståndet. Resultaten visar att användningen av vagnen minskar bränsleförbrukningen vid transportavstånd över 400 m enkel väg. Givet kostnaden för den testade vagnen (220 000 kr), blir det kostnadseffektivt att använda vagnen vid transportavstånd över 600 m enkel väg. Dessa brytpunkter gäller dock under mer eller mindre optimala förhållanden (tex plan mark).

Kostnadsberäkningarna för studiens traktbanksdata över slutavverkningar, visar att i grundscenariot var skotaryagns användning bara lönsam för 12-19% av volymen. Om skotaryagnen skulle användas till all skotning skulle den totala kostnaden öka med 4-7% jämfört med skotning utan vagn. Känslighetsanalyser visade att det fanns förhållandevis lite att vinna på att använda vagnen som en standardutrustning vid all skotning, medan det skulle kunna bli stora extra kostnaderna. Slutsatsen av de ekonomiska analyserna blir därför att det troligtvis vore lämpligt om flera skotare delar på en skotaryagn, som används på trakter där vagnens fördelar kommer till sin rätt.

Testområdet hade god bärighet tack vare dess ovanligt stenrika morän, så det var svårt att utvärdera generella skillnader i markpåverkan mellan skotning med och utan vagn. Studien gav dock stöd för resonemanget om mindre markpåvekan om lasten fördelas på skotare och vagn, även om totala lastvikten är högre än om skotning görs utan vagn. Ytterligare studier behövs dock för att belysa frågan bättre, och då på känsligare mark.

Studierna visade på tekniskt förbättringsbehov rörande vagnsdraget, avståndet mellan skotar- och vagnsvirke samt lastsäkring. Dessutom bör de mer långsiktiga effekterna på framförallt skotares kran och drivlina utredas ytterligare.

Sammantaget indikerar studien att det finns en ekologisk, och till viss del också ekonomisk potential, som gör att skotaryagns användning förtjänar fortsatt uppmärksamhet.

## Summary

In ground based transport of products from the forest to roadside, the impact on the soil should be minimized, which implies small (i.e. light) loads and careful driving. However, economical rationality implies large loads and high speed. Recently, the concept of adding a trailer to a conventional forwarder has revived, with the objective to comply with both of the aforementioned concerns and to fit into the current mechanized cut-to-length system. Here we present the results from field experiments of the forwarder trailer concept compared to conventional forwarding at final felling operations. The tested forwarder's ordinary payload was 15 tonnes, and the trailer added another 10 tonnes.

This increased the total travel time and fuel consumption during transportation, but resulted in a 25-33% and 22-27% reduction in time and fuel, respectively, required per forwarded tonne. To load and unload the trailer required 44% and 94%, respectively, more time as well as fuel compared to when conducting the corresponding work for the forwarders ordinary bunk. Thus, the viability of trailer usage was dependent on the transportation distance. The results show that usage of the forwarder trailer should reduce fuel consumption for transportation distance over circa 400 m single way. Given the costs for the tested forwarder and the rather simple trailer (cost 220 000 SEK, circa 20 000 €), the trailer should be cost-efficient at transportation distances (single way) over circa 600 m. However, those distance limits are under more or less optimal condition (i.e. flat terrain).

When applied to available data over final fellings, the use of forwarder trailer was only cost-efficient on 12-19% of the harvested volume in the base scenario. If using the forwarder trailer for all transportation work, the total cost would increase with 4-7% compared to using the forwarder without trailer. Sensitivity analysis revealed that there was relatively little to gain in applying the trailer as a permanent part of the forwarder (e.g. always using the trailer), whereas the extra costs for such use might be considerable. Thus, it was concluded that the trailer might be best used if several forwarders could share one trailer, and cooperate in terms of only using the trailer during appropriate conditions.

Due to the good bearing capacity of the stand's stony till soil, it was difficult to evaluate the soil disturbance differences between forwarder with or without trailer. Nevertheless, some indications were given in the support for the logic in less soil disturbance when allocating the load on both forwarder and trailer, even when the total load is higher than for a fully loaded forwarder. However, more studies are needed on this topic.

The field studies indicated some technical limitations with the tested trailer. The attachment of the trailer needs further development and some kind of load fixation should be considered, to prevent slippery logs to slide off in slopes. Moreover, the continuous use of trailers might harmfully stress the forwarder's crane and powertrain components, and should be evaluated before large scale implementation.

All in all, based on the results it can be concluded that there are environmental and to some extent economic potentials that warrant a further investigation of the forwarder trailer concept.

# Innehållsförteckning

<b>Förord</b>	<b>2</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>4</b>
<b>Innehållsförteckning</b>	<b>5</b>
<b>1. Bakgrund</b>	<b>6</b>
<b>2. Material och metod</b>	<b>8</b>
2.1 <i>Maskin, vagn och vägning</i>	8
2.2 <i>Studielokal och körsträckor</i>	9
2.3 <i>Bränsleförbrukning</i>	10
2.4 <i>Tidsåtgång och hastighet</i>	12
2.5 <i>Modellering av skotningsarbetet</i>	12
2.6 <i>Kostnadsantaganden</i>	13
2.7 <i>Traktdata</i>	15
2.8 <i>Känslighetsanalyser</i>	16
2.9 <i>Statistiska analyser</i>	16
2.10 <i>Markpåverkan</i>	17
<b>3. Resultat</b>	<b>18</b>
3.1 <i>Praktiska erfarenheter</i>	18
3.2 <i>Experimentell körning</i>	20
3.2.1 <i>Körhastighet</i>	20
3.2.2 <i>Bränsleförbrukning</i>	23
3.3 <i>Experimentell lastning och avlastning</i>	29
3.4 <i>Observation av vanligt skotningsarbete</i>	30
3.4 <i>Beräknade effektivitetsgränser</i>	32
3.4.1 <i>Antaganden utifrån fältstudien</i>	32
3.4.2 <i>Effektivitetsgränser vid grundscenariot</i>	32
3.4.3 <i>Känslighetsanalyser</i>	33
3.4.4 <i>Flyttkostnad</i>	35
3.5 <i>Beräknad tillgång på lämpliga trakter</i>	36
3.5.1 <i>Förutsättningar</i>	36
3.5.2 <i>Grundscenario</i>	36
3.5.3 <i>Känslighetsanalyser</i>	36
3.6 <i>Markpåverkan</i>	39
<b>4. Diskussion</b>	<b>41</b>
4.1 <i>Resultatens tillämplighet</i>	41
4.2 <i>Tekniska förbättringsförslag</i>	41
4.3 <i>För- och nackdelar med studiemetodiken</i>	43
4.4 <i>Markpåverkan</i>	44
4.5 <i>Slutsatser och rekommendationer</i>	44
<b>Referenser</b>	<b>45</b>
<b>Bilaga 1. Faktablad för UFOs skotarvagn</b>	<b>47</b>

# 1. Bakgrund

Att utöka lastkapaciteten genom att hänga en eller flera vagnar efter ett dragfordon är givetvis ingen nyskapande innovation. Inom de flesta transportarbeten är man ute efter att maximera lastkapaciteten under de givna fysiska och ekonomiska begränsningarna. Inom skotningen har påhängsvagn testats tidigare för användning i svenskt skogsbruk, både för rundvirkestransport (Eriksson 1998) och för transport av skogsbränsle (Jonsson 1988; Persson 1995). Slutsatserna från de studierna var att även om själva transporteffektiviteten ökade, så var lastningen av vagnen betydligt svårare än lastningen av själva skotaren. Kostnadseffektivitet uppnåddes därför bara vid relativt långa terrängtransportavstånd. På den internationella marknaden finns redan skotningskoncept för just långa terrängtransportavstånd, som till exempel Bells Timber Haulers T302 & T403 som består av upp till två vagnar efter en kranlös dragmaskin (Bell 2010) i främst högintensivt plantageskogsbruk. Det är då i och för sig fråga om ett mellanting mellan skotning i opreparerad terräng och lastbilstransport på skogsbilväg.

Intresset för maximerad lastvolym gör att intresset för påhängsvagn återväcks då och då, och då särskilt när det finns skäl att misstänka att förutsättningarna har förändrats. Det nu nyvaknande intresset kan nog dels spåras till teknisk utveckling och dels till ökat fokus på att begränsa negativ markpåverkan. Den tekniska utvecklingen har medfört att dagens kranar är betydligt mer kraftfulla än de som förekom vid testerna under 1990-talet (Nordfjell et al. 2010). Man skulle alltså kunna misstänka att de tidigare förekommande problemen med lastning och lossning av en påhängsvagn skulle vara mindre med dagens kranar. Utöver att det rent tekniskt nu kan misstänkas vara lättare att använda vagn kan det vara önskvärt att nyttja den ur ett markpåverkans-perspektiv. Det finns i dagsläget ett stort fokus på att minska skogsbrukets markpåverkan både internationellt, och då främst i kontinentala Europa (e.g. (Horn et al. 2004, 2007; Vossbrink & Horn 2004), men även i Sverige (Berg et al 2010). Att fördela last på fler hjulaxlar skulle kunna vara ett sätt att minska skotningens negativa markpåverkan, varför påhängsvagn är av intresse ur detta perspektiv.

Det är därför inte förvånande att det i Sverige på senare år har utvecklats ett antal ansatser till påhängsvagn. Markhänsynen lyfts fram i marknadsföringen av Timbear Lightloggs maskinkoncept, där stor anläggningsyta från markkontaktorganen kombineras med påhängsvagn (Timbear 2011). Teknisk utveckling fick Sveaskog, som deltog i försöken under 1990-talet, att göra omtag i påhängsvagnsfrågan och inledde praktiska försök med skotning med påhängsvagn (Sveaskog 2011, Adolfsén 2011). Och nytänk kring hur vagnen skulle kunna lastas och lossas effektivare drev innovatören Rolf Volungholens utveckling av eXtractor ZYX-konceptet (Figur 1) (Volungholen 2008).

Generellt gäller att vagnen måste lastas först för att med fullastad skotare ser föraren inte att lasta vagnen. Avlastningen måste av samma anledning göras i omvänd ordning. Den teoretiska potentialen med att fortlöpande kunna lasta fler sortiment än vanligt genom att lägga vissa sortiment på vagnen och vissa på skotaren är därför i praktiken starkt begränsad. Ökad lastvolym leder alltså inte i praktiken till ökad sorteringsmöjlighet i lasset.





**Figur 1.** eXtractor ZXY under lastning (överst) och transport (nederst). Konceptet och bilderna är skapade av Rolf Volungholen (Volungholen 2008).

Volungholens (2008) innovation var således en respons på den generella problematiken kring kranbegränsning samt att förbättra förutsättningarna för samlastning av fler sortiment. Skotare med påhängsvagn analyserades teoretiskt av Lindroos & Wästerlund (manus), där det visade sig finnas en viss ekonomisk potential för påhängsvagn men att potentialen var avhängig inköpskostnaden för vagnens och hur mycket vagnen påverkade tidsåtgången för skotningsarbetet. Analysen baserades dock på teoretiska antaganden där förväntad potential ringades in genom förväntade extremvärden för extra kostnader och tidsåtgång. Genom att förbättra ingångsvärdena med empiriskt data från fältstudier skulle analyserna kunna förbättras.

Syftet med denna studie var därför att med hjälp av fältstudiedata jämföra skillnaderna i tidsåtgång, bränslekonsumtion samt markskador vid skotning med och utan påhängsvagn, samt med vagn med reducerad last (för att minimera markskador). Skillnaderna i tids- och bränsleåtgång nyttjades till jämförelser av de ekonomiska skillnaderna under olika skotningsförutsättningar.

## 2. Material och metod

Studien genomfördes med en experimentell uppläggning, där olika arbetsmoment studerades separat under kontrollerade former. De arbetsmoment som studerades experimentellt var körning med och utan last samt stillastående lastning och avlastning. Därutöver genomfördes observationer av vanlig skotning, framförallt för att fånga upp eventuella effekter vid vanlig lastning av virke då virket är utspritt samt då lastning ofta sker simultant med körning.

### 2.1 Maskin, vagn och vägning

Den studerade påhängsvagnen (Figur 2) var tillverkad av Umeå Försäljnings AB (UFO) och såldes under produktnamnet UFOs skotarvagn enligt deras produktblad, där också vissa specifikationer för vagnen framgår (Bilaga 1). Den studerade vagnens dimensioner mättes upp med måttband (dvs viss reservation finns för exaktheten på måtten) och hade en totallängd på 4,87 m från dragögla till bakkant på vagnen. Till första stake var det 2,16 m och dragstången kunde mekaniskt kortas med 30 eller 60 cm. Vagnen hade tre par stöttor med 2,71 m mellan det främsta och bakersta paret. Vagnen hade 2,76 m mellan bankarna vilket gav en lastarea på ca 4,4 m<sup>2</sup>. Bankavståndet kunde ökas med 40 cm, vilket borde ge en lastarea på ca 5 m<sup>2</sup>. Vagnen var utrustad med en odriven boggi, med 1,65 m mellan boggihjulens axlar. Boggi-axeln var placerad 1,4 m bakom främre banken och 1,32 m framför bakre banken, dvs med en viss förskjutning bakåt. Vagnen var utrustad med fyra däck av märket Tianli Forestry flotation med dimensionerna 700/50/26,5. Däcktrycket mättes upp till 3,8 bar i det främre hjulet på höger sida och till 4,0 bar i bakre hjulet på vänster sida.



**Figur 2.** Den nyttjade skotarvagnen från Umeå Försäljnings AB (UFO).  
Foto: Ola Lindroos.

Den studerade skotaren var en John Deere 1510 E (Figur 4) som levererades från fabriken i juli 2011 och som vid studietillfället hade körts i ca 700 timmar. Skotarmodellen har enligt tillverkarens uppgifter en totallängd på 9,57 m (John Deere 2013). Skotarens kran hade en räckvidd på 8,5 m (dvs hade enkelutskjut) och var utrustad med en SuperGrip 36 Grip från Hultdins AB.

Skotaren vägdes med hjälp av fyra mobila fordonsvågar (Telub 20T) på fast underlag (grusad skogsbilväg). För att undvika att vågarna skadades av boggi-banden lades markskonare ovanpå och mellan de två fordonsvågarna vardera sida. Skotarens framdel, bakdel och vagn vägdes därefter var för sig. Bakdelen och vagnen vägdes både med och utan last. Vikterna beräknades genom att summera värdena från de fyra vågarna och dra av markskonarnas vikt. Detta gav att skotarens framdel vägde 14,44 ton och den olastade bakdelen vägde 10,79 ton, vilket tillsammans gav en totalvikt på 25,23 ton. Vagnen vägde tom 3,08 ton.

Vägning med lass gav att 15,21 ton hade lagts på skotare och 10,0 ton på vagnen. Enligt skotarens egen lastviktsmätning genom dess 'Active Load Space' (ALS) system vägde lasterna 15,0 och 10,0 ton. Med tanke på mätnoggrannheten i både ALS och fordonsvågssystemen ansågs de två mätsätten stämma väl överens och ALS-vägning användes därför vid lastvägning. På grund av mätnoggrannheten avrundas vikterna till tiondels ton.

Ekipagets totala massa samt lastens massa under den experimentella studien redovisas i Tabell 1. Samma laster användes vid den experimentella lastnings- och avlastningsdelen. Vid bränslemätningsskörningarna utgjorde full last av 15,0 ton på skotare och 10,0 ton på vagnen enligt ALS-mätningen. Den reducerade lasten var på 8,5 ton på skotaren och 9,0 ton på vagnen, också uppmätt med ALS-systemet.

**Tabell 1.** Maskinvikter under den experimentella studien.

Konstellation	Totalvikt (ton)	Lastvikt (ton)
Tom skotare	25,2	0
Tom skotare och vagn	28,3	0
Full skotare	40,3	15,1
Full skotare och vagn	53,4	25,1
Reducerad last på skotare och vagn	45,8	17,5

## 2.2 Studielokal och körsträckor

Fältstudien genomfördes mellan den 18-25 oktober 2011 vid en slutavverkningstrakt ca 34 km nordnordväst om Lycksele tätort (64° 53' N, 18° 30' Ö, kordinater i SWEDREF: 7202218, 666150). Trakten var i sin helhet talldominerat (>95% av volymen) med en beräknad trädålder av 91 år, medelstamsvolym på 0,26 m<sup>3</sup>fub och uttagsvolym av 137 m<sup>3</sup>fub/ha. Hela trakten var på totalt 66 ha, men den var bara delvis avverkad vid studietillfället.

Försöksområdet låg på en altitud av ca 270 meter över havet, men marken var kraftigt svallad och innehöll en stor mängd ytnära sten (blockkvot 5 enligt terrängtypschemat (Berg 1992)), vilket ställde till det vid testerna för att bedöma effekten av påhängsvagnen på markskador. Mellan stenarna var marken finkornig, närmast en moig morän (Bilaga 2, kornstorleksfördelningsanalys enligt SS-EN 933-1:1997, utförd på ett ytligt beläget prov), och tämligen blöt med en fukthalt på 19 % ( fuktkvot 23,6; n=5). Marken var således ej optimal för att studera markskador.

På den avverkade delen gjordes i samråd med skotarföraren en bana som täckte körning uppför, på plan mark samt utför i terräng, samt vägkörning. Banan drogs i en slinga så den avslutades där den påbörjades, och därmed kunde flera varv köras efter varandra utan avbrott. Inom slingan definierades fyra terrängdelar, medan vägdelen inte avdelades. Därutöver delades övergången mellan terrängkörning och vägkörning av, eftersom den utgjordes av en dikespassage. Slingans delar markerades ut med stakkäppar. Dikespassagen analyserades inte i studien. De i studien ingående delarna (sträckor) beskrivs i Tabell 2. Grundförhållande och ytstrukturen var för samtliga terrängdelar av klass 1 enligt terrängtypschemat (Berg 1992). Sträckornas längd mättes mellan hjulspåren med hjälp av ett 25 meter långt måttband. Lutningen mättes med en Suunto höjdmätare (PM-5/1520), där höjdskillnaden i meter omvandlades till grader enligt höjdmätarens tabell. Banan kördes tre varv för varje maskinkonstellation, förutom för skotare och vagn med reducerad last (Tabell 3). Tidsbrist i

kombination med praktiska problem (stockarna blev för hala och gled av vagnen), kunde inte det sista banvarvet genomföras.

I delen ”Brant uppför” var de första 25 metrarna i princip platta, och därefter var lutningen 8-9° uppför. I delen ”Svagt uppför” lutade de första ca 30 metrarna ca 1,5° uppför, och därefter var det ett platt parti på ca 22 m, varefter det lutade uppför ca 4°. Det platta partiets första ca 10 m lutade uppför ca 4°, och var därefter platt. ”Utför”-sträckan hade förhållandevis jämn lutning utför, medan den första hälften av vägpartiet utgjordes av utförskörning i ca 4° lutning, och den andra hälften lutade uppåt ca 2-3°.

**Tabell 2.** Beskrivning av körsträckor vid den experimentella studien av körhastighet och bränsleförbrukning

Sträcka	Längd (m)	Medel	Lutning (°)	
			Max uppför	Max utför
Brant uppför	88	6-7 uppför	8-9	-
Svagt uppför	146	2-3 uppför	Ca. 4	0
Platt	68	0	Ca 4	0
Utför	109	8 utför	-	8
Väg	230	Hälften utför och hälften uppför	2-3	Ca. 4

**Tabell 3.** Antal upprepningar per körsträcka och maskinkonstellation vid den experimentella studien av körhastighet och bränsleförbrukning

Sträcka	Skotare		Skotare med vagn		
	Tom	Full last	Tom	Full last	Reducerad last
Brant uppför	3	3	3	3	2
Svagt uppför	3	3	3	3	2
Platt	3	3	3	3	2
Utför	3	3	3	3	2
Väg	3	3	3	3	2

Vid den experimentella studien av lastning och avlastning användes samma virke som vid den experimentella körningen. Virket var utlagt på båda sidor av maskinen i låga vältor, dvs att gripnar lades bredvid varandra och inte ovanpå varandra. Virke som tillhörde vagn respektive skotare hölls isär genom att separera ”vältorna”. Arbetet utfördes i huvudsak stillastående, med endast små förflyttningar längs vältan.

Virket som användes var talltimmer med en medellängd på 4,6 m (standardavvikelse (SA)=0,6 m, omfång=3,2-5,2 m, antal observationer (n)=22). I urvalstraven mättes stockars ändytorna på båda trassidorna, men utan att ha möjlighet att koppla en given stocks rot- och toppdiametrar till varandra. För den sidan av traven med flest rotändar var medeldiametern 25,9 cm på bark (SA=6,2 cm, omfång=17,0-41,0 cm, n=19) och på andra sidan traven var medeldiametern 22,6 cm på bark (SA=6,5 cm, omfång=15,0-44,0 cm, n=18).

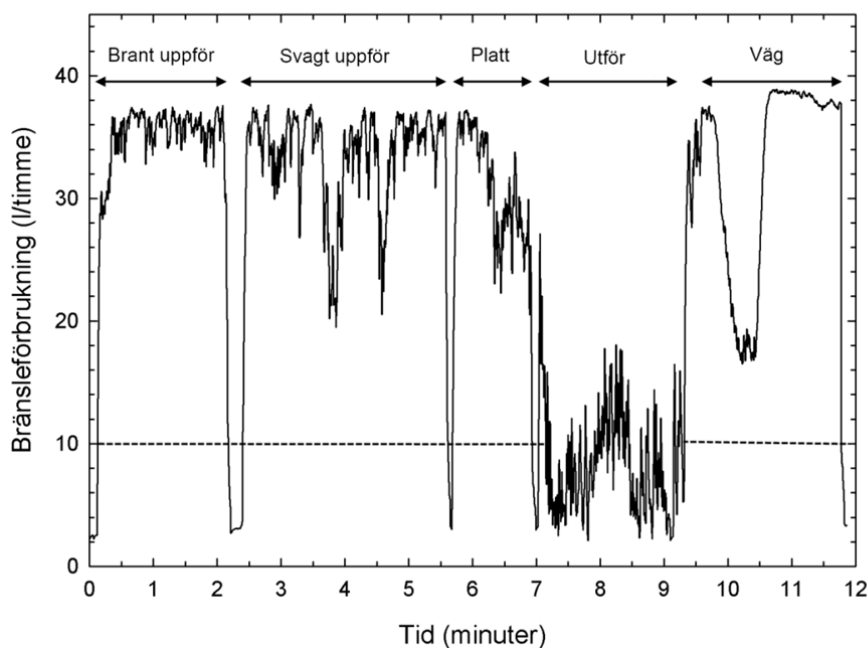
### 2.3 Bränsleförbrukning

Bränsleförbrukningen mättes genom att spela in motorns insprutningssignaler via att koppla upp en bärbar dator mot skotarens maskinövervaknings- och justeringssystem (TimberLink™). De data som erhöles var en tidstämpel och det aktuella bränsleflödet. Flödet

angavs i enheten liter per timme, med två decimaler och tidsintervallet var 100 Hz, dvs varje hundraedels sekund, med en variation på en millisekund. Detta innebar att i merparten av observationerna var intervallet 10 millisekunder, men för en del var intervallet 9 eller 11 millisekunder. Tomgångskörning användes för att synka bränsleförbrukningsinspelningen mot tidsstudien av körningen. Eftersom bränsleförbrukningsnivån vid tomgångskörningen var känd (ca 2,25 l/timme) och dessutom var markant lägre än vid körning så resulterade sådan körning i tydliga avgränsningar mellan körsträckorna. I praktiken innebar detta att skotaren stannades vid varje delsträcksgräns och stod still i några sekunder innan körningen fortsatte, vilket gav tydliga bränsleförbrukningsavgränsningar (Figur 3). På grund av den mycket snabba accelerationen och retardationen vid de aktuella låga hastigheterna (sekundsabba, dvs i praktiken omätbara) i kombination med de förhållandevis långa körningarna ansågs de återkommande starterna och inbromsningarna ha en minimal inverkan och togs därför inte hänsyn till studien. Tomgångskörning inkluderades inte i analyserna. Bränslemätningen sköttes av en person som åkte med i hytten.

Analys av det omfattande bränsleförbrukningsdata gjordes i Microsoft Excel, där körsträckorna kategoriserades manuellt genom att stämma av tidsobservationerna för körningarna (var borde det återfinnas körssträcke gränser och därmed tomgångskörning?) med förbrukningsdata (var finns det tomgångskörningsförbrukning?). Gränsen mellan tomgångskörning och sträckkörning sattes vid 10 l/timme. Detta värde tillämpades dock inte som kategoriseringsgräns rakt av, utan bara vid sträckgränser (dvs vid övergångarna till och från tomgångskörning). Bränsleförbrukning under 10 l/timme vid tex utförskörning klassificerades därför inte som tomgångskörning. Vägkörningen föregicks inte av något stopp, utan startades direkt efter dikespasseringen, och i bränsledatat startades sträckan vid en konstant hög förbrukning (full gas).

Förbrukningen sedan föregående observationsvärde beräknades genom att multiplicera det angivna flödet med tidsintervallet sedan föregående värde (9-11 millisekunder) och sedan dividera det med antalet millisekunder per timme (3600000). Därefter summerades förbrukningen för hela körsträckan. Även medelvärdet av de angivna flödesvärdena beräknades för respektive körsträcka. De två måtten gav väl överensstämmande flödesvärden när förbrukningen räknades om till flödet under mätperioden; för båda av de två jämförelserna som gjordes gav summeringsmetoden ett flöde som var 0,2 ml/timme lägre jämfört med medelvärdena av flödesobservationerna.



**Figur 3.** Exempel på bränsleförbrukningsdata, här från den första vändan med full skotare och vagn. Tomgångskörningen under pauserna mellan delsträckorna ses som de djupa dalarna, där det horisontella strecket visar den satta gränsen för delsträckornas start och stopp i bränsleförbrukningsberäkningarna (förutom den i texten nämnda vägstarten). Data registrerades var 10:e millisekund, så figuren är baserad på drygt 71 000 observationer.

## 2.4 Tidsåtgång och hastighet

Tidsstudierna gjordes med hjälp av ett stoppur med avläsnings- och lagringsfunktion för deltider. Deltiderna noterades löpande manuellt och kontrollerades efter varje delstudie mot de lagrade värdena. Stoppuret gav tider i minuter, sekunder och hundradels sekunder, men vid inmatning i Microsoft Excel omvandlades tiderna till sekunder och hundradels sekunder. Tiderna noterades av samma person vid samma position under alla körningar.

Hastigheten beräknades genom att dividera tidsåtgången med sträckan som körts, vilket gav enheten sekunder per meter (s/m). Hastigheten  $x$  s/m omvandlas enligt följande:  $1/x$  ger hastigheten i m/s,  $60/x$  ger hastigheten i m/min och  $60/(3,6x)$  ger hastigheten i km/h.

## 2.5 Modellering av skotningsarbetet

För att belysa vagnens påverkan på de olika delarna av skotningsarbetet gjordes en analytisk modellering med samma metodik och grundfunktioner som i Lindroos & Wästerlund (manus), dvs baserat på ekvationer från Nurminen et al. (2006) för de olika arbetsmomenten körning utan last, körning med last, körning under lastning, lastning samt avlastning. Jämfört med tidigare utformning modifierades dock modellen så att bränsleförbrukningen varierade vid olika arbetsmoment.

Kortfattat kan det nämnas att körhastigheten för vanlig skotare (utan vagn) antogs vara 58 m/minut vid tomkörning, 27 m/minut vid lastning och 46 m/minut vid körning med full last i grundscenariot (se Tabell 23). Hastigheterna baseras på observationerna under fältstudien, och

är något högre än i referensmaterialet (56, 27 och 44 m/min) (Nurminen et al. 2006). För lastning och avlastning användes dock referensvärden i grundscenariot, med avlastningen satt till  $0,657 G_0\text{-minut/m}^3$  och lastningstiden (exklusive körning under lastning) beräknades som en funktion av mängden virke längs stickvägen enligt

$$T_{\text{Lastning}} = 1 + \frac{0.155}{\text{Exp}\left(-0.447 + 0.3 \times \text{Ln}\left(\frac{100V_R}{l_r}\right)\right)} (G_0\text{-min/m}^3) [1]$$

där  $V_R$  är virkeskoncentrationen per hektar (ha) av det skotade sortimentet och  $l_r$  är totallängden av vägnätet per ha (Nurminen et al. 2006). Avståndet mellan körslagen antogs vara 13 m, vilket ger att  $l_r = 769$  m/ha ( $10000 \text{ m}^2/\text{ha}$  delat med 13 m).

Vid modelleringen användes traktdata (se 2.7), i vilket ett medelskotningsavstånd fanns angivet per trakt. Det antogs vara hälften av längden på medelvändan vid körningen under arbetsmomenten körning utan last, körning under lastning, samt körning med last. Lastningssträckan skattades genom att ta skotarekipagets lastvolym dividerat med uttagvolymen per 100 m stickväg. Uttagsvolymen per 100 m beräknades genom att totala virkeskoncentrationen per ha multiplicerat med antaget körslagsavstånd (13 m) delat med 100. Sträckorna som kördes med respektive utan last antogs vara lika långa och beräknades genom att från hela traktdatas medelskotningsavstånd räkna bort lastningssträckan, och sedan dela kvarvarande sträcka den i två. Ingen körsträcka kunde vara negativ i beräkningarna. Metodiken för sträckberäkningen må vara grov, men ansågs användbar för att hantera den generella osäkerhet som finns kring skotningsavstånd (jmf Lindroos 2012).

Vid de empiriska studierna gjordes mätningar på transporterad massa. Som omräkning från massa till volym användes ett omräkningstal på 900 kg per  $\text{m}^3$  fub utifrån de erfarenhetstal som användes av maskinlaget i deras egen redovisning. Omräkningstalet validerades genom ett litet stickprov på tre densitetsprover som visade att omräkningstalet var lämpligt för de skotade virket.

## 2.6 Kostnadsantaganden

Kostnadsantagandena togs fram i diskussion med Ulf Jonsson, Urban Nordmark och Lennart Hult, Sveaskog, och baserade sig främst på faktiskt kostnadsdata för den studerade skotaren och skotarvagnen.

För den studerade skotaren uppgick den totala kostnaden till 823 kr/planerad arbetstimme, vilket fördelade sig på 187 kr i kapitalkostnader, 381 kr i förarlönekostnader samt 255 kr i rörliga kostnader (Tabell 5). Av de rörliga kostnaderna utgjordes ca 90 kr av bränslekostnader (baserat på en förbrukning av 12 l/timme).

För skotaren planerades dess arbetstid att uppgå till 2350 skotartimmar timmar/år (normalt mellan 2300 och 2400 timmar per år). Av dessa utgjordes i snitt 88% av det Sveaskog avser med produktiv arbetstid i sina uppföljningar, vilket inkluderar raster/avbrott kortare än 5 minuter i arbetstiden (dvs de mäter produktiv arbetstid i  $G_5$ -timmar). Den tekniska utnyttjandegraden (TU) mätt i  $G_5$ -tid var alltså 88%. Eftersom tidsåtgången i analyserna modelleras i  $G_0$ -tid (dvs produktiv arbetstid utan avbrott alls) skulle helst kännedom om TU för den tiden vara känd, men då den saknas och det varken finns något naturligt givet förhållande mellan  $G_0$ - och  $G_5$ -tid eller god erfarenhetsbaserad kunskap om förhållandet så är

en sådan omvandling svår att göra. Därför användes TU på 88% i kostnadsantagandena trots att det kommer att överskatta produktiviteten och därmed underskatta kostnaderna. Det kommer dock inte att påverka jämförelsen mellan maskinkonstellationerna eftersom underskattningen kommer att påverka alla maskinkonstellationer likadant. Det ger alltså bara en nivå-sänkning av de faktiska kostnaderna medan brytpunkter (som tex lämpligt terrängtransportavstånd) inte påverkas.

Inköpskostnaden för vagnen var 220 000 kr. Den enkla konstruktionen utan hydraulik gör att dess livslängd anses förhållandevis lång. Avskrivningstiden sattes därför till 8 år. Räntekostnaden på kapital har satts till 4%, vilket vid kalkyleringstillfället motsvarade marknadsränta (3-månaders Stockholm Interbank Offered Rate (STIBOR)) med ett tillägg på 2%. Restvärdet ansågs vara mellan 10-25% av inköpskostanden beroende på om vagnen blir populär och det därmed finns en andrahandsmarknad eller inte. I analyserna sattes restvärdet till 15% efter 8 år. Till detta lades 2 kr/planerad skotartimme i beräknade vagnsunderhållskostnader. Med antagandet att skotarvagnen skall användas lika mycket som skotaren och med tillämpning av en rätlinjig värdeminskning och en räntekostnad som är approximativt jämnt fördelad över den förväntade livslängden (8 år) (Miyata 1980) blev den förväntade kapitalkostnaden för skotarvagnen 12,3 kr/planerad skotartimme. Total kostnad inklusive förväntade underhållskostnader blev således 14,3 kr/planerad skotartimme (Tabell 5). Skotarvagnen förväntas alltså kosta drygt 14 kr/planerad skotartimme, oavsett om skotaren använder den eller inte.

Skotarvagnen förväntas inte öka förarlönkostnaderna per planerad skotartimme. Däremot förväntas användningen påverka bränsleförbrukningen, vilket tas hänsyn till genom att korrigera de rörliga kostnaderna utifrån de observerade bränsleförbrukningseffekterna. Bränslekostnaden sattes till 10 kr/liter (Tabell 5), vilket motsvarar den faktiska kostnaden under studietiden minus den skattereduktion som avses finnas kvar efter skattereduktionsutfasningen efter 2015. Dessutom testades effekten av ökade underhållskostnader, då det är tänkbart att användningen av vagnen kommer att kräva ökade underhållskostnader på skotaren.

Flyttkostnad för skotare uppgick i det aktuella området till 2000-3000 kr per flytt (på specialtrailer). Skördare flyttades ofta på lastbil med lastväxlarflak, vilket då kostade 1000-2000 kr per flytt. Extrakostnaden för att flytta med skotarvagnen sattes till 2000 kr/flytt, eftersom den antogs behöva en separat flytt. Det testades dock även hur kostnadseffektiviteten blev utan extra flyttkostnad, för att simulera att man löst skotarvagnstransporten så att den inte kräver en egen, separat flyttinsats.

**Tabell 5.** Kostnadsantaganden för grundscenariot. Observera att när skotaren utrustas med skotarvagnen så läggs endast en fast kostnad till, samt att drivmedelskostnaden ändras pga ändrad förbrukning med och utan vagn.

Kostnadspost (kr/planerad skotartimme)	Skotare	Skotarvagn
Fast kostnad	187,0	14,3
Förarkostnad	381,0	0,0
Rörlig kostnad exkl. drivmedel	165,0	0,0
Drivmedelkostnad	10 kr/l × observerad medelförbrukning för respektive maskin- konstellation & arbetsmoment	0,0



## 2.7 Traktdata

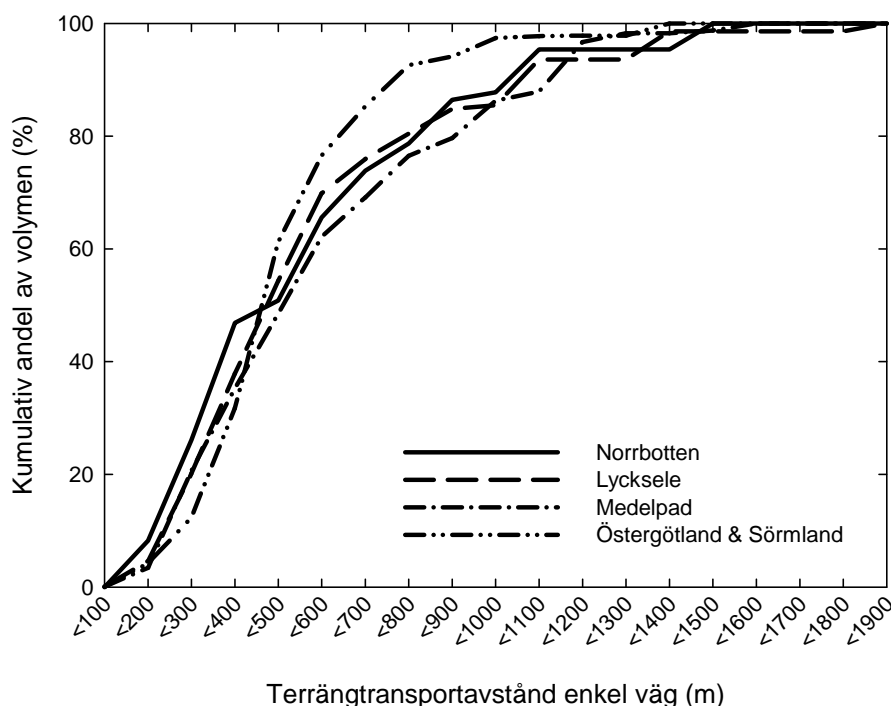
Oavsett om en innovation visar sig vara väldigt fördelaktig under vissa förutsättningar, är den av liten relevans om sådana förutsättningar är ovanliga. Därför har analyserna om skotarvagnens lämplighet under olika förhållanden tillämpats på data för slutavverkningsvolymerna från fyra områden i Sverige (Tabell 6). Datat är insamlat från olika skogsbolag, där data från Lycksele är hämtat ur Sveaskogs traktbank för planerade slutavverkningar i Lycksele och Björksele församlingar. Lyckseledatat togs ut ur traktbanken i januari 2012. Data för övriga tre områden utgjordes av uppföljningsdata över olika maskinlags samtliga genomförda slutavverkningar. Data för Medelpad och Norrbotten omfattar ungefär perioden 2005-2012 medan data för Östergötland-Sörmland omfattar perioden 2004-2009.

**Tabell 6.** Data över de trakter som inkluderades i studien

	Norrbottens kustland	Lycksele	Medelpad	Östergötland & Sörmland
Total volym (m <sup>3</sup> fub)	316 904	249 828	310 801	994 150
Antal trakter (n)	164	246	162	802
Medelvolym per trakt (m <sup>3</sup> fub)	1 932	1 016	1 918	1 239
Terrängtransportavstånd* (m, enkel väg)	360	355	425	388
Uttagsmängd* (m <sup>3</sup> fub /ha)	207	146	302	246
Medelstam* (m <sup>3</sup> fub/träd)	0,24	0,25	0,37	0,48

\*Volymvägd

Från ursprungsdatat avlägsnades alla trakter som innehöll <100 och >1000 m<sup>3</sup>/ha, eftersom de tidsåtgångsfunktioner som användes inte var anpassade till sådana förhållanden. Denna begränsning innebar att mellan 2,4-8,9% av volymen rensades bort från originaldatat, där minst volym tog bort från Medelpadsdatat och mest från Östergötland-Sörmlandsdatat. Mer än 90% av den bortrensade volymen togs bort på grund av bestockning <100 m<sup>3</sup>fub/ha. Bestånd med mer än 1000 m<sup>3</sup>fub/ha var ovanliga och återfanns endast i Norrbotten och i Östergötland-Sörmland. I Norrbotten-datat fanns en sådan trakt som totalt innehöll 2149 m<sup>3</sup>fub (7% av den bortrensade volymen), med en bestockning på 1 131 m<sup>3</sup>fub/ha och en medelstamsvolym på 0,30 m<sup>3</sup>fub. I Östergötland-Sörmland fanns 9 trakter med bestockning på >1000 m<sup>3</sup>fub/ha, vars gemensamma volym var 9740 m<sup>3</sup>fub (10% av den bortrensade volymen). Av dessa var dock 8 mycket små (≤1 ha), varför missar mellan uttagen volym och avverkad areal får stort genomslag. En bortrensad trakt på 0,1 ha hade till exempel en angiven bestockning på 8770 m<sup>3</sup>fub/ha, en medelstamsvolym på 0,46 m<sup>3</sup>fub och drygt 19 000 träd/ha! Det fanns således skäl att misstänka korrektheten i datat, särskilt vid hög bestockning. I de använda dataseten var volymfördelning på olika medelterrängtransportavstånd relativt lika (Figur 4).



**Figur 4.** Medelterrängtransportavståndets fördelning över totalvolymen för de fyra områdena. Figuren visar tex att det är 93% av volymen i Östergötlands & Sörmlandsdatat och 80% av volymen i Medelpadsdatat som finns i trakter där terrängtransportavståndet är kortare än 900 m. Skillnaden (ökningen) mellan olika avståndssteg ger mängden i det intervallet. För Norrbotten har tex 8% <200 m i terrängtransportavstånd och 45% har <400 m. Alltså finns 37% (45 minus 8) av volymen i trakter med ett terrängtransportavstånd mellan 200 och 399 m.

## 2.8 Känslighetsanalyser

Ett antal känslighetsanalyser gjordes i form av att variera parametrars ingångsvärden, både för enskilda parametrar och för flera parametrar tillsammans. Detta förfarande ger dels ett mått på de olika parametrarnas viktighet för analysresultaten och ger dels möjlighet att täcka in den osäkerhet och variationsbredd som finns för parametrars ingångsvärden. De parametrar som inkluderades i känslighetsanalysen var uttagsvolym, vagnskostnad, bränslekostnad, körhastighet, flyttkostnader, nivån på samtlig tidsåtgång, samt nivån på extra tidsåtgång för lastning, lossning, respektive vagnshantering.

## 2.9 Statistiska analyser

Data sammanställdes i Microsoft Excel och statistiska analyser genomfördes i Minitab 16. Variansanalys (ANOVA) användes för att jämföra effekterna från de olika behandlingarna och analyserna genomfördes generellt på normerat data (tex tidsåtgång per km, istället för tidsåtgång för den observerade sträckan) för att möjliggöra relevanta jämförelser vid varierade förhållanden (tex olika långa delsträckor och olika mängd last på vagn och skotare). Vid analys av den experimentella sling-körningen användes en tvåvägs-ANOVA med huvudeffekterna maskinkonstellation (5 nivåer) och delsträcka (5 nivåer) och dessutom inkluderades interaktionseffekterna. Vid den experimentella lastningen användes också en tvåvägs-ANOVA, med huvudeffekterna lastningsdel (2 nivåer; skotare eller vagn) och lastningsarbete (2 nivåer; lastning eller avlastning) samt dess interaktioner. Vid observationsstudien av lastning användes en envägs-ANCOVA (variensanalys med covariat)

med maskinkonstellation som huvudeffekt (2 nivåer; skotare eller skotare med vagn) och med uttagsmängd per körsträcka som covariat. Signifikanta samspel i ANCOVA-analyserna parameteriserades genom linjär regression, där dummy-variabler användes för huvudeffekterna.

ANOVA och ANCOVA-modellerna analyserades genom en generell linjär modell (GLM) och skillnader mellan olika behandlingar har analyserats med hjälp av Tukey-test. Vid analys av hur stor del av den observerade variationen som en statistisk modell förklarar har genomgående den justerade förklaringsgraden ( $R^2$ -adj) använts. Som gräns för signifikanta skillnader har 5% använts.

### ***2.10 Markpåverkan***

Kraftig spårbildning efter maskinernas körning är en lätt observerbar markpåverkan, medan jordpackning i körspåren är betydligt mera svårupptäckt. Jordpackning kan dock påverka skogens tillväxt (Wästerlund & Olsson, 1983; Wästerlund 1985). Markpåverkan studerades därför på två olika sätt, dels genom att mäta spårdjup (avstånd mellan markytan och den djupaste delen i hjulspår), dels genom att mäta penetreringsmotstånd i marken med en registrerande konpenetrometer (30° kon, 3,3 cm<sup>2</sup> bas, 3 cm/s i penetreringshastighet). Konpenetrometern ger ett relativt mått på markens hårdhet, och togs fram av US Army Waterways Experimental Station på 1950-talet för att ge indikationer om hur många arméfordon som kan passera ett givet ställe (Wong, 2010). Indikationer om möjliga antal passager är naturligtvis även intressant för modernt skogsbruk.

För båda metoderna gjordes 12 mätningar efter respektive maskinkonstellations passerat över en ca 20-30 m lång provyta. Mätningar gjordes efter 1, 3 och 5 passager över ytorna. För penetreringsmotståndet insamlades även 36 kontrollvärden från opåverkad mark.

De maskinkonstellationer som studerades var tom skotare med tom vagn, full skotare med full vagn (15 ton på skotaren och 9 ton på vagnen), reducerad last på skotare med full vagn (8,5+9 ton) samt full skotare (15 ton) utan vagn.

## 3. Resultat

### 3.1 Praktiska erfarenheter

För att ge en förståelse för efterföljande resultat är det nödvändigt att beskriva det arbetssätt som användes för lastning och avlastning av skotarvagnen. Det var ofrånkomligen så att vagnen inte kunde lastas om skotaren lastades full, pga av att lasten skymde vagnen (se Figur 7). Därför lastades vagnen före skotaren, och skotaren lastades av före vagnen. Vid det praktiska lastningsarbetet lastades föraren dock lite virke i skotaren i början av lastningsarbetet, för att stadga upp skotardelen. För att nå och lägga virket på vagnen var föraren tvungen att ta virket ungefär en tredjedel från ändytan, lyfta stockarna mellan skotare och vagn för att sedan använda kranens utskjut maximalt innan virket kunde läggas på plats (Figur 5). Vid avlastning av vagnen gjordes det omvända; virket greps med fullt utskjut, och sedan ”drogs” virket in (dvs att utskjutet drogs in) innan virket lyftes över skotarens stakar och ned till väla.



**Figur 5.** Arbetsmetodik vid avlastning av skotarvagnen. Notera användningen av utskjuten för att nå vagnen och hur virket ”dras in” innan det lyfts till avlägg. Lastning gjordes i omvänd ordning. Foto: Ola Lindroos.

Förarna ansåg att det var för kort dragstång på vagnen för skotning av timmer. Virket behövde lastas långt bak på vagnen för att inte riskera att ta i virket på skotaren. Den formen av lastning var dels svår med 8,5 m kranen, och dels riskerade vagnen få bakvikt. Lastades inte virket på vagnen tillräckligt långt bak behövdes i värsta fall allt lastas om för att virke inte rymdes på själva skotaren.

Kranlängden ansågs vara i kortaste laget för att lasta vagnen. Samtidigt var förarna oroliga för om en längre kran långsiktigt skulle klara den extra påfrestningen på kranutskjutet som vagnslastning och -avlastning innebär. Särskilt om lång kran kombineras med större grip än vad som användes i studien.

Sikten ansågs vara ett bekymmer och särskilt då med last på skotaren. Vid körningen framåt följde vagnen smidigt efter skotaren, men backning med last ansågs snudd på omöjligt även om de skulle ha hjälp av backkamera. I tillägg till siktsvårigheterna upplevdes backningen svårkontrollerad, dels på grund av de två lederna (varav vagnsdraget var ostyrd) och den långa ekipagelängden (drygt 14 m). Förarna trodde därför att vagnen skulle vara olämplig där det fanns risk för behov av backning, och då särskilt om det var ont om utrymme.

Vid försöket lastades samma virke på och av flera gånger, vilket gjorde att bark lossnade. När det därefter blev fuktigt, genom regn eller rimfrost/dagg, blev stockarna hala. Vid de tre sista körningarna (de tre upprepningen av vagn med reducerad last) gled vid två tillfällen ca 10 stockar av vagnen, ena gången framåt vid nedförskörning och andra gången bakåt vid uppförskörning. Föraren upptäckte inte något av stockbortfallen. Dessutom försköts lasten på vagnen framåt och gled in i skotarlasten vid ett tillfälle (Figur 6 & 7). Trots försök med att hålla lasten still med hjälp av spännband fick den tredje upprepningen avbrytas och försökets sista körning hanns därför inte med.



**Figur 6.** Virket på vagnen gled in i skotarvirket vid nedförskörning i 6-7° lutning. Virket gick ihop än mer när skotardelen på bilden kör ner i en svacka och därigenom tvingar ner framdelen på skotarvagnen. Foto: Ola Lindroos.





**Figur 7.** Föraren försöker reda ut härvan med skotarvagnsvirke som glidit in i skotavirket och måste då lasta av ömsom vagnen och ömsom skotaren. Notera förarens halvstående arbetsställning och långa hals för att få sikt över skotavirket. Foto: Ola Lindroos.

## 3.2 Experimentell körning

### 3.2.1 Körhastighet

Tidsåtgången för att köra en viss sträcka varierade signifikant mellan de olika maskinkonstellationerna ( $p < 0,001$ ) och mellan sträckorna ( $p = 0,001$ ). Skillnaderna varierade också signifikant mellan olika kombinationer av konstellation-sträcka (interaktionseffekt,  $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,4% av variationen ( $R^2$ -adj).

Som syns i Tabell 7-8 och i Figur 8 behövdes konsekvent mer tid för körning med vagn än med utan vagn och längre tid krävdes ju mer totallast som transporterades. Tidsförbrukningen påverkades inte nämnvärt av terränglutningen så länge ekipagen var tomma, men vid lastning krävdes mer tid vid motlut (Figur 8). Denna effekt blev tydligare ju större last som transporterades.

**Tabell 7.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i körtid (s/m) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Tom skotare	3	0.88 <sup>ij</sup>	0.01	0.89 <sup>ij</sup>	0.01	0.85 <sup>j</sup>	0.00	0.88 <sup>ij</sup>	0.02	0.49 <sup>m</sup>	0.00
Tom skotare och vagn	3	0.91 <sup>ij</sup>	0.01	0.92 <sup>hi</sup>	0.02	0.88 <sup>ij</sup>	0.02	0.93 <sup>ghi</sup>	0.04	0.50 <sup>m</sup>	0.00
Full skotare	3	1.10 <sup>de</sup>	0.00	1.09 <sup>de</sup>	0.02	0.98 <sup>fg</sup>	0.01	0.97 <sup>fgh</sup>	0.00	0.54 <sup>lm</sup>	0.00
Full skotare och vagn	3	1.37 <sup>a</sup>	0.01	1.30 <sup>b</sup>	0.01	1.14 <sup>cd</sup>	0.04	1.08 <sup>c</sup>	0.02	0.60 <sup>k</sup>	0.01
Reducerad last på skotare och vagn	2	1.17 <sup>c</sup>	0.02	1.13 <sup>cde</sup>	0.02	1.02 <sup>f</sup>	0.03	0.98 <sup>fgh</sup>	0.01	0.57 <sup>kl</sup>	0.01

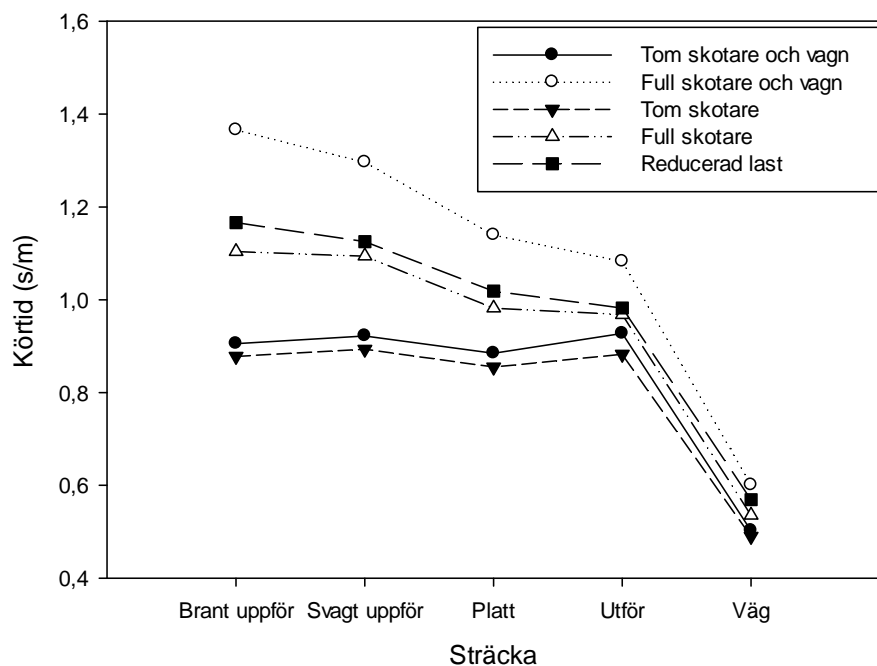
Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).

I termer av terrängkörningshastighet i meter per minut så låg medelvärdena det för de tomma ekipagen på mellan 64,8 – 70,2 m/min. Den fullastade skotaren hade en medelterränghastighet

på 54,4 – 62,0 m/min (Tabell 8). För fullastad skotare med vagn var motsvarande hastighet 43,9 – 55,4 m/min och med reducerad last var hastigheten för skotarvagnsekipaget 51,4 – 61,1 m/min.

**Tabell 8.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i hastighet (m/min) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Tom skotare	3	68.4	1.4	67.2	0.8	70.2	0.1	68.0	1.1	122.5	0.2
Tom skotare och vagn	3	66.3	0.7	65.1	1.1	67.9	1.2	64.8	2.8	119.4	0.9
Full skotare	3	54.4	0.1	54.8	1.1	61.1	0.9	62.0	0.1	112.1	0.2
Full skotare och vagn	3	43.9	0.4	46.3	0.3	52.7	2	55.4	0.9	99.9	1.0
Reducerad last på skotare och vagn	2	51.4	0.8	53.3	1.1	58.9	1.7	61.1	0.4	105.4	1.1



**Figur 8.** Medelkörtid för de respektive konstellationerna och sträckorna. Ju lägre värde, desto högre körhastighet.

I relativa termer behövdes mellan 3-5% extra tid för att köra en given sträcka med vagn när ekipagen var olastade (Tabell 9). Med fullastad skotare och vagn krävdes mellan 12-24% extra tid jämfört med fullastad skotare. För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 2-6% mer tid jämfört med full skotare.

**Tabell 9.** Relativ medelskillnad (%) i körtid (s/m) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 7. Tom skotare och vagn är jämförd mot tom skotare, och positiva siffror betyder att skotare med vagn behöver längre tid för att köra samma sträcka (lägre hastighet). Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Tom skotare och vagn	3.1	3.2	3.5	5.1	2.5
Full skotare och vagn	23.7	18.5	16.0	11.8	12.2
Reducerad last på skotare och vagn	5.7	2.8	3.7	1.5	6.3

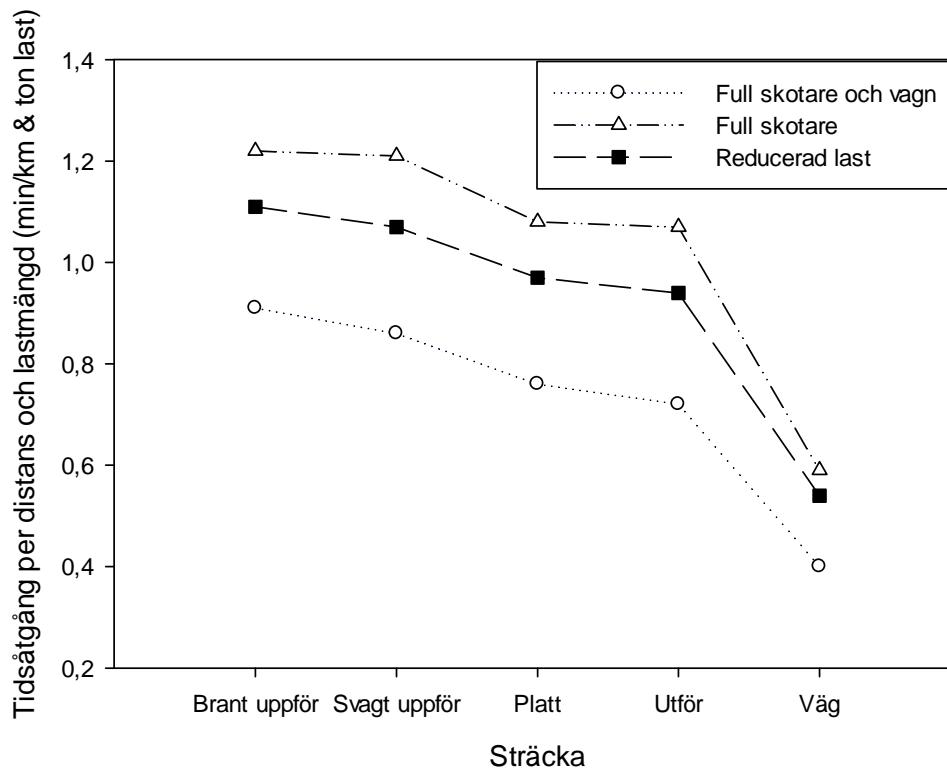
När tidsåtgångsanalyserna gjordes utifrån hur stor nyttolast som transporteras blev utfallen i huvudsak motsatta de för tidsåtgången för körningen (Tabell 10, Figur 9). Det tog nämligen signifikant kortare tid per ton last att köra en given sträcka med fullastad skotare med vagn än med reducerad last på skotare och vagn, som i sin tur var signifikant snabbare än fullastad skotare. Det fanns således en signifikant huvudeffekten av konstellation ( $p < 0,001$ ), samt även av sträcka ( $p < 0,001$ ) och interaktionseffekten dem emellan ( $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,6% av variationen ( $R^2$ -adj).

**Tabell 10.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i hastighet (min/km & ton last) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Full skotare	3	1.22 <sup>a</sup>	0.00	1.21 <sup>a</sup>	0.03	1.08 <sup>b</sup>	0.02	1.07 <sup>b</sup>	0.00	0.59 <sup>g</sup>	0.00
Full skotare och vagn	3	0.91 <sup>d</sup>	0.01	0.86 <sup>c</sup>	0.01	0.76 <sup>f</sup>	0.03	0.72 <sup>f</sup>	0.01	0.40 <sup>h</sup>	0.00
Reducerad last på skotare och vagn	2	1.11 <sup>b</sup>	0.02	1.07 <sup>b</sup>	0.02	0.97 <sup>c</sup>	0.03	0.94 <sup>cd</sup>	0.01	0.54 <sup>g</sup>	0.01

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).





**Figur 9.** Medeltidsåtgång per distans och transporterad last (min/km & ton last) för de respektive konstellationerna och sträckorna.

I relativa termer så behövdes mellan 25-33% mindre tid per transporterat ton last för att köra en given sträcka med fullastad skotare och vagn jämfört med fullastad skotare (Tabell 11). För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 9-12% mindre tid per transporterat ton last jämfört med full skotare.

**Tabell 11.** Relativ medelskillnad (%) i hastighet (min/km & ton last) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 10. Tom skotare och vagn är jämförd mot tom skotare, och positiva siffror betyder att skotare med vagn har lägre tidsåtgång. Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Full skotare och vagn	-25.4	-28.9	-29.6	-32.7	-32.2
Reducerad last på skotare och vagn	-9.0	-11.6	-10.2	-12.1	-8.5

### 3.2.2 Bränsleförbrukning

#### *Bränsleförbrukning per km*

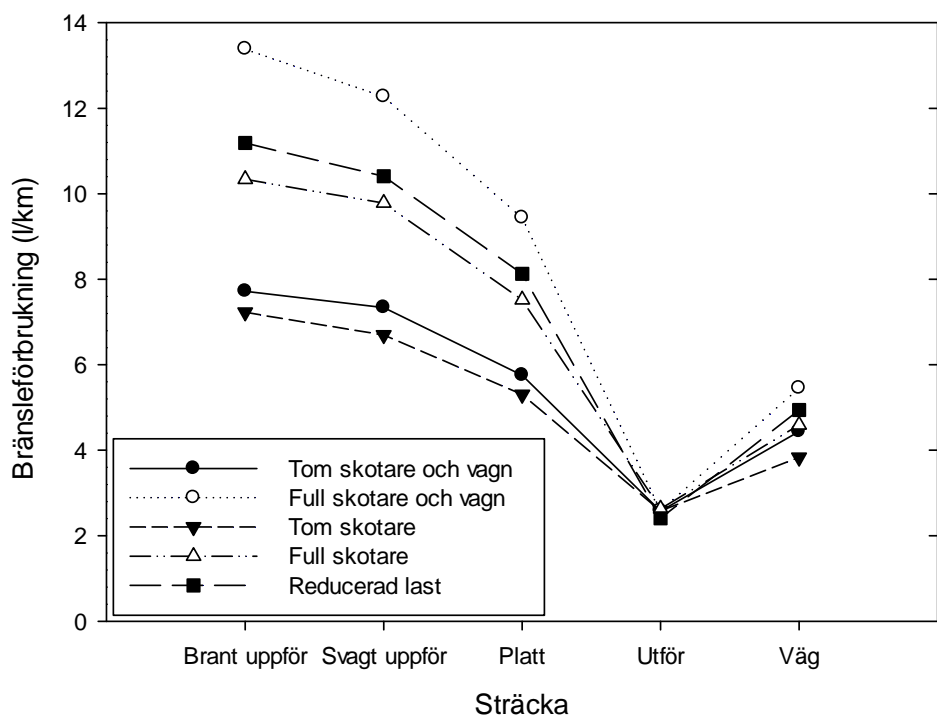
Bränsleförbrukningen för att köra en viss längd varierade signifikant mellan de olika maskinkonstellationerna ( $p < 0,001$ ) och sträckorna ( $p < 0,001$ ). Skillnaderna varierade också signifikant mellan olika kombinationer av konstellation-sträcka (interaktionseffekt,  $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,8% av variationen ( $R^2$ -adj). Generellt var förbrukningen högre ju högre totalvikt ekipaget och skillnaderna (i absoluta siffror) mellan konstellationerna

var större ju mer krävande körningen var (Tabell 12, Figur 10). Vid utförskörning var bränsleförbrukningen per kilometer lika för alla konstellationer.

**Tabell 12.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i bränsleförbrukning (l/km) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Tom skotare	3	7.23 <sup>h</sup>	0.08	6.70 <sup>i</sup>	0.06	5.30 <sup>kl</sup>	0.00	2.58 <sup>p</sup>	0.16	3.83 <sup>o</sup>	0.04
Tom skotare och vagn	3	7.72 <sup>fg</sup>	0.11	7.34 <sup>gh</sup>	0.15	5.75 <sup>j</sup>	0.13	2.58 <sup>p</sup>	0.06	4.44 <sup>n</sup>	0.05
Full skotare	3	10.34 <sup>d</sup>	0.05	9.78 <sup>e</sup>	0.20	7.52 <sup>gh</sup>	0.10	2.63 <sup>p</sup>	0.06	4.59 <sup>mn</sup>	0.01
Full skotare och vagn	3	13.38 <sup>a</sup>	0.09	12.27 <sup>b</sup>	0.03	9.44 <sup>e</sup>	0.40	2.59 <sup>p</sup>	0.06	5.45 <sup>jk</sup>	0.09
Reducerad last på skotare och vagn	2	11.19 <sup>c</sup>	0.18	10.41 <sup>d</sup>	0.12	8.13 <sup>f</sup>	0.03	2.41 <sup>p</sup>	0.01	4.94 <sup>lm</sup>	0.23

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).



**Figur 10.** Medelvärden för bränsleförbrukning (l/km) för respektive konstellation och sträcka.

När utförskörningen exkluderas behövdes det i relativa termer mellan 7-16% mer bränsle för att köra en given längd med vagn när ekipagen var olastade (Tabell 13). Med fullastad skotare och vagn krävdes mellan 19-29% mer bränsle jämfört med fullastad skotare. För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 6-8% mer bränsle jämfört med full skotare.

**Tabell 13.** Relativ medelskillnad (%) i bränsleförbrukning (l/km) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 12. Tom skotare och vagn är jämförd mot tom skotare, och positiva siffror betyder att skotare med vagn har högre bränsleförbrukning. Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Tom skotare och vagn	6.8	9.6	8.5	0.0	15.9
Full skotare och vagn	29.4	25.5	25.5	-1.5	18.7
Reducerad last på skotare och vagn	8.2	6.4	8.1	-8.4	7.6

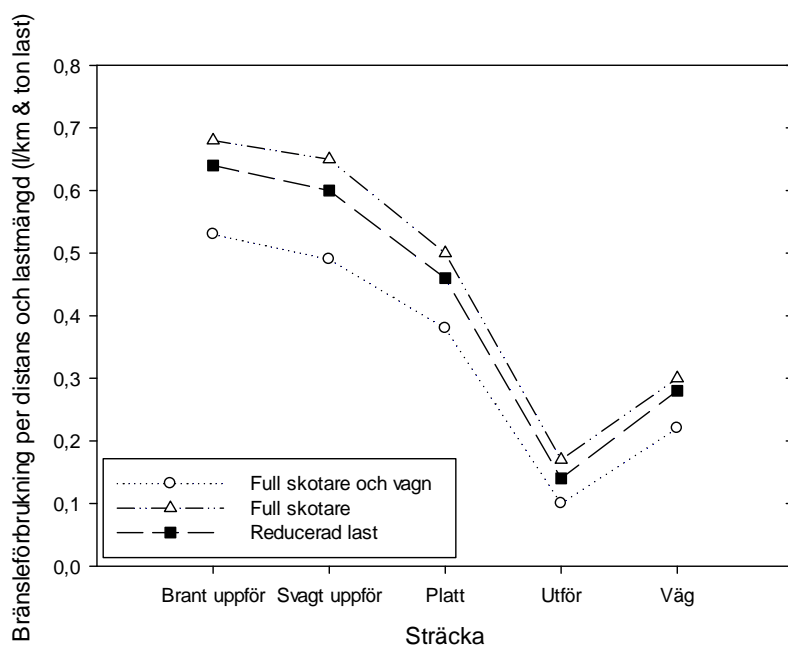
### Bränsleförbrukning per kilometer och ton last

När bränsleförbrukningen däremot beräknades per ton last istället för per ton totalvikt var förhållandet det motsatta; ju högre lastvikt desto lägre förbrukning per ton last (Tabell 14, Figur 11). Bränsleförbrukningen per ton last och kilometer varierade signifikant mellan de olika maskinkonstellationerna ( $p < 0,001$ ) och sträckorna ( $p < 0,001$ ). Skillnaderna varierade också signifikant mellan olika kombinationer av konstellation-sträcka (interaktionseffekt,  $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,9% av variationen ( $R^2$ -adj).

**Tabell 14.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i bränsleförbrukning (l/km & ton last) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Full skotare	3	0.68 <sup>a</sup>	0.00	0.65 <sup>b</sup>	0.01	0.50 <sup>e</sup>	0.01	0.17 <sup>j</sup>	0.00	0.30 <sup>h</sup>	0.00
Full skotare och vagn	3	0.53 <sup>d</sup>	0.00	0.49 <sup>ef</sup>	0.00	0.38 <sup>g</sup>	0.02	0.10 <sup>k</sup>	0.00	0.22 <sup>i</sup>	0.00
Reducerad last på skotare och vagn	2	0.64 <sup>b</sup>	0.01	0.60 <sup>c</sup>	0.01	0.46 <sup>f</sup>	0.00	0.14 <sup>l</sup>	0.00	0.28 <sup>h</sup>	0.01

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).



**Figur 11.** Medelvärden för bränsleförbrukning (l/km och ton last) för respektive konstellation och sträcka.

När utförskörningen exkluderas behövdes det i relativa termer mellan 22-27% mindre bränsle för att köra ett ton last en kilometer med fullastad skotare och vagn jämfört med enbart fullastad skotare (Tabell 15). För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 6-8% mindre bränsle per ton last och kilometer jämfört med full skotare.

**Tabell 15.** Relativ medelskillnad (%) i bränsleförbrukning (l/km & ton last) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 13. Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare, och positiva siffror betyder att skotare med vagn har högre bränsleförbrukning.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Full skotare och vagn	-22.1	-24.6	-24.0	-41.2	-26.7
Reducerad last på skotare och vagn	-5.9	-7.7	-8.0	-17.6	-6.7

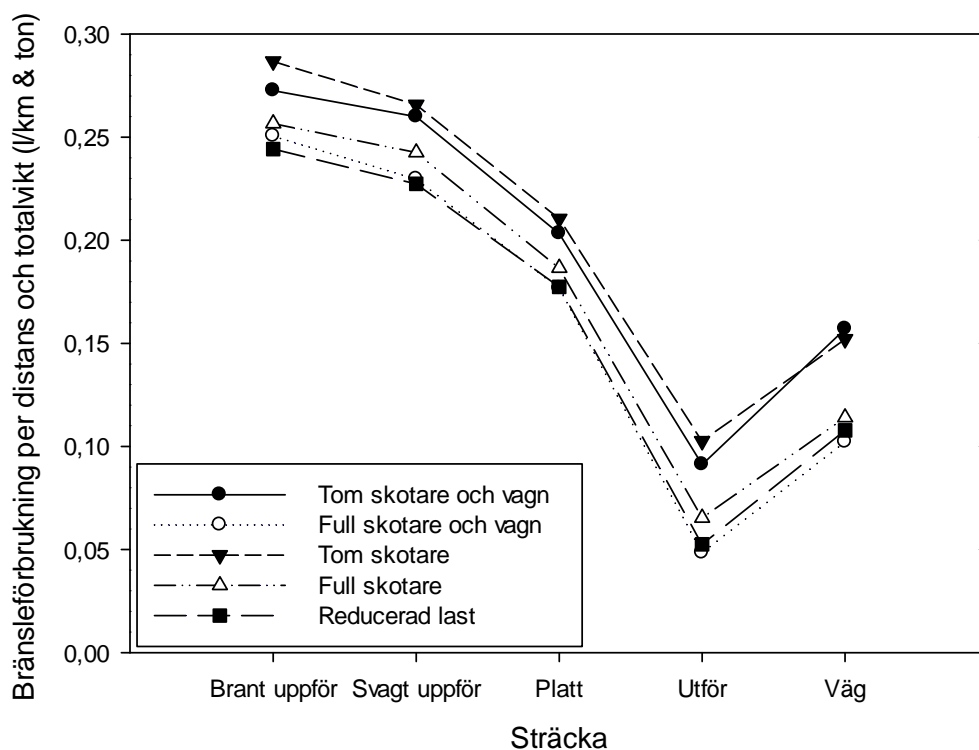
### **Bränsleförbrukning per kilometer och ton totalvikt**

Bränsleförbrukningen per ton totalvikt och kilometer varierade signifikant mellan de olika maskinkonstellationerna ( $p < 0,001$ ) och sträckorna ( $p < 0,001$ ). Skillnaden mellan effekten på kombinationerna konstellation-sträcka varierade också signifikant (interaktionseffekt,  $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,8% av variationen ( $R^2$ -adj). Generellt var förbrukningen högre ju lägre totalvikt ekipaget hade och skillnaderna (i absoluta siffror) mellan konstellationerna var förhållandevis lika mellan sträckorna (Tabell 16, Figur 12). Vid körning utan last förbrukades mest bränsle per ton totalvikt och kilometer, och förutom vid brant uppförskörning och vid utförskörning var förbrukningen densamma oavsett om vagn användes eller inte. Minst bränsle per ton förbrukades när vagnsekipaget kördes med last, och då var förbrukningen densamma oavsett om ekipaget kördes med full eller med reducerad last.

**Tabell 16.** Medelvärden och variation (standardavvikelse (SA)) i bränsleförbrukning (l/km och ton totalvikt) för de olika kombinationerna av maskinkonstellation och körsträcka.

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Tom skotare	3	0.287 <sup>a</sup>	0.003	0.266 <sup>bc</sup>	0.002	0.210 <sup>g</sup>	0.000	0.103 <sup>k</sup>	0.006	0.152 <sup>i</sup>	0.002
Tom skotare och vagn	3	0.273 <sup>b</sup>	0.004	0.260 <sup>cd</sup>	0.005	0.203 <sup>g</sup>	0.005	0.091 <sup>l</sup>	0.002	0.157 <sup>i</sup>	0.002
Full skotare	3	0.257 <sup>cd</sup>	0.001	0.243 <sup>e</sup>	0.005	0.187 <sup>h</sup>	0.003	0.065 <sup>m</sup>	0.001	0.114 <sup>j</sup>	0.000
Full skotare och vagn	3	0.251 <sup>de</sup>	0.002	0.230 <sup>f</sup>	0.001	0.177 <sup>h</sup>	0.007	0.048 <sup>n</sup>	0.001	0.102 <sup>k</sup>	0.002
Reducerad last på skotare och vagn	2	0.244 <sup>e</sup>	0.004	0.227 <sup>f</sup>	0.003	0.177 <sup>h</sup>	0.001	0.053 <sup>n</sup>	0.000	0.108 <sup>jk</sup>	0.005

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).



**Figur 12.** Medelbränsleförbrukning (l/km och ton totalvikt) för de respektive konstellationerna och sträckorna.

När utförskörningen exkluderas behövdes det i relativa termer mellan 5% mindre till 3% mer bränsle för att köra en given totalmassa en given sträcka med tomt vagnsekipage jämfört med tom skotare (Tabell 17). Med full last behövdes 2-10% mindre bränsle för vagnsekipaget jämfört med fullastad skotare. För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 5-6% mindre bränsle per ton totalvikt och kilometer jämfört med fullastad skotare.

**Tabell 17.** Relativ medelskillnad (%) i bränsleförbrukning (l/km och ton totalvikt) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 16. Tom skotare och vagn är jämförd mot tom skotare, och negativa siffror betyder att skotare med vagn har lägre bränsleförbrukning. Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Tom skotare och vagn	-4.9	-2.2	-3.4	-11.0	3.3
Full skotare och vagn	-2.4	-5.3	-5.3	-25.8	-10.4
Reducerad last på skotare och vagn	-4.8	-6.3	-4.9	-19.6	-5.5

### **Bränsleförbrukning per timme**

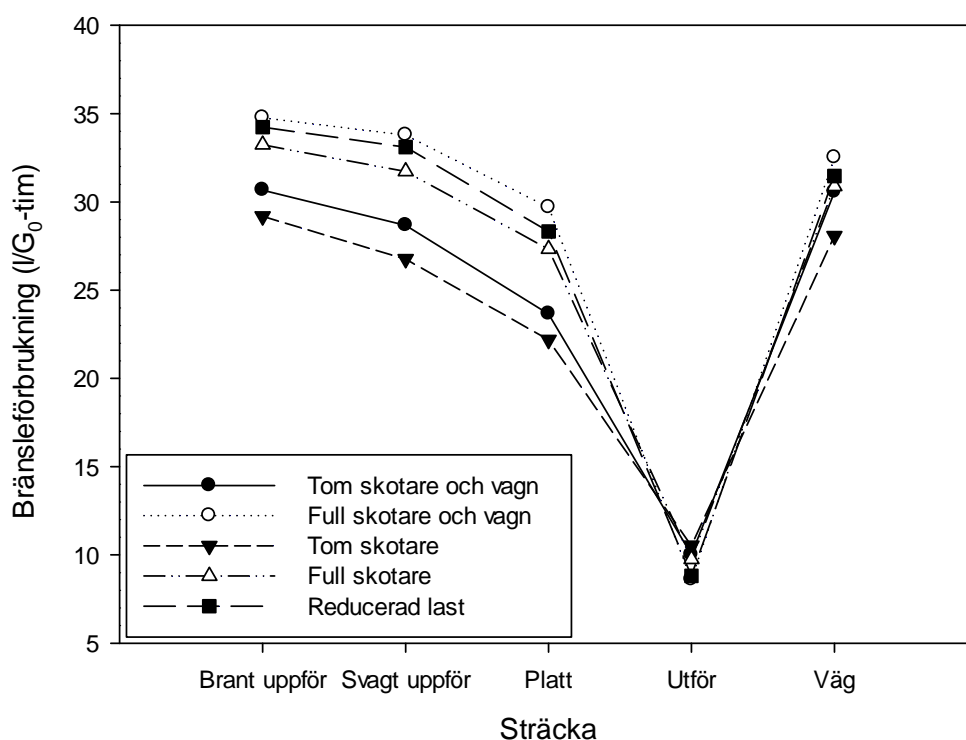
Medelbränsleförbrukningen per produktiv timme ( $G_0$ -timme) varierade signifikant mellan de olika maskinkonstellationerna ( $p < 0,001$ ) och sträckorna ( $p < 0,001$ ). Skillnaden mellan effekten på kombinationerna konstellation-sträcka varierade också signifikant

(interaktionseffekt,  $p < 0,001$ ). ANOVA-modellen förklarade 99,7% av variationen ( $R^2$ -adj). Generellt följde bränsleförbrukning per tidsenhet det arbete som skulle utföras; ju högre totalvikt ekipaget hade desto högre bränsleförbrukning vid körning plant och uppför, men lägre förbrukning vid körning nedför (Tabell 18, Figur 13).

**Tabell 18.** Medelbränslekonsumtion ( $l/G_0$ -tim) under körningen av försökssträckorna. Samplingsfrekvens var 100 Hz (100 gånger per sekund).

Konstellation	n	Brant upp		Svagt upp		Platt		Utför		Väg	
		Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Tom skotare	3	29,19 <sup>ghi</sup>	0,89	26,77 <sup>k</sup>	0,48	22,19 <sup>l</sup>	0,11	10,53 <sup>m</sup>	0,44	28,07 <sup>ijk</sup>	0,30
Tom skotare och vagn	3	30,67 <sup>efg</sup>	0,45	28,67 <sup>hij</sup>	0,77	23,66 <sup>l</sup>	0,63	10,01 <sup>mm</sup>	0,23	30,57 <sup>efg</sup>	0,30
Full skotare	3	33,24 <sup>abc</sup>	0,22	31,73 <sup>cde</sup>	0,08	27,33 <sup>jk</sup>	0,58	9,76 <sup>mm</sup>	0,27	30,89 <sup>ef</sup>	0,06
Full skotare och vagn	3	34,77 <sup>a</sup>	0,01	33,79 <sup>ab</sup>	0,39	29,69 <sup>fgh</sup>	1,35	8,60 <sup>n</sup>	0,10	32,52 <sup>bed</sup>	0,15
Reducerad last på skotare och vagn	2	34,24 <sup>ab</sup>	0,05	33,11 <sup>abcd</sup>	0,47	28,33 <sup>hijk</sup>	0,42	8,82 <sup>mm</sup>	0,04	31,47 <sup>de</sup>	0,36

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).



**Figur 13.** Medelbränsleförbrukning ( $l/G_0$ -tim) för de respektive konstellationerna och sträckorna.

När utförskörningen exkluderas behövdes det i relativa termer 5-9% mer bränsle per tidsenhet för att köra ett tomt vagnsekipage jämfört med tom skotare (Tabell 19). Med full last behövdes 5-9% mer bränsle för vagnsekipaget jämfört med fullastad skotare. För den reducerade lasten på skotare med vagn krävdes mellan 3-4% mer bränsle per tidsenhet jämfört med fullastad skotare.

**Tabell 19.** Relativ medelskillnad (%) i bränsleförbrukning (l/G<sub>0</sub>-tim) mellan skotare med vagn och utan vagn för respektive sträcka, baserat på medelvärden från Tabell 18. Tom skotare och vagn är jämförd mot tom skotare, och positiva siffror betyder att skotare med vagn har högre bränsleförbrukning. Lastad skotare med vagn har jämförts med fullastad skotare.

Konstellation	Brant upp	Svagt upp	Platt	Utför	Väg
Tom skotare och vagn	5,1	7,1	6,6	-4,9	8,9
Full skotare och vagn	4,6	6,5	8,6	-11,9	5,3
Reducerad last på skotare och vagn	3,0	4,3	3,7	-9,6	1,9

### 3.3 Experimentell lastning och avlastning

Vid lastnings- och avlastningsarbetet tog det signifikant längre tid per ton att både lasta och att lasta av vagnen än skotaren ( $p < 0,001$ ) (Tabell 20). Avlastningen av vagnen var avsevärt mycket långsammare än för skotaren, och tog faktiskt lika lång tid per ton som lastningen av skotaren. Lastning tog signifikant längre tid än avlastning ( $p = 0,001$ ) och inga interaktioner mellan arbete och konstellation (skotare eller vagn) fanns ( $p = 0,544$ ). ANOVA-modellen förklarade 84,7% av variationen ( $R^2_{adj}$ ).

Bränsleförbrukningen per timme var konstant oavsett kombination av arbete och konstellation, dvs att det helt avsaknades huvud- och interaktionseffekter ( $p \geq 0,178$ ) (Tabell 20). Detta resulterade i att effekterna från arbete och konstellation på bränsleförbrukning per ton blev desamma som för tidsåtgången per ton (Tabell 20), dvs signifikanta huvudeffekter (arbete:  $p = 0,002$ , konstellation:  $p < 0,001$ ) och ingen interaktionseffekt ( $p = 0,558$ ), och  $R^2_{adj} = 85,3\%$ . I relativa tal behövdes det i medel 44% längre tid per ton att lasta vagnen jämfört med skotaren och vid avlastningen behövdes 94% längre tid för. Totalt sett innebar detta att det krävde 18% extra tid för att lasta hela ekipaget, jämfört om samma volym hade lastats bara på skotare ( $0\%$  extra tid  $\times 16,7 \text{ m}^3 \text{ fub}$  på skotare +  $44\%$  extra tid  $\times 11,1 \text{ m}^3 \text{ fub}$  vagnen på skotaren, och hela den summan delat med  $27,8 \text{ m}^3 \text{ fub} = 18\%$ ). På samma sätt krävdes det 38% extra att lasta av hela ekipaget, jämfört att lasta av samma volym från bara skotaren.

Bränsleförbrukningen per ton last var i medel 47% högre vid lastning av vagnen jämfört med lastning av skotaren, och vid avlastningen var bränsleförbrukningen 95% högre vid vagnsavlastningen.

**Tabell 20.** Tidsåtgång och bränsleförbrukning vid lastning och avlastning av skotare respektive vagn.

Arbete	Konstellation	n	Tidsåtgång		Bränsleförbrukning			
			(s/ton)		(l/ton)		(l/timme)	
			Medel	SA	Medel	SA	Medel	SA
Lastning	Skotare	3	22,39 <sup>a</sup>	2,64	0,080 <sup>a</sup>	0,011	12,64 <sup>a</sup>	0,62
	Vagn	3	32,26 <sup>b</sup>	4,61	0,118 <sup>b</sup>	0,015	13,18 <sup>a</sup>	0,39
Avlastning	Skotare	3	12,90 <sup>c</sup>	0,99	0,048 <sup>c</sup>	0,004	13,25 <sup>a</sup>	0,20
	Vagn	3	24,98 <sup>ab</sup>	2,64	0,093 <sup>ab</sup>	0,011	13,13 <sup>a</sup>	0,13

Värden som är signifikant skilda åt har olika upphöjda bokstäver (2-vägs ANOVA med Tukey-test).

### 3.4 Observation av vanligt skotningsarbete

Vid den vanliga skotningen varierade de flesta parametrarna kraftigt mellan varje skotat lass (dvs mellan varje vända i Tabell 21-22), vilket var ett förväntat utfall av den naturliga variationen i beståndet och de val som föraren gör.

**Tabell 21.** Lastningsrelaterade parametrar vid vanliga skotningsarbetet.

Konstellation	Vända	Last (ton)	Lastningssträcka (m)	Uttagsvolym (ton/100 m)	Lastningstid (s/ton)
Skotare	1	14.8	152	9.7	51.8
	2	15.2	88	17.3	34.8
	3	15.4	121	12.7	43.8
Skotare och vagn	1	24.0	132	18.2	51.2
	2	24.7	275	9.0	59.3
	3	28.0	281	10.0	58.6

Uttag per ha =  $100 \times (\text{uttag per } 100 \text{ m}) / (\text{slagbredd})$ . Dvs att med 10 ton per 100 m och slagbredd 13 m är skotningsuttaget 77 ton/ha, dvs  $86 \text{ m}^3 \text{ fub/ha}$ . Observera att skotat uttag oftast skiljer sig från det totala (bestånds)uttaget per ha, om inte alla apterade sortiment samlas vid skotningen.

Lastningstiden (s/ton) påverkades signifikant ( $p=0,023$ ) av både virkestätheten och om vagn användes eller inte enligt:

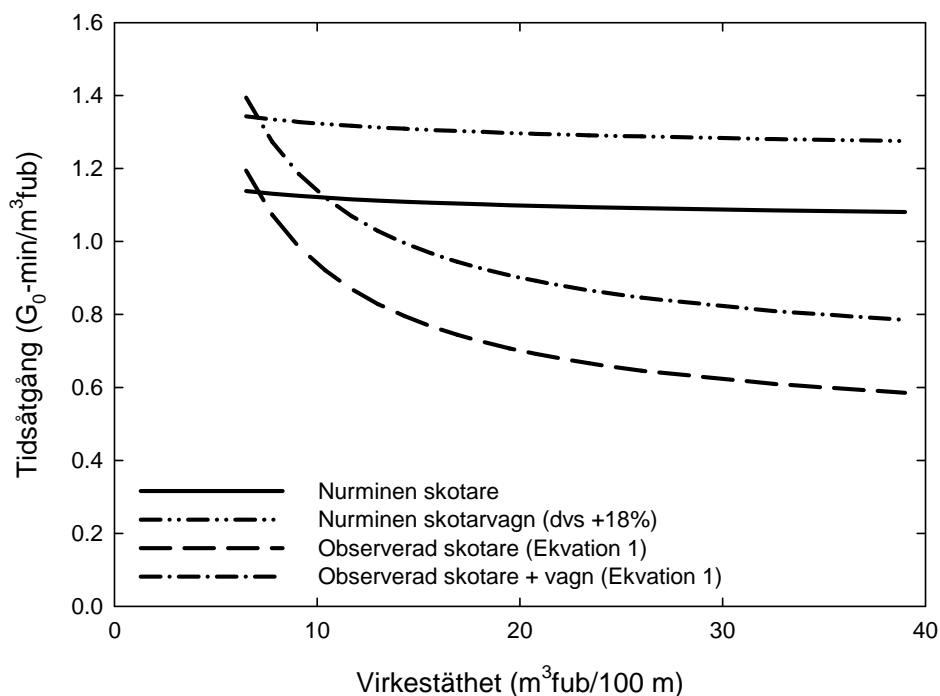
$$\text{Lastningstid} = 25,0 + 10,8 \times \text{Vagn} + 231/\text{Uttagsvolym} \quad (\text{s/ton}) [2]$$

där *Vagn* är en dummy-variabel som är 0 om vagn inte används och 1 om vagn används, och *Uttagsvolym* är mängden lastat virke per körd sträcka (ton/100 m). Enligt modellen tog det således drygt 11 s längre tid per ton att använda vagnen vid lastning. Dessutom minskar tidsåtgången kurvlinjärt (hyperboliskt) för varje extra ton last som tas ut per 100 m laststräcka. Regressionsmodellen förklarade 86,5% av variationen ( $R^2_{\text{adj}}$ ) och alla modellens delar bidrog signifikant till att förklara den totala observerade variationen; konstantens p-värde var 0,020, för vagn-dummin var p-värdet 0,032 och för uttagsvolymen 0,038. Vagn-dummin stod för merparten av den förklarade variationen (58%) medan uttagsvolymen stod för 34%. Det bör dock noteras att även om funktionen förklarar en stor del av den observerade variationen så är den baserad på väldigt få observationer (6 st) och för ett begränsat intervall av virkestäthet (9-18 ton/100 m).

Observera att funktionen är för ton virke. Skall beräkning göras utifrån virkestäthet i  $\text{m}^3$  för att få lastningstiden i sekunder per  $\text{m}^3$  måste virkestätheten i  $\text{m}^3$  multipliceras med virkets densitet ( $0,9 \text{ ton/m}^3$ ) och den framräknade lastningstiden skall divideras med densiteten.

Tidsåtgången baserat på Ekvation 2 var markant lägre än tidsåtgången i referensmaterialet (Nurminen et al. 2006) (Figur 14). Medan den generella tidsåtgångsökningen för lastning av vagn och skotare var 18% för hela ekipagets volym i den experimentella studien innebar det konstanta påslaget för vagn i Ekvation 2 att ökningen låg mellan 17-34%, med lägst relativ skillnad vid låga virkestätheter och högst skillnad vid höga tätheter. Detta beror på att en konstant faktisk skillnad ger högre relativ skillnad när grundvärdet minskar, som i Figur 14).





**Figur 14.** Jämförelse mellan referenstidsåtgången (Nurminen et al. 2006) justerad för den extra tidsåtgång som behövdes för lastning av ekipaget med skotarvagn vid den experimentella studien (dvs extratiden utslagen på hela ekipagets volym) och den tidsåtgång som noterades vid observationsstudien (dvs Ekvation 2).

Analys av tidsåtgången vid körning (körhastighet) var inte huvudsyftet med denna delstudie, men observerades och analyserades för att validera det experimentella upplägget gentemot praktiskt arbete. Motsägelsefullt nog fanns det tendenser till lägre tidsåtgång med vagnen vid tomkörning, ( $p=0,084$ ,  $R^2_{adj}=57,92\%$ ,  $n=5$  eftersom data saknas för en observation då vagn användes) (Tabell 22). För körningen med full last hade ett orimligt värde ( $0,38$  s/m med bara skotare, dvs  $159$  m/min eller  $9,5$  km/h) stor inverkan på den statistiska analysen (ingen påverkan av vagn,  $p=0,901$ ,  $R^2_{adj}=0,00\%$ ,  $n=6$ ). När den orimliga observationen uteslöts blev de statistiska värdena snarlika de för tidsåtgången vid tomkörning ( $p=0,094$ ,  $R^2_{adj}=54,8\%$ ,  $n=5$ ), men med den väsentliga skillnaden att hastigheten med full last tenderade att vara högre med vagn än utan.

Tidsåtgången vid förflyttning under lastning (lastningskörhastigheten) påverkades inte signifikant av vagnen, oavsett om inversen av virkestäthet togs med som covariat eller inte ( $p=0,216$ ,  $R^2_{adj}=18,82\%$ , respektive  $p=0,288$ ,  $R^2_{adj}=27,4\%$ ).

**Tabell 22.** Körhastigheter vid det vanliga skotningsarbetet.

Konstellation	Vända	Tidsåtgång vid körning (s/m)		
		Tom	Full	Under lastning
Skotare	1	0.90	0.87	4.16
	2	-	0.98	2.16
	3	1.14	0.76	2.09
Skotare och vagn	1	0.76	1.06	1.88
	2	0.78	1.08	1.21
	3	0.82	0.38	2.10

### 3.4 Beräknade effektivitetsgränser

#### 3.4.1 Antaganden utifrån fältstudien

I de experimentella studierna återfanns vissa skillnader i tidsåtgång och bränsleförbrukning mellan att använda skotarvagn eller inte. Dessa skillnader, tillsammans med kostnadsdata, användes till att beräkna under vilka förutsättningar det är lämpligt att använda skotarvagn. I grundscenariot antogs att skillnader var enligt Tabell 23 och kostnader enligt Tabell 5 (i Material och metoder). Dessutom antogs uttagsvolymen vara 26 m<sup>3</sup>fub/100 m lastningssträcka, vilket motsvarar att det finns 200 m<sup>3</sup>fub/ha av det uttagna virket vid ett antaget avstånd på 13 m mellan körstråken. Tidsåtgången grundar sig på data från Nurminen et al. (2006). Detta scenario varierades sedan i ett antal känslighetsanalyser för att undersöka hur känslig förutsättningsgränserna var för variation i en eller flera variabler.

**Tabell 23.** Förutsättningar för de olika maskinkonstellationerna i grundscenariot.

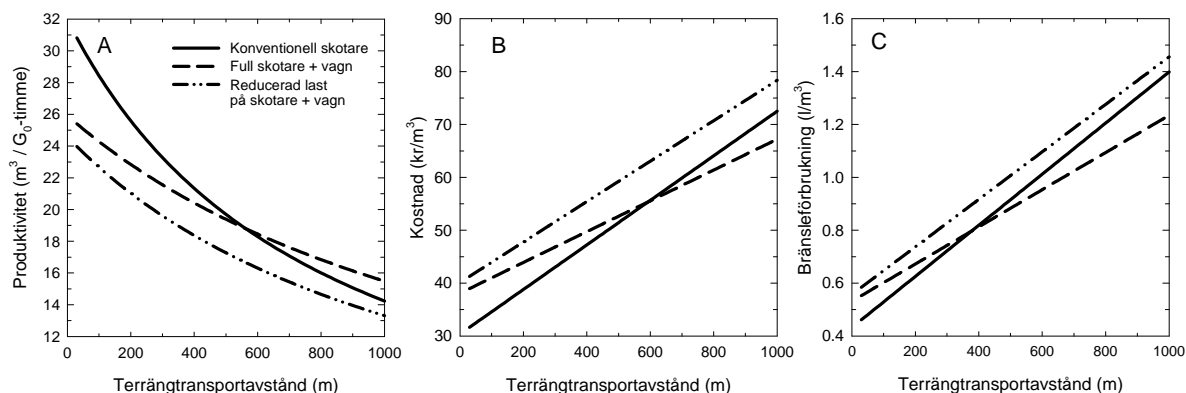
Variabel	Konventionell skotare	Skotare + vagn	Reducerad last på skotare + vagn
Lastvolym (m <sup>3</sup> fub)			
- Skotare	16,7	16,7	9,4
- Vagn	-	11,1	10,0
Körhastighet (m/min)			
- Tom	58	97 <sup>a</sup>	97 <sup>a</sup>
- Lastning	27	100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
- Full	46	85 <sup>a</sup>	97 <sup>a</sup>
Lastningstid (% av Ekvation 1)			
- Skotarovolym	100	100	100
- Vagnsvolym	-	144	144
Avlastningstid (min/m <sup>3</sup> )			
- Skotarevolym	0,657	100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
- Vagnsvolym	-	194 <sup>a</sup>	194 <sup>a</sup>
Bränsleförbrukning (l/timme)			
- Körning utan last	22	107 <sup>a</sup>	107 <sup>a</sup>
- Lastningskörning	25	108 <sup>a,b</sup>	105,5 <sup>a,b</sup>
- Körning med full last	27	109 <sup>a</sup>	104 <sup>a</sup>
- Avlastning	13	100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
- Lastning	13	100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
- Tomgång	2,4	100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
Extra tidsåtgång pga skotarvagnen (min/vända)			
	0	0	0

<sup>a</sup> i procent av värdet för konventionell skotare. <sup>b</sup> beräknat som medelvärdet av tom och fullastad.

#### 3.4.2 Effektivitetsgränser vid grundscenariot

I grundscenariot är det fördelaktigare att använda skotarvagn än att använda konventionell skotare när terrängtransportavståndet (enkel väg) är tillräckligt långt (Figur 15).

Brytpunkterna är rätt lika för produktivitets- och kostnadsfördelar (570 respektive 600 m) medan brytpunkten för fördelaktig bränsleförbrukning ligger betydligt närmare (380 m). Att skota med reducerad last på både skotare och vagn var dock inte fördelaktigt under de analyserade avstånden (upp till 1000 m enkel väg).



**Figur 15.** Produktivitet (A), kostnad (B) och bränsleförbrukning (C) vid olika terrängtransportavstånd för de olika maskinkonstellationerna under grundscenariot.

### 3.4.3 Känslighetsanalyser

Känslighetsanalyserna visar att uttagsvolymen har en relativt liten påverkan på brytpunkterna för när skotarvagnsanvändningen är fördelaktig jämfört med konventionell skotare (Tabell 24). Låga uttagsvolymerna har störst effekt och påverkar skotarvagnsbrytpunkterna negativt (kräver längre terrängtransportavstånd), men effekten planar snabbt ut vid ökning av uttagsvolymerna.

Brytpunkterna påverkades inte nämnvärt av variation i drivmedelskostnad eller i vagnskostnad. Faktum är att även om vagnen skulle vara gratis att använda så hamnar brytpunkten för kostnadseffektivt terrängtransportavstånd på 530 m, dvs bara 70 m närmare än i grundscenariot. Brytpunkterna påverkades inte alls av generella ändringar av tidsåtgångsnivåerna för alla arbetsmoment. Däremot påverkades brytpunkterna drastiskt av nivåerna på extra tidsbehovet för att lasta respektive lasta av skotarvagnen (Tabell 24). Ju mer extra tid, desto längre terrängtransport krävdes för att nyttjande av skotarvagnen skulle vara fördelaktig. Även de tidpåverkande faktorerna generell körhastighetsnivå för konventionell skotare samt nödvändig extratid per vända med vagn påverkade brytpunkterna förhållandevis mycket. Som väntat försköt höjda nivåer på dessa faktorer brytpunkterna till längre avstånd.

**Tabell 24.** Känslighetsanalys för hur brytpunkterna för när det blir effektivt att använda fullastad skotarvagn jämfört med fullastad konventionell skotare. Grundscenariot (GS) = fet, kursiv stil.

Ändring nummer	Variabel	Nivå <sup>(a)</sup>	Terrängtransportsbrytpunkt (m enkel väg)		
			Produktivitet	Kostnad	Bränsleförbrukning
1	Uttagsvolym	10	580	610	410
2	(m <sup>3</sup> /100 m)	20	570	600	390
<b>3</b>		<b>26 <sup>(b)</sup></b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
4		40	570	590	370
5	Vagnskostnad	+100%	- <sup>(c)</sup>	670	-
6	(kr/timme)	+20%	-	610	-
7		+10%	-	600	-
8		<b>14,3</b>	-	<b>600</b>	-
9		-10%	-	580	-
10		-20%	-	570	-
11		0 kr/tim	-	530	-
12	Bränslekostnad	+20%	-	590	-
13	(kr/l)	+10%	-	590	-
<b>14</b>		<b>10,0</b>	-	<b>600</b>	-
15		-10%	-	600	-
16		-20%	-	610	-
17	Tidsåtgång <sup>(d)</sup>	+10%	570	600	380
<b>18</b>		<b>GS</b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
19		-10%	570	600	380
20	Skotarvagns	+60 & +120%	750	770	500
21	extratid vid	+50 & +100%	620	650	420
<b>22</b>	lastning &	<b>+ 44 &amp; +94%</b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
23	lossning	+40 & +90%	530	560	360
24		+30 & +70%	410	440	280
25		+20 & +50%	290	320	200
26	Konventionell	+10	630	660	420
<b>27</b>	skotares	<b>GS</b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
28	körhastighet <sup>(e)</sup>	-10	510	540	350
<b>29</b>	Extratid pga	<b>0</b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
30	vagn	1	620	640	390
31	(min/vända)	2	660	680	390

<sup>(a)</sup> Med % menas en procentuell ändring jämfört med grundscenariots värde. Exempelvis i ändring nr 7 är vagnskostnaden 10% högre (15,73 kr/timme) än i grundscenariot (14,3 kr/timme).

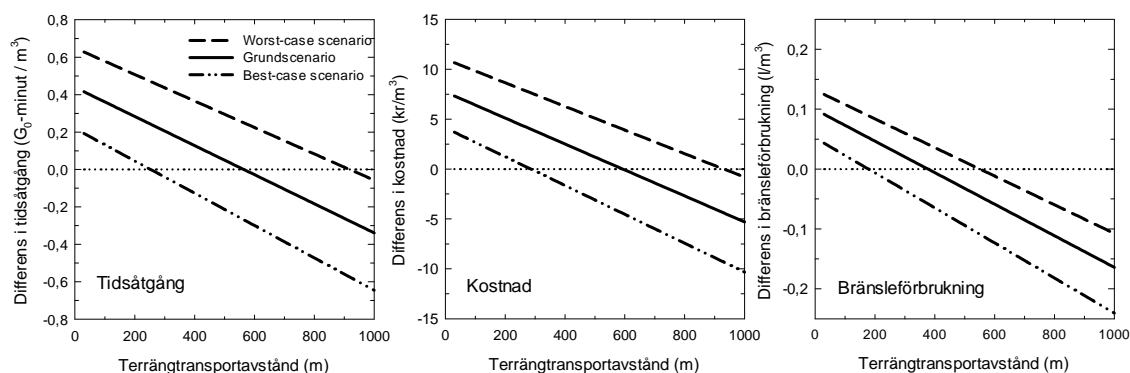
<sup>(b)</sup> Uttag per ha = 100 × (uttag per 100 m) / (slagbredd). Dvs att med 26 m<sup>3</sup> per 100 m och slagbredd 13 m är skotningsuttaget 200 m<sup>3</sup>/ha. Observerad att skotat uttag oftast skiljer sig från det totala (bestånds)uttaget per ha, om inte alla apterade sortiment samlas vid skotningen.

<sup>(c)</sup> Ändringen medför ingen förändring.

<sup>(d)</sup> Generell ändring av tidsåtgången för konventionell skotares alla arbetsmoment, från de nivåer som anges i Tabell 23. Förhållandet mellan tidsåtgång för konventionell skotare utan och med vagn bibehålls som i grundscenariot.

<sup>(e)</sup> Ändring av konventionell skotares hastighet vid körning utan last, under lastning och med fullt last, från de nivåer som anges i Tabell 23. Förhållandet mellan hastigheten för konventionell skotare utan och med vagn bibehålls som i grundscenariot.

Ställs ett worst-case scenario samman genom att kombinera ändringarna 20, 26 och 31 så blir terrängtransportbrytpunkterna 920 m enkel väg för produktiviteten, 940 m för kostnadseffektiviteten och 560 m för bränsleförbrukningen (Figur 16, Tabell 25).



**Figur 16.** Skillnad mellan att använda skotarvagn eller inte beroende på terrängtransportavstånd enkel väg under förutsättningarna i tre olika scenarion. Negativa differensvärden betyder att det är fördelaktigt att använda skotarvagn.

Med ett best-case scenario i form av att kombinera ändringarna 25 och 28 så blir terrängtransportbrytpunkterna 260 m enkel väg för produktiviteten, 290 m för kostnadseffektiviteten och 180 m för bränsleförbrukningen (Figur 16, Tabell 25).

Best-case scenariot var något lägre än den nivå som erhöles när analysen baserades på den observerade tidsåtgångsnivån för den konventionella skotarens lastning och avlastning, vilken var betydligt lägre än tidsåtgången i det referensmaterial (Nurminen et al. 2006) som användes i grundscenariot. Med tidsåtgången för lastning baserad på Ekvation 2 och avlastningstiden satt till 0,24 min/m<sup>3</sup> fub (dvs endast 38% av tidsåtgången i grundscenariot) och med andra förutsättningar som i grundscenariot blev terrängtransportbrytpunkterna 380 m enkel väg för produktiviteten, 390 m för kostnadseffektiviteten och 260 m för bränsleförbrukningen (Tabell 25).

**Tabell 25.** Spännvidden för scenarionas påverkan på brytpunkterna för när det blir effektivt att använda skotarvagn. Grundscenariot är skrivet med fet, kursiv stil.

Scenario	Terrängtransportbrytpunkt (m enkel väg)		
	Produktivitet	Kostnad	Bränsleförbrukning
Best-case	260	290	180
Observerat	380	390	260
<b>Grund</b>	<b>570</b>	<b>600</b>	<b>380</b>
Worst-case	920	940	560

### 3.4.4 Flyttkostnad

Tas extra flyttkostnad med i tillägg till grundscenariot förskjuts brytpunkterna till längre terrängtransportavstånd. Ökningen beror på traktens storlek; ju mindre volym att fördela den extra kostnaden desto större ökning av terrängtransportbrytpunkterna. Med en ökad flyttkostnad på 1,5 kr/m<sup>3</sup> fub (1500 kr/1000 m<sup>3</sup> fub) så ökade den ekonomiska brytpunkten till 710 m jämfört med 600 m i grundscenariot. Om flyttkostnaden ökade med 3 kr/m<sup>3</sup> fub (1500 kr/500 m<sup>3</sup> fub) hamnade den ekonomiska brytpunkten på 830 m.

När extra flyttkostnad på 1,5 kr/m<sup>3</sup>fub kombineras med worst-case scenariot hamnar den ekonomiska brytpunkten på >1000 m medan flyttkostnadsnivån i kombination med den observerade tidsåtgången ger en brytpunkt på 510 m och i kombination med best-case scenariot hamnar brytpunkten på 390 m. Med en flyttkostnad på 3 kr/m<sup>3</sup>fub hamnar brytpunkten på >1000, 620 och 500 m för kombination med worst-case, observerad tidsåtgång respektive best-case scenariot.

### **3.5 Beräknad tillgång på lämpliga trakter**

#### **3.5.1 Förutsättningar**

Genom att tillämpa beräkningarna i 3.4 på faktiskt traktdata går det att få en indikation på hur mycket det finns av trakttyper som är lämpliga för skotarvagnsanvändning. Mixen av traktvolym med olika kombinationer av terrängtransportvolym och uttagsvolym påverkar alltså utfallet i dessa beräkningar. Dessutom kan effekten av eventuellt dyrare flyttar testas, då flyttkostnaderna per trakt slås ut på den aktuella traktvolymen.

Dessa analyser görs för ett medelvärde av terrängtransportavståndet eftersom kunskapen om dess variation och fördelning generellt är låg och saknades för traktdatat. I analyserna förutsätts det därför att skotningen av alla lass på en trakt är identisk, dvs tar lika lång tid, kostar lika mycket och förbrukar lika mycket bränsle. Resultaten bör därför betraktas som indikationer med ett förhållandevis stort mått av inneboende osäkerhet.

#### **3.5.2 Grundscenario**

Vid det antagna grundscenariot för skillnader i tidsåtgång, bränsleförbrukning och kostnader mellan att skotaren använde skotarvagnen eller inte så fanns det generellt en förhållandevis liten andel av traktvolymerna där man sparade på att användning av skotarvagnen skulle innebära besparingar (Figur 17). Kostnadsbesparingar kunde göras på som mest 18,9% av volymen (Medelpad) och som minst på 12% av volymen (Lycksele och Östergötland-Sörmland). Skillnaderna var förhållandevis små mellan de fyra geografiska områdena och trenderna var likartade; användningen av skotarvagnen skulle öka kostnaderna med upp till 7 kr/m<sup>3</sup> på merparten av traktvolymerna.

Det skulle kosta mellan 4-7% mer att använda skotarvagnen på all volym i de olika områdena i stället för att använda konventionell skotare, med minst kostnadshöjning i Medelpad och mest i Lycksele och Norrbotten.

När flyttkostnaderna tas med (dvs 1500 kr extra per trakt med vagnen) sänks andelen traktvolym i samtliga områden med mellan 4,0 – 6,2 procentenheter och resulterar i att störst andel fortfarande återfinns i Medelpad (12,7%) och minst andel finns i Östergötland-Sörmland (6,9%).

#### **3.5.3 Känslighetsanalyser**

I best-case scenariot var det billigare att använda skotarvagnen på mellan hälften och tre fjärdedelar av traktvolymerna (Tabell 26). Om flyttkostnad räknas med sjönk andelarna till mellan en tredjedel och drygt hälften. Kostnadsmissigt fanns det i best-case scenariot stora besparingar i att använda skotarvagn på all slutavverkning så länge inte vagnen innebar extra flyttkostnad. Förutsättningarna blev sedan stegvis sämre för skotarvagnsanvändning allt eftersom scenariona innehöll sämre förutsättningar. I worst-case scenariot så kunde kostnadsbesparingar göras på som mest drygt en tiondel av volymen (Medelpad) och som

minst på endast några procent av volymen (Östergötland-Sörmland). Det skulle då kosta ca 10% mer att använda skotarvagnen på all volym. När flyttkostnaderna togs med i beräkningen sänktes andelen lämpliga trakter ytterligare och den extra kostnaden ökade ytterligare (Tabell 26).

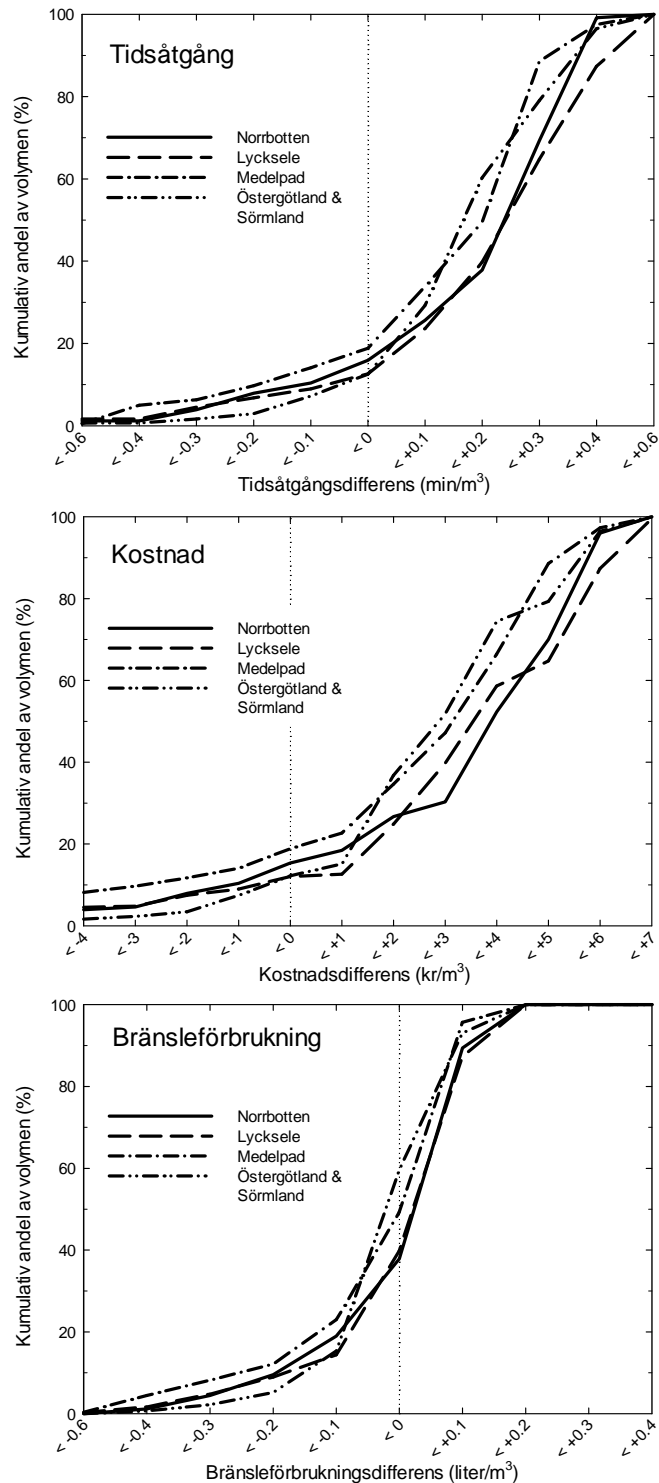
**Tabell 26.** De olika scenariernas påverkan på andelen traktvolym där skotarvagn innebär kostnadsbesparing samt den total kostnadsändringen vid skotarvagns användning på samtliga trakter. Negativa värden innebär att det är billigare att använda skotarvagnen.

Scenario	Andel trakter där det var billigare med skotarvagn (% av totalvolym)		Extra kostnad för att använda skotarvagn på alla trakter (% av konventionella skotarkostnaden)	
	Utan extra flyttkostnad	Med extra flyttkostnad	Utan extra flyttkostnad	Med extra flyttkostnad
Best-case	52,4 – 74,5	35,9 – 54,4	-4,1 – -2,0	-2,5 – 1,0
Observerat	30,2 – 51,2	22,9 – 35,6	-1,3 – 1,2	0,6 – 4,6
<b>Grund</b>	<b>12,0 – 18,9</b>	<b>6,9 – 12,7</b>	<b>4,5 – 6,8</b>	<b>6,0 – 9,5</b>
Worst-case	1,5 – 6,3	0,6 – 4,6	13,0 – 15,4	14,3 – 17,7

Trenderna mellan tidsåtgång var i princip identisk med trenderna för kostnader utan flyttkostnad (Tabell 27). Däremot var potentialerna betydligt större med avseende på minskad bränsleförbrukning när skotarvagn används (Tabell 27). Störst andel av volmen med bränslebesparing fanns i Medelpad och Östergötland-Sörmland, och minst andel fanns i Norrbotten och Lycksele.

**Tabell 27.** De olika scenariernas påverkan på andelen traktvolym där skotarvagn innebär tids-, respektive bränslebesparing samt den totala ändringen i tids- och bränsleåtgång vid skotarvagns användning på samtliga trakter. Negativa värden innebär att det är lägre åtgång när skotarvagnen används.

Scenario	Andel trakter där det är fördelaktigt med skotarvagn (% av totalvolym)		Extra åtgång vid användning av skotarvagn på alla trakter (% av konventionella skotarens åtgång)	
	Tidsåtgång	Bränsleförbrukning	Tidsåtgång	Bränsleförbrukning
Best-case	52,4 – 75,1	84,4 – 95,6	-5,1 – -3,1	-8,4 – -5,9
Observerat	30,3 – 51,8	56,3 – 80,9	-2,1 – 0,3	-6,5 – -3,7
<b>Grund</b>	<b>12,6 – 18,9</b>	<b>30,2 – 51,2</b>	<b>3,8 – 5,9</b>	<b>1,7 – 1,0</b>
Worst-case	1,5 – 6,4	12,6 – 22,5	12,7 – 14,9	3,6 – 6,4



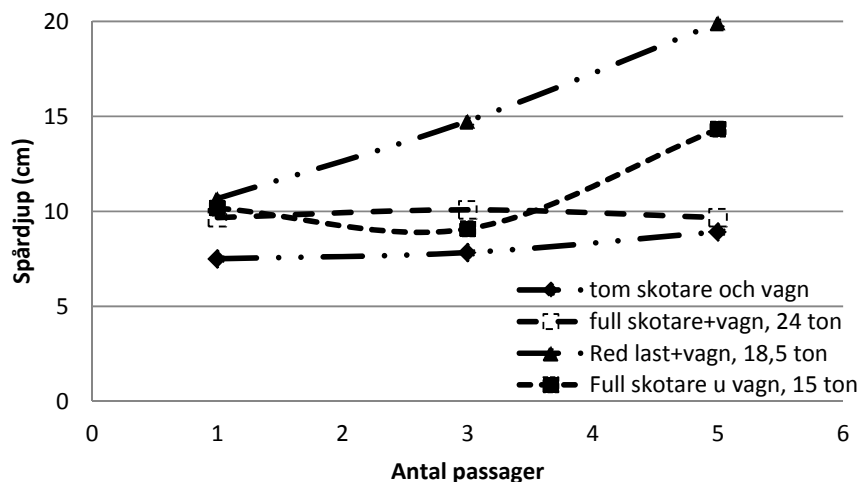
**Figur 17.** Differensen i tidsåtgång, kostnad och bränsleförbrukning mellan full skotare med vagn och konventionell skotare samt dess fördelning över totalvolymen för de fyra områdena. Värderna mindre än noll (< 0, prickade vertikala linjen) visar att det är billigast att använda skotarvagnen. Skillnaden (ökningen) mellan olika differenssteg ger mängden i det intervallet. För Lycksele finns tex 4,5% av volymen i trakter där det är mer än 4 kr billigare att använda skotarvagnen, medan 12,0% av volymen finns i trakter där det finns någon kostnadsfördel över huvudet (<0 kr). Alltså finns 7,5% (12,0



minus 4,5) av volymen i trakter där det är mellan 0-3,99 kr billigare per skotad m<sup>3</sup> att använda skotarvagnen än att låta bli.

### 3.6 Markpåverkan

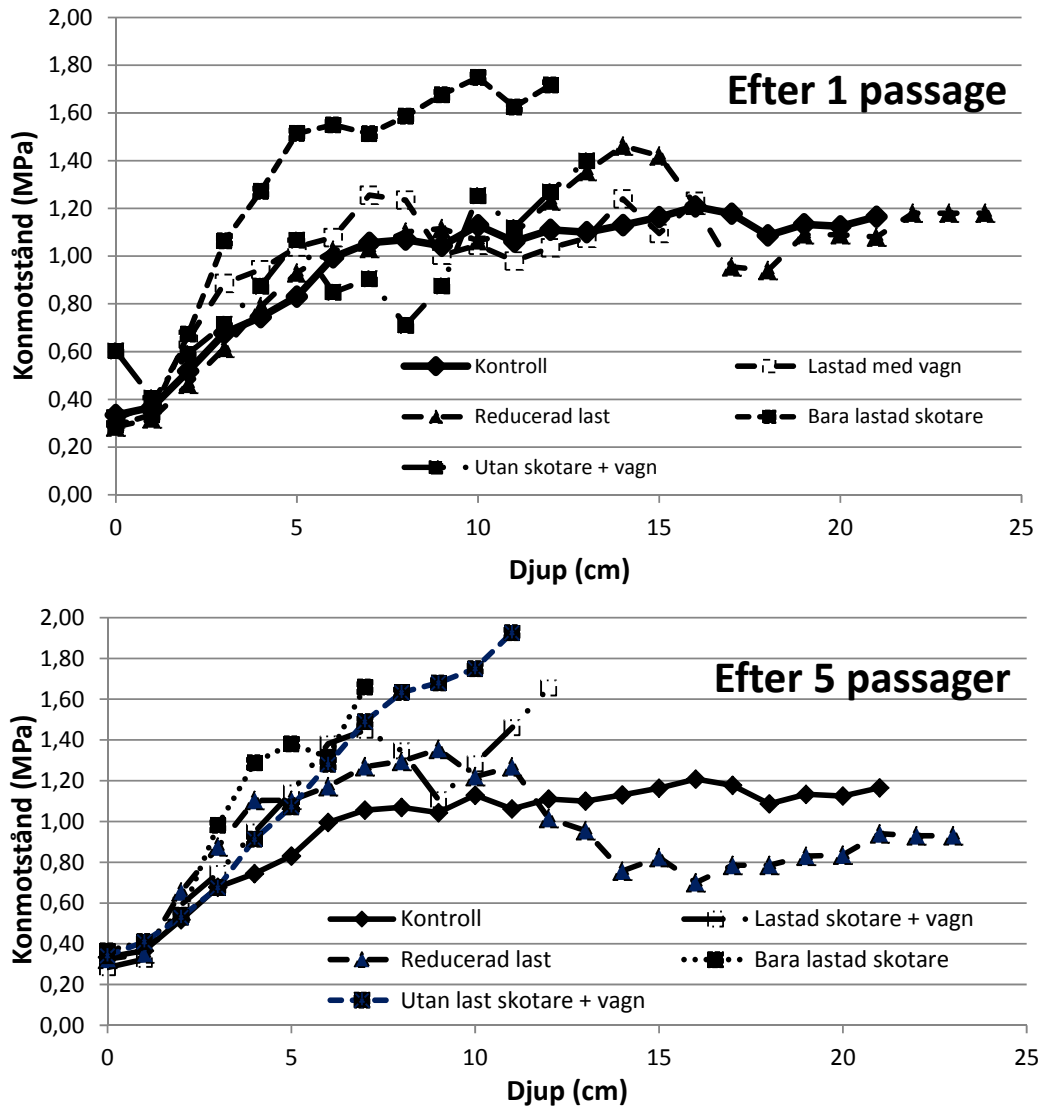
Utöver att minst spår uppmättes med olastat ekipage visar spårbildningsmätningarna inget förväntat eller logiskt mönster, eftersom mest spår uppmättes för ekipaget med reducerad last på skotaren (Figur 18). Detta kan troligen hänföras till det ytsteniga underlaget, vilket hindrade fordonet att påverka marken särskilt mycket oavsett lastvikt. Efter fem passager med fullt lastad skotare och vagn (totalt 24 tons last) uppstod endast 10-20 cm djupa spår, vilket visar att området var olämpligt för studier av markpåverkan.



**Figur 18.** Spår djup efter 1, 3 och 5 passager av olika maskinkonstellationer fordonet.

Mätningar av markpackning med konpenetrometer var svåra att genomföra, eftersom det var svårt att få ner instrumentet utan att träffa på sten (alla nedstick som stötte på ytlig sten togs bort och det blev bara ett fåtal användbara nedstick kvar). Trots det blev nedsticken endast maximalt 15 – 20 cm djupa innan sten träffades (jfr spår djupen i Figur 18).

Trots den ytsteniga marken fanns det dock tydliga effekter i jorden mellan stenarna (Figur 19). Efter en överfart visade konpenetrometermätningarna att fullastad skotare utan vagn (15 ton last) var den maskinkonstellation som gav störst markförändringen, och det resultatet bestod även efter 5 överfarter. Reducerad last på vagn och skotare gav betydligt mindre markpåverkan, både vid en och fem passager. Förvånande nog uppmättes nästan lika kraftig jordpåverkan för olastad skotare med vagn efter fem överfarter som för den fullastade skotaren utan vagn. Detta kan bero på ojämn viktsfördelning hos fordonet (jfr viktsmätningarna i 2.1). Upprepade passager resulterade i ökad jordpackning, vilket indikerar en nötning- eller utmattningseffekt utöver enbart effekten från de individuella passagera.



**Figur 19.** Konmotstånd vid olika markdjup för olika maskinkonstellationer samt för opåverkad mark (kontroll) efter en respektive fem passager.

## 4. Diskussion

### 4.1 Resultatens tillämplighet

De genomförda fältstudierna gav ett empiriskt material till analyserna av när det är ekonomiskt fördelaktigt att använda skotarvagn. Det visade det sig att den extra tidsåtgången för lastning och avlastning av påhängsvagnen var betydligt större än vad som tidigare antagits i teoretiska analyser (Lindroos & Wästerlund (manus)). Fältstudien var således ett bra komplement till tidigare analyser, men resultatens generella representativitet är osäker eftersom de är baserade på en enskild studie med en enda förare. För att ta hänsyn till osäkerhet kring representativiteten kompletterades gundscenariot (baserat på fältstudieresultatet) med en spännvidd av realistiska utfall (best- och worst case scenarios). Utfallen ligger i linje med Erikssons (1998) resultat från analyserna under 1990-talet; ekonomiskt sett är det fördelaktigt att använda skotarvagn när terrängtransportavstånden överstiger 300-900 m. Exakt brytpunkt beror på den enskilde förarens behov av extra tidsåtgång vid lastning och avlastning av vagnen. Dessutom är det givetvis mer fördelaktigt med påhängsvagn ju långsammare körningen med konventionell skotare är, eftersom nyttan av den extra lastmängden ökar ju större del av arbetstiden som den rena transporten utgör. I studien studerades av praktiska skäl en skotare med en kortare kran än vad som antogs vara optimalt vid användningen av skotarvagn. Om en längre kran är att föredra ifrågasattes av studiens skotarförare (se Praktiska erfarenheter) på grund av den förväntade höga materialpåfrestningen vid kontinuerligt arbete med full grip på full kranlängd. Om materialhållbarheten skulle visa sig vara tillräcklig kan det dock antas att en längre kran skulle underlätta lastnings- och avlastningsarbetet. Resultaten skulle då förskjutas mot best-case scenariot, dvs med en terrängtransportbrytpunkt som ligger på längre avstånd än vid grundscenariot.

Eftersom lämpligt terrängtransportavstånd är avgörande för lönsamheten med påhängsvagns användandet är det viktigt att påpeka att de utförda analyserna är gjorda på beståndsmedelvärden, det vill säga med samma terrängtransportavstånd för all volym i en trakt. I verkligheten varierar givetvis avståndet med både längre och kortare avstånd på samma trakt. Vagnanvändning är därmed både mer och mindre lämpligt än medelvärdet för varje given trakt. Det kan till och med vara så på en given trakt skulle vagnen vara lämplig för vissa vändor och olämplig för andra. För att hantera variationen inom trakten skulle de enskilda vändorna behöva analyseras. Detta rymdes dock inte inom detta arbete och är dessutom en utmanande uppgift, eftersom utförandet av skotningsarbetet innehåller många möjliga kombinationer av förfaranden med avseende på sortimentsval inom och mellan enskilda lass. Det skall också påpekas att korrektheten i både planerat och rapporterat terrängtransportavstånd generellt kan ifrågasättas (Tiger 2012, Lindroos 2012). Dessa troliga brister återfinns även i det traktdata som har använts för att utvärdera andelen slutavverkningsvolym som är lämplig för användning av påhängsvagn. En detaljerad lösning av detta problem är därför svår, men denna studie ger åtminstone grova riktlinjer för rimliga brytpunkter för när det kan antas vara relevant att överväga att använda påhängsvagn.

### 4.2 Tekniska förbättringsförslag

I grova drag stämmer denna studies resultat överens med tidigare studier (Eriksson 1998, Lindroos & Wästerlund (manus)) och med logiskt resonemang. Det är dock viktigt att därutöver även ta med de praktiska erfarenheterna från studien, i form av tekniska förbättringar som påpekats behövas för att möjliggöra användandet av den studerade påhängsvagnen. De nedan presenterade förslagen påpekades främst av maskinförarna i Älvalaget, och har sammanställts och till viss del bearbetats av författarna. Förbättringsförslag

för vagnen rörde dels vagnsdraget, och dels avståndet mellan skotar- och vagnsvirke samt lastsäkring.

Vagnsdragets utformning med en ögla på vagnen och en krok på skotaren ansågs olämpligt eftersom det inte var utformat för att klara av de påfrestningar som skotarvagnen innebar. Skotarens dragkrok klarade framförallt inte de uppåtriktade krafterna, och ett skotardrag hade innan studien gått sönder vid vagnskörningen (Figur 20). Från vagnsutvecklarhåll finns tankar på att byta infästningsanordning till att ha en kula på skotaren och en kulhandske på vagnen. Det ansågs från förarhåll viktigt att ensam kunna koppla på och av vagnen snabbt och smidigt. Med nuvarande utformning behövdes det vid påkoppling en person som stod och instruerade föraren medan denne backade.



**Figur 20.** Skotardragkrok som gått sönder på grund av skotarvagnens påfrestning. Metallen som skall hålla låstappen bröts upp på tappens ovansida. Foto: Ola Lindroos.

För att klara långt timmer ansågs det önskvärt med ett längre avstånd mellan skotar- och vagnslast. För att klara varierande virkeslängder och minska behovet av kranarbete på långt avstånd, skulle avståndet dessutom helst vara snabbt justerbart. Ett enkelt sätt att öka avståndet vore att öka dragstångslängden, men det skulle kräva en längre kran för att klara lastningen. Ett alternativ som förarna lyfte fram var att ha hela vagnens lastutrymme justerbart i form av ett skjutbord som kunde skjutas nära skotaren vid lastning och avlastning, och hållas i ett tillbakaskjutet läge anpassat till virkeslängd vid skotningen. Det ställer dock krav på någon sorts krafttillförsel till vagnen, och därmed ökade kostnader för vagnen.

Med anledning av lastförskjutningen under den experimentella studien ansågs det behövas någon form av lastsäkring på vagnen, och då särskilt om skotningen skall utföras i brant och/eller blockig terräng. Även om studiens barkfläkningen var ovanligt omfattande så såg förarna stora likheter med den halhet som virket kan få vid rimfrostbeläggning på vintern och under savningstiden. Någon form av lastsäkringsutveckling ansågs därför behövas, där kedjor ansågs som en billig men tidskrävande lösning, medan tex en lösning i stil med timmerbilarnas ExTe:s Com 90-bankar (ExTe 2013) skulle bli snabbare men dyrare. Än mer avancerade lösningar finns även i form av variabla laststakar som kan klämma fast ("komprimera") lasten (Bergström et al. 2010, Afzelius 2012).

De teoretiska analyserna visar på vikten av att kunna minimera och helst helt undvika att vagns användningen kräver extra tid per vända, utöver den långsammare på- och avlastningen. För att uppnå det är det viktigt att hitta lösningar på lastförskjutning, eftersom det ses som den mest överhängande risken för ökade störningar jämfört med vanligt skotningsarbete. Att reda ut ett lass där stockarna på vagn och skotare har ”trasslat in sig” kräver enligt fältstudieerfarenheten förödande mycket tid, medan avglidande stockar innebär extraarbete och förlorad användning av den ökade lastkapaciteten. Att hitta kostnadseffektiva sätt för att se till att lasten ligger kvar torde därför vara högprioriterat i den fortsatta utvecklingen av vagns användningen.

### **4.3 För- och nackdelar med studiemetodiken**

I denna rapport kombineras teoretisk modellering med indata från empiriska fältstudier. De kontrollerade fältförsöken har effektivt fångat upp rena vagns-orsakade skillnader, vilka sedan har satts in i modelleringen av vagns användning under olika förhållanden. Studien kan därmed utan tvekan påvisa de skillnader som finns under de rådande förutsättningarna. Det innebär dock inte att detta resultat skulle vara detsamma för andra förare, under andra terräng- och beståndsfaktorer eller för andra skotar-krankombinationer. Som redan har nämnts ovan har detta hanterats genom att kompletterades grundscenariot (baserat på fältstudieresultatet) med en spännvidd av realistiska utfall (best- och worst case scenarios).

Studien har också i huvudsak varit experimentell, så till vida att enskilda arbetsmoment av skotningsarbetet har studerats på förutbestämt sätt. Alternativet till detta skulle vara att studera vanligt skotningsarbete (observationsstudie), vilket i och för sig skulle vara representativt men skulle medföra en ökad mängd okontrollerad variation och därmed försvåra isoleringen av effekten av påhängsvagnen. Detta syns tydligt i den skillnad i variation mellan den lilla observationsstudie som gjordes och variationen i den experimentella delen av studien. Skillnaden i datakvalitet i en renodlad observationsstudie skulle således ha krävt en betydligt större kvantitet data för att rättvisande kunna belysa vagnens påverkan. Vi är således tacksamma för att Sveaskog ansåg det befogat att ställa upp på den experimentella approachen och är övertygad om att det var den mest resurseffektiva lösningen för denna studie.

I studien analyserades bränsleförbrukningen genom att spara data från skotarens eget styrsystem. Det är givetvis ingen nyhet att den snabba tekniska utvecklingen i form av maskinernas digitala styrning öppnar för nya, intressanta sätt att genomföra studier. Det förhållandevis vanliga förfarandet med att mäta tankens bränslemängd före och efter studien (Brunberg et al. 2005) ger visserligen genomsnittlig bränsleförbrukning, men ger ingen information om variationen över tiden (dvs momentan-förbrukning). Momentan övervakning av bränsleförbrukningen är inte heller någon nyhet, men krävde tidigare specialinstallation av extra givare (tex Sondell (1979)), men kan nu alltså framgångsrikt tillämpas på standardmaskiner om det går att få tillgång till maskinernas datasystem. Som visas i den genomförda studien så är det med denna metodik dessutom smidigt att effektivt studera bränsleförbrukningen under relativt korta arbetspass (Figur 3). Det kan däremot nämnas att om brist på bränsleförbrukningsdata tidigare var en begränsning kan nu snarare överflödet av data upplevas begränsande. Med en registrering varje hundradels sekund växer datamängden snabbt under en studie, och resulterar i datamaterial som nog kan anses som ovanligt stora ur ett skogstekniskt perspektiv. Snabbt ökande datamängder är dock en generell trend, som knappast kan ses som annat än en initial och tillfällig begränsning som lätt kommer att överkommas med ökad hanteringsvana.

#### **4.4 Markpåverkan**

Markkompakteringsmätningar med konpenetrometer var svår genomförbara på studielokalen, eftersom det var svårt att få ner instrumentet utan att träffa på sten. Det var också uppenbart att effekterna av variation i olika maskinekipages marktryck var begränsade på den aktuella marken, utifrån den obetydliga spårbildning som blev efter fem passager (Figur 18). Det kan däremot förväntas finnas större skillnader i markpåverkan på marker med sämre bärighet, varför det vore relevant att i fält kombinera studier av markpåverkan och kostnadseffektivitet vid olika marktryck.

För att sätta resultaten från konpenetromettermätningarna (Figur 19) i perspektiv kan det nämnas att konmotstånd under 1 MPa är i stort sett normalt för fuktig skogsmark, medan värden kring 2 och över är mera vanligt på en välpackad skogsbilväg. Körning som orsakar konmotstånd upp mot 2 MPa är alltså inte önskvärda i skogsmark, eftersom det begränsar både rotframkomlighet och infiltration av nederbörd (stående vatten i hjulspåren).

#### **4.5 Slutsatser och rekommendationer**

Analyserna visar på att det knappast kan anses vara rimligt att som standardutrustning utrusta skotare med påhängsvagn. Vagnen kan däremot troligen utgöra ett bra komplement vid särskilda förhållanden. Det vore därför rimligt att en vagn användes som en gemensam resurs, det vill säga i någon form av samnyttjande mellan flera skotare.

För att maximera nyttan med påhängsvagn bör vissa tekniska detaljer utvecklas. Ett tydligt exempel var att dragkroken på skotaren inte var gjord för att dra en 12 tons vagn. Dessutom bör de mer långsiktiga effekterna på framförallt skotares kran och drivlina utredas ytterligare.

Påhängsvagnens effekt på markpåverkan var svårstuderade på grund av den stenrika och därmed mycket bäriga marken. Studien gav dock visst stöd för att last fördelad på skotare och påhängsvagn gör det möjligt att köra ut stora laster med mindre markpåverkan än med bara last på skotare. Vagnen kan därför troligen utgöra ett bra komplement vid särskilda förhållanden och särskilt på fuktiga marker, men ytterligare studier behövs för att särskilt belysa detta.

## Referenser

- Adolfsén, T. 2011. Släpvnagn efter skotare. Tidningen Skogen 10, sid. 34.
- Afzelius, A., 2012. Skotarvagn för GROT. Examensarbete i Högskoleingenjörsprogrammet i maskinteknik vid Umeå universitets tekniska högskola. Umeå.
- Bell 2010. Bell Timber haulers and long range forwarders; T403 & T302. Bell Equipment. 4 sid. Tillgänglig på: <http://www.bellequipment.com>, under Bell Africa-Products-Forestry-Bell Timbertrucks. Hämtad 2011-11-26.
- Berg, S. 1992. Terrängtypschema för skogsarbete. Uppsala, Skogforsk.
- Berg, R., Bergkvist, I., Lindén, M., Lohmander, A., Ring, E. & Simonsson, P. 2010. Förslag till en gemensam policy angående körskador på skogsmark för svenskt skogsbruk. Arbetsrapport 731. Skogforsk, Uppsala.
- Bergström, D., Nordfjell, T. & Bergsten, U. 2010 Compression processing and load compression of young Scots pine and birch trees in thinnings for bioenergy, International Journal of Forest Engineering 21(1): 31-39.
- Brunberg, T., P. Granlund & B. Nordén 2005. Standardiserad bränslemätning för skördare och skotare. Resultat 10. Skogforsk, Uppsala.
- Eriksson, P. 1998. Påhängsvagn för skotare. Uppsala, Skogforsk: 4.
- ExTe 2013. Com 90, ExTe Fabriks ABs hemsida. [www.exte.se](http://www.exte.se). Besökt 2013-03-23.
- Horn, R., J. Vossbrink & S. Becker 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. Soil and Tillage Research 79(2): 207-219.
- Horn, R., J. Vossbrink, S. Peth & S. Becker 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. Forest Ecology and Management 248(1-2): 56-63.
- John Deere 2012. Skotarna 1510E/1910E. <http://viewer.zmags.com/publication/40e30ae6#/40e30ae6/1>. Besökt 2013-09-19.
- Jonsson, T. 1988. Skotning av trädrester med Bruunett 678 med extra lastbärare. Stencil 1988-07-12. Stiftelsen Skogasarbeten, Spånga.
- Lindroos, O. 2012. Skotningen har många avstånd. Tidningen Skogen nr 6-7, sid 38-39.
- Lindroos & Wästerlund, I. (inskickat manus). Larger loads and decreased damage — the potentials of forwarder trailers with and without ground-pressure restrictions.
- Miyata, E. S. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. General Technical Report GTR-NC-55. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station. St. Paul, Minnesota, USA. 20 sid.
- Nordfjell, T., R. Björheden, M. Thor & I. Wästerlund 2010. Changes in technical performance, mechanical availability and prices of machines used in forest operations in Sweden from 1985 to 2010. Scandinavian Journal of Forest Research 25(4): 382 - 389.
- Nurminen, T., H. Korpunen & J. Uusitalo 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. Silva Fennica 40(2): 335-363.
- Olsson, M.T. & Wästerlund, I, 1983. Isotopteknik för studium av rotskador i gallringar. Skogshögskolan, SLU, Inst f skogsteknik, stencil nr 238.
- Persson, J. 1995. Skogsbränsle från gallring – studie av skotning av bränsleträddelar med extra vagn hos SCA Skog AB. Stencil 1995-02. Stiftelsen Skogasarbeten, Spånga.

- Sondell, J. 1979. Genomförande av ”Skotartest -78” samt redovisning av körhastighet och bränsleförbrukning för skotare i terräng och på väg. Redogörelse 8. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Spånga.
- Sveaskog 2011. Färre markskador med ny vagn. Nyhet publicerad 2011-06-23. Hämtad 2012-11-26 på <http://www.sveaskog.se/Press-och-nyheter/Nyheter/2011/Farre-markskador-med-ny-vagn1/>
- Tiger, K. 2012. Jämförelse av skattat och kört skotningsavstånd. Arbetsrapport 357, Institutionen för skoglig resurshushållning. Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Umeå
- Timbear 2011. Produkter - Lightlogg C, Timbear ABs hemsida. [www.timbear.se](http://www.timbear.se). Besökt 2011-09-26.
- Volungholen, R. 2008. Vehicle for felling trees and/or transport of pieces of timber. World Intellectual Property Organization.
- Wong, J.Y., 2010. Terramechanics and off-road vehicle engineering. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier.
- Vossbrink, J. and R. Horn 2004. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of Forest Research* 123(4): 259-267.
- Wästerlund, I., 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. *Forest Ecology and Management* 11: 171-189.





# SKOTARVAGN

UFO:s skotarvagn är framtagen för att möjliggöra ett större uttag av timmer, massaved, trädelar, grot etc.

Dagens skördare är så effektiva att skotarna inte hänger med och har samtidigt nått sitt maximum vad gäller storlek och kapacitet. Skotarna går helt enkelt inte att göra större med hänsyn till framtida skogsskador.

Med skotarvagnen ökas skotarens kapacitet och flexibilitet. Skogsskadorna minskar genom ett lägre marktryck samtidigt som bränsleåtgången per kubikmeter skog minskar.

Med vagnen kan olika sortiment lastas - ett på skotaren och ett på vagnen.

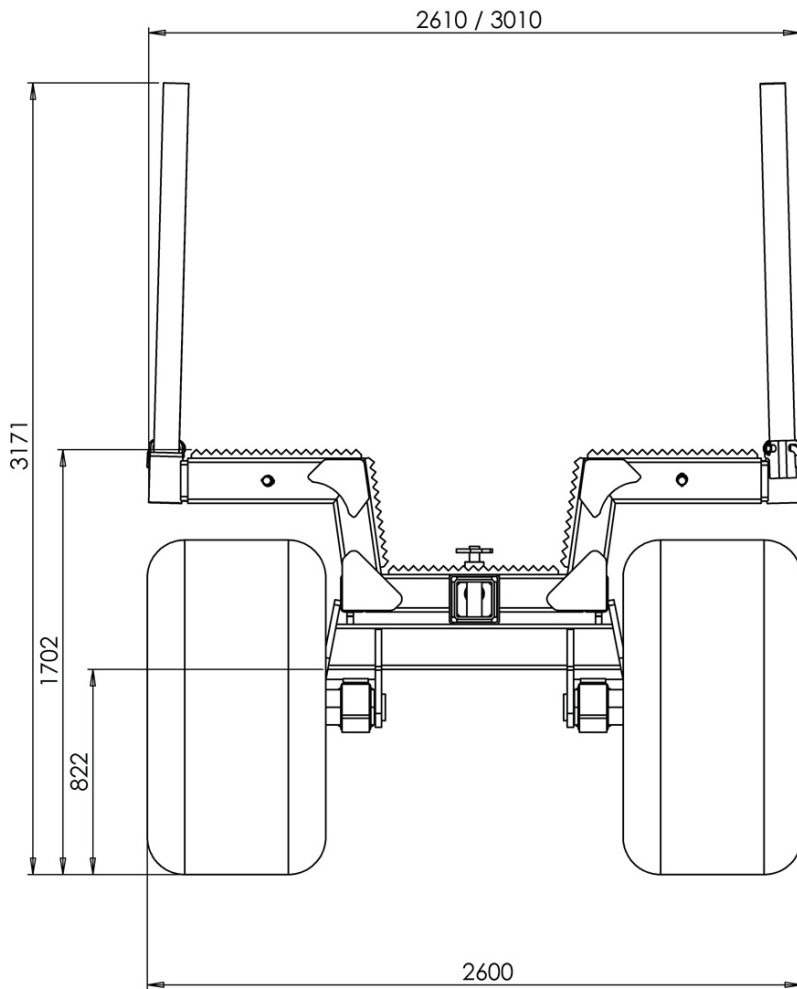
Vagnen lastas med standardkran och kan enkelt flyttas mellan olika skotare då ingen hydraulik erfordras. Vagnen kan också förflyttas mellan olika arbetslag med hjälp av t.ex. en lastväxlarbil.

Stöttor går att ta bort vid förflyttning av vagn.

Kopplas på befintlig krok på skotaren.

---

■ UMEÅ FÖRSÄLJNING AB  
Läringsgatan 8. SE-904 22 Umeå  
Tel: +46 90 12 07 70  
Fax: +46 90 12 00 08  
E-post: [info@ufoab.se](mailto:info@ufoab.se)  
[www.ufoab.se](http://www.ufoab.se)



- Tillåten last: 12000 kg
- Lastarea: 3,8-4,5 m<sup>2</sup>
- Frigångshöjd: 822 mm

Art. Nr	Bredd mm	Maxlängd mm	Minlängd mm	Höjd mm	Vikt kg
94110	2600	5680	4430	3171	2200



**UMEÅ FÖRSÄLJNING AB**  
 Lärlingsgatan 8. SE-904 22 Umeå  
 Tel: +46 90 12 07 70  
 Fax: +46 90 12 00 08  
 E-post: [info@ufoab.se](mailto:info@ufoab.se)  
[www.ufoab.se](http://www.ufoab.se)