

Förstudie om utformning av energieffektivare skogsmaskiner

Skogforsk: Martin Englund, Morgan Rossander, Karin Ågren, Mikael
Andersson

RISE: Mats Zackrisson

Linköpings universitet: Samuel Kärnell, Liselott Ericson



Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning	6
Bakgrund	7
Metod	7
Prestandakartläggning	7
Energikartläggning	8
Modellering	9
Energiflöden	9
Batteridesign	9
Cylindrar, leder och flödesförluster	10
Kvistknivar och matarvalsar	11
Sågmotor	12
Flödesförluster	12
Hydraulpumpar och motorer	12
Dieselmotormodell	12
Elmotor, generator och batteri	13
Rullmotstånd och drivlina	13
Terrängförflyttning skotare	13
Terrängförflyttning skördare	14
Ignorerade funktioner och kringutrustning	14
Simuleringsmodeller i Simulink	14
Realtidssimulator	14
Konceptdesign	14
Livscykelanalys	16
Livscykelkostnad	17
År 2030	18
Resultat och diskussion	18
Prestandakartläggning	18
Energikartläggning	19
Konceptdesign och energijämförelse	20
Skotarkoncept med energijämförelse	20
Skördarkoncept med energijämförelse	22

Drivlina.....	23
Hydraulik.....	24
Hybridkoncept	24
Batterielektriska koncept.....	25
Livscykelanalys	27
Skördare	27
Skotare.....	27
Livscykelkostnad	27
Slutsatser och fortsatt forskning.....	29
Referenser	30
Deltagande parter och kontaktpersoner.....	31
Bilaga 1	32



skogforsk

Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts i december 2024 av Petrus Jönsson, Bitr. programchef Driftsystem. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 13 december 2024.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2024 ISSN 1404-305X

Förord

Denna pilotstudie emottog finansiering av Vinnova genom utlysningen "Fossilfria mobila arbetsmaskiner – 2022" (diarienummer 2022-00612). Projektet leddes av Skogforsk och genomfördes i samarbete med Linköpings universitet, RISE och Danfoss. Martin Fredriksson, Kim Skov, Hans Jorgen Jensen och Pavel Buzin från Danfoss deltog i projektet men har inte författat rapporten.

Summary

In the study, various design concepts for harvesters and forwarders were examined regarding energy consumption, climate impact, resource depletion, and cost. The concepts were designed to match the performance of machines used in regeneration felling. Energy usage in conventional machines was mapped to identify which work elements or subsystems had the greatest significance in this context. For the forwarder, the propulsion of the machine and thus the powertrain account for most of the consumption. In the harvester, the work hydraulics connected to the harvester head is the largest consumer.

Four concepts were formulated: a hybrid concept and a battery-electric concept for each machine type. Components from Danfoss were used in the concepts to optimize the hydraulic system and electrify the machines. Apart from the diesel engine in the hybrid concepts and the significantly larger battery in the battery-electric concepts, they were otherwise similar. Through simulations, the energy savings from using the concepts were estimated to be nearly 30% for the forwarder and nearly 25% for the harvester. For the hybrid concepts, diesel demand is therefore reduced by the same levels. The battery-electric concepts have the same use of electric energy locally on the machine. Their batteries were sized to last for eight hours of work. Each machine is equipped with two such battery sets, allowing one to be charged while the machine is in use. For charging, a hydrogen fuel cell is available at the logging site.

A life cycle analysis was conducted on the concepts. It showed that diesel consumption during the usage phase is by far the largest source of climate impact for the conventional machine and the hybrid concept. The battery-electric concepts result in half as much climate-impacting emissions as a conventional machine if Swedish average electricity is used to produce the hydrogen for the fuel cell. If surplus electricity, which carries no environmental cost, can be used, the concept's climate impact is further reduced. A drawback of both the hybrid and battery-electric concepts is that the electric components, especially the batteries, lead to greater resource depletion than conventional machines.

A life cycle cost was also calculated for the concepts, including investment cost, depreciation, and fuel costs. Forecasts indicate that the prices of components used in these concepts, particularly the batteries, will decrease, while diesel prices will increase. Even at today's prices, a hybrid machine would be cost-effective compared to a conventional machine, whereas a battery-electric machine would have a higher cost. By 2030, the battery-electric concepts could be more cost-effective overall.

For continued research, there are many interesting questions. One of the more obvious challenges is how to transport energy to the forest. Besides the hydrogen fuel cell option already mentioned, previous ideas include mobile battery storage. The substantial energy requirements are viewed as a challenge. Other potential energy storage methods include biogas, electrofuels, or green ammonia. From a holistic perspective, are fuel cells or combustion engines more suitable? More advanced simulations and experimental data are needed on how batteries age in this application. Charging strategies for hybrid machines could significantly impact battery aging. Additionally, understanding of the energy usage in harvesters needs to be improved.

Sammanfattning

I denna studie har olika designkoncept för skördare och skotare undersökts med avseende på energiåtgång, klimatpåverkan, resursutarmning och kostnad. Konzepten har utformats för att motsvara prestandan hos maskiner som används i förnygringsavverknig. Energianvändningen i konventionella maskiner kartlades för att identifiera vilka arbetsmoment eller delsystem som var av störst betydelse i sammanhanget. För skotaren står terrängkörningen, och därmed drivlinan, för största delen av förbrukningen. För skördaren är arbetshydrauliken kopplat till aggregatsanvändningen den största förbrukaren.

Fyra koncept formulerades: ett hybridkoncept och ett batterielektriskt koncept för vardera maskintypen. I koncepten användes komponenter från Danfoss för att effektivisera hydraulsystemet och elektrifiera maskinerna. Konzepten för respektive maskintyp var i princip lika, bortsett från att det fanns en dieselmotor hos hybridkoncepten och att ett betydligt större batteri användes i de batterielektriska koncepten. Genom simuleringar beräknades energibesparingen i användning av koncepten till knappt 30 procent för skotaren och knappt 25 procent för skördaren. För hybridkoncepten minskar alltså dieselbehovet med samma nivåer. De batterielektriska koncepten har samma användning av elektrisk energi lokalt på maskinen. Deras batterier dimensionerades för att räckta till åtta timmars arbete. Varje maskin är utrustad med två sådana batteriuppsättningar för att kunna ladda det ena när maskinen används. För laddningen finns en vätgasbränslecell på avverkningsplatsen.

En livscykelanalys genomfördes på koncepten. Den visade att dieselförbrukningen under användningsfasen är den överlägset största källan till klimatpåverkan för den konventionella maskinen och hybridkonceptet. De batterielektriska koncepten innebär ungefär hälften så mycket klimatpåverkande utsläpp som en konventionell maskin om svensk genomsnittsel används för att skapa vätgasen till bränslecellen. Om överskottsel som inte påförs någon miljökostnad kan användas minskar konceptets klimatpåverkan ytterligare. En nackdel med hybridkoncepten och de batterielektriska koncepten är att de elektriska komponenterna, framför allt batterierna, medför större resursutarmning än konventionella maskiner.

Även en livscykelkostnad beräknades för koncepten och inkluderade investeringskostnad, värdeminskning och bränslekostnad. Prognoser visar att komponenter som ingår i koncepten, framför allt batterierna, kommer att sjunka i pris samtidigt som dieselpriiset ökar. Redan med dagens priser skulle en hybridmaskin vara lönsam jämfört med en konventionell maskin, medan en batterielektrisk maskin har en högre kostnad. År 2030 kan de batterielektriska koncepten vara mer kostnadseffektiva totalt sett.

För den fortsatta forskningen återstår många intressanta frågeställningar. En av de mer uppenbara utmaningarna är hur energin ska fraktas till skogen. Förutom vätgas med bränslecell som redan nämnts, finns tidigare idéer kring mobila batterilager. De stora energimängderna bedöms vara en utmaning. Andra energilagringmetoder kan vara exempelvis biogas, elektrobränslen eller grön ammoniak. Är bränsleceller eller förbränningsmotorer mest lämpade ur ett helhetsperspektiv? Mer avancerade simuleringar och experimentella data behövs på hur batterier åldras i den här tillämpningen. Laddningsstrategier för hybridmaskinerna kan ha en betydande påverkan på hur batterierna åldras. Vidare behöver förståelsen för energianvändningen i skördare förbättras.

Bakgrund

Fordonsindustrin har på senare tid fokuserat på att byta ut förbränningsmotorn mot elektriska drivlinor för att minska användningen av fossila energikällor. För att underlätta denna process för skogsmaskiner bör energiförlusterna minimeras i de system som ska drivas. Inom skogsmaskinsområdet har en stor del av pågående forskning och utveckling fokuserat på automation av rörelser och körning, till exempel i Vinnovaprojektet AUTO2 och i Mistra Digital Forest. Skogsmaskiner med högre grad av automation har också potential att bli mer energieffektiva, speciellt om förståelsen av energianvändningen förbättras genom det sökta projektets analys.

För att kunna ge en bra bedömning av potentialen för energieffektivisering för olika arbetsmaskiner och körcykler krävs kunskap om var i systemen energiförlusterna sker. Majoriteten av rörelsen på skogsmaskiner sker genom hydraulisk eller mekanisk kraftöverföring. I projektet fokuserar vi på de huvudsakliga systemen kran- och verktygsrörelse (grip eller aggregat) samt framdrivning. I tidigare FFI-projekt (Stealth) visades att med ganska små förändringar kan energiförbrukningen minska med 50 procent för en styckegodskran. Körcykeln har en mycket stor inverkan på potentialen för energibesparing, vilket visades inom ett pågående FFI-projekt (Elhydraulik) när en lastare för underjordisk gruvdrift analyserades. Med en relativt avancerad systemarkitektur påvisades där endast marginella förbättringar, eftersom körcykeln endast hade små samkörningsförluster. Det visar på vikten av att förstå och inkludera körcykeln vid analyser av energiåtgången på arbetsmaskiner.

Projektet syftar till att beskriva hur nya koncept och tekniker kan användas i skogsmaskiner (skördare och skotare) för att förbättra energieffektiviteten och minska miljöpåverkan för maskinernas livscykel.

Metod

Arbetet har utförts i fyra steg som beskrivs mera utförligt nedan. Parallellt har workshops och studiebesök genomförts för att förstå nuläge, utforska möjligheter och sprida kompetens mellan projektets deltagare samt för att hitta innovativa koncept. Ett stort antal koncept och teknikmöjligheter har berörts inom projektet. Projektet har fokuserat på maskiner som enbart används i förnygringsavverkning, alltså de största modellerna som finns på marknaden. För de nya koncepten sattes en begränsning på att tekniken skulle vara beprövad i liknande tillämpningar, även om viss anpassning skulle kunna vara nödvändig för applikationen.

Prestandakartläggning

Publika data har använts för att kartlägga egenskaperna hos skotare och skördare avsedda för förnygringsavverkning. Medelvärden av ett flertal maskiner från flera olika tillverkare har använts för att sätta prestanda på konceptmaskinerna i termer av dragkraft, lastkapacitet, hjuldiameter m.m. Medelvärdena har även fungerat som underlag till en simuleringsmodell av maskinerna för att beräkna deras energianvändning för olika funktioner idag.

Energikartläggning

En simuleringsmodell användes för att beräkna energianvändningen hos olika funktioner. Den totala beräknade energianvändningen jämfördes med statistik från bränsleanvändning hos skogsmaskiner av motsvarande storlek [1]. Avvikelser mellan statistiken och beräknad energiåtgång för de konventionella systemen användes för att ta fram en korrektionsfaktor för skördare respektive skotare. Korrektionen fördelades proportionellt till de olika funktionerna. Metoden förutsätter alltså ett antagande om att simuleringen fångar fördelningen av energianvändningen mellan olika funktioner, även om den totala energiförbrukningen avviker. Korrektionsfaktorn applicerades också på de alternativa koncepten. På så sätt blir energibesparingar hos koncepten kopplade till en bränslebesparing som står i proportion till förbrukningen hos verkliga maskiner.

Energianvändningen i de olika koncepten delades upp i kategorierna som beskrivs i Tabell 1.

Tabell 1. Kategorier av effektförbrukning hos koncepten.

Framdrivning	Effekt som förbrukas för förflyttning av maskinen i terrängen.
Kran och grip (skotare)	Effekt som förbrukas för användningen av kran och grip för att genomföra av- och pålastning av stockar.
Kran (skördare)	Effekt som förbrukas genom användning av skördarens kran.
Aggregat (skördare)	Effekt som används av skördaraggregatet.
Diesel grundförbrukning	Effektförlust som uppstår i dieselmotorns interna rörelse på grund av friktion och annat motstånd. Förlusten är den energi som motorn omvandlar till mekanisk rörelse men endast går åt för att hålla motorn snurrande.
Kringutrustning	Kategori som samlar den effekt som används för mindre funktioner som till exempel belysning och luftkonditionering.
Omvandlingsförlust energibärare ombord	För diesel-/HVO-drivna koncept innebär det effektförlusterna av dieselmotorns omvandling av diesel/HVO till mekanisk rörelse. Kan också beskrivas som effektförlusten på grund av dieselmotorns verkningsgrad. För de batterielektriska koncepten innebär det effektförlusterna som uppstår i batteri, kraftelektronik och elmotorer vid omvandlingen från elektrisk energi i batteriet till mekanisk rörelse.
Omvandlingsförlust vätgasladdning	Effektförlusterna som uppstår vid det vätgasdrivna elverket (bränslecellen) och vid inladdning av den elektriska energin i batteriet.
Hybridförlust	Effektförlusterna som uppstår i kraftelektronik och elektriska maskiner vid omvandling mellan mekanisk och elektrisk energi samt vid laddning och urladdning av batteri.

Modellering

Detta avsnitt beskriver de modeller och simuleringsverktyg som legat till grund för energikartläggningen och konceptdesigner.

Energiflöden

Energiflödet för ett seriehybridsystem där all energi omvandlas via en generator och sedan används i en elektrisk motor för att leverera mekaniska energin P_{avg}

$$P_{in} = \frac{P_{avg}}{\eta_{el,g}\eta_{el,m}} \quad (1)$$

där P_{in} är nödvändig mekanisk effekt in till generatoren η_g , η_m är generatorns och elmotorns respektive verkningsgrader. De elektriska förlusterna ges då som av

$$P_{loss} = P_{in} - P_{avg} = P_{avg} \left(\frac{1}{\eta_{el,g}\eta_{el,m}} - 1 \right) \quad (2)$$

I ett hybridsystem där det laddande systemet, typiskt dieselmotorn, är kopplat direkt till mekaniska systemet kan den effekt som systemet behöver tas direkt från motorn. I samma situation sker en laddning av batterierna av överbliven effekt. Om vi antar att motorn kan konstantbelastas med 80 procent av märkeffekten ges tillgänglig motoreffekt som

$$P_m = 0.8 \cdot P_{max} \quad (3)$$

Andel tid som motorn i ett hybridsystem i medel är i gång blir

$$\alpha_m = \frac{P_{in}}{P_m} \quad (4)$$

Tiden som motorn är i gång kan ses som den tid det tar att ladda batteriet enligt

$$t_m = \frac{E_b}{P_m - P_{in}} \quad (5)$$

där E_b är den energi som ska laddas in i batteriet. Vid urladdning ska batteriet själv ge all effekt och tiden maskinen körs av endast batteriet ges av

$$t_b = \frac{E_b}{P_{in}} \quad (6)$$

Då kan antalet starter per tidsenhet uttryckas som

$$N = \frac{1}{t} = \frac{1}{t_m + t_b} = \frac{P_{in}(P_m - P_{in})}{P_m E_b} \quad (7)$$

Batteridesign

Batterier har i modelleringen hanterats som energilager med en fix verkningsgrad för laddning och urladdning. Batteriers åldrande i termer av kapacitetsminskning beror på flera faktorer som antalet laddnings- och urladdningscykler och relativa storleken på

dessa cykler, hur fort cyklerna går (effekten relativt batteriets storlek), laddningsnivån runt vilket batteriet arbetar samt arbetstemperatur [2, 3, 4].

Vi har antagit att temperaturhanteringssystem som säkerställer optimal arbetstemperatur för batterierna är på plats och på så sätt exkluderat temperaturaspekter. För de andra aspekterna har följande riktvärden antagits:

- Laddningsnivå inom 10–90 procent (batteriet laddas vid 10 procent och slutar laddas vid 90 procent).
- Medeleffektuttag <5 procent i relation till batteriets kapacitetsvärde, vilket minimerar åldrandet på grund av effektuttag.
- Medelladdningsnivå 50 procent. För en hybrid kan möjligen en något lägre medelnivå vara mera gynnsam, beroende på urladdningsnivå.

För de batterielektriska maskinerna har batterierna överdimensionerats så att kapaciteten vid slutet av den tekniska livslängden inte understiger 80 procent. Detta beror på att batterier ofta går in i en accelererad åldringsfas när kapaciteten når 70–80 procent av sin ursprungliga nivå. Dessutom har laddningsnivåerna satts mellan 10 och 90 procent för att förlänga livslängden.

För hybridmaskinerna har batterierna antagits ligga på en laddningsnivå på 40–60 procent. Alltså, förbränningsmotorn startas vid 40 procent och stoppas vid 60 procent. Batteriets storlek väljs baserat på antalet önskade förbränningsmotorstarter enligt ekvation (7).

Cylindrar, leder och flödesförluster

Friktionen i aktuatorer, F_f , (hydrauliska cylindrar och hydraulmotorer) har modellerats på samma sätt för linjära och roterande rörelser. Det är den enda friktion som lagts på cylindrar och kranleder. Modellen ger friktionen F_f för linjära rörelser enligt

$$F_f = F_0 + bv \quad (8)$$

$$b = \frac{F_0}{v_{max}}$$

$$F_0 = 230 \cdot 10^5 \cdot A \frac{1 - \eta}{2\eta}$$

Där F_0 motsvarar ett konstant bidrag och b en kraftberoende del, v är cylinderns hastighet, v_{max} den maximala hastigheten och A är arean av cylinderns trycksida. För hydraulmotorer anpassas ekvationerna med

$$A_A = \frac{d}{2\pi} \quad (9)$$

$$v = \frac{\omega}{R}$$

där d är motorns displacement, ω är rotations hastigheten och R är utväxlingen. Insatt i ekvationerna (8) ges då ett bromsande moment som friktionen ger upphov till.

Parameter η har satts till mellan 80–95 procent verkningsgrad beroende på led, och v_{max} har satts till antagen maximal hastighet. Resulterande värden listas i Tabell 2 och Tabell 3.

Tabell 2. Hydraulikparametrar för skördaren.

Funktion	v_{max} (m/s), (rad/s)	η	A_A (cm ²)	d (cm ³)	R	k (GPa/m ³)
Kransväng**	0,91*	0,9		270	0.0143	2,0
Huvudarm	0,20	0,95	300			1,0
Vipparm	0,21	0,95	61			2,0
Utskjut	0,98	0,9	18			2,0
Rotator	1,96*	0,9		120	1	2,0
Sågmotor	911*	0,8		19	1	0,5
Matarvalsar	25*	0,85		670	1	0,5

* rad/s.

** Kransvängen har approximerats med en hydraulmotor.

Tabell 3. Hydraulikparametrar för skotaren.

Funktion	v_{max} (m/s), (rad/s)	η	A_A (cm ²)	d (cm ³)	R	k (GPa/m ³)
Kransväng**	0,76*	0,9		180	0.0143	2,0
Huvudarm	0,14	0,95	200			1,0
Vipparm	0,29	0,95	120			2,0
Utskjut	1,3	0,9	12			2,0
Rotator	1,0*	0,9		120	1	2,0
Grip	0,3*		9			

* rad/s.

** Kransvängen har approximerats med en hydraulmotor.

Kvistknivar och matarvalsar

Skördarens kvistknivar modellerades som ett statiskt tryck som måste levereras av pumpen när knivarna är aktiva. Dessa funktioner saknar alltså direkt energianvändning i modellen, men kommer leda till effektbehov som samkörningsförluster i de fall då de tryck som krävs av knivarna blir det högsta trycket för pumpen. Trycket sattes till 16 MPa för respektive kniv. Matarvalsarnas anliggningsstryck modellerades inte separat utan kan anses inkluderade i knivmodellen.

I flertalet datablad för skördaraggregat anges maxhastigheter för matning i storleksordningen 5 m/s och maxdragkrafter runt 25 kN. I modellen har hastigheten antagits vara 5 m/s tillsammans med en effektanvändning motsvarande 80 procent av maxdragkraften.

Sågmotor

Momentbehovet för en sågmotor som körs runt 8700 rpm är cirka 39 Nm [5]. Dessa värden har använts när sågmotorn varit aktiv.

Flödesförluster

Flödesförlusterna i hydraulrör och slangar har modellerats som tryckfall enligt

$$p_{drop} = kq \quad (10)$$

där k är en omvandlingskonstant och q är flödet. Tryckfallsmodellen tog även hänsyn till både tryck- och retursida samt att cylindern har olika area på de olika sidorna. Arealen för retursidan på cylindrarna har antagits vara halva den för primärsidan, alltså

$$A_B = \frac{A_A}{2} \quad (11)$$

Vidare antogs att returtanken höll atmosfärstryck och inga tryck kunde understiga detta. För kranarna användes även ett minsta tryckfall, 3 MPa, i händelse att beräknat tryckfall understeg detta. För skördarens såg användes minsta tryckfall om 6 MPa.

Omvandlingskonstanterna listas i Tabell 2 och Tabell 3 för skördaren respektive skotaren.

Hydraulpumpar och motorer

Hydraulpumpar och hydraulmotorer har antagits ha en verkningsgrad om 83 procent. För pumparna har samkörningsförluster modellerats genom att summera det beräknade flödet för samtliga funktioner och använda maximalt önskat tryck för att få pumpens använda effekt. Den effekten har därefter applicerats den generella verkningsgraden om 83 procent. För DDP, Digital Displacement Pump, antogs en konstant verkningsgrad på 91 procent utan samkörningsförluster.

Dieselmotormodell

Som dieselmotormodell användes följande formler från [6, 7, 8]

$$FR = \frac{1}{E_d} \left(KNV + \frac{P}{\eta} \right) (1 + b_1(N - N_0)^2) \quad (12a)$$

$$K = K_0(1 + C(N - N_0)) \quad (12b)$$

$$N_0 \approx 30 \sqrt{\frac{3,0}{V}} \quad (12c)$$

där E_d är energiinnehållet i diesel i (kJ/gram), N är motorvarvtalet i (rpm), V är motorvolymen (i liter), P är effektuttaget, b_1 en koefficient satt till 0,0001, C en koefficient satt till 0,00125 och K_0 sattes till 0,1. Verkningsgraden för diesel, η , sattes till 0,45. Ekvationen (12a) ger bränsleförbrukningen i gram/s. Genom att sätta $P = 0$ antas modellen uppskatta dieselmotorns grundförbrukning. Trots modellens till synes stökiga utseende är det faktiskt en helt linjär funktion av P givet ett fixt arbetsvarvtal.

Elmotor, generator och batteri

De elektriska maskinerna (elmotor/generator) i kombination med kraftelektronik antogs till totalt 90 procent verkningsgrad. I- och urladdningsprocesserna av batterier antogs ha en verkningsgrad på 95 procent vardera.

Rullmotstånd och drivlina

Rullmotståndet modelleras som en kraft som behöver levereras från drivlinan ut i hjulen enligt

$$F_T = F_B + \mu mg \quad (13)$$

Där F_B är ett bromsande konstant bidrag exempelvis från banden, μ är friktionskoefficienten för maskinen mot marken, m är maskinens totala massa inklusive band och eventuell last och g är gravitationskonstanten. Uppskattning av μ och F_B gjordes med modellanpassning för att matcha bränslestudier på skotare i [9]. Med vissa antaganden kring vikter och verkningsgrader gav modellanpassningen $F_B = 20$ kN och $\mu = 0.1$.

Drivlinan modellerades som att den effekt som krävdes enligt markmodellen ska levereras genom ett antal komponenter med olika verkningsgrad. Drivlinans mekaniska verkningsgrad (från motordrivaxel till moment ut på hjul) sattes till 90 procent. Hydraulpump och hydraulmotor modellerades som tidigare beskrivet, vidare tillkom en statisk förbrukning om 15 Nm för boost-pump. DDP-pumpen modellerades utan boost-pump.

Terrängförflyttning skotare

Terrängkörningen modellerades med hjälp av skotarförbrukningsstatistik. Statistiken ger förutom förbrukning även transporterad volym per timme, sträcka per timme och medellass per timme [1]. Med hjälp av dessa kan en medelsträcka och en medelhastighet tas fram. För att fördela ut maskinens totalvikt över tid användes förhållande för tid spenderad i olika sekvenser från [10] och körhastigheter från i varje sekvens från [9].

Genomsnittlig terränglutning antogs vara 0° . Detta tros vara en god approximation, eftersom det enligt rullmotståndsmodellen i ekvation (13) är först vid en lutning om 15 procent som medlutet överstiger rullmotståndet. Detta bedöms ovanligt och med de linjära modellerna som används bör mot- och medlut ta ut varandra.

Extrapolering till andra fall än medelfallet gjordes genom att se till bränslestatistik givet för olika percentiler av förbrukning [1].

Tabell 4. Uppskattad fördelning av skotarens arbete baserat på medelkörsträcka om 1106 m per lass samt resultat ur [9, 10].

Arbetsmoment	Genomsnittlig lastgrad under arbetsmoment	Hastighet (km/h)	Andel av tid
Körning tom	0 %	2,8	16 %
Körning full	100 %	3,3	16 %
Lastning och körning	50 %	2,2	11 %

Lastning	50 %	0	34 %
Avlastning	50 %	0,3	23 %

Terrängförflyttning skördare

Medelförflyttningshastigheten för en slutavverkningskördare kan approximeras enligt:

$$v_{avg} = 10 \frac{n_{fell}}{D W_{work}} \quad (14)$$

Där n_{fell} är antalet fällda träd per timme (uppskattat till 85 träd/h), D är stamantalet (uppskattat till 700 träd/ha) och W_{work} är maskinens arbetsbredd. Med en kranräckvidd på 9 m och dubbelsidigt arbete antas en arbetsbredd om 16 m (maximalt 18 m, men det är opraktiskt att utnyttja full kranlängd). Faktorn 10 ger hastigheten i km/h. Med de antagna värdena ges en medelförflyttningshastighet på 0,076 km/h.

Utöver aktiv körning tillkommer förflyttning till och från avlägget i samband med skiftbyte och vissa raster. Förflyttningens längden har naturligtvis ett traktegenskapsberoende, men antas här 0,5 h tomförflyttning per 7,5 h arbetspass med en hastighet om 3 km/h.

Totalt kan skördaren anses ha en medelförflyttning om $\frac{0,076 \cdot 7,5 + 3 \cdot 0,5}{8} \approx 0,26$ km/h.

Ignorerade funktioner och kringutrustning

Ett antal funktioner har antagits vara av mindre betydelse och har inte tagits med i analysen, så som midjestyrning, hyttnivellering, upptiltning av aggregatet och sågsvärdets rörelse. En konstant förbrukare för att täcka olika typer av kringutrustning har lagts till. Den ska täcka saker som belysning, kyla, AC, datorer m.m.

Simuleringsmodeller i Simulink

Simuleringsmodeller för de olika koncepten har byggts i Simulink (MathWorks). Modelleringen var kvasistationär, vilket innebär att dynamiska förlopp som ventilöppningar och pumpreglering har ignorerats och i stället betraktats som momentana. Detsamma gäller för de elektiska komponenterna.

Realtidssimulator

En realtidssimulator från Oryx Simulations användes för att beskriva användningen av kran och aggregat vid typiska skotnings- och skördarscenario. En förare användes för insamlingen av data som gav krafter och rörelser i alla cylindrar. Simulatorkörningen användes för att få data på olika cylindrars hastighet och hur användning av olika hydrauliska funktioner förhöll sig till varandra i tid. Dessa kradata och aggregat-/gripdata användes som underlag för simuleringsmodellerna i Simulink.

Konceptdesign

I detta steg formulerades och utvärderades olika maskinkoncept. Ett flertal av alla konceptidéer modellerades utifrån de typiska scenarierna i realtidssimulatorens och de beräknade terrängförflyttningens avstånd för skördare och skotare. Modellerna användes

för att jämföra koncepten i termer av energianvändning. Koncepten utvärderades ur perspektiven teknisk komplexitet och energibesparing. Simuleringarna gav en relativ förbättring i energieffektivitet jämfört med konventionella maskiner.

De tekniska dellösningar som implementerats i koncepten eller diskuteras i samband med dem sammanställs i Tabell 5.

Tabell 5. Tekniska dellösningar.

Diesel	Innebär att maskinen har en dieselmotor som omvandlar bränslets kemiska energi till rörelseenergi. Skulle alltså även kunna drivas av HVO och liknande.
Digital displacement-pump (DDP)	I flera av koncepten används två tandemkopplade 96 kubikcentimeters hydraulpumpar. Modellen är Danfoss Digital Displacement Pump (DDP096) (Bilaga 1). Pumpen har flera egenskaper som kommer till nytta i koncepten. De två pumparna ger totalt sex oberoende kretsar med variabelt flöde. Samkörningsförluster kan därmed i princip elimineras. Kretsarna kan sammankopplas vid behov med ett fördelningsblock. Pumpen har även högre verkningsgrad än konventionella pumpar vid delplacement och flödet kan styras elektroniskt. Detta innebär att man kan minska tryckfallen i systemet, eftersom man inte behöver förlita sig på konventionell tryckåterkoppling, utan i stället kan leverera flöde baserat på förarens signaler. Tomgångsförlusterna är tack vare pumpens unika egenskaper mycket låga. Komponenterna illustreras i Figur A, Bilaga 1.
Elektrisk drivlina	I flera av koncepten användes en elektrisk drivlina. Den bestod av en elektrisk motor som levererade moment till en i övrigt konventionell mekanisk kraftöverföring till hjulen. Den bestod av en tvåväxlad fördelningsväxellåda som fördelade momentet vidare till främre och bakre differential som i sin tur fördelade momentet till respektive höger och vänster boggi. I boggin är hjulen sammanlänkade genom kugghjul.
Seriehybrid	I en seriehybrid driver dieselmotorn en generator. Elektriciteten som skapas används antingen direkt eller lagras i ett batteri och används sedan av elmotorer som skapar den mekaniska rörelse som behövs för olika funktioner. Dieselmotorn kan stängas av när det finns gott om energi i batteriet.
Parallellhybrid	I en parallellhybrid arbetar dieselmotorn och elektriska motorer samtidigt för att skapa den mekaniska rörelse som används för olika funktioner. De kan antingen driva olika funktioner eller arbeta tillsammans för att driva samma funktion. Elektriciteten som används av de elektriska motorerna skapas genom att dieselmotorn driver en generator. Dieselmotorn är alltid i gång och de elektriska motorerna kan inte ensamma användas för att driva maskinen.

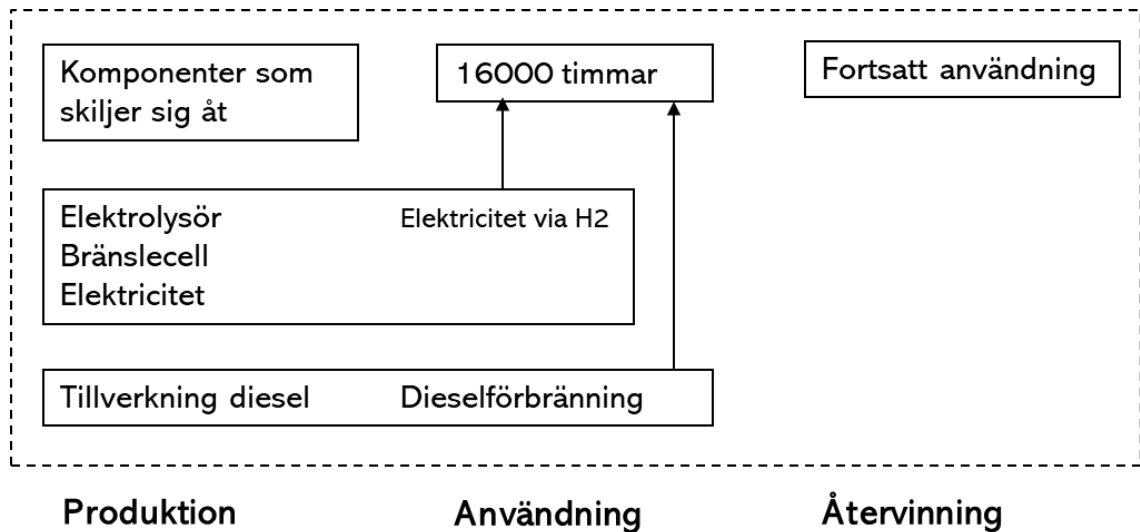
Kombinationshybrid	Begreppet innebär att den fungerar som en kombination av seriehybrid (beskrivs ovan) och parallellhybrid. I en parallellhybrid är dieselmotorn alltid i gång och genererar både ström och mekanisk rörelse som används i andra funktioner. I kombinationshybriden är dieselmotorn aktiv intermittent och levererar då energi som lagras i batteriet och som senare kan användas för att driva maskinens elektriska motorer när dieselmotorn är avstängd (som en seriehybrid). Dieselmotorn levererar också energi direkt till hydraulsystemet i samverkan med elmotorn (som en parallellhybrid). När batteriet nått rätt laddningsnivå kopplas dieselmotorn bort genom en mekanisk koppling och stängs av. Då står batteriet för maskinens effektbehov och det är då elmotorerna ensamma som omvandlar den till mekanisk effekt.
Batterielektrisk	Maskinen hämtar sin energi från ett stort batteri som laddas med elektricitet som har sin källa utanför maskinen, till exempel från elnätet, externt elverk eller bränslecell. Elmotorer skapar den mekaniska rörelse som används i till exempel en elektrisk drivlina eller för att driva hydrauliska pumpar.
Batteriladdning med vätgas	Det batterielektriska konceptet behöver laddas varje skift. Ett vätgasdrivet elverk (bränslecell) har valts som lösning. Det har antagits ha en verkningsgrad på 50 procent.

Livscykelanalys

En livscykelanalys, LCA, utfördes på de mest energieffektiva koncepten och jämfördes med konventionella maskiner med avseende på skillnaderna i koldioxidekvivalenter och resursutarmning. Även en analys av livscykelkostnaderna genomfördes.

LCA:n har genomförts av RISE i nära samarbete med övriga projektdeltagare. Komponent- och energibehov fastställdes genom erfarenhet och teoretiska simuleringar. Tillhörande resurser och utsläpp för komponenter hittades i befintliga databaser för LCA och representerar i allmänhet europeiska eller globala genomsnitt. Data har huvudsakligen hämtats från databasen Ecoinvent 3.8 (Wernet m.fl. 2016). LCA-mjukvaran SimaPro 9.4.0.2 användes för beräkningarna.

Simuleringarna som ligger till grund för livscykelanalysen har utförts per tidsenhet. Funktionell enhet för LCA-studien är en timme, vilket innebär att all miljöpåverkan uttrycks per timmes drift av skogsmaskin.



Figur 1. Systemgränser för LCA.

Produktionsfasen modelleras endast för de komponenter som skiljer sig åt mellan de olika koncepten, det vill säga batteri och dieselmotor samt elmotorer, omvandlare, kylare etc.

Endast skillnaderna i koncepten modellerades i detta projekt, men data från en tidigare analys av en skördare användes för att sätta resultaten i perspektiv. Analysen omfattar tillverkningen och 16 000 timmars användning av maskinerna. Eftersom maskinerna normalt inte skrotas efter denna tid, utan säljs vidare till mindre intensiv användning, räknas ingen återvinning med i analysen. Livscykelanalysen omfattar skillnaderna i konceptens klimatpåverkan, marknära ozon och resursutarmning.

För de batterielektriska koncepten har även laddning i form av en vätgasbränslecell som är placerad på avverkningsplatsen inkluderats i beräkningarna. Dessutom ingår produktion av nödvändig utrustning för tillverkning, kompression, lagring och transport av vätgasen. På samma sätt ingår infrastrukturen för dieselproduktionen. Transporten av vätgasen ut i skogen antas kunna ske ungefär på samma sätt som dieseltransporten, så dessa transporter kvittas mot varandra, det vill säga de ingår inte i kalkylen. Det är mycket troligt att vätgaselektrolys i stor utsträckning kommer att göras med överskottsel, det vill säga elektricitet som vi annars inte hade kunnat använda. I basfallet anses ändå elektriciteten för elektrolysen vara svensk genomsnittsel.

Livscykelkostnad

Kostnadsberäkningar för de komponenter som skiljer mellan koncepten har genomförts med uppskattningar för dagens priser samt med prognoser för diesel, batterier och vätgassystem för år 2030. För att ta fram totalkostnaden har hänsyn tagits till maskinkostnad, bränslekostnad samt investeringskostnad.

En konventionell skotare och skördare har antagits kosta 4 respektive 5 miljoner SEK. För att beräkna pris för koncepten har kostnaden för den konventionella maskinen använts som utgångspunkt. Kostnaden för de komponenter som byts ut från den konventionella maskinen har tagits bort och ersatts med kostnaden för de komponenter som tillkommer i koncepten. Som input till beräkningen har prisuppgifter erhållits från Komatsu Forest

och Danfoss för specifika komponenter. Det kan vara värt att notera att dessa priser i Danfoss fall är angivna som pris vid nyttillverkning, medan de uppgifter Komatsu lämnat motsvarar pris för reservdelsutbyten. För totalpriset för konceptet har dock dessa komponenter mindre betydelse.

För de batteripack som ingår har ett pris på \$265 per kWh [11] antagits. Ett inköp av bränslecell (108 kW) och gastuber för att transportera vätgas inkluderas också i beräkningarna, och delas mellan skördare och skotare i proportion till energiåtgången. I bränslekostnaderna har ett pris om 14 kr/l använts för dieseln och 80 kr/kg för vätgasen till bränslecellsladdning av batterielektriska maskinen.

Räntekostnaden för koncepten har beräknats genom att använda Stibor 90-räntan + tre procent på medelinvesteringen, vilken definieras som summan av maskinkostnaden per koncept och dess restvärde delat på två. Restvärdet är definierat som 15 procent av inköpspriset, vilket är vad som är brukligt för dagens skogsmaskiner. Det där dock möjligt att hybridmaskiner eller helelektriska maskiner skulle ha ett annat restvärde efter sex år och 16 000 timmar. Värdeminskningen blir den överskjutande investeringen minus restvärdet.

År 2030

Batteripriset per kilowattimme är högre för lastbilar än för personbilar i dagsläget, vilket förmodas bero på att tillverkningen av batteripack till eldrivna personbilar är mycket större än till eldrivna lastbilar enligt en studie av ICCT, the International Council on Clean Transportation [11]. Priser för batterier och elektriska drivlinor för skogsmaskiner är sannolikt något högre än för lastbilar. ICCT uppskattar att batteripriset för lastbilar kan halveras från 2022 till 2030 och uppgå till 120 USD/kWh (packnivå) för lastbilar omkring år 2030. Bränslecellsystemens pris förväntas också sjunka under samma period med två tredjedelar och nå en nivå på 300 USD/kW. Vätgastankarnas pris förväntas sjunka med endast en tredjedel under samma period, och nå en nivå på 850 USD/kg vätgas [11]. Vätgaspriset förväntas bli lägre i framtiden och antas vara 40 kr/kg år 2030. För andra komponenter i det elektriska drivsystemet som till exempel transmission, motor och växelriktare beräknas prisminskningar på över 60 procent fram till 2030, och priserna då uppgå till storleksordningen 23 USD/kW [11].

Vad gäller dieselpriiset väntas det i stället stiga i framtiden. Energimyndigheten förutspår att en liter diesel år 2030 kommer att kosta mellan 28,90 kr och 33,90 kr vid pump [12]. Eftersom skogsbruket erhåller en dieselsubvention (på dieselskatten och drar av moms), kan ett rimligt dieselpriis år 2030 sättas till 20 kr. För konventionella dieselmotorer och bränsletankar används dagens priser i fortsatta beräkningar.

Resultat och diskussion

Prestandakartläggning

Prestandakartläggningen resulterade i de egenskaper som listas i Tabell 6. Egenskaperna fungerade som designprestanda för de alternativa koncepten.

Tabell 6. Designprestanda för maskinerna.

	Skördare	Skotare
Vikt (kg)	22 700	23 200
Last (kg)	-	19 800
Motorvolym (l)	8,2	8,2
Motoreffekt (kW)	217	213
Motormoment (Nm)	1290	1250
Dragkraft (kN)	200	252
Hjuldiameter (m)	1,5	1,5
Maxhastighet (km/h)	20	20
Kran		
Räckvidd (m)	9	8
Lyftmoment (kNm)	277	158
Vridmoment (kNm)	56	41

Energikartläggning

Resultatet av den simulerade energikartläggningen av de konventionella maskinerna ges i Tabell 7. Avvikelserna mellan modellerad energiförbrukning och bränslestatistik hanteras genom en korrektionsfaktor som appliceras på samtliga energianvändare.

Posten kringutrustning är uppskattad som en konstant förbrukare om 5 kW. Det är tydligt från kartläggningen att framdrivning är skotarens stora energiförbrukare.

För skördaren är det tvärtom tydligt att terrängkörningen utgör en relativt liten del av energianvändningen. Däremot är den simulerade totala förbrukningen väsentligt lägre än vad bränslestatistiken säger att den borde vara, vilket leder till relativt stor korrektionsfaktor. Några tänkbara orsaker är att skördarens energianvändning är betydligt mer koncentrerad till arbetshydrauliken som innehåller fler komponenter och källor till fel än drivlinan. Faktorer som friktion i leder och förbrukning vid trädvistning är några faktorer som identifierats som mycket osäkra. Även för skördaren har en konstant förbrukning om 5 kW för kringutrustning antagits.

Tabell 7. Simuleringsmodellernas beräknade bränsleåtgång för de olika kategorierna av effektförbrukare. Beräkningarnas avvikelse från bränslestatistik och resulterande korrektionsfaktorer.

		Skotare (l/h)	Skördare (l/h)
Modellering	Framdrivning	7,2	1,6
	Kringutrustning	1,1	1,1
	Dieselmotor grundförbrukning	2,1	2,1
	Kran och grip	3,4	2,1
	Aggregat	-	4,7
	Summa	13,8	12,1

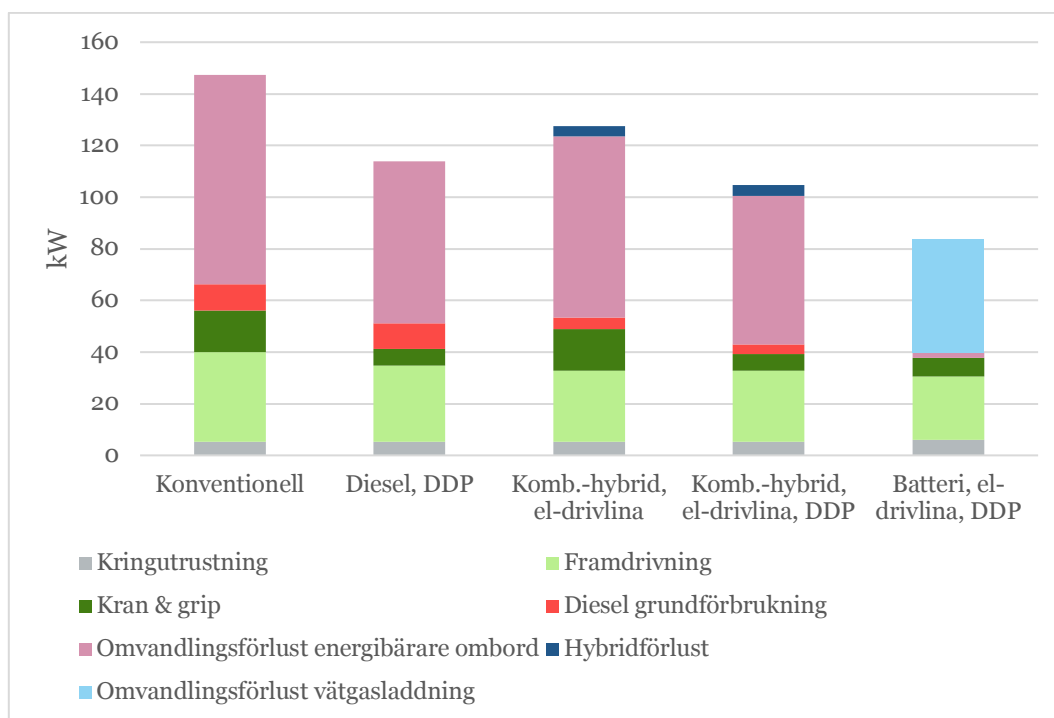
Energi från bränslestatistik	14,78	18,56
Avvikelse	-1,0	-6,46
Korrektionsfaktor	1,07	1,54

Konceptdesign och energjämförelse

För både skördare och skotare togs fyra alternativa koncept fram. De formulerades för att ha samma prestanda som gavs av prestandakartläggningen av konventionella maskiner. Koncepten jämfördes med varandra och den konventionella maskinen med avseende på energiåtgång.

Skotarkoncept med energjämförelse






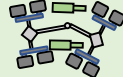

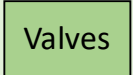

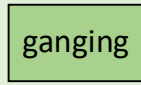


För skotaren togs fyra alternativa koncept fram för att kunna jämföras med den konventionella konstruktionen med avseende på beräknad energiåtgång (Figur 2). Koncepten beskrivs med de begrepp för alternativa tekniska lösningar som förklaras i Tabell 5. Den konventionella konstruktionen har en dieselmotor för energiomvandlingen som i sin tur driver två hydrauliska pumpar. Den ena pumpen driver i huvudsak kranfunktioner och den andra maskinens framdrivning sker genom en mekanisk kraftöverföring till främre och bakre boggipar.



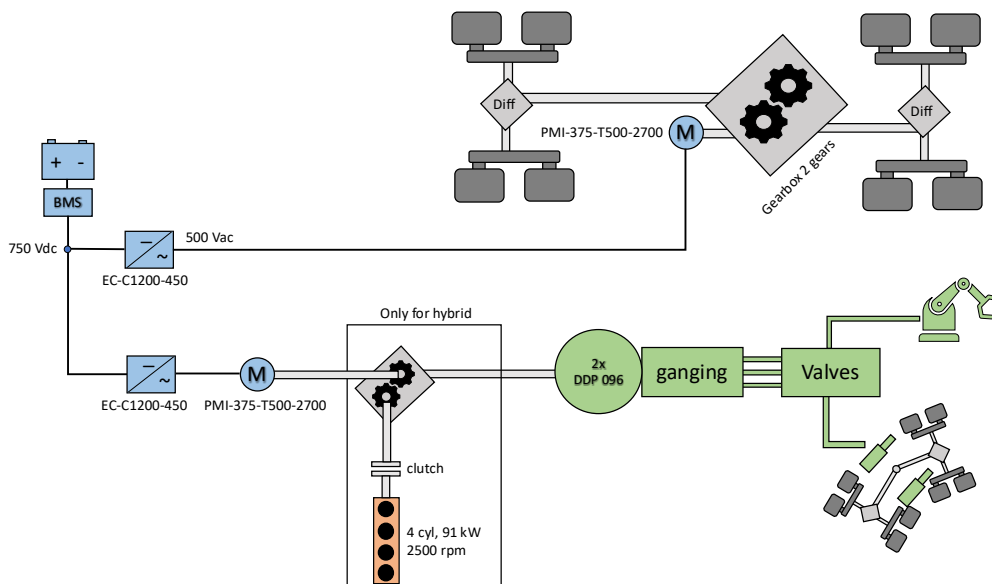
Figur 2. Jämförelse av medeleffekten för konventionell skotare och de studerade koncepten.

För vidare jämförelse och livscykelanalys valdes de två mest energieffektiva koncepten: ”Kombinationshybrid, elektrisk drivlina, DDP” och ”Batteri, elektrisk drivlina, DDP”. Koncepten förklaras nedan i form av schematiska skisser som beskriver de huvudsakliga komponenterna i maskinernas energisystem och deras förbrukare. Skisserna är färgkodade där de elektriska komponenterna är blå, de mekaniska grå, de hydrauliska

gröna och förbränningsmotorn är röd. Symbolerna som används i skisserna förklaras i Figur 3.

	Elektrisk maskin. Kan användas som motor och generator		Hydraulpump (2xDDP096)
	Inverter		Representerar alla kranfunktioner
	Batteri		Representerar alla mindre använda hydrauliska funktioner t.ex. sväng
	Battery management system		Ventilpaket
	Mekanisk växel som kan ändra ingående axels varvtal, moment och riktning		Fördelningsblock
	Differential		Dieselmotor

Figur 3. Beskrivning av symboler.



Figur 4. Systemskiss över de mest energieffektiva koncepten för skotaren. För det batterielektriska konceptet exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett större batteri används.

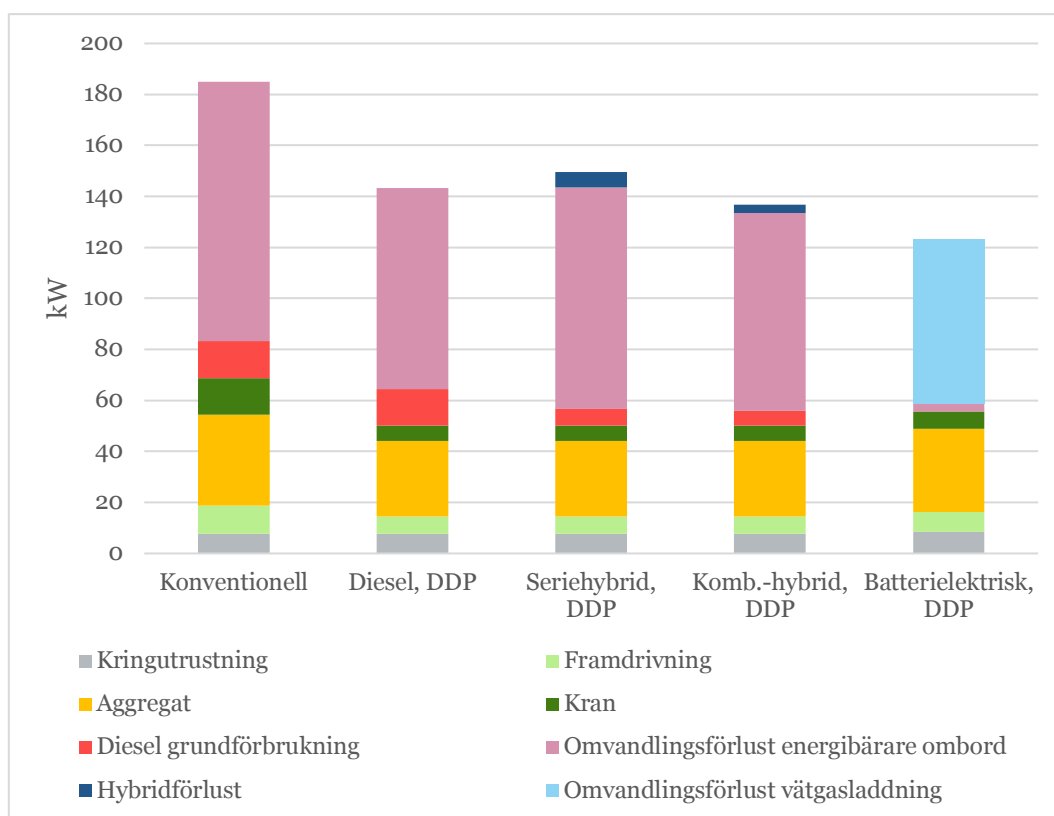
Skotarkoncepten har två elektriska maskiner, en för framdrivningen samt en för arbetshydrauliken som också fungerar som generator i hybridfallet. För kombinationshybriden sitter pumpen till arbetshydrauliken på samma axel som

dieselmotorn (via en växellåda). All energi till drivlinan omvandlas genom den elektriska maskinen ansluten på samma axel.

Förbränningsmotorn är placerad på samma axel som DDP-pumpen. När förbränningsmotorn är i gång driver den pumpen direkt och driver den elektriska maskinen som generator. När dieselmotorn är avstängd kopplas den bort från systemet genom en mekanisk koppling. Eftersom DDP:n har mycket låg tomgångsförbrukning innebär det inga betydande förluster om arbetshydrauliken är vilande.

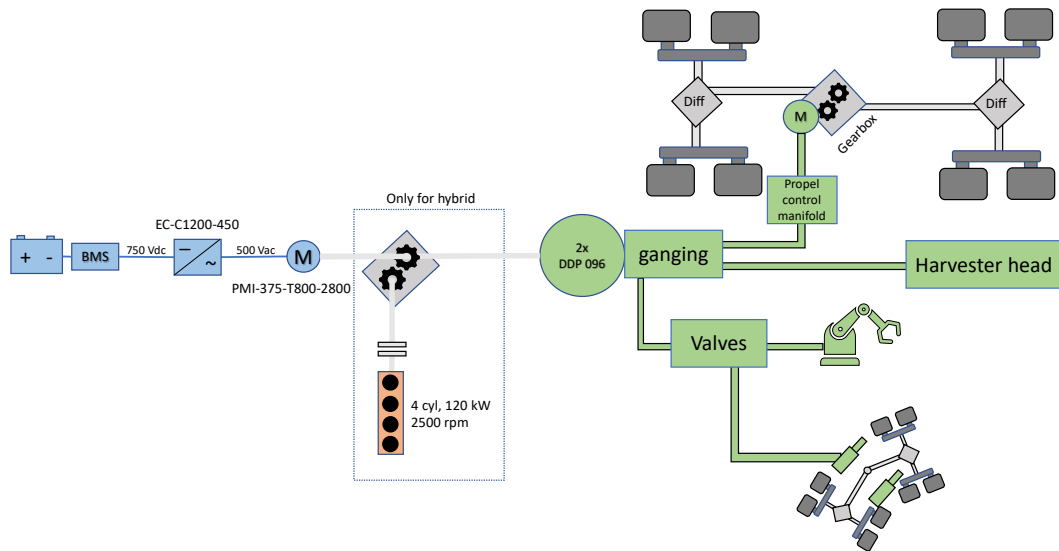
Skördarkoncept med energijämförelse

För skördaren togs fyra alternativa koncept fram för att kunna jämföras med den konventionella konstruktionen med avseende på beräknad energiåtgång. Konzepten beskrivs i Figur 5 med de begrepp för alternativa tekniska lösningar som förklaras i Tabell 5. Den konventionella konstruktionen har en dieselmotor för energiomvandlingen som i sin tur driver tre hydrauliska pumpar. En pump står för maskinens framdrivning och de andra driver i huvudsak kranfunktioner respektive aggregatsfunktioner.



Figur 5. Jämförelse av medeleffekten för konventionell skördare och de studerade koncepten.

För vidare jämförelse och livscykelanalys valdes de två mest energieffektiva koncepten, ”Kombinationshybrid med DDP” och ”Batterielektrisk med DDP”. Den beräknade dieselförbrukningen för hybriderna är 14,2 l/h och medeleffekten för den batterielektriska är 58,6 kW, vilket motsvarar en vätgasförbrukning på 3,7 kg/h. Konzepten förklaras nedan i form av schematiska skisser som beskriver de huvudsakliga komponenterna i maskinernas energisystem och deras förbrukare. Skisserna är färgkodade där de elektriska komponenterna är blå, de mekaniska grå, de hydrauliska gröna och förbränningsmotorn är röd. Symbolerna som används i skisserna förklaras i Figur 3.



Figur 6. Systemskiss för de mest energieffektiva skördarkoncepten. För det batterielektriska konceptet exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett större batteri används.

Skördarkoncepten har endast en elektrisk maskin. För hybridkonceptet fungerar den omväxlande som generator och som elmotor som driver DDP-pumparna.

För kombinationshybriden sitter pumpen till arbetshydrauliken på samma axel som dieselmotorn (via en växellåda). Förbränningsmotorn är placerad på samma axel som DDP-pumpen. När förbränningsmotorn är i gång driver den pumpen direkt och driver den elektriska maskinen som generator. När dieselmotorn är avstängd kopplas den bort från systemet genom en mekanisk koppling. Eftersom DDP:n har mycket låg tomgångsförbrukning innebär det inga betydande förluster om arbetshydrauliken är vilande. Eftersom framdriften utgör en mindre del av energianvändningen i skördaren sågs elektrisk framdrivning inte som motiverat ur ett energibesparingsperspektiv. I stället utnyttjas en hydraulmotor, vilket kräver en extra ventillösning för att kunna drivas från DDP:n.

Drivlina

I kartläggningen framgick tydligt att för skotaren är det framdrivningen som står för största delen av energiförbrukningen. Eldrift på framdrivningen ger högre verkningsgrad än dagens hydrostatiska lösning och även marginellt bättre verkningsgrad än drivning via DDP. För skördaren däremot stod framdrivningen för en betydligt mindre del av energianvändningen. Det var därför inte motiverat den extra komplexiteten att inkludera koncept med elektrisk drivlina.

Dagens maskiner använder växellådor och även med elektrisk drivlina blir växellåda nödvändig. Utmaningen ligger i att erhålla hög dragkraft och kunna erbjuda en topphastighet av 20 km/h likt konventionella maskiner. En viss övervarvning av elmotorn upp till 4000 rpm (med hjälp av fältförsvagning) ger stort hastighetsspann, men två växlar blir ändå nödvändigt. Med en elmotor som fördelar kraften genom en fördelningsväxellåda behövs också bara en växellåda och dragkraften kan fördelas till den hjulaxel (främre/bakre) som har störst motstånd.

En alternativ lösning hade kunnat vara separata elmotorer på fram- och bakvagn, en motor per boggi eller en motor per hjul. Det skulle dock innebära nackdelar i vissa situationer. I branta backar hamnar en stor del av vikten på den nedre boggin. Det innebär att även en stor del av dragkraften måste kunna levereras där, då det inte finns nog med friktion på den övre boggin. Med en kraftkälla för drivningen och en mekanisk fördelningsväxel mellan fram- och bakvagn som används i konventionella maskiner erhålls den egenskapen. För att uppnå motsvarande prestanda med separata elektriska motorer krävs en överdimensionering av varje motor. Dessutom krävs också en växellåda för varje motor för att klara hastighetsomfång och dragkraft. Det finns dock potentiella fördelar med separata elektriska motorer ur terrängkörningsperspektiv och troligen även energimässiga fördelar, men mera omfattande studier är nödvändiga för att kartlägga detta alternativ.

Hydraulik

För samtliga koncept av både skördare och skotare användes en tandemmonterad Digital displacement pump (DDP). Att gå över från konventionella hydrauliska pumpar till DDP var den enskilt största energibesparingen. För krankörning är det framför allt elimineringen av samkörningsförlusterna som innebär en energibesparing. För framdrivningen är det främst den högre verkningsgraden och frånvaron av boost-pump som leder till energibesparing.

Ett alternativt koncept som inte undersöktes är möjligheten att ha individuella hydrauliska kretsar för enskilda funktioner. Genom att separera kretsarna undviks samkörningsförluster som uppstår då flera funktioner med olika behov av tryck och flöde körs på samma pump. DDP-pumpen ger liknande funktionalitet med färre antal komponenter.

En teknisk lösning som inte inkluderades var elektrisk energiöverföring till skördaraggregatet. Det uppstår förluster i de långa hydraulslangarna ut till aggregatet där en stor del av maskinens energi förbrukas. Genom att i stället föra över energin elektriskt skulle förlusterna minska betydligt. Sågmotorn skulle kunna vara elektrisk och de andra funktionerna på aggregatet skulle kunna drivas hydrauliskt av en högvarvig och kompakt elektriskt driven hydraulpump. Konceptet hade god potential till energibesparing men utmaningarna i komponentval gjorde att det ansågs för osäkert att inkluderas i skördarkonceptet.

För kranen finns möjligheter att ersätta hydraulik med elektriska ställdon, men inga sådana lösningar inkluderades i koncepten. Även om tekniken som finns är lovande bedömdes den dock kräva omfattande utvärdering för att en bedömning av rimlighet och driftsäkerhet ska kunna genomföras. Vidare noterades att det kan kräva förändringar i kranens geometri och uppbyggnad, vilket bedömdes vara utanför projektets omfattning.

Hybridkoncept

Båda hybridlösningarna är av typen kombinationshybrid. Maskinerna förses då med energi i form av diesel/HVO. För både skotaren och skördaren valdes ett batteri om 60 kWh. Med ett valt utnyttjande om 20 procent av kapaciteten och baserat på medeleffekterna ger ekvation (7) två starter per timme för skotaren och drygt tre starter per timme för skördaren. Skillnaderna beror på olika medeleffektbehov och olika motorstorlek och därmed laddeffekt. Skotarens dieselmotor har en maxeffekt på 91 kW och maxeffekten på skördarens motor är 120 kW. Båda belastas till 80 procent när de är i

gång. För både skotaren och skördaren innebär det att dieselmotorn är i gång ca 60 procent av tiden.

En maskin som är en hybrid med både förbränningsmotor och elmotor har flera fördelar jämfört med konventionella maskiner ur energisynpunkt. Ett exempel på detta är att förbränningsmotorn bara är aktiv under en del av tiden. Det innebär att när dieselmotorn är avstängd sparar man den effekt som går åt till att övervinna motorns interna motstånd, det som i energijämförelsen kallas "diesel grundförbrukning". En annan energivinst är att när motorn körs och bidrar till att ladda batteriet kan belastningen regleras för att ge en så hög verkningsgrad som möjligt. För en konventionell maskin varierar belastningen på motorn och under en betydande del av tiden bidrar den inte till något nyttigt arbete. En annan källa till energibesparing är att det är mer effektivt att distribuera energi på maskinen som elektricitet än som tryck och flöde i ett hydraulsystem. Detta drar till exempel skotarkonceptets drivlina nytta av.

Då dieselmotorn är aktiv kontrollerar ett styrsystem den elektriska maskinens användning som antingen generator eller elmotor. Det ser till att dieselmotorn håller optimal effekt och att elmaskinen går som generator då det finns överskott av effekt. En sådan regleringslösning finns inte som standard i den kraftelektronik som föreslagits i konceptet, men uppskattas vara en rimlig produktanpassning att genomföra.

Det finns två fördelar med en kombinationshybrid jämfört med en seriehybrid. Den ena är att inte all energi måste omvandlas till elektrisk energi, vilket är förknippat med sådana förluster som i energijämförelsen kallas "hybridförlust". Den andra fördelen är att en elektrisk maskin med tillhörande kraftelektronik kan uteslutas, då samma maskin här används både som motor och generator. Nackdelen är att det behövs en mekanisk koppling för att koppla bort dieselmotorn då den är avstängd.

Jämfört med en parallellhybrid har serie- och kombinationshybriderna fördelen att motorn alltid går vid optimal belastning och verkningsgrad. En parallellhybrid har nackdelen att dieselmotorn alltid är i gång och den dras därmed med i princip samma grundförbrukning som en konventionell maskin. Belastningen på dieselmotorn kommer att variera med belastningen på den funktion motorn är kopplad till, till exempel hydraulpumpen. Om en elektrisk motor är kopplad till samma funktion kan den dock användas för att minska variationerna i belastning på dieselmotorn och på så sätt få den att arbeta vid en mer gynnsam belastning och verkningsgrad.

Batterielektriska koncept

I de batterielektriska koncepten exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett betydligt större batteri används i stället. De är i övrigt lika som hybridkoncepten.

För de fortsatta analyserna har följande val gjorts för de batterielektriska koncepteten. Batteriet har dimensionerats för 8 h drift och vid skiftbyte kan det bytas med hjälp av maskinens kran. Laddning av batteriet sker vid avlägg i ett vätgasdrivet bränslecellsaggregat. Energimängden som behövs för 8 h drift varierar beroende på traktens egenskaper. Storleken på batterierna har valts för att kunna klara 8 h drift på de flesta av trakterna i Sverige. Valet har gjorts med hänsyn till statistik över bränsleförbrukning på olika trakter och med den energibesparing som de batterielektriska koncepten beräknas innebära. Uppskattat energibehov för koncepten med avseende på andelen svenska trakter som kan hanteras illustreras i Figur 7.

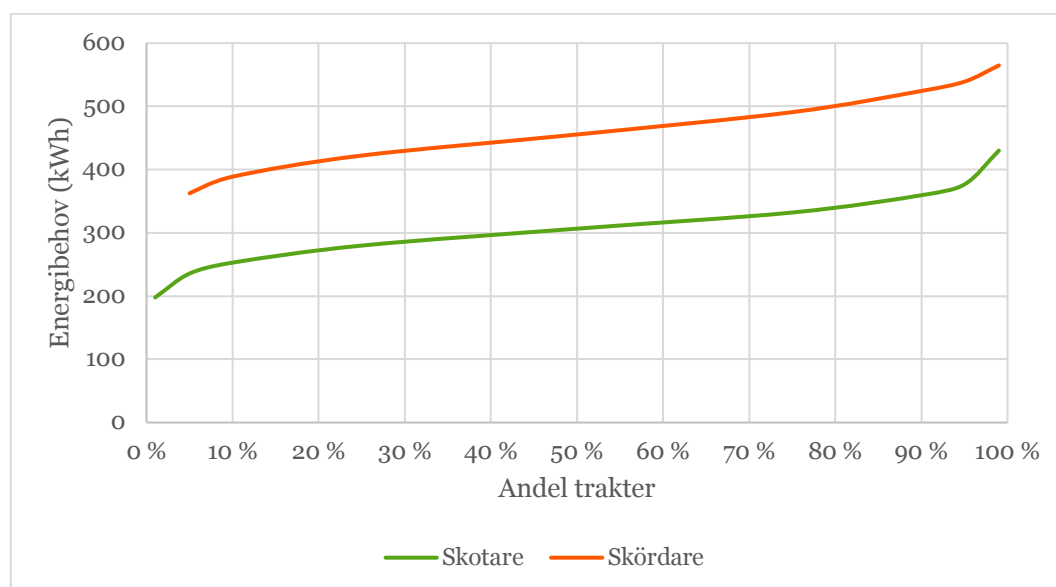
För den batterielektriska varianten av skotaren sattes storleken av batteriet till 500 kWh och för skördaren 750 kWh. Det ger en marginal för att undvika djupurladdningar och

fulladdning av batteriet samt tar höjd för att batteriets kapacitet minskar med ålder och användning. Däremot har ingen hänsyn tagits till att batteriets prestanda påverkas av temperatur, vilket kan kräva ytterligare marginaler eller användning av energi för att hantera detta (till exempel värmesystem vid kyla). Exakt modell av batteri och mekanisk utformning har inte behandlats i projektet.

Elbilsbatterier väger runt 6–7 kg/kWh, där större batterier är lättare per kWh [13, 14]. För bytbara batterier tillkommer även en kraftigare mekanisk konstruktion. För koncepten, som kommer att behöva byten, antas värdet 7 kWh/kg samt att vissa viktbesparingar görs på dieselmotor och tank som är lättare än elmotor och kablage så att 1000 kg sparas. Skördarens totalvikt väntas då bli 4200 kg tyngre och skördaren 2500 kg tyngre. För skördaren bör detta vara ett marginellt problem då den rör sig långsamt och relativt lite. I skotarfallet kan viktökningen i värsta fall påverka lastkapaciteten, men det är inget som hanterats vidare i detta arbete. Det kan noteras att det kan finnas fördelar i att dela batterierna i 2–3 moduler. Då kan maskinens egen kran köras på en kvarvarande modul under bytet av en annan. Genom att använda moduler om 250 kWh kan samma typ av modul användas i båda maskinerna, skördaren använder tre och skotaren två, vilket kan ha praktiska fördelar.

Sannolikt är det olika trakter som är mest energikrävande för skördare och skotare. För skördarna innebär hög virkestäthet och därmed intensivt arbete med kran och aggregat det högsta energiförbrukningen per timme. För skotarna är det trakter med långa transportavstånd som är mest energikrävande.

Eftersom batterierna är för stora och tunga för att transportera på ett enkelt sätt och på så sätt kunna laddas från elnätet har en vätgasbränslecell för laddning vid avverkningsplatsen inkluderats i konceptet. Tvåskift är det vanligaste sättet att organisera arbetet i drivning. Därför har bränslecellen dimensionerats för att kunna ladda batteriet under ett skift så att det är färdigladdat när nästa operatör avslutar sitt skift och behöver sätta sitt batteri på laddning. Det innebär en snitteffekt på 40 och 70 kW för skotare respektive skördare. Vid enkelskift skulle laddning även kunna ske över natten med lägre effekt. Transport av vätgasen antas kunna utföras av maskinförarna på likande sätt som de idag transporterar diesel till avverkningsplatsen.



Figur 7. Uppskattat energibehov för de batterielektriska koncepten för att klara given del av Sveriges trakter.

Livscykelanalys

Vad gäller marknära ozon hittades inga signifikanta skillnader mellan koncepten och det presenteras därför inte i den fortsatta resultatredovisningen. Ozonet kommer dock från olika källor där dieselförbränning är den största enskilda källan, men också produktion av batteri, vätgasinfrastruktur och generering av el är betydande källor.

Skördare

Dieselförbränningen under användningsfasen är den överlägset största källan till klimatutsläpp för hybridkonceptet och det konventionella konceptet. För det batterielektriska konceptet är användningsfasen och tillverkningsfasen mer lika. Om svensk genomsnittsel används för produktionen av vätgas är användningsfasen större än tillverkningsfasen, medan det omvända förhållandet råder om överskottsel (utan miljöbörda) används för vätgasgenerering. Det batterielektriska konceptet har lägst klimatpåverkan, knappt hälften av det konventionella konceptets påverkan. Hybridkonceptet sparar närmare 25 procent koldioxidutsläpp i användarfasen jämfört med en konventionell maskin. När överskottsel används för att producera vätgas mer än halverar det batterielektriska konceptet sin klimatpåverkan.

För resursutarmning är produktionen av de stora batterierna i det batterielektriska konceptet den största faktorn. För att sätta skillnaderna mellan koncepten som ingått i kalkylen i proportion till en komplett maskins miljöpåverkan inkluderades en befintlig analys av tillverkningen av en skördare. Det innebär ytterligare klimatpåverkan med 7 kg CO₂-eq per timme för både den konventionella maskinen och alla koncepten.

Den batterielektriska maskinen beräknas ha drygt hälften av den konventionella maskinens klimatpåverkan och hybridmaskinen ligger närmre den konventionella maskinen. Resursutarmningen är 2,7 gånger så stor för hybridkonceptet och 17 gånger så stor för det batterielektriska konceptet jämfört med den konventionella skördaren.

Skotare

Även här använder vi den befintliga analysen av en skördare för att sätta siffrorna från komponentskillnaderna i proportion. Trots att det är en annan typ av maskin innehåller de i stort samma typ av material och komponenter.

Det batterielektriska konceptet beräknas ha knappt hälften så stor klimatpåverkan som den konventionella maskinen. Hybridkonceptet sparar närmare 30 procent koldioxidutsläpp i användarfasen jämfört med en konventionell maskin.

Sett till resursutarmning innebär hybridkonceptet 2,8 gånger så stor resursutarmning och det batterielektriska konceptet 12 gånger så stor resursutarmning som den konventionella skotaren.

Livscykelkostnad

Maskinkonceptens livscykelkostnad baserat på dagens uppskattade komponentkostnader samt prognostiserade komponentpriser för 2030 med hänsyn till maskinkostnad,

bränslekostnad, samt investeringskostnad och värdeminskning redovisas i Tabell 8 för skördaren och Tabell 9 för skotaren.

För hybridkoncepten ökar maskinkostnaden med 5–10 procent och totalt sett förväntas användningen bli runt 10 procent billigare än en konventionell maskin för både skördare och skotare. Resultatet för 2030 är i princip likvärdigt, då maskinkostnaden i och för sig blir relativt sett några procentenheter lägre, men huvudposten bränsle ökar i pris på samma sätt som för den konventionella.

Komponenterna till de batterielektriska koncepten, framför allt de stora batterierna, är dyra och båda maskinerna uppskattas i dag bli närmare dubbelt så dyra som konventionella maskiner. I gengäld är kostnaderna för energianvändningen i brukarfasen lägre och totalt sett blir batterikoncepten 60 procent dyrare för skördaren och 30 procent dyrare för skotaren. Fördelningen av kostnaden för bränslecell och tuber landade på 60 procent för skördaren och 40 procent för skotaren, vilket ger marginell påverkan på resultaten. Det är snarare det väsentligt större batteriet på skördaren och det höga energibehovet som ger det sämre totalresultatet relativt skotaren. Med prognoserna för 2030 blir resultaten annorlunda. Maskinkostnaderna förväntas då vara bara 30–40 procent högre än en konventionell maskin och totalkostnaden blir 10 procent lägre än för en konventionell maskin.

Tabell 8. Uppskattade kostnader i miljoner SEK för skördarkoncepten idag och 2030.

		Konventionell	Hybrid	Batteri
Idag	Maskinkostnad	5,0	5,3	9,9
	Bränslekostnad	4,2	3,2	4,7
	Räntekostnad	1,1	1,2	2,3
	Restvärde	0,8	0,8	1,5
	Totalkostnad	9,6	8,9	15,4
2030	Maskinkostnad	5,0	5,1	7,0
	Bränslekostnad	6,0	4,5	2,4
	Räntekostnad	1,1	1,2	1,6
	Restvärde	0,8	0,8	1,1
	Totalkostnad	11,3	10,0	10,0

Tabell 9. Uppskattade kostnader i miljoner SEK för skotarkoncepten idag och 2030.

		Konventionell	Hybrid	Batteri
Idag	Maskinkostnad	4,0	4,4	7,3
	Bränslekostnad	3,3	1,9	1,9
	Räntekostnad	0,9	1,0	1,7
	Restvärde	0,6	0,7	1,1
	Totalkostnad	7,6	6,6	9,8
2030	Maskinkostnad	4,0	4,3	6,0
	Bränslekostnad	4,7	3,4	1,6
	Räntekostnad	0,9	1,0	1,4
	Restvärde	0,6	0,6	0,9
	Totalkostnad	9,0	7,9	8,1

Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet visar på potential till en markant energibesparing för koncepten jämfört med konventionella maskiner. De föreslagna koncepten med hybridteknik och DDP-pump väntas kunna spara 20–30 procent koldioxidutsläpp i användarfasen jämfört med en konventionell maskin. Batterimaskiner kan potentiellt närmare eliminera koldioxidutsläppen i användarfasen, men den nödvändiga energimängden för ett arbetspass är fortfarande stor. I projektets beräkningar användes en vätgasbränslecell vid avlägget som laddade stora batterier som räckte ett arbetspass. Ett möjligt alternativ är att transportera batterier för laddning från elnätet, men då tillkommer frågor om hur logistiken skulle gå till.

I projektet har vi utelämnat hur maskinerna skulle konstrueras för att rymma batteriernas volym och vikt samt exakt hur batteribyten sker. Batterierna blir enklare att hantera och att få plats med på maskinerna om man är villig att byta batteri oftare, men då kvarstår utmaningen att transportera den nödvändiga batterikapaciteten för laddning på nätet.

Livscykelanalysen visar att det sannolikt finns avsevärda skillnader i klimatpåverkan och resursutarmning för de olika koncepten. Skillnaderna är störst mellan de batterielektriska maskinerna och de traditionella maskinerna. Hybridmaskinen ligger i mitten, men närmare den traditionella maskinen såväl vad gäller klimatpåverkan som resursutarmning. För marknära ozon kan däremot inga signifikanta skillnader mellan koncepten konstateras.

I dagsläget är det dyrt att producera de batterier som behövs för de hybrid- och batterielektriska maskinerna. I hybridfallet leder dock bränslebesparingen till att maskinerna totalt sett faktiskt blir 8–13 procent billigare än en konventionell maskin. Batterimaskinerna blir väsentligt dyrare i dagsläget. Det väntas dock en snabb effektivisering inom batteriindustrin med tillhörande prisminskningar. I kombination med väntat ökande bränslepriser innebär det att totalkostnaden för batterielektriska koncept potentiellt skulle kunna vara billigare än konventionella maskiner redan 2030.

För den fortsatta forskningen finns många intressanta frågeställningar. Om batterielektriska maskiner är ett utvecklingsspår som kommer att fortsätta är en av de mer uppenbara utmaningarna hur energin ska fraktas till skogen. Förutom vätgas med bränslecell som redan nämnts, finns tidigare idéer kring mobila batterilager. De stora energimängderna bedöms vara en utmaning. Andra energilagringmetoder kan vara exempelvis biogas, elektrobränslen (elektriskt framställda kolväteföreningar från industriavgaser) eller grön ammoniak (ammoniak producerad från fossilfri el). Energiomvandlingens placering är en annan fråga. Är det mera lämpligt att använda batterielektriska maskiner med laddning från ett separat elverk eller ska omvandlingen placeras på maskinen? Är bränsleceller eller förbränningsmotorer mest lämpade på maskinen eller vid avverkningsplatsen?

Det finns även andra intressanta frågeställningar för fortsatt forskning:

- Hur ska hybridmaskinernas laddningsstrategier designas för att minska belastning på batterier och laddningssystem?
- Mer avancerade simuleringar och experimentella data på hur batterier i hybrider och batterielektriska maskiner åldras i den här tillämpningen. Hur ska batterierna hanteras med värmning, kylning m.m.?

- Hur ska de batterielektriska maskinerna utformas för att hålla de stora batterierna och är mekaniskt batteribyte praktiskt rimligt?
- Finns energibesparingar och potential till lägre markpåverkan med elektrisk drivlina fördelad per hjul eller boggi (4 eller 8 motorer)?
- Hur kan skördaraggregatet drivas elektriskt? Matarvalsarna är stora förbrukare idag med höga hydrauliska energiöverföringsförluster.
- Kan energiåtervinning i rörelser användas för att minska energianvändningen?
- Hur kan krandedesignen anpassas för elektriska drivdon?
- Energikartläggningen av maskinerna kan förbättras och inkludera mer av hur olika körmönster och yttre förhållanden påverkar.

Referenser

- [1] Personlig kommunikation med L. Eliasson, Skogforsk, 2024-11-07.
- [2] Naumann, M., Spingler, F.B., & Jossen, A. (2020). Analysis and modeling of cycle aging of a commercial LiFePO₄/graphite cell. *Journal of Power Sources*, Vol. 451, 227666. ISSN 0378-7753. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227666>
- [3] Naumann, M., Schimpe, M., Keil, P., Hesse, H. C., & Jossen, A. (2018). Analysis and modeling of calendar aging of a commercial LiFePO₄/graphite cell. *Journal of Energy Storage*, 17, 153-169. ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.019>
- [4] Wang, J., Liu, P., Hicks-Garner, J., Sherman, E., Soukiajian, S., Verbrugge, M., Tataria, H., Musser, J., & Finamore, P. (2011). Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources*, 196(8), 3942–3948. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.134>.
- [5] Jönsson, P., Andersson, M., Hannrup, B., Henriksen, F. och Högdahl, A. (2016). Arbetsrapport 913-2016.
- [6] Barth, M., Younglove, T. och Scora, G. (2005). Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. Final Report for Task Order 4215, California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. UCB-ITS-PRR-2005-1. California PATH Research Report.
- [7] An, F. och Ross, M. (1993). A Model of Fuel Economy with Applications to Driving Cycles and Traffic Management. *Transportation Research Record*, nr. 1416.
- [8] Ross, M. och An, F. (1993). The Use of Fuel by Spark Ignition Engines. SAE Technical Paper, nr. 930329.
- [9] Manner, J., Nordfjell, T., & Lindroos, O. (2016). Automatic load level follow-up of forwarders' fuel and time consumption. *International Journal of Forest Engineering*, 27(3), 151–160. <https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1231484>
- [10] Manner, J., Nordfjell, T., & Lindroos, O. (2013). Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. *Silva Fennica*, vol. 47, nr 4, artikel-id 1030. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.14214/sf.1030>
- [11] Xie, Y., Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). Purchase costs of zero-emission trucks in the United States to meet future Phase 3 GHG standards (Working Paper 2023-10). International Council on Clean Transportation. Hämtad från <https://www.theicct.org>

[12] Energimyndigheten. (2022). Kontrollstation för reduktionsplikten 2022. Delrapport 1 av 2 (ER 2022:07). Hämtad från <https://www.energimyndigheten.se>

[13] ADAC. Kia EV9 – Technische Daten und Informationen. Hämtad från: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/kia/ev9/mv1/327686/#technische-daten>

[14] ADAC. Opel Ampera – Technische Daten und Informationen. Hämtad från: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/opel/ampera/2generation/275079/#technische-daten>

Deltagande parter och kontaktpersoner

Part	Kontaktperson	Kontaktuppgifter
Skogforsk (koordinator)	Martin Englund	martin.englund@skogforsk.se
RISE	Mats Zackrisson	mats.zackrisson@ri.se
Linköpings universitet	Liselott Ericson	liselott.ericson@liu.se
Danfoss	Kim Skov	kskov@danfoss.com



Bilaga 1



Tandem DDP



DDP styrenheter



EM-PMI375-T500, EM-PMI375-T800



EC-C1200-450 Inverter

Figur A. Nyckelkomponenter från Danfoss i koncepten.