



Potential för bränslebesparingar genom hybridisering av hjullastare

Gunnar Larsson

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för energi och teknik

Potential för bränslebesparingar genom hybridisering av hjullastare

Gunnar Larsson

ISSN 1654-9406

2012:044

Uppsala 2012

Nyckelord: hybridisering, elektricitet, mobila maskiner, arbetsmaskiner, hjullastare, energi, ekonomi, prestanda, potential, energianvändning, komponentstorlek, verkningsgrad, effekt, lagringskapacitet, regenerering, rekuperering, skopa, hög, rullmotstånd, kinetisk energi

SAMMANFATTNING

I projektet har studerats hur olika faktorer påverkar möjligheterna till bränslebesparing genom hybridisering. Hur pass stor denna minskning blir beror på en stor mängd variabler som hur fordonet används, miljön det används i (t.ex. rullmotstånd) och själva fordonet.

De variabler som har störst inverkan på de potentiella bränslebesparingarna genom hybridisering är: rullmotstånd, maxhastighet, längd på cykeln.

Genom hybridisering kan energiförbrukningen teoretiskt minska med omkring 60 % för den ”korta cykeln” under de flesta förhållanden för vilken modellen använts. Vid längre cykellängd minskar potentialen för bränslebesparingar. Om alla interna förluster kan undvikas (vilket kan ses som ett teoretiskt extremfall som steg för steg närmas vid full elektrifiering) är en minskning på omkring 80 % teoretiskt möjligt.

Den reellt genomförbara minskningen beror även på hastighet på inbromsningen samt de ingående elektriska komponenternas verkningsgrad och förmåga att hantera effekt. Med nuvarande komponentprestanda och prisnivåer är den begränsande faktorn lagringsmediet. Det som begränsar är dess förmåga att ta emot effekt. Detta göra att för närvarande är superkondensatorer det mesta intressanta alternativet för energilagring för hybridhjulastare.

ABSTRACT

The project studied how various factors affect the potential for fuel savings through hybridization. The magnitude of these savings depends on a number of variables such as how the vehicle is used, the environment in which it is used and the vehicle itself.

The variables that affect the potential for fuel savings the most are: rolling resistance, maximum vehicle velocity and length of driving cycle. It is theoretically possible to reduce the energy consumption by about 60 % through hybridization for the "short cycle" under most circumstances. Longer cycle lengths reduce the potential for fuel savings. If all internal losses can be prevented (equivalent of a theoretical extreme that is step for step approached by full electrification) a reduction of around 80 % is theoretically possible.

Actual fuel saving also depends on the rate of deceleration as well as energy efficiency and ability to handle high power of the involved electric components. At current component capacities and prices the storage medium is the limiting factor, due to its limited capacity to absorb power. At current conditions the most interesting alternative for energy storage is therefore supercapacitors, as they are more able to handle high powers than batteries.

FÖRORD

Denna rapport har finansierats via av Trafikverket genom projektet ”Potential för bränslebesparingar genom hybridisering av hjullastare”. Övriga delar av den senare studien finns presenterad i rapporten ”Hybridisering av mobila maskiner – Översikt av teknikläget samt drivkrafter och begränsningar för framtida utveckling”. Arbetet har i huvudsak genomförts under 2011.

Jag vill rikta ett varmt tack till Magnus Lindgren för kommentarer, feedback och som generöst delat med sig av information och erfarenheter.

Uppsala april 2012

Gunnar Larsson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	NOMENKLATUR	1
2.	BAKGRUND	2
3.	METODIK	3
3.1.	Beskrivning av testserie och använd data	4
3.2.	Ekonomisk utvärdering	6
3.3.	Modell	6
3.3.1.	<i>Fysiska blocken</i>	6
3.3.2.	<i>Krafter på fordonskroppen</i>	6
3.3.3.	<i>Krafter på skopan</i>	7
3.3.4.	<i>Drivlinan</i>	8
3.3.5.	<i>Styrning</i>	9
4.	RESULTAT OCH DISKUSSION	11
4.1.	Återvinnbar energi och teoretiskt minimal bränsleförbrukning	12
4.1.1.	<i>Styrning och cykel(längd)</i>	13
4.1.2.	<i>Omgivningsfaktorer</i>	14
4.1.3.	<i>Maskinstorlek</i>	14
4.1.4.	<i>Verkningsgrad förbränningsmotorn</i>	15
4.2.	Inverkan av elektriska komponenters prestanda	16
4.2.1.	<i>Effekt</i>	16
4.2.2.	<i>Lagringskapacitet</i>	18
4.2.3.	<i>Elektroniken</i>	19
4.3.	Osäkerhetsfaktorer	19
5.	SLUTSATSER	20
6.	REFERENSER	21

1. NOMENKLATUR

A_f	Frontarea, fordon
$E_{bränsle}$	Energien i bränslet som tillförts fordonet
E_{ext}	Externa energiförluster
E_{int}	Interna energiförluster
E_{mat}	Materialfall
E_{mek}	Mekanisk energi
E_{reg}	Fordonets interna energi
E_{tot}	Total energi tillförd till fordonet
F_a	Luftmotstånd
F_g	Gravitation
F_n	Normalkraft
F_r	Rullmotstånd
c_d	Luftmotståndskoefficient
c_r	Rullmotståndskoefficient
v	Hastighet, fordon
ρ_a	Densitet, luft

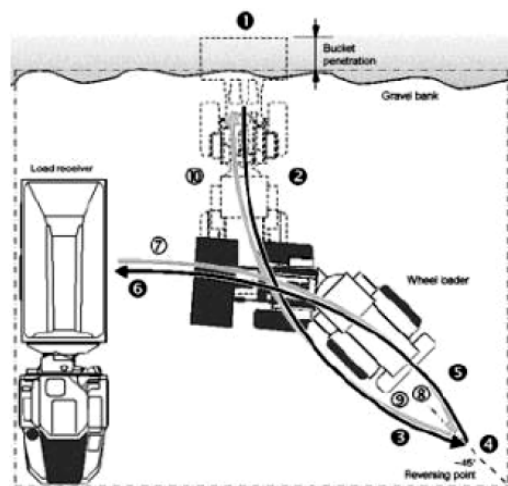
2. BAKGRUND

Under de senaste fem åren har mobila hybridmaskiner börjat komma ut på marknaden och antalet vetenskapliga publikationer inom området har ökat i rask takt. Dessa fordon kan enligt dess tillverkare minska bränsleförbrukningen betydligt; upp till 35 % för hjullastare, ibland ännu mer för t.ex. grävmaskiner (Larsson, 2012). Detta kan på sikt påverka den totala mängden utsläpp från sektorn. Samtidigt är dessa uppgifter inte tredjepartsgranskade. Några standardiserade testcykler för mobila maskiner, motsvarande de för vägfordon, finns inte. Detta gör att data för prestanda ofta är baserade på egna cykler, vilket gör det svårt att veta hur pass representativa resultaten är.

Då det i stor omfattning är ny teknik som introduceras finns det sannolikt en relativt betydande potential som ännu inte är tillvaratagen p.g.a. ekonomiska skäl (elektriska komponenter är dyra och det tillverkas få kommersiella mobila maskiner) och en än så länge begränsad erfarenhet av att bygga hybridfordon. Det kan därför vara av intresse att bedöma hur stora besparingar som är teoretiskt möjliga när tekniken blivit mer mogen och komponentpriserna minskat så att fordonen fått mer konkurrenskraftiga försäljningspriser.

Studien har gjorts på hjullastare. I denna studie är fokus dels på den s.k. ”korta cykeln” där lastaren tar material från en hög och tömmer den i en dumpers som står så nära som möjligt, dels på den långa cykeln (”load and carry”) där högen och platsen där materialet töms ligger på skilda platser. Figur 1 (Filla, 2005) ger en schematisk beskrivning av den korta cykeln.

Vid hybridisering är det möjligt att minska bränsleförbrukningen genom två effekter. För det första genom att drivlinan blir effektivare. För det andra genom att mer energi kan regenereras, d.v.s. fordonets energilager laddas när fordonet minskar sin kinetiska eller potentiella energi, istället för att som i konventionella fordon gå förlorade i bromsar och dylikt. I denna studie är huvudfokus på det senare.



Figur 1 Korta cykeln

En förutsättning för att det ska kunna gå att minska energiförbrukningen genom regenerering är att det åtminstone under någon del av arbetscykeln är av intresse att minska fordonets kinetiska energi mer än vad som sker automatiskt genom de krafter med vilka omgivningen påverkar fordonet. De krafter som verkar på fordonet är under fri körning i huvudsak luftmotstånd och rullmotstånd. Luftmotståndet beror på fordonets hastighet, dess frontarea och hur pass aerodynamiskt utformat fordonet är. Ökar dessa krafter minskar möjligheterna till regenerering då den effekt som krävs för att överkomma dessa förbrukas och inte kan lagras in i batteriet eller kondensatorn.

I högen tillkommer krafter orsakade av passivt tryck från högen, friktion (och kohesion) mellan skopa och hög samt som krävs för att ”klyva” högen så att skopan kan köra in. Materialet i högen påverkar effektiviteten och produktiviteten på flera sätt. Ökad densitet medför att mer material kan flyttas per cykel samt att den energi som krävs för att höja skopan ökar. Den energi som krävs för att höja materialet går förlorad i samband med att skopan töms. Material med större statisk friktion och mindre partikelstorlek har högre rasvinkel (den vinkel som uppstår om materialet läggs in en hög och enbart stoppas av sin friktion). Om kohesionen ökar krävs mer energi att föra in skopan i underlaget.

I denna studie har möjligheterna till energibesparing undersökts i två steg:

1. Hur mycket går det att teoretiskt minska bränsleförbrukningen genom att regenerera energi vid t.ex. inbromsning?
2. Hur mycket av den teoretiskt möjliga minskade bränsleförbrukningen är praktiskt möjlig, baserat på komponenters prestanda? Hur är bränsleekonomi och komponentstorlekar relaterade?

3. METODIK

För att bedöma den inverkan som hybridisering kan ha på energianvändningen hos hjullastare har en modell gjorts i Simulink. För interaktionen mellan skopa och hög har Matlab-kod använts. Modellen har körts i batchläge för att kunna studera den inverkan som olika parametrar har. Som indata för modellen har variabler för fordonets geometri och dess drivlina, fordon/omgivningsinteraktion och styrning använts. Modellen returnerar dels hur mycket energi som använts för olika aktiviteter, dels tillståndsvariabler som fordonets hastighet, skopans höjd etc.

Den energi som tillförs ett fordon genom dess bränsle, $E_{bränsle}$, kan lämnas det på många olika sätt. Totalt har 24 energiflöden simulerats, fördelade på nedanstående kategorier:

- a. Interna energiförluster, E_{int}
 - Ej återvinningsbara, men ersättningsbara (med energimässigt bättre komponenter) och optimerbara (t.ex. genom att använda dieselmotorn vid optimalt varvtal/vridmoment).
 - **I denna studie har följande komponenter simulerats:** dieselmotor, momentomvandlare, hydraulisk motor/pump, kraftelektronik, batteri/superkondensator samt elektrisk motor/generator.
- b. Ökning av fordonets interna energi, E_{reg}
 - Regenererbar energi, då fordonets rörelse eller potentiella energi minskar (t.ex. vid inbromsning samt sänkning av aggregat) är det möjligt att konvertera denna energi till t.ex. elektrisk energi i ett batteri eller en superkondensator. I konventionella drivlinor sker detta inte i någon större omfattning.
 - **I denna studie:** fordonets kinetiska energi, skopans potentiella energi, energi i batteri/superkondensator och hydraulisk ackumulator.
- c. Externa energiförluster, E_{ext}
 - Påverkas inte (direkt) av drivlinans utformning
 - **I denna studien:** rullmotstånd, luftmotstånd, slirförluster och motstånd från högen.
- d. Materialfall, E_{mat}
 - **I denna studien:** Materialet i skopan (töms från en högre position än det togs)

Flödena ovan sker i följande ordning: Drivlinan har all bränsleenergi till sitt förfogande, denna energi omvandlas antingen till mekanisk energi hos fordonet eller interna förlusterna. Den mekaniska energin används sedan till att antingen öka fordonets interna energi, vilket också orsakar externa förluster eller medför att arbete utförs på omgivningen: $E_{mek} = E_{reg} + E_{ext} + E_{mat}$.

För att beräkna möjligheten till minskad bränsleförbrukningen genom regenerering behöver man veta andelen regenererbar energi, E_{reg} , i förhållande till den totala mängden tillförd bränsleenergi, $E_{bränsle}$. Denna beror dels på verkningsgraden på energiomvandlingen till mekanisk energi, dels på hur mycket av den mekaniska energin som är regenererbar:

$$E_{reg}/E_{bränsle} = (E_{mek}/E_{bränsle})(E_{reg}/E_{mek}) \quad (1)$$

Om samma primärmotor används förändras inte kvoten $E_{mek}/E_{bränsle}$ vid hybridisering. Därmed beror möjligheterna att minska bränsleförbrukningen enbart på kvoten E_{reg}/E_{mek} , d.v.s. hur stor del av vad motorn producerar som är regenererbart (och inte externa förluster eller arbete på omgivningen). För ett helt elektriskt fordon blir energibesparingen större då kvoten $E_{mek}/E_{bränsle}$ förändras drastiskt p.g.a. den elektriska motorns höga verkningsgrad.

Teoretiskt kan energianvändningen minimalt bli den energi som täcker externa förluster och förlorad potentiell energi när skopans last töms, d.v.s. $E_{ext}+E_{mat}$. Detta förutsatt inga förluster sker i drivlinan. Detta är inte praktiskt möjligt, men kan ses som ett idealfall som elektriska fordon kan närma sig då de inte är begränsade av Carnots teorem. Därmed är den teoretiskt möjliga minskningen av bränsleförbrukningen:

$$E_{max} = E_{bränsle} - E_{ext} \quad \text{och} \quad \frac{E_{min}}{E_{bränsle}} = 1 - \frac{E_{ext}}{E_{bränsle}} \quad (2)$$

I praktiken kommer den potentiellt möjliga bränslebesparingen inte att uppnås, varken vid enbart hybridisering eller för fullt elektriska fordon, då inga processer är förlustfria och ekonomiska och praktiska skäl begränsar hur pass stora komponenter som kan användas. För att undersöka vilka som är de viktigaste begränsande faktorerna genomfördes simuleringar där batteri- och elmotorstorlek varierades från noll till total mängd använd energi respektive högsta inbromsningseffekt.

3.1. Beskrivning av testserie och använd data

I tabell 1 anges de variabler som varierats och motiven för valda testvärden. För fordonsvariabler som vikt, fordonsstorlek, skopstorlek m.m. har uppgifter från Volvos hjullastarserie använts. Detta inkluderar också motorns varvtal/vridmomentkurva, vilken finns redovisad i produktbladen för de olika modellerna. I standardfallet har värden för modellen L350F använts, men även L120G och L250G har modellerats.

Fordonet har tre styrvariabler: hastighet, skophöjd och skoplutning. Maxhastigheten är i normalfallet satt till 6 m/s. Detta motsvarar ungefär 20 km/h vilket är en typisk maxhastighet för hjullastare (Grammatico et al., 2010). Det är också vad fordonet i normalfallet hinner uppnå under den korta cykeln i denna simulering. Om maxhastigheten sätts högre än så påverkar detta bara den uppnådda maxhastigheten indirekt (p.g.a. att värdet för maxhastigheten interpoleras från en tabell kan fordonet accelerera lite längre innan det måste börja bromsa för att vända/stanna). Även i de fall då mindre, snabbare, hjullastare testats är deras topphastighet på upp till 46 km/h inte mycket högre och denna hastighet nås aldrig under den korta cykeln då det inte finns tillräckligt med tid att accelerera fordonet.

Tabell 1 Standardvärden för olika parametrar

Variabel	Standardvärde	Variation	Källa/motiv
System			
Tidsupplösning	0,01 s	-	-
Fordonet			
Vikt	49,810 kg		Volvo L350
Frontarea	7,56 m ²		Volvo L350, (delvis uppskattad)
Drivlina			
Maxeffekt, förbränningsmotor	397 kW	300-500 kW	Volvo L350
Maxverkningsgrad, förbränningsmotor	40 %	30-50 %	
Verkningsgrad, hydraulik, generering	93 %	80-93 %	Achten, 2008; Minav, 2009; Hui, 2010
Verkningsgrad, hydraulik, regenerering	93 %		
Verkningsgrad, elektronik, generering	92 %		Gover, 2009
Verkningsgrad, elektronik, regenerering	87 %		
Verkningsgrad, kraftelektronik	97 %		Tolbert och Peng 2008
Verkningsgrad, batteri	97 %		Nguyen, 2005
Styrning			
Cykellängd	36,18 m	36,18-250 m	Volvo L350s dubbla vändradie
Cykellängd, del bakåt	18,09 m	-	Volvo L350s vändradie
Maxhastighet	6 m/s	2-10 m/s	Grammatico et al., 2010
Hastighet vid lastning	1 m/s		Uppskattad
Tömningsperiod	2 s		Uppskattad
Lyfthöjd	100 % (7,46 m)		Volvo L350
Interaktion			
Luftmotståndskoefficient	0,9		Wei et al., 2008
Rullmotståndskoefficient	0,015		Sain och Quinby, 2004; Andersen et al., 2011)
Friktion däck/underlag	0,4		
Luftdensitet	1,22 kg/m ³		
Material i högen			
Densitet	2,000 kg/m ³		
Statisk friktion, intern	0,4		
Statisk friktion, rel. skopan	0,4		

3.2. Ekonomisk utvärdering

De alternativ för lagring av regenererad energi som undersökts har varit litiumjonbatterier och superkondensatorer. De har alla olika styrkor och svagheter, som kort beskrivs i tabell 2 (Doucette och McCulloch, 2011). För elmotorn har värden från Simpsons (2006) kortsiktiga scenario använts för vikt och kostnadsbedömning. Detta innebär att motorns massa (kg) är $21,6 + 0,833 \times \text{kW}$ och kostnaden (i dollar) är $21,7 \times \text{kW} + 425$.

Tabell 2 Alternativ för att lagra energi i fordon

Egenskap\Lagringsmedium	Batteri	Superkondensator
Energitäthet (Wh/kg)	108	5,62
Kostnad (\$/kWh)	1 000 – 2 000	10 000-39 000
Effekttäthet (kW/kg)	3,3	4,3
Kostnad (\$/kW)	33-66	13- 51

3.3. Modell

Modellen består av två fysiska block: fordonskroppen och skopan. Dessa påverkas av krafter som antingen kommer från omgivningen eller från drivlinan. Både fordonskroppen och skopan har ett omgivningskraftsblock där krafterna från omgivningen beräknas baserat på fordonskroppens/skopans rörelse och position (beskrivna nedan). I fallet med skopan innehåller blocket Matlab-kod för att bättre beskriva interaktionen mellan skopan och högen.

Fordonskroppen innehåller ett drivlineblock. Drivlineblocket består av tre underblock: styrningen, själva drivlinan samt ett outputblock som returnerar resultaten av simuleringarna (t.ex. hur mycket energi som använts). Styrblocket omvandlar omgivningskrav som efterfrågad fordons hastighet till efterfrågad effekt. Drivlineblocket består av komponenter för de olika energiomvandlarna (förbränningsmotorn; elmotorn/-generatoren; hydraulpumpen/-motorn), energilagren (batteri, ackumulator) och transmissionen samt beskriver hur effekt flödar mellan dessa olika underblock.

Till dessa block kommer ett övergripande styrblock som bestämmer när de olika delarna av cykeln börjar och slutar baserat på fordonets position och om skopan är full samt sätter efterfrågad fordons hastighet, skophöjd och massa material i skopan som funktion av delcykel samt plats i delcykeln.

3.3.1. Fysiska blocken

För fordonskroppen samt skopan används en fysisk modell för dess grundläggande fysiska egenskaper (hur kraftpåverkan ändrar hastighet och position, orsakar rotation eller ger upphov till normalkrafter beroende på hur interaktionen sker samt hur rörelseenergi och potentiell energi förändras). Krafter verkar antingen på skopan eller på fordonet. Kraftöverföring sker mellan de bägge (t.ex. ökar normalkraften på fordonets hjul som en följd av att skopans vikt ökar då den fylls).

3.3.2. Krafter på fordonskroppen

Då ett fordon kör utan att utföra något aktivt arbete på omgivning påverkas det av i huvudsak tre krafter: luftmotstånd (F_a), rullmotstånd (F_r) och gravitation F_g . I denna studie antas underlaget antagits vara plant varför gravitationen inte har någon nettoeffekt på själva fordonskroppen (men däremot på skopan som höjs och sänks). I högen påverkas skopan av ett flertal krafter, beskrivna längre ner.

Den aerodynamiska kraften, $F_a(t)$ ges av:

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d v^2, \quad (3)$$

där ρ_a är luftens densitet, A_f fordonets frontarea, c_d luftmotståndskoefficienten och v fordonets hastighet. Luftmotståndskoefficienten beskriver hur pass aerodynamiskt fordonet är, ett högre värde innebär att fordonet är mindre aerodynamiskt. Det är ont om data på dessa för mobila maskiner, sannolikt beroende på att de har betydligt mindre betydelse för fordonens energianvändning än för vägfordon då fordonen kör långsammare (samtidigt som de väger mer och därför har större rullmotstånd).

Rullmotståndet, $F_g(t)$, orsakas främst av att fordonets däck periodiskt deformeras under körning. Detta då en jämvikt uppstår varvid däckens yta mot marken bli så pass stor att lufttrycken i däcken är lika stort som fordonets tryck på underlaget. Rullmotstånd används främst för att beskriva fordon på väg. För fordon i terräng kan förhållanden vara mer komplicerade då fordonen kan sjunka ner i underlaget och behöva "ploga" sig fram genom detsamma (Coutermarsh, 2007; Muench, 2006). Om fordonet skulle sjunka ner i underlaget beror den kraft som verkar på hjulen på: hastigheten med vilken fordonet kör, antalet gånger som underlaget blivit överkört samt markens egenskaper. Det gör att förhållandet mellan t.ex. fordonshastighet och energiåtgång för förflyttning i så fall följer andra samband än för fasta underlag (Harnisch et al., 2005).

Vid körning av hjullastare är underlaget i allmänhet någorlunda hårt varför formeln för rullmotstånd på väg har använts i denna studie. Rullmotståndet ges av (Chan, 2008):

$$F_r(t) = c_r F_n, \quad (4)$$

där c_r är rullmotståndskoefficienten och F_n normalkraften. Det innebär att den energi som det krävs för ett fordon för att övervinna rullmotståndet enbart beror på sträckan, fordonets vikt och rullmotståndskoefficienten och därmed är oberoende av fordonets hastighet.

Den kraft som fordonet kan utväxla med underlaget (och därmed accelerera med) beror på normalkraften på däcken samt friktionen. Kraft som överstiger denna kommer inte att gå till att accelerera fordonet framåt utan går istället till att accelerera hjulens rotationshastighet, d.v.s. fordonet slirar. I fallet med en hjullastare kan detta ske genom för högt effektuttag vid låg hastighet; eftersom kraften ges av $F=P/v$ blir kraften mycket hög då hastigheten är låg. Det kan också ske genom att operatören styr skopan på ett olämpligt sätt, vilket medför att en del av fordonets normalkraft läggs på skopan istället för på framhjulen, vilket medför att den kraft som det är möjligt att överföra minskar. I modellen antas att fordonet körs av en så pass skicklig förare att ingen slirning förekommer, genom att effekten begränsas till den vilken traktionen tillåter.

3.3.3. Krafter på skopan

Ett flertal krafter verkar på skopan när hjullastaren kör in i högen:

- Passivt tryck från högen
- Friktion (och kohesion) mellan skopa och hög
- Klyvningskraft

Den första kraften kommer från att tyngdkraften från materialet i högen verkar neråt genom skopan. Denna kommer inte bara från det material som finns i skopan (d.v.s. rakt ovanför skopbotten), utan även en del material som finns i högen något innanför skopan. Detta beror på att när skopan kör in i högen ändras tryckfördelningen inne i högen, vilket gör att detta material lossnar. Det andra kommer från friktionskraften mellan skopan och materialet i

högen, medan den tredje kommer att material måste tryckas undan för att skopan ska kunna komma in i högen. För interaktionen mellan skopan och materialet i högen har Ericsson och Slättengren's modell (2000) använts.

Skopans dimensioner påverkar följderna av de effekter som beskrivits i föregående stycke. En bredare skopa ("bred" här definierad som dimensionen vinkelrätt mot fordonet, medan "djup" används för dimensionen i fordonets riktning) medför att mer energi går åt till att övervinna kohesionskrafterna för att penetrera högen. En större skopa medför att mer material kan lagras i skopan. Om inte drivlinans kapacitet ökar samtidigt ökar risken för slirning. Detta eftersom en högre massa medför att fordonet går långsammare.

Potentiell energi hos materialet som finns i skopan kan gå förlorad (i den mening att det inte kan regenereras) antingen då materialet faller ur skopan då den töms eller genom att materialet sjunker i skopan i samband med tömning och fyllning. Potentiell energi förloras också i högen i samband med att lastaren lämnar densamma. Lutningen på högen, vilken kallas dess rasvinkel, beror på den stationära friktionen hos materialet i högen (Smith och Smith, 2000). Då skopan lämnar efter sig en urgröpning som på vissa ställen har en skarp vinkel än rasvinkeln så kommer material att falla tills att lutningen minskat ner till rasvinkeln. Denna och andra externa energiflöden har inte modellerats då det inte påverkar fordonet.

För att göra kontrollogiken för fordonet lättare antas högen inte börja förrän en meter in i fyllningsfasen. Högen "nollställs" efter varje fyllning, d.v.s. den urgröpning som bildats då skopan tagit upp material lämnas inte kvar. Inte heller förändras högens egenskaper mellan fyllningarna, vilket annars kan ske till viss del genom t.ex. kompression av materialet i högen.

3.3.4. Drivlinan

Mobila maskiner använder dieselmotorer, vars verkningsgrad beror på dess varvtal och vridmoment. I denna studie har data från en maskintillverkare används. För att enkelt kunna testa hur variationer i verkningsgrad påverkar resultatet har motormappen normaliserats genom att alla verkningsgrader delats med den högsta verkningsgraden som motorn kan uppnå (vid optimalt varvtal och vridmoment). Detta har sedan multiplicerats med olika satta maximalverkningsgrader på 30-50 %, med 40 % som normalfall. Bränslet antas levereras till motorn utan förluster. De olika fordonsmodellerna har antagits ha identiska motormappar, där det enda som skiljer är att vridmomentet ökar linjärt som funktion av angiven maxeffekt.

För de elektriska och hydrauliska motorerna har en fast verkningsgrad antagits. Om den efterfrågade effekten är positiv (t.ex. vid acceleration) körs elmotorn som en sådan, förutsatt att det finns energi i batteriet/superkondensatorn. Energin passerar kraftelektroniken och den elektriska motorn till hjulen, med därtill hörande förluster. Om efterfrågad effekt är negativ (t.ex. vid inbromsning) körs elmotorn som en generator och lagrar rörelseenergin som elenergi (återigen via kraftelektroniken med därtill hörande förluster). Om elmotorn av någon anledning inte kan leverera full efterfrågad effekt så efterfrågas resten från dieselmotorn. Detta kan ske om det inte finns någon tillgänglig elenergi i batteriet eller om den efterfrågade effekten överstiger elmotorns maxeffekt.

Fordonet har fyra växlar. Förhållandet mellan utväxlingen hos dessa är baserat förhållandet mellan fordonens maxhastighet för de olika växlingslägena enligt Volvos produktblad. Modellen väljer växel så att varvtalet i motorn alltid är så nära det optimala varvtalet som möjligt (d.v.s. modellen minimerar skillnaden i rpm mellan faktiskt och optimalt varvtal). Utifrån aktuell hastighet på fordonet samt vald växel beräknas aktuellt varvtal. Från en motormapp beräknas utifrån varvtalet verkningsgraden och den maxeffekt som motorn kan leverera. Momentomvandlaren "aktiveras" om fordonet är i första växeln och motorns varvtal

annars skulle hamna under dess operativa område. Annars förutsätts dess lock-up vara inkopplad, så att varken uppväxling eller förluster sker.

För hydrauliken gäller att först undersöks om den tillgängliga energin i ackumulatorn överstiger en miniminivå. Om så är fallet används den direkt. Annars efterfrågar systemet energi från dieselmotorn tills miniminivån uppnås.

3.3.5. Styrning

Fordonets styrning består av två delar, dels en extern som beskriver fordonscykeln, dels en intern som beskriver hur fordonet anpassar sig till de externa förhållandena.

Körcykel

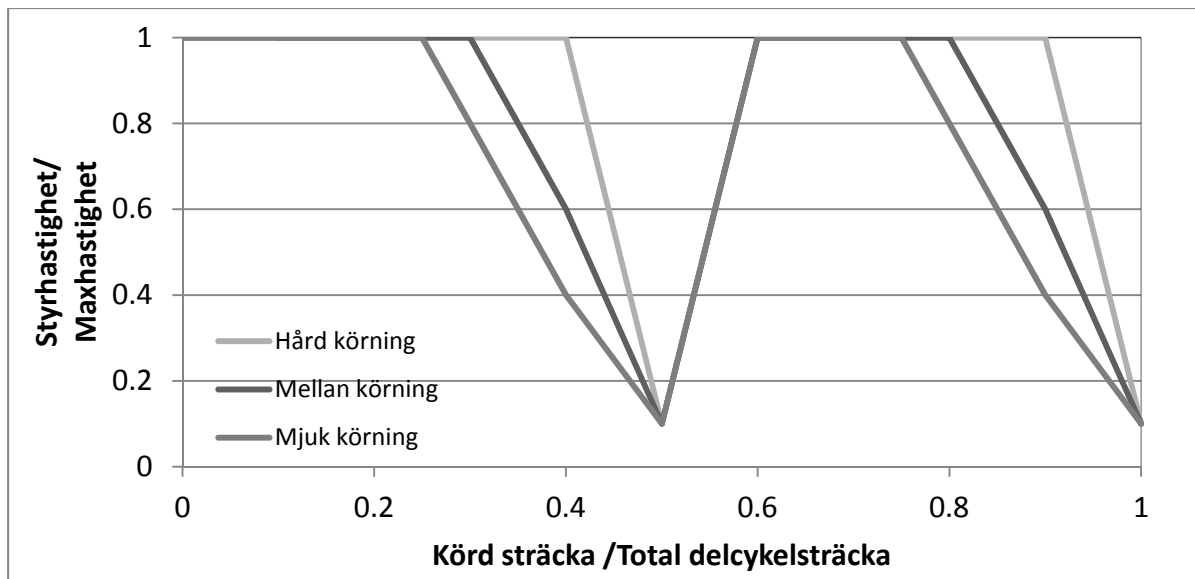
Cykeln har antagits bestå av fyra delar: körning mot hög (från dumper), fyllning, körning från hög (mot dumper) och tömning. De olika delarna har antagits vara slutförda när en viss cykelsträcka körts (för körning mot och från hög), när skopan blivit fylld med material så att dess maxvikt nåtts (för fyllning) eller när skopan tömts på material (för tömning).

För den korta cykeln begränsas den minimala körsträckan av fordonets vändradie samt dumpersens relativa position i förhållande till högen. I denna studie har körsträckan till och från högen satts till dubbla fordonets vändradie för den korta cykeln och varierande angivna längder för långa cykeln. I samtliga fall antas att under första halvan av ”körning mot hög” och ”körning mot tömning” backar fordonet en vändradie bakåt. För den korta cykeln fortsätter fordonet sedan en vändradie framåt. För den långa cykeln är sträckan framåt så pass lång att den satta totala cykellängden uppnås.

För de olika cykeldelar har olika former av styrning använts. Styrningen har gällt:

- Fordonet (hastighet samt riktning: framåt/bakåt)
- Skopan (höjd och lutning)

Riktningen är bakåt för första halvan av cykeln (d.v.s. fordonet backar bort från dumpern) och framåt under andra halvan (d.v.s. fordonet kör fram mot högen). Målhastigheten är satt från en normerad tabell (se figur 2), vilken multiplicerats med en maxhastighet (som varierar mellan simulationerna). Målhastigheten är, liksom alla övriga styrvariabler under denna delcykel, en funktion av körd sträcka i cykeln.



Figur 2 Hastighetsprofil

Målhöjden på skopan följer även denna en normerad tabell. I detta fall multiplicerat med en maxhöjd. Under den första delcykeln (mot högen) sänks skopan från maxhöjd i början av cykeln, till en position något över marknivån i slutet av cykeln. Skopans mållutning varierar linjärt. Vid delcykelns start är dess lutning samma som vid avslutad tömning. Vid cykelns slut lutar inte skopan.

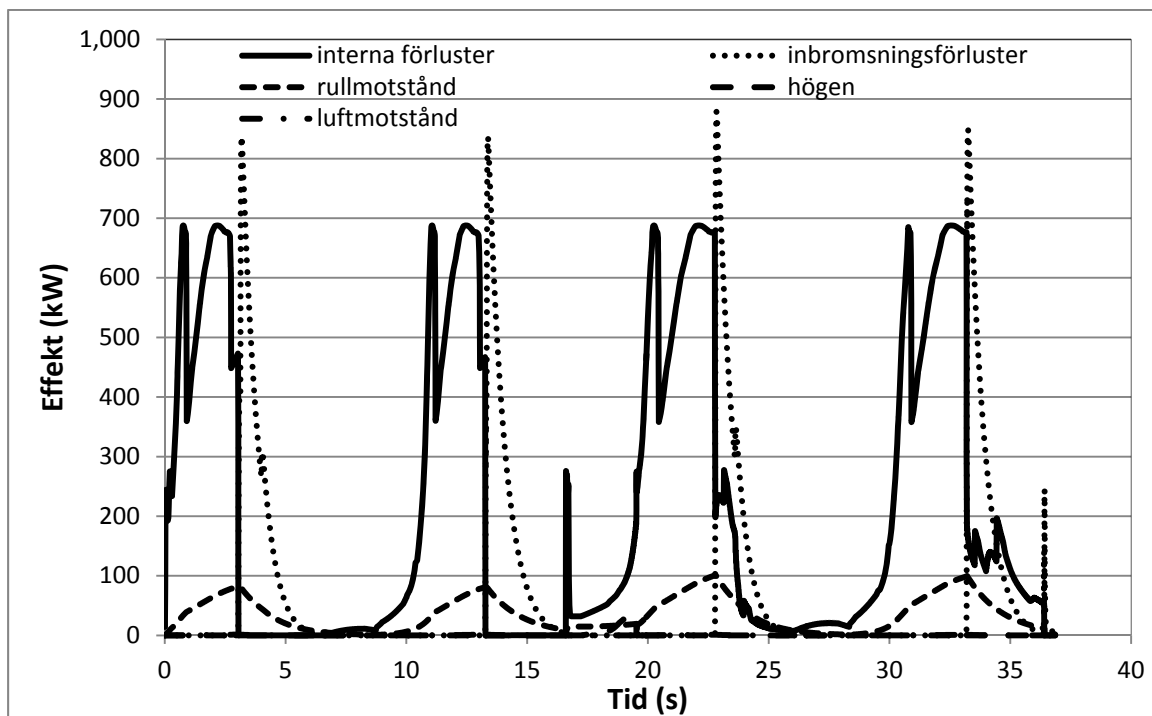
Vid skopfyllning är riktningen satt till framåt och mål hastigheten är konstant låg (1 m/s). Skopans mål höjd ökar linjärt som funktion av skopans position i högen och en höjningsvinkel. Höjningen sker relativt långsamt. Skopans mållutning ökar som funktion av massan i skopan upphöjt till fyra. Maxlutningen är halva rasvinkeln (det antas att föraren kommer att fortsätta vinkla upp skopan under utkörningen).

Körningen från högen följer i stort den mot högen. Hastighetsprofilen antas vara densamma som vid körningen in mot högen. Skopans höjd ökar enligt tabell från höjden i slutet på fyllningen till skopans maxhöjd. Skopans lutning ökar linjärt från halva rasvinkeln till $(\pi/2)$ - (skopans bakvinkel/2), d.v.s. skopans mitt är rakt uppåt i slutet av delcykeln. Vid skopans tömning är fordonet satt till en låg hastighet framåt. Mål höjden är satt till maxhöjden och mållutningen till en maximal negativ lutning (så att materialet snabbt glider ur skopan).

Beräkning av efterfrågad effekt baserat på efterfrågad prestanda

För att bedöma hur mycket effekt de olika aktuatorerna vill ha från drivlinan användes skillnaden mellan efterfrågat och aktuellt värde på relevanta variabler (fordonshastighet, skophöjd och skoplutning) tillsammans med PID-kretsar för att förändra systemet från aktuellt till eftersträvat värde (t.ex. när fordonet accelererar i början av cykeln) samt beräknade effektförluster vid aktuell verksamhet (rull- och luftmotstånd m.m.) som behöver uppvägas för att upprätthålla aktuellt värde (t.ex. för att undvika att fordonet automatiskt bromsar in). Modellen försöker uppnå de efterfrågade värdena, som t.ex. hastigheten, genast. Ingen hänsyn tas till eventuell responstid hos ingående komponenter. Om den totala effekten som efterfrågas från drivlinan överstiger dess kapacitet att leverera effekt så förses i första hand framdrivningen med energi. I andra hand laddas den hydrauliska ackumulatören. Detta händer framförallt då fordonet accelererar i början av dess rörelse till eller från högen och dumpern.

4. RESULTAT OCH DISKUSSION



Figur 3 Energianvändning under en cykel

I figur 3 visas de största posterna för vad den tillförda bränsleenergin går till under en ”bascykel”, baserat på standardparametrar som angivits i tabell 1 för ett konventionellt fordon utan eldrivlina. Denna bascykel är för ett stort fordon på 49 810 kg. Totalt använder fordonet 12 225 000 J eller 3,4 kWh under cykeln. Då cykeln varar i 37,08 s medför detta en genomsnittlig bränslekonsumtion på 329,7 kW, motsvarande en bränsleförbrukning på i storleksordningen 30 l/h.

Det mesta av energin dissiperas genom interna förluster i fordonet. Detta sker främst direkt i förbränningsmotorn (där förlusterna är på minst 60 % p.g.a. att maxverkningsgraden är satt till 40 %), samt vid låga hastigheter i momentomvandlaren. En del förluster sker i hydrauliken, men dessa är relativt små då den antagna verkningsgraden i hydraulpumpen/-motorn är 93 %. Då inga elektriska komponenter används sker inga förluster i dessa.

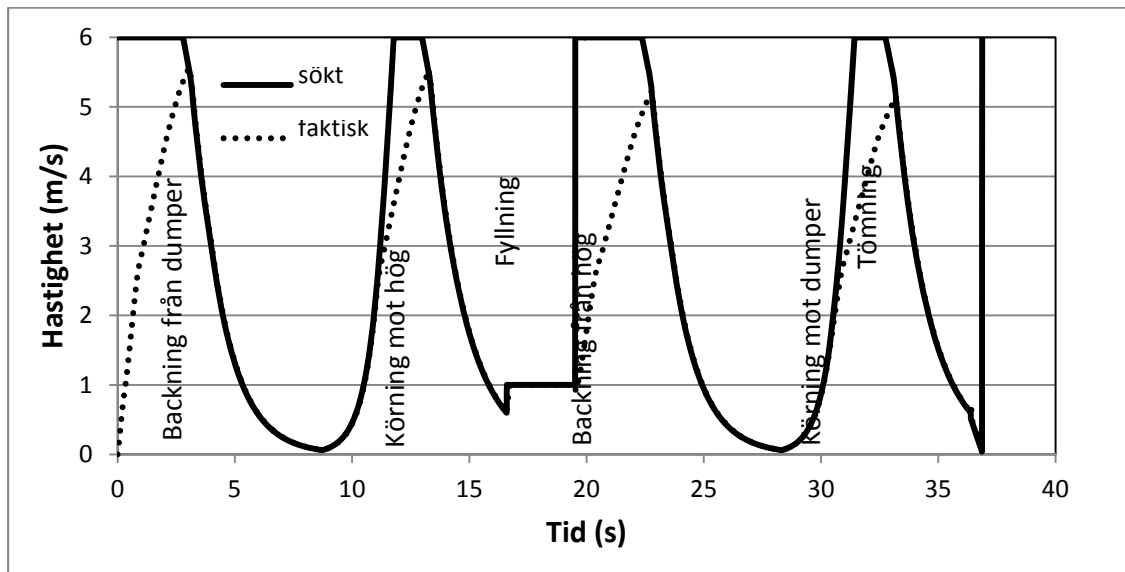
Externa förluster sker framförallt p.g.a. rullmotståndet. Rullståndet verkar med en kraft på 7 330 N ($49\,810 \times 9,81 \times 0,015$) under en längd på 72,36 m, vilket medför att en energianvändning på cirka 530 000 J krävs för att övervinna rullmotståndet sett över en bascykel. Då fordonet även när det rör sig som snabbast är relativt långsamt är luftmotståndet är betydligt lägre, vid en hastighet på 1 m/s är det 8 N, vid en hastighet på 6 m/s är det 300 N och vid en hastighet på 10 m/s är det 830 N ($(10 \text{ m/s})^2 \times 1,22 \text{ kg/m}^3 \times 7,56 \text{ m}^2 \times 0,9$).

En betydande mängd energi används för att lyfta materialet i skopan. För en massa på 7 ton som lyfts till fordonets maximalhöjd blir energiåtgången $7\,000 \times 9,81 \times 7,46 = 512\,000 \text{ J}$. Den potentiella energin hos lasten antas gå förlorad (lasten antas nå marknivå, även om dumpersen golv är belägen betydligt högre än så).

Den energi som går åt för arbete i högen varierar i betydande omfattning med hur pass fylld skopan hunnit bli. Det bör påpekas att i modellen är materialet i högen grus, som är relativt lättarbetat samt att framförallt klyvkraften är svårmodellerad och beskrivningen av skopans rörelse är en förenkling av hur skopan normal fylls (Youtube/Swecon (2011)).

Om fordonet uppnår en hastighet på 6 m/s kommer det att ha en kinetisk energi på $6^2/2=18 \text{ J/kg}$, eller 896 580 J. Denna energi kommer att antingen bromsas upp eller (helt eller delvis) lagras i något lagringsmedium på fordonet genom regenerering. Detta sker fyra gånger per cykel: vid backning och framåtkörning under körning mot hög respektive dumper.

Förändringar i de variabler som undersökts innebär inte bara att fordonet kommer att använda den energi det tillförts annorlunda. Det kommer också att bete sig annorlunda, med olik hastighet beroende på att tillgången på energi kommer att variera. Som framgår av figur 4 tar det tre sekunder för fordonet att nå topphastigheten (vilken i detta fall blir något under den sökta, då fordonet hunnit komma så nära vändpunkten att det behöver sakta ned), medan det relativt enkelt når sökt skophöjd och vinkling. Anledningen till att det tar längre tid att nå topphastigheten är att mängden energi som behöver tillföras fordonet är betydligt större för att accelerera det till topphastigheten än för att höja/luta skopan.



Figur 4 Sökt och faktisk hastighet

4.1. Återvinnbar energi och teoretiskt minimal bränsleförbrukning

I denna sektion redovisas de grundläggande energiflödena under olika förutsättningar samt vilken bränslebesparing som är teoretiskt möjlig genom enbart regenerering, d.v.s. baserat på ekvation 1. I dessa fall antas att ingen elektrisk drivlina finns utan att all kinetisk energi hos fordonet bromsas bort när hastigheten minskas. Kvoten är alltså mellan energin som bromsas bort (och som teoretiskt skulle kunna utnyttjas i en hybrid) i förhållande till den tillgängliga energin som kommer ut ur drivlinan.

4.1.1. Styrning och cykel(längd)

Tabell 3 Påverkan av sökt maxhastighet

Sökt max-hastighet	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (MJ)
3 m/s	6	68	19	7	19	74	7,0
4 m/s	13	67	15	6	38	79	8,9
5 m/s	19	64	12	5	53	86	10,8
6 m/s	21	64	11	4	57	85	12,2
8 m/s	20	64	11	4	56	84	13,1
10 m/s	19	65	11	4	55	84	13,7

Den återvinnbara kinetiska energin (kinetisk energi som går förlorad vid inbromsning) ökar vid högre maxhastighet, som framgår av tabell 3, vilket är väntat då fordonets kinetiska energi vid maxhastigheten är högre. Det bör påpekas fordonet under den använda (korta) cykeln enbart når upp i en hastighet på kring 6 m/s (~20 km/h), oavsett sökt maxhastighet.

Trenden döljs något av att förbränningsmotorns verkningsgrad varierar med varvtal, vilket styrs av transmissionen och fordonets hastighet. I vilken omfattning som motorn verkar nära optimalt varvtal/vridmoment kan därför variera mer eller mindre slumpmässigt mellan de olika alternativen.

Hastighetsprofilen, hur pass långt före högen som föraren börjar minska farten, har låg inverkan på energianvändningen. De olika profilerna medför samma fördelning mellan olika förluster för alla alternativ, med en skillnad mellan alternativen på under en procent. Detta beror på att de externa förlusterna domineras av rullmotståndet och inte luftmotståndet. Då rullmotståndet inte är hastighetsberoende blir påverkan liten.

Vid ökad cykellängd ökar maxhastigheten och därmed mängden kinetisk energi som kan regenereras. Detta då fordonet har mer tid på sig att accelerera upp till sökt maxhastighet. Samtidigt ökar förlusterna per cykel p.g.a. den ökade cykellängden. Nettoresultatet blir, som framgår av tabell 4, att vid ökad cykellängd minskar möjligheterna till regenerering. Detta då den återvinnbara kinetiska energin ökar långsammare än förlusterna till rullmotstånd.

Tabell 4 Påverkan av cykellängd

Cykellängd	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
36,18 m	21	64	11	4	57	85	12,2
50 m	22	63	11	3	62	86	16,4
100 m	19	64	15	2	53	83	23,6
150 m	16	64	19	2	44	80	28,5
200 m	12	64	22	2	34	77	32,1
250 m	9	64	25	1	27	74	35,5

4.1.2. Omgivningsfaktorer

Då luftmotståndet inte har någon större påverkan på den totala bränsleförbrukningen har inte heller hur pass aerodynamiskt fordonet är någon betydande påverkan, inget flöde påverkas mer än 1 % av en ökning av luftmotståndskoefficienten från 0,5 till 1,5. Rullmotståndet har däremot en betydande påverkan på mängden regenererbar energi, som framgår av tabell 5. Detta då det står för en stor del av de externa förlusterna.

Tabell 5 Påverkan av rullmotståndskonstant

Rullmotståndsfaktor	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
0,015	26	64	6	4	71	90	11,5
0,02	24	64	8	4	67	88	11,7
0,03	21	64	11	4	58	85	12,2
0,05	16	64	16	4	45	80	13,1

Som noterats ovan är mängden energi som går åt till materialarbete i denna studie relativt liten. För att undersöka dess betydelse varierades dess styrka upp till 10 gånger det i basfallet. Detta innebar framförallt att drivlinans snittverkningsgrad försämrades, som framgår av tabell 6, då de låga hastigheterna med vilket fordonet kör i högen medför att varken motor eller momentomvandlare utnyttjas optimalt. Det är värt att komma ihåg att detta är de förhållanden vid vilka elektriska motorer fungerar som bäst, vilket gör att möjligheterna till ökad effektivitet i drivlinan är stor. Samtidigt var påverkan på de olika energiflödena liten, detta beroende på att även om krafterna är stora är sträckan i högen kort.

Tabell 6 Påverkan av högen

Rel. faktor	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
1	21	64	11	4	58	85	12,2
10	19	66	11	4	57	85	13,1

4.1.3. Maskinstorlek

De olika modellerna har ungefär samma förhållande max motoreffekt/maskinvikt på 8,0 till 10,4 W/kg. De uppnår därför ungefär samma maxhastighet och har ungefär samma energiflöden, som framgår av tabell 7. Notera att fordonsetiketterna bara kommer sig av att ett antal kända inre och yttre variabler för dessa fordon använts. Samma datormodell som för övriga fall har använts och resultaten avviker därför sannolikt betydligt från de faktiska fordonen.

Tabell 7 Påverkan av maskinstorlek

	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
"L120G"	25	64	8	3	69	89	4,2
"L250G"	21	64	10	5	59	85	8,3
"L350F"	21	64	11	4	58	85	12,2

Ökad maxeffekt på ett i övrigt oförändrat fordon medför att fordonet når en högre topphastighet och därför bromsar bort mer av den tillförda energin, som framgår av tabell 8. Detta då de huvudsakliga externa förlusterna: rullmotstånd och materialhantering är oförändrade.

Tabell 8 Påverkan av motoreffekt

Maxeffekt	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
300 kW	20	64	12	5	54	83	10,8
350 kW	21	64	11	4	57	84	11,6
400 kW	21	64	11	4	58	85	12,2
450 kW	21	64	10	4	60	86	12,7
500 kW	22	64	10	4	61	86	13,1

4.1.4. Verkningsgrad förbränningsmotorn

Vid ökad motorverkningsgrad minskar som en direkt följd de interna förlusterna, vilket gör att de övriga förlusternas procentuella andel ökar, som framgår av tabell 9. Kvoten regenererbar/mechanisk effekt förblir dock oförändrad, vilket gör att den förväntade bränslebesparingen (i procent) vid hybridisering genom att enbart ta tillvara regenererbar energi är densamma. Dock finns vid lägre verkningsgrad hos förbränningsmotorn i praktiken större möjligheter till vinster, detta då skillnaden mellan elmotorns och förbränningsmotorns verkningsgrad är större.

Tabell 9 Påverkan av verkningsgrad på förbränningsmotorn

Maxverkningsgrad	E_{reg} (%)	E_{int} (%)	E_{ext} (%)	E_{mat} (%)	E_{reg}/E_{mek} (%)	E_{min}/E_{tot} (%)	E_{tot} (J)
30 %	16	73	8	3	58	89	16,2
35 %	18	68	9	4	58	87	13,9
40 %	21	64	11	4	58	85	12,2
45 %	24	59	12	5	58	83	10,8
50 %	26	55	13	5	58	81	9,7

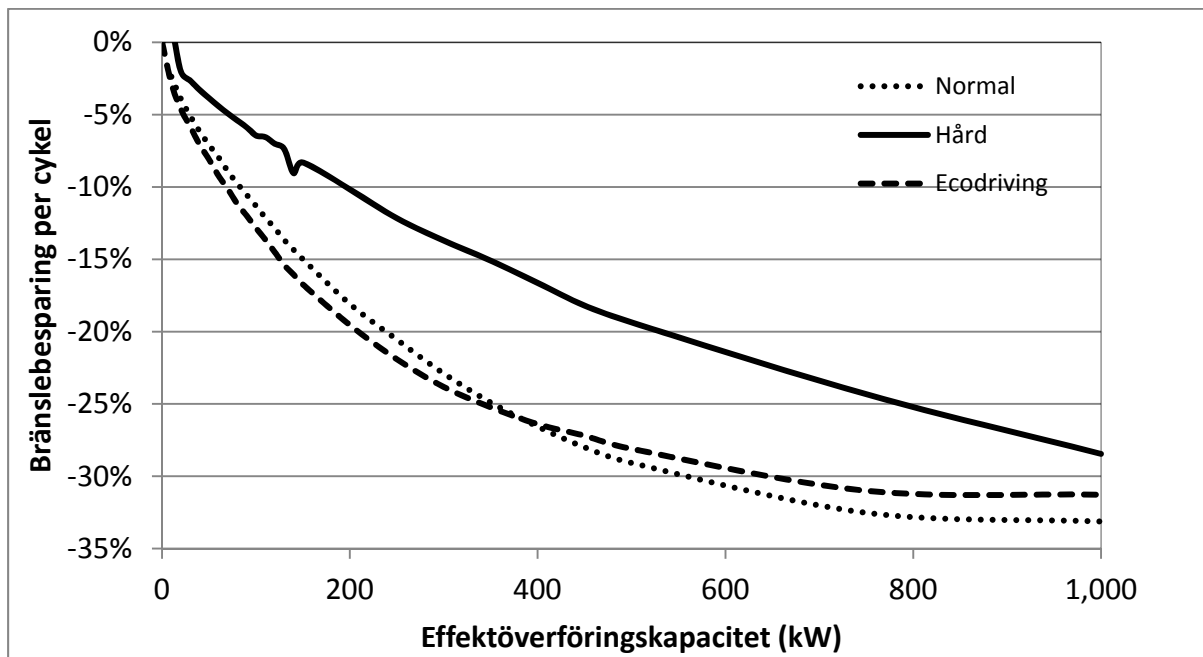
4.2. Inverkan av elektriska komponenters prestanda

I praktiken kommer de ovan beräknade möjligheterna till bränslebesparing att begränsas av fordonets förmåga att överföra effekt och lagra energi effektivt. Därför har den inverkan som begränsad förmåga till effektöverföring och energilagring har på möjligheterna till bränslebesparing undersökts.

Det ska påpekas att det är enbart de praktiska begränsningarna på ett övergripande plan gällande komponenternas storlek, kostnad och verkningsgrad som undersökts. Andra begränsningar finns, t.ex. är det inte uppenbart hur kablarna bör dimensioneras för att hantera de mycket höga elektriska effekterna som krävs för att ta hand om all potentiellt regenererbar energi.

4.2.1. Effekt

I figur 5 framgår hur bränsleförbrukningen beror på hur pass mycket effekt systemet kan överföra från fordonets rörelse till dess batteri/superkondensator. Det antas att lagringsmediets kapacitet att lagra energi är obegränsad. Hur beroendet ser ut beror på hur fordonet körs. Ju kraftigare det behöver bromsas desto mer effekt behöver fordonet överföra till batteri/superkondensator. Ett fordon som rör sig med en hastighet på 6 m/s har en kinetisk energi på $\frac{6^2}{2}=18$ J/kg, eller 896 580 J för ett fordon på 49 810 kg. Om det saktar ner till 1 m/s, där den kinetiska energin är 24 905 J (0.5 J/kg) innebär det att motorn måste kunna hantera 871 675 J (17.5 J/kg) under det tidsintervall som inbromsningen sker för att all energi som kan regenereras också regenereras. Om inbromsningen sker på 1 sekund kräver det att elmotorerna och övriga elektronik klarar av att hantera 871,7 kW, medan kravet minskar till 290,5 kW om inbromsningen sker på 3 sekunder.



Figur 5 Energibesparing som funktion av körcykel

Den överförbara effekten kan begränsas av motorn, kraftelektroniken eller lagringsmediet; samtliga måste ha förmåga att ta hand om den efterfrågade effekten. I tabell 2 finns en uppskattning av den extravikt och de komponentkostnader som de olika drivlinekomponenterna för med sig.

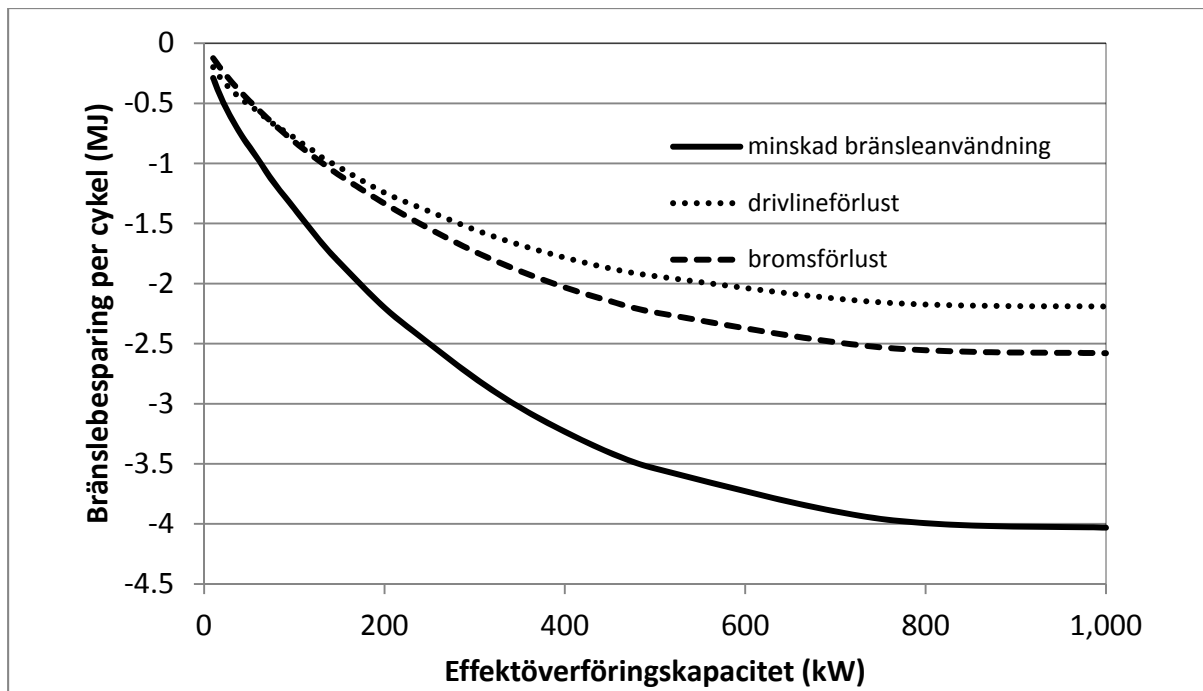
Som framgår av figur 5 beror sambandet mellan effekt och bränslebesparing på hur fordonet används. Om cykeln innehåller hårdare inbromsningar så krävs större komponenter (mer

effekt) för att omvandla rörelseenergin till elektrisk energi. Då superkondensatorer kostar mindre per kW än batterier är de att föredra som lagringsmedium om effekt, snarare än lagringskapacitet, är en begränsande faktor. Då cykeln innehåller många laddningar/urladdningar är detta också eftersträvansvärt med avseende på underhållsbehovet, då superkondensatorer klarar av ett mycket stort antal laddningar/urladdningar utan att förlora i prestanda, medan litiumjonbatterier har en livslängd på omkring 1,000 laddnings-/urladdningscykler (Juda, 2006).

För att kunna överföra en effekt på 100 kW krävs omkring 23,3 kg superkondensatorer, vilket kostar på 1 300-5 100 dollar (omkring 9-45 000 kronor). En motor på 100 kW väger 105 kg och kostar 2 600 dollar. För en överföringskapacitet på 800 kW ökar superkondensatorns vikt till 186 kg och priset till 10 400-40 800 dollar, medan en motor på 800 kW väger 688 kg och kostar 17 800 dollar enligt Simpsons formel.

Som framgår av figur 6 påverkar flera faktorer möjligheterna till energibesparing. Besparingarna kommer dels från regenererbar energi, dels från minskade drivlineförluster då elmotorn med dess höga verkningsgrad kan användas istället för förbränningsmotorn vid accelerationer vid låga hastigheter, där förbränningsmotorn och momentomvandlaren har låga verkningsgrader.

Jämfört med potentialberäkningarna ovan är besparingarna betydligt mindre. Ungefär halva skillnaden beror på att enbart en cykel simuleras för de olika motoreffekterna; d.v.s. fordonet slutar med energi i batterierna, medan det startar utan. Detta gör att den första accelerationen av två görs utan hjälp från den elektriska delen av drivlinan. Detta tillsammans med förluster som hör samman med hydrauliken inte påverkas samt att verkningsgraden för förbränningsmotorn och momentomvandlaren blir något lägre gör att om komponenterna i den elektriska delen av drivlinan inte hade några förluster skulle bränslebesparingen bli 46,8 %. Den kvarvarande skillnaden mellan potentiell och realiserbar bränslebesparing beror på förluster i den elektriska delen av drivlinan. Av dessa förluster på 13,7 % orsakas 5,8 % är direkta förluster och 7,9 % orsakas av ökad användning av den konventionella delen av drivlinan (då den behöver användas mer än om alla komponenter hade en verkningsgrad på 100 %). Genom att elmotorn har högre (relativ) effekt vid låga varvtal minskar tiden som cykeln tar med 1,5 %.



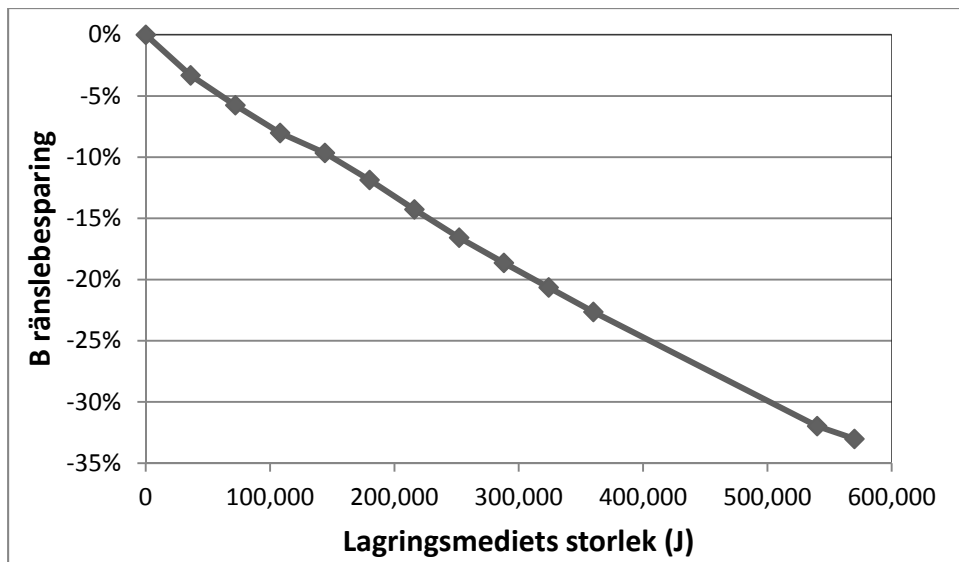
Figur 6 Förändrad energianvändning som följd av den elektriska drivlinans effektkapacitet

4.2.2. Lagringskapacitet

I figur 7 visas hur bränsleförbrukningen beror på hur mycket energi som lagringsmediet kan spara. Systemets förmåga att överföra effekt antas vara obegränsad. Samma verkningsgrader som tidigare, d.v.s. de angivna i tabell 1, har använts. För beräkningarna för lagringsmediets storlek har det antagits att det kan laddas ur helt utan att dess långsiktiga hållbarhet påverkas. I praktiken används bara en del av de olika lagringsmediernas kapacitet, för att få korrekt storlek bör därför resultaten delas med andelen av lagringsmediets kapacitet som används.

Förhållandet mellan lagringskapacitet och bränslebesparing är i stort sett linjärt fram till dess att all regenererbar energi är lagrad i lagringsmediet. En ökning av lagringskapaciteten på 1 J medför en minskad bränslebesparing på omkring 10 J. Detta beror dels på att fordonet laddar och urladdar lagringsmediet fyra gånger under en cykel (backning och framåtkörning mot högen samt mot dumpen), samt att då den lagrade energin används av elmotorn är denna omkring 2,5 gånger mer effektiv än dieselmotorn. Den marginella kvoten bränslebesparing/lagringskapacitet är störst för små storlekar på lagringsmediet då verkningsgraden för dieselmotorn/momentomvandlaren är störst vid låga hastigheter, vilket är när den regenererade energin börjar användas. I takt med att lagringskapaciteten ökar kan den elektriska delen av drivlinan användas under en längre period under fordonets accelerering/arbete i högen och kvoten minskar något (då förbränningsmotorn verkar mer effektivt när fordonet nått en högre fart).

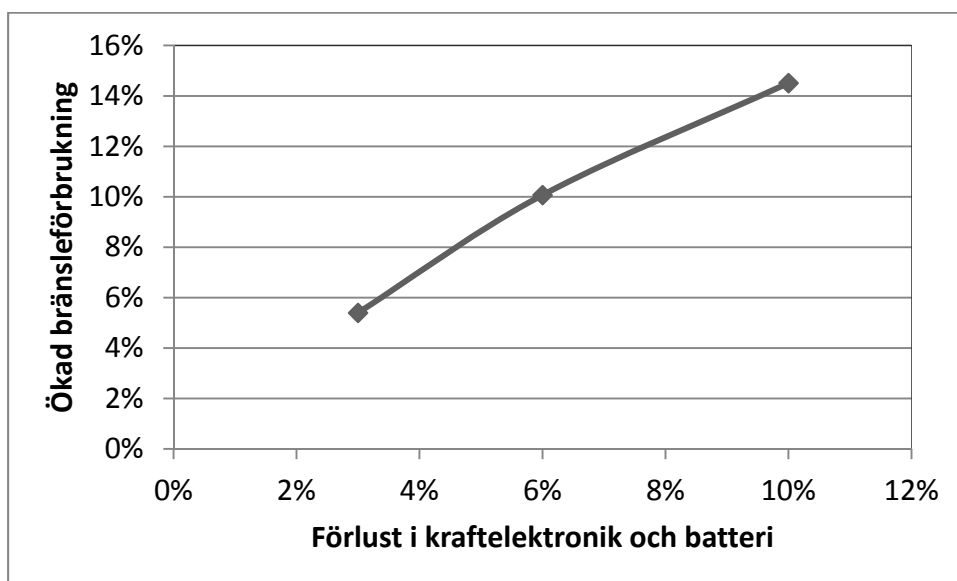
För att kunna lagra 600 kJ (166 Wh) krävs en superkondensator på 30 kg eller ett batteri på 1,5 kg. Detta är betydligt mindre än vad som krävs för att de bägge ska kunna hantera de eftersträvade överföringseffekterna beskrivna i ovanstående avsnitt, även med hänsyn tagen till att det ur livslängdssynpunkt är lämpligt att bara använda en del av lagringsmediernas kapacitet.



Figur 7 Inverkan av lagringsmediets storlek på bränsleförbrukningen

4.2.3. Elektroniken

Förluster hos den ingående elektroniken (motor, kraftelektronik, batteri) påverkar dels direkt genom förluster vid själva effektöverföringen, men också indirekt genom ett ökat behov av att använda förbränningsmotorn. Det senare dominerar över det förra. Detta beroende på att förbränningsmotorn har en verkningsgrad på under 40 %, vilket gör att varje ökad förlust ökar bränsleförbrukningen med ungefär $0,6/0,4=1,5$ gånger den ursprungliga förlusten, som framgår av figur 8.



Figur 8 Inverkan av verkningsgrad hos kraftelektroniken

4.3. Osäkerhetsfaktorer

För att göra resultaten enkla att förstå och minska dess beroende på variationer mellan olika typer av komponenten har verkningsgraden för alla komponenter förutom förbränningsmotorn och momentomvandlaren antagits vara konstanta. I praktiken är detta inte fallet, för motorer beror verkningsgraden främst på aktuellt vridmoment och varvtal och för transmissionen på

överförd effekt. Dessutom beror ett batteris lagringskapacitet på hur snabbt det laddas (långsammare laddning medför högre kapacitet).

I studien har utgångspunkten varit att föraren kunnat utföra sitt arbete perfekt. I praktiken sker alltid avvikelser, mest för nya förare, minskande med ökad erfarenhet. Ett exempel på misstag är att köra in i högen med skopan så att den trycker neråt. Då kommer skopan att ta del av fordonets vikt, vilket medför dels att energianvändningen blir högre vid skopan, dels att det hjulen slirar då hjulens traktion blir lägre då normalkraften över dem minskar. Dessa förluster får flera effekter:

- Energiförlusterna ökar då energi går åt till att utföra ”onyttigt” arbete. Detta gäller både med och utan hybridisering och innebär därför att potentialen för energibesparingar minskar.
- I vissa fall innebär hybridtekniken att det är lättare att minska dessa förluster, t.ex. genom att det är lättare att reglera hjulen individuellt efter lokala förhållanden och därigenom undvika att hjulen slirar. Det innebär att potentialen för energibesparingar ökar.

5. SLUTSATSER

Genom att använda elektriska komponenter i drivlinan för att regenerera energi går det teoretiskt att minska energiförbrukningen med omkring 60 % för den ”korta cykeln” under de flesta förhållanden för den fordonsmodell som använts. Vid längre cykellängd minskar potentialen för bränslebesparingar. Teoretiskt är det möjligt energiförbrukningen med omkring 80 % om drivlinan har en verkningsgrad på 100 % och fungerande regenerering, d.v.s. om energianvändningen enbart begränsas nedåt av den energi som krävs för att överkomma olika motstånd som t.ex. rullmotstånd.

Hur pass stor den minskade bränsleförbrukningen blir beror på en stor mängd variabler: hur fordonet används, den ”miljö” som det används i och själva fordonet. De variabler som har störst inverkan på de potentiella bränslebesparingarna genom hybridisering är (inom parentes om ett ökat värde medför en ökad eller minskad potential för bränslebesparing):

- Rullmotstånd (minskad)
- Maxhastighet (ökad)
- Längd på cykeln (minskad)

Den reellt genomförbara minskningen beror också på:

- Hastighet på inbromsningen, desto snabbare inbromsningen är desto mer effekt måste systemet klara av att hantera.
- De ingående elektriska komponenternas verkningsgrad. Ökar förlusterna i komponenterna medför detta inte bara direkta förluster, utan även indirekta av minst samma storlek då förbränningsmotorn med dess lägre verkningsgrad måste använda mer energi.
- Med nuvarande komponentprestanda och prisnivåer är den begränsande faktorn lagringsmediet. Det som begränsar är dess förmåga att ta emot effekt. Detta göra att superkondensatorer är det mesta intressanta alternativet för energilagring för hybridhjulastare.

6. REFERENSER

- Andersen, Johannes; Ekenberg, Daniel; Willner, Kristina och Erlandsson, Lennart (2011), ”Methods to calculate and declare fuel consumption for heavy non road - mobile machinery part II literature and simulation study”,
http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_001201_001300/Publikation_001223/Fuel%20Consumption%20for%20Heavy%20Non%20Road%20Mobile%20Machinery%20part%20II.pdf
- Chan, B. J.-Y. (2008). *Development of an off-road capable tire model for vehicle dynamics simulations*. Blacksburg, Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State.
- Coutermarsh, B. (2007). Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand. *Journal of Terramechanics*, 44 , 275-291.
- Doucette, Reed T. och McCulloch, Malcolm D.. “A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle.” *Journal of Power Sources*, 2011: 1163–1170.
- The Engineering Toolbox (2011). *Drag coefficient* http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html (besökt 21 december 2011)
- Ericsson, Allan och Slättengren, Jesper, ”A model for predicting digging forces when working in gravel or other granulated material” , 15:th ADAMS European Users Conference. Rome, 2000. 1-9.
- Filla, R. (2005:44). Operator and Machine Models for Dynamic Simulation of Construction Machinery. *LiU-Tek-Lic* .
- Grammatico, S., Balluchi, A., Cosoli, E., (2010), “A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles”. Vehicle Power and Propulsions Conference
- Harnisch, C., Lach, B., Jakobs, R., Troulis, M., & Nehls, O. (2005). A new tyre–soil interaction model for vehicle simulation on deformable ground. *Vehicle System Dynamics*, 43 (1) , 384-394.
- Juda, Zdzislaw. “Ultracapacitors as an advanced energy source for braking energy recovery in electric vehicles.” *Environment Protection Engineering* 32 (1), 2006.
- Larsson, Gunnar (2012), “Hybridisering av mobila icke-väggående fordon”
- Muench, Steve (2006), “Vehicle Dynamics”, powerpoint
- Nguyen, John. “Performance of Phosphate Lithium-Ion Batteries in Motive Applications.” Battcon Stationary Battery Conference. 2005.
<http://www.battcon.com/PapersFinal2005/NguyenPaper2005.pdf> (besökt 29 april 2011).
- Sain, Charles H. och Quinby, G. William, *Earthwork in* (Standard handbook for civil engineers, Ricketts, Jonathan T; Loftin, M. Kent; Merritt, Frederick S (ed.))
- Simpson, A. (2006), *Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology*
- Smith, G. N., & Smith, I. G. (2000). *Elements of Soil Mechanics*. Oxford, UK: Blackwell Science.
- Tolbert, Leon M. och Peng, Fang Z. (1998), ”Multilevel Inverters for Electric Vehicle Applications”, WPET '98, Dearborn, Michigan, October 22-23, 1998, pp. 79-84.

Wei, Xiu-ling, Wang, Guo-qiang och Feng, Su-li (2008). "Aerodynamic characteristics about mining dump truck and the improvement of head shape." Journal of Hydrodynamics, 2008: 713-718.

Youtube/Swecon (2011). Volvo hjullastare - Grundläggande körteknik,
<http://www.youtube.com/user/SweconVolvoCE#grid/user/08425B14E561F>

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energi och teknik

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