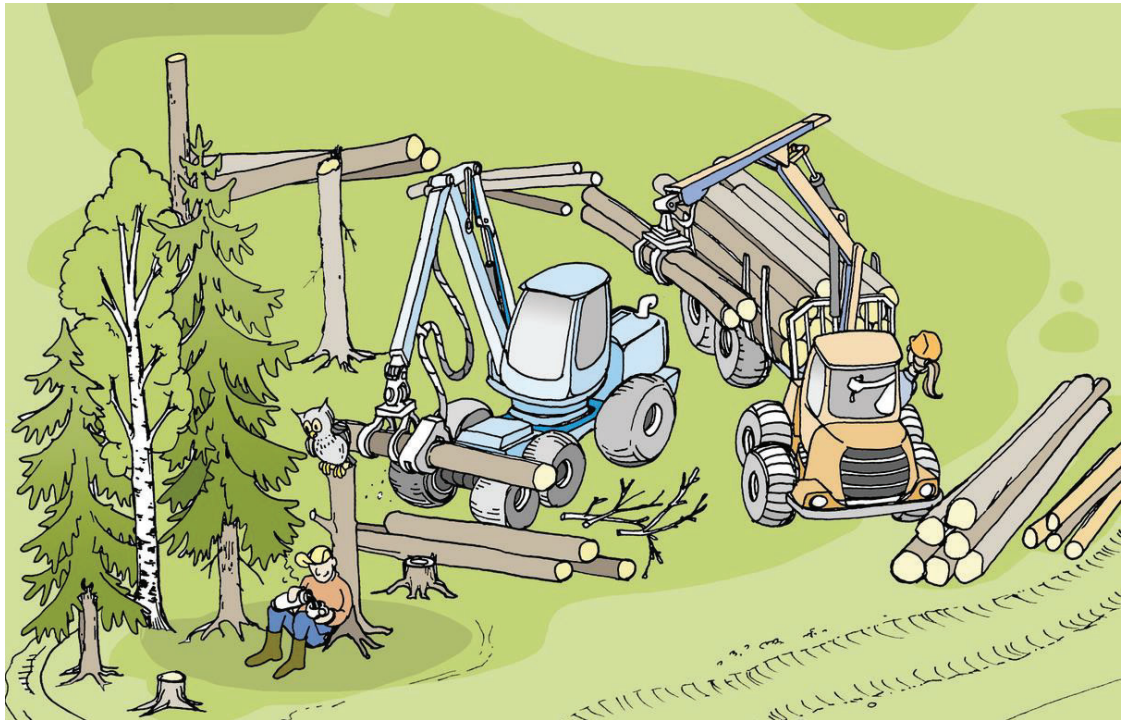


Förstudie om utformning av energieffektivare skogsmaskiner



Författare:

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

RISE: Mats Zackrisson

Linköpings universitet: Samuel Kärnell, Liselott Ericson

Danfoss: Martin Fredriksson, Kim Skov, Hans Jorgen Jensen, Pavel Buzin

Datum: 2023-05-17

Projekt inom den särskilda satsningen Fossilfria Arbetsmaskiner

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....	6
5 Mål	8
6 Resultat och måluppfyllelse	8
6.1 Prestandakartläggning	8
6.2 Konceptdesign.....	9
6.3 Livscykelanalys	16
6.4 Livscykelkostnad	17
6.5 Bidrag till utlysningens mål.....	18
7 Spridning och publicering	19
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	19
7.2 Publikationer.....	19
8 Slutsatser och fortsatt forskning	19
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	21

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

Copyright framsidebild, Mats Rundlöf.

1 Sammanfattning

I studien har olika designkoncept för skördare och skotare med avseende på energiåtgång, klimatpåverkan, resursutarmning och kostnad studerats. Koncepten har utformats för att motsvara prestandan hos maskiner som används i föryngringsavverkning. 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. På 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. Bortsett från dieselmotorn hos hybridkoncepten och att ett betydligt större batteri användes i de batterielektriska koncepten var de i övrigt lika. Genom simuleringar beräknades energibesparingen i användning av koncepten till 43% för skotaren och 25% för skördaren. För hybridkoncepten är alltså dieselbehovet minskar med samma nivåer. De batterielektriska koncepten har samma användning av elektrisk energi lokalt på maskinen. Deras batterier dimensionerades för att räcka till 8 timmars arbete. Varje maskin är utrustad med två sådana batterier för att kunna ladda det ena när maskinen används. För laddningen finns en vätgasbränslecell på avverkningsplatsen.

En livscykelanalys genomfördes på koncepten. Den visade att diselförbrukningen under användningsfasen är den överlägset största källan till klimatpåverkan för den konventionella maskinen och hybridkonceptet. De batterielektriska koncepten innebär 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 elkomponenterna och framför allt batterierna innebär större resursutarmning än konventionella maskiner.

Även en livscykelkostnad beräknades för koncepten och inkluderade investeringskostnad, värdeminskning och bränslekostnad. För de batterielektriska koncepten inkluderades inte kostnaden för väte till bränslecellerna eftersom underlag saknades. Prognoser visar att komponenter som ingår i koncepten, framför allt batterierna, kommer sjunka i pris samtidigt som dieselpriiset ökar. Därför genomfördes kalkylen både med dagens priser och de prognosticerade priserna för 2030. Redan med dagens priser skulle en hybridmaskin vara lönsam jämfört med en konventionell maskin medan en batterielektrisk har en högre kostnad. År 2030 har de batterielektriska konceptmaskinerna jämfört med den konventionella maskinen ett ekonomiskt utrymme för vätgaskostnader på ca 3,8 och 2,7 miljoner kronor för skördare respektive skotare. De stora och tunga batterierna innebär dock praktiska svårigheter att hantera och placera på maskinerna.

Projektet visar att det finns en stor potential till minskad klimatpåverkan från skogsmaskiner genom användning av effektiv hydraulik och elektrifiering. Det finns ett flertal intressanta frågeställningar för fortsatt forskning. För batterielektriska maskiner finns olika alternativ på infrastruktur för att föra ut elektrisk energi till avverkningsplatsen eller skapa den på plats. Det finns flera alternativa energilagringsmetoder som biogas, elektrobränslen eller grön ammoniak. Energiomvandlingens placering är en annan fråga, om det är mera lämpligt att den sker vid sidan av eller på själva maskinen.

För den fortsatta forskningen finns 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 energilagringsmetoder kan vara exempelvis biogas, elektrobränslen (elektriskt framställda kolväteföreningar från industriavgaser) eller grön ammoniak (ammoniak producerad från certifierad el). 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.

2 Executive summary in English

To make a transition to sustainable fuels or electricity for forestry machines, it is necessary to minimize energy losses to the system. To provide a comprehensive assessment of the energy reduction potential of different machines and driving cycles, knowledge of where energy losses occur in the vehicle's motion systems is required. Most of the motion in forestry machines occurs through hydraulic power transmission. In this project, we focus on the main systems: crane and tool movement, as well as propulsion. The project aims to describe how new concepts and technologies can be used in forestry machines (harvesters and forwarders) to improve energy efficiency and reduce environmental impact throughout the machines' lifecycle.

The first step was to map the characteristics of forwarders and harvesters intended for regeneration felling using public data. Average values of several machines from multiple manufacturers have been used to determine the performance demands and specification of the concept machines in terms of traction, load capacity, wheel diameter, and more. The machines have been assumed to have a technical and economic lifespan of 16,000 hours and 6 years. In the next step, various machine concepts were formulated and evaluated. Several concepts were modeled in the performance mapping simulator, and the simulation results were used to compare the concepts in terms of energy usage. The concepts were evaluated based on technical complexity and cost. The simulations showed a relative improvement compared to the traditional machine for each concept. The battery packs in the battery-electric concepts were sized to enable the machines to operate for 8 hours on 95% of all regeneration felling sites in Sweden (based on fuel consumption tracking statistics). A life cycle assessment (LCA) was conducted on the final concepts compared to conventional machines, considering the differences in carbon dioxide emissions and resource depletion. An analysis of life cycle costs was also performed.

The purpose of the feasibility study is to contribute to decision-making regarding the direction of future research and development projects aimed at more energy-efficient forestry machines. The preliminary study helps identify the overall directions that may be possible, such as assessing the feasibility of electrification. For both harvesters and forwarders, the analysis resulted in two concepts: a hybrid combination and a battery-electric concept. In the hybrid combination, the machines are powered by a combination of diesel/HVO fuel. In the battery-electric concepts, the diesel engine and associated components are excluded, and a significantly larger battery is used instead.

The term complex hybrid means that it operates as a combination of a series hybrid and a parallel hybrid. The diesel engine operates intermittently, delivering energy that is stored in the battery for later use to power the machine's hydraulic system when the diesel engine is turned off (as to a series hybrid). Additionally, the diesel engine directly provides energy to the hydraulic system in collaboration with the electric motor (as a parallel hybrid). For the battery-electric concept, a battery equivalent to 8h of operation is used. The battery can be mechanically replaced with the assistance of the machine's crane. The estimated battery size for the concepts has been designed to handle 95% of Swedish sites. Due to the batteries being too heavy to transport easily, a hydrogen fuel cell for on-site charging at the harvesting location has been included in the calculations. For both harvester and forwarder concepts, two tandem-coupled 96 cubic centimeter hydraulic pumps are used. The specific model employed is the Danfoss Digital Displacement Pump (DDP096). The pump controller activates each piston individually, making the pump displacement electronically variable and resulting in fast, accurate flow control.

The environmental advantages and disadvantages of the proposed concepts were studied through an LCA comparing them to conventional machines. The analysis covers the manufacturing phase and 16,000 hours of machine operation. Since the machines are typically not scrapped after this time but rather sold for less intensive use, recycling is not included in the analysis. The LCA includes the differences in the concepts' climate impact, ground-level ozone, and resource depletion. However, no significant differences were found in terms of ground-level ozone formation among the concepts.

For the harvester the diesel combustion during the usage phase is by far the largest source of climate emissions for both the hybrid concepts and the conventional concepts. For the battery-electric harvester

concept, the usage phase and manufacturing phase are roughly equivalent when Swedish average grid electricity is used for hydrogen production. The total climate impact is 43 kg CO₂-eq per hour for the conventional concept, 34 kg CO₂-eq for the hybrid concept, and 19 kg CO₂-eq for the battery-electric concept. When surplus electricity with no environmental burden is used for hydrogen production, the climate impact of the battery-electric concept is more than halved to 8.3 kg CO₂-eq. For resource depletion, the production of the large batteries in the battery-electric concept is the most significant factor. In terms of the differences in manufacturing and usage among the concepts, the hybrid concept results in 6.7 times greater resource depletion, while the battery-electric concept exhibits over 50 times greater resource depletion compared to the conventional concept.

For the forwarder, the conventional concept has a climate impact of 35 kg CO₂-eq per hour, the hybrid concept 21 kg CO₂-eq, and the battery concept 14 kg CO₂-eq (using Swedish average grid electricity). Regarding resource depletion, the hybrid concept results in 7.5 times greater resource depletion, while the battery concept exhibits 41 times greater resource depletion compared to the conventional concept.

Cost estimates for the differences between the concepts have been compared with the cost of a conventional harvester and forwarder. The total cost of the concept, which includes the sum of the interest cost for the excess investment, depreciation, and fuel (diesel/HVO) cost, has been compared for the various concepts. Hydrogen cost for the fuel cell that charges the battery electric concepts have not been included. Cost estimates have been conducted only for the components that differ among the various concepts. The components for the battery-electric concept are considerably more expensive to purchase compared to the components for the conventional concept. For the harvester, the components for the battery-electric concept cost approximately nine times as much, and for the forwarder, they cost slightly over seven times as much compared to the conventional concept. The hybrid concept also incurs higher component costs than the conventional concept, but only around 25% more for the harvester and 58% more for the forwarder. For the hybrid concept, the life cycle cost amounts to 79% of the cost of the conventional concept for the harvester and 67% for the forwarder. The life cycle cost of the battery-electric concepts (excluding hydrogen cost) in both cases exceeds the cost of their conventional counterparts (including fuel cost): by 6% for the forwarder and 25% for the harvester. Prices of batteries, fuel cell systems, and hydrogen tanks, as well as other components in the electric powertrain such as transmission, motor, and inverters, are expected to decrease by the year 2030. Diesel prices, on the other hand, are expected to rise in the future. After recalculating the results with expected prices in 2030 for batteries, electric powertrain components, and diesel, a significantly different cost calculation is obtained. In this case, the battery-electric concepts achieve a life cycle cost of 35% (harvester) and 42% (forwarder) of the conventional concept. For the hybrid machine an improvement is also seen, but on a smaller scale. The total cost of the hybrid concept is 75% (harvester) and 59% (forwarder) of the conventional concept in 2030.

For further research, there are many interesting questions to explore. One of the more obvious challenges is how to transport energy to the forest. In addition to hydrogen with fuel cells, previously discussed ideas include mobile battery storage. Other energy storage methods could involve biogas, electrofuels, or green ammonia (ammonia produced from certified electricity). The placement of energy conversion is another question: Is it more suitable to use battery-electric machines with charging from a separate power source, or should the conversion be located on the machine itself?

3 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 utveckling fokuserat på automation av rörelser och körning, till exempel i Vinnoprojektet AUTO2 och i Mistra Digital Forest. Automationssteget kan bli mer energieffektivt och hållbart om förståelsen av rörelsesystemet förbättras genom det sökta projektets analys. Pågående studier rörande elektrifiering av

jordbruksmaskiner vid bland annat Sveriges lantbruksuniversitet och RISE bedöms vara intressanta och relevanta för projektet.

För att kunna ge en bra bedömning av energiminskningspotentialen för olika arbetsmaskiner och körcykler krävs en kunskap om var energiförlusterna sker i rörelsesystemen på fordonet. Majoriteten av rörelsen på skogsmaskiner sker genom hydraulisk kraftöverföring. I projektet fokuserar vi på de huvudsakliga systemen kran- och verktygsrörelsen samt framdrivningen. I tidigare FFI projekt (Stealth) visades att med ganska små förändringar kan energiförbrukningen minskas med 50 % för en styckegodskran. Körcykeln har en mycket stor inverkan på potentialen för energibesparing vilket visades inom ett pågående FFI projekt (Ehydraulik) 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.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

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.

Arbetet har utförts i tre 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 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, mm. Medelvärdena har även fungerat som underlag till en simuleringsmodell av maskinerna för att beräkna deras energianvändning idag. Maskinernas energianvändning har kartlagts baserat på en kombination av förbrukningsstatistik, förbrukningsstudier på skogsmaskiner, en markmodell, en dieselmotormodell samt en simulering av maskinernas användning i typisk drift från en realtidssimulator. Markmodellen togs fram i projektet. Kartläggningen var underlag till en simuleringsmodell för att beräkna energianvändning i maskinerna. Maskinerna har antagits ha en teknisk och ekonomisk livslängd på 16 000 timmar och 6 år.

Konceptdesign

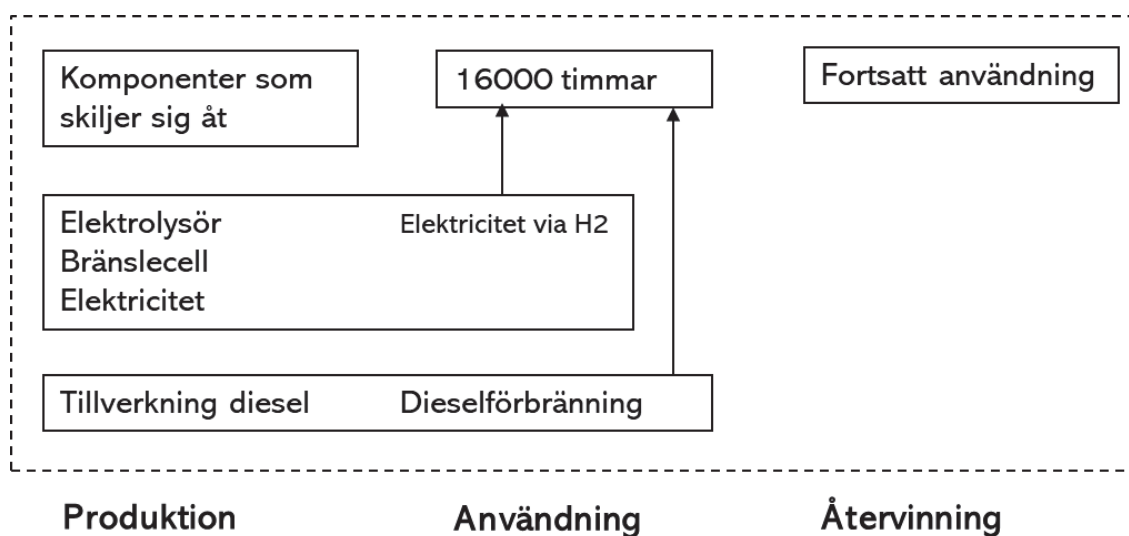
I detta steg formulerades och utvärderades olika maskinkoncept. Ett flertal koncept modellerades i simulatormodellen från prestandakartläggningen och simuleringsresultaten användes för att jämföra koncepten i termer av energianvändning. Koncepten utvärderades ur perspektiven teknisk komplexitet och kostnad. Simuleringarna gav en relativ förbättring i energieffektivitet jämfört med konventionella maskiner. Batteripacken i de batterielektiska koncepten dimensionerades så att maskinerna skulle kunna arbeta i 8h på 95 % av alla förnygringsavverkningstrakter i Sverige (baserat på statistik från uppföljning av bränsleförbrukning). En marginal sattes för att ta hänsyn till batteriernas åldrande och för att undvika kraftiga urladdningscykler. Batteridimensionering för hybrider är mer komplicerat då antalet laddningscykler beror på maskinens energibehov i varje stund, laddsystemets kapacitet och batteriets kapacitet. En kompletterande simuleringsmodell användes där maskinernas arbete delades upp i cykler med ett visst medelbehov av energi. Modellen kompletterades med modeller för batteriers åldrande för att hitta hybridbatterier som uppskattas hålla hela maskinernas tekniska livstid.

Livscykelanalys och livscykelkostnad

En livscykelanalys, LCA, utfördes på de slutliga koncepten jämfört med konventionella maskiner med avseende på skillnaderna i koldioxidutsläpp 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 et al 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 1 timmes drift av skogsmaskin.



Figur 1. Systemgränser för LCA

Produktionsfasen modelleras endast för de komponenter som skiljer sig åt mellan de olika koncepten, dvs batteri och dieselmotor samt elmotorer, invertrar, kylare etc. En bränslecell antas behövas för laddning av batterierna i de batterielektriska maskinerna. Produktionen av såväl bränslecell som elektrolysör ingår i kalkylen. Dessutom ingår produktion av nödvändig utrustning för kompression, lagring och transport av vätgasen. På samma sätt ingår infrastrukturen för dieselproduktion. Transporten av vätgasen ut i skogen antas kunna ske av maskinoperatörerna ungefär på samma sätt som dieseltransporten, så dessa transporter kvittas mot varandra, dvs de ingår inte i kalkylen. Det är mycket troligt att vätgaselektrolys i stor utsträckning kommer att göras med överskottsel, dvs elektricitet som vi annars inte hade kunnat använda. I basfallet anses ändå elektriciteten för elektrolysen vara svensk genomsnittsel. I en känslighetsanalys räknas med elektricitet helt utan miljöpåverkan.

Kostnadsberäkningar för de skillnader som finns i mellan koncepten har genomförts och jämförts med kostnaden för en konventionell skördare och skotare. Tre skilda parametrar har beaktats; kostnaden för de komponenter som skiljer mellan maskinerna, räntekostnad samt bränslekostnad. För det batterielektriska konceptet har kostnaden för köp och hantering av vätgas utelämnats. Slutligen har totalkostnaden för konceptet, dvs summan av räntekostnaden för den överskjutande investeringen, värdeminskning och bränslekostnad jämförts för de olika 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.

5 Mål

Syftet med förstudien är att bidra till beslutsunderlag om inriktningen på framtida forsknings- och utvecklingsprojekt med energieffektivare skogsmaskiner som mål. Förstudien bidrar till att identifiera vilka övergripande inriktningar som kan vara möjliga, till exempel om elektrifiering är rimligt eller inte. Efter projektets slut kan resultaten ligga till grund för vidare forskning inom ämnet.

- Projektets prestandakartläggning och körcykelanalys har som mål att uppskatta energi- och effektbehov i samtliga rörelser som en skotare respektive skördare utför under sitt arbete och nå en förståelse för mer än 90% av maskinernas energianvändning.
- Målet med kartläggningen av tänkbara alternativ är att utvärdera potentialen av åtminstone följande teknologier; elektrisk framdrivning, elektrifiering av roterande rörelser, elektrifiering av linjära rörelser, smartare hydrauliska ventiler och delade hydraulsystem med elektriskt drivna pumpar. Åtminstone diesel / HVO och batterier kommer studeras som huvudsaklig energibärare.

Slutmål med projektet är minst ett realistiskt koncept vardera för maskintyperna skördare och skotare där den lokala energianvändningen understiger 75% av befintligt system (det finns indikationer på att ett system med 50% lägre energianvändning kan vara möjligt). Slutkoncepten ska i en livscykelanalys ge lägre miljöpåverkan än befintligt system och driftskostnaden ska inte överstiga befintliga system med mer än 5% med dagens bränslepriser.

6 Resultat och måluppfyllelse

6.1 Prestandakartläggning

Prestandakartläggningen resulterade i de generella egenskaperna som listas i Tabell 1.

Energikartläggningen av maskinerna med hjälp av simuleringsmodellen jämförs i

Tabell 2 med statistik om bränsleförbrukning. Differensen mellan simuleringen för skotaren nådde anmärkningsvärt god överensstämmelse (<1%). Posten kringutrustning är dock en betydande post som är antagen vara en konstant förbrukare om 5 kW. Denna är uppskattad, och en stor osäkerhet i modellen. Det kvarstår att se hur modellen kan återskapa den statistiska spridning som finns i förbrukningsdata. Det är dock tydligt från kartläggningen att framdrivning är skotarens stora energianvändning. Med viss försiktighet kan det anses att projektmålet om att kartlägga 90% av skotarens energianvändning kan anses uppfyllt.

För skördaren är det tydligt att terrängkörningen är en relativt liten del av skördarens energianvändning. Däremot är den simulerade förbrukningen väsentligt lägre än statistiken. Trots ett antaget utökat kringssystem om 20 kW fattas fortfarande 13% av maskinens förbrukning i modellen. 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 förbrukningen vid trådkvistning är några faktorer som identifierats som mycket osäkra. Målet att kartlägga 90% av skördarens energianvändning kan inte anses uppfyllt.

Tabell 1. Designprestanda för maskinerna.

	Skördare	Skotare
Vikt (kg)	22 700	23 200
Last (kg)	-	19 800
Motorvolym (l)	8,2	8,2
Motoreffekt (kW)	217,2	213,2
Motormoment (Nm)	1291	1247
Dragkraft (kN)	200	252
Hjuldiameter (m)	1,5	1,5
max-hastighet (km/h)	20	20
Kran		
Räckvidd (m)	9	8
Lyftmoment (kNm)	277	158
Vridmoment (kNm)	56	41

6.2 Konceptdesign

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, mekaniska grå, hydrauliska gröna och förbränningsmotorn är röd. Symbolerna som används i skisserna förklaras i Figur 2.

	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 2. Beskrivning av symboler.

Både ett hybridkoncept och ett batterielektriskt koncept tagits fram för skotaren respektive skördaren. Sammanställning av konceptens förväntade besparing i energi ses i

Tabell 2. För medelfallet beräknas energianvändningen hos koncepten till 57% för skotaren och 74% för skördaren jämfört med respektive konventionella maskiner. För hybridkoncepten är alltså dieselbehovet minskat till samma nivåer. Målet att koncepten skulle nå en lokal energianvändning under 75% av dagens nivåer (besparing om 25%) bedöms därför vara uppfyllt, även om skördaren ligger väl nära och osäkerheten i analysen kan förskjuta värdet över den gränsen.

Tabell 2. Jämförelse av energianvändningen mellan koncepten och konventionella maskiner.

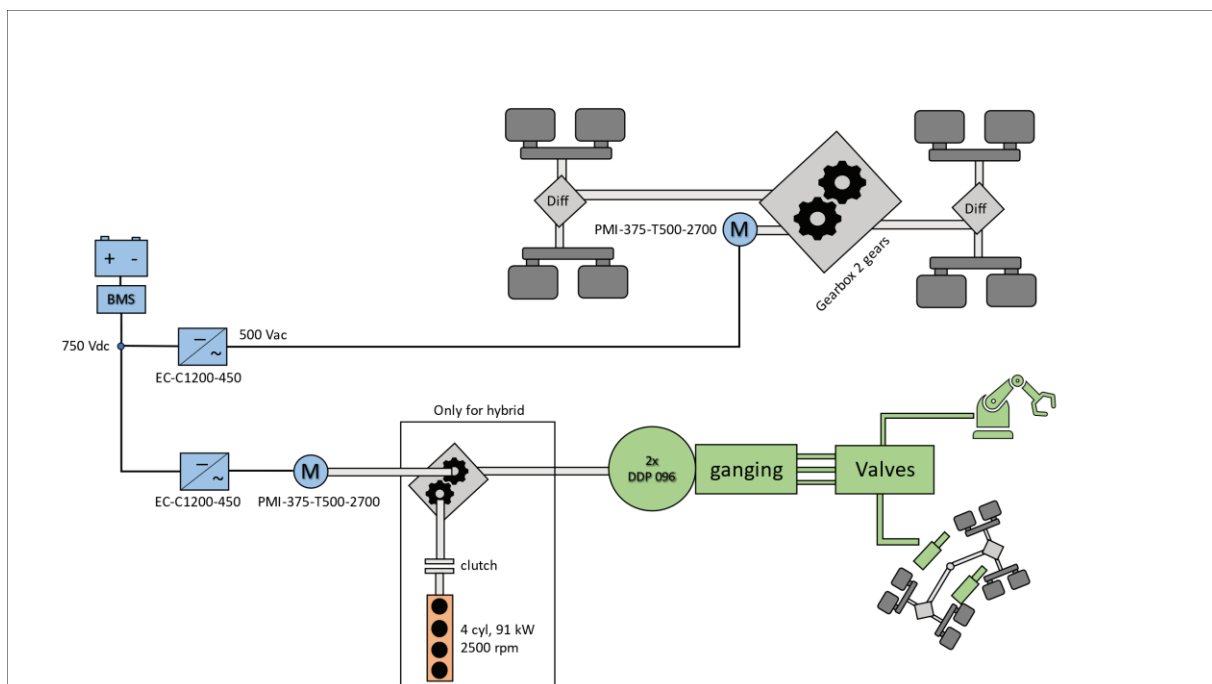
System	Förändring	Fördelning av konventionell maskins energianvändning	Konceptets besparing för resp. område jämfört med konv. maskin
Skotare			
Energikälla	Hybridisering*	-	10 %
Drivlina	Elektrifiering	52%	25 %
Arbetshydraulik	DDP pump	13%	55 %
Kringsystem**	-	34%	-
Modellavvikelse	-	0,5%	-
Skördare			
Energikälla	Hybridisering*	-	7 %
Drivlina	DDP pump	21%	10 %
Arbetshydraulik	DDP pump	59%	20 %
Kringsystem**	-	7%	-
Modellavvikelse	-	13%	-

*Det batterielektriska systemet har motsvarande energiåtgång lokalt som den mekaniskt levererande energin i hybridsystemet.

**Till exempel luftkonditionering, belysning, hydraulikkylare, styrelektronik, mm

Skotarkoncept

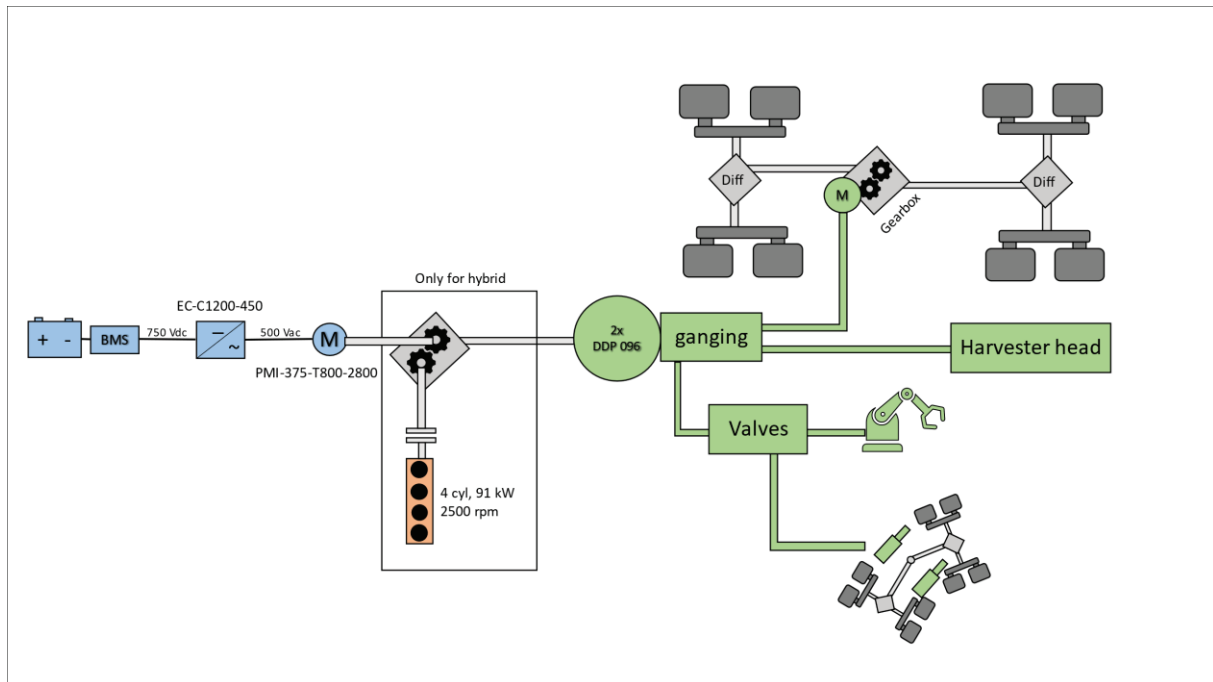
Skotarkoncepten har två elektriska maskiner, en för framdrivningen samt en för arbetshydrauliken som också fungerar som generator i hybridfallet. I kartläggningen framgick tydligt att skotarens främsta energiåtgång ligger i framdrivningen. Eldrift på framdrivningen ger högre verkningsgrad än dagens hydrostatiska lösning. Dagens maskiner använder växellådor och även med elektrisk drivlina blir växellåda nödvändig. Utmaningen ligger i att erhålla hög dragkraft och kunna ha en topphastighet av 20 km/h. En viss övervarvning av elmotorn upp till 4000 rpm (med hjälp av fältförsvagning) ger stort hastighetsspann, men två växlar blir ändå nödvändigt. Med en mekanisk transmission behövs bara en växellåda och dragkraften kan fördelas till de hjul som har störst motstånd. I hybridfallet placeras förbränningsmotorn på samma axel som DDP pumpen. När förbränningsmotorn är i gång driver den pumpen direkt och driver den elektriska maskinen som generator. Eftersom DDP:n har mycket låg tomgångsförbrukning innebär det inga betydande förluster när arbetshydrauliken är vilande.



Figur 3. Det resulterande konceptet för skotare. För det alternativa batteri-elektriska konceptet exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett större batteri används.

Skördarkoncept

Även på skördarkoncepten utnyttjas DDP pumpens fördelar. Då framdriften utgör en bråkdel av energianvändningen i skördaren är en elektrisk framdrivning inte motiverat ur ett energibesparingsperspektiv. I stället utnyttjas en hydraulmotor, vilket kräver en extra ventillösning för att kunna drivas från DDP:n.



Figur 4. Det resulterande konceptet för skördaren. För det batterielektriska konceptet exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett större batteri används.

Hybridkonceptet

De resulterande koncepten för skotare respektive skördare illustreras i Figur 3 respektive Figur 4. Båda hybridlösningarna är av typen kombinationshybrid. Maskinerna förses då med energi i form av diesel/HVO. Vi har också i livscykelanalysen inkluderat alternativa batterielektriska koncept. Där exkluderas dieselmotorn med tillbehör och ett betydligt större batteri används i stället. De är i övrigt lika som hybridkoncepten.

En maskin som är en hybrid mellan 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. När den 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. 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.

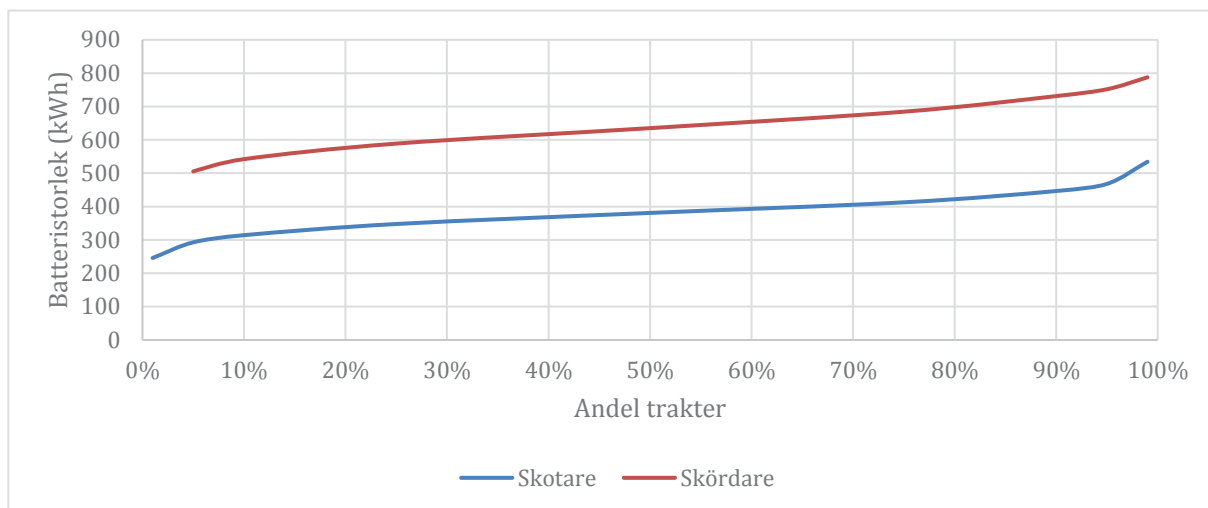
Begreppet kombinationshybrid innebär att den fungerar som en kombination av seriehybrid och parallellhybrid. Dieselmotorn är aktiv intermittert och levererar då energi som lagras i batteriet som senare kan användas för att driva maskinens hydraulik när dieselmotorn är avstängd (som en seriehybrid) men levererar också energi direkt till hydraulsystemet i samverkan med elmotorn (som en parallellhybrid). När dieselmotorn är avstängd levererar batteriet all effekt. När dieselmotorn är aktiv är den ansluten via en koppling på samma axel som hydraulpumpen och den elektriska maskinen. När batteriet nått rätt laddningsnivå kopplas dieselmotorn bort och stängs av och batteriet står då för maskinens effektbehov. 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.

Fördelen med en kombinationshybrid jämfört med en seriehybrid är att inte all energi måste omvandlas till elektrisk energi, vilket innebär förluster, och 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.

Batterielektriska konceptet

För det batterielektriska konceptet avses ett batteri som motsvarar 8h drift. Batteriet kan bytas mekaniskt med hjälp av maskinens kran. Laddning av batteriet kan exempelvis ske vid avlägg i ett vätgasdrivet bränslecellsaggregat. Uppskattad batteristorlek för koncepten med avseende på andelen svenska trakter som kan hanteras illustreras i Figur 5. Energibehovet (och batteristorleken) beror relativt linjärt på andelen trakter som ska kunna hanteras men ökar kraftigt efter ca 95%. Man kan tänka sig att i praktiken skulle det gå att anpassa batteristorleken på en maskin efter hur krävande användningen är. Kapacitetsökningen som krävs på batteriet för att gå från 10% till 90% av trakterna är 130 kWh (+42%) för skotaren och 190 kWh (+35%) för skördaren.

Exakt modell av batteri och mekanisk utformning har inte behandlats i projektet. Baserad på generell statistik handlar den nödvändiga kapaciteten om batterier på upp emot 6000 kg för skördaren och 4000 kg för skotaren per styck.



Figur 5. Uppskattad batteristorlek för att klara given andel av Sveriges trakter.

Eftersom batterierna är för tunga för att transportera på ett enkelt sätt har en vätgasbränslecell för laddning vid avverkningsplatsen inkluderats. Bränslecellen behöver kunna ladda batteriet under ett skift så att det är färdigladdat när nästa operatör anländer. Det innebär en snitteffekt på 40 och 70 kW för skotare respektive skördare. Vid enkelskift kan laddning även ske över natten och lägre effekter kan användas. Transport av vätgasen för att klara ett arbetsskift kan exempelvis utföras av maskinoperatören med lite större personbil, förutsatt att tankställe finns på rimligt avstånd från avverkningsplatsen.

Pumpkoncept

För både skördar- och skotarkoncepten används två tandemkopplade 96 kubikcentimeters hydraulpumpar. Modellen är Danfoss Digital Displacement Pump (DDP096), se Figur 6. Pumpen har flera egenskaper som kommer till stor 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 deldeplacement och flödet kan styras elektroniskt. Detta innebär att man kan minska tryckfallen i systemet eftersom man inte behöver förlita sig på konventionell tryckåterkoppling utan man kan i stället leverera flöde baserat på förarens insignaler. Tomgångsförlusterna är tack vare pumpens unika egenskaper mycket låga.



Tandem DDP



DDP styrenheter



EM-PMI375-T500, EM-PMI375-T800



EC-C1200-450 Inverter

Figur 6. Nyckelkomponenter från Danfoss i koncepten.

Ej inkluderade konceptförslag

Några koncept och tekniker som övervägts i projektet, men som exkluderats från de föreslagna koncepten:

- Elektriska ställdon – Det finns ny lovande teknik som kan ha potential att direkt ersätta hydrauliska cylindrar. Tekniken bedömdes 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.
- 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.
- Elektrisk energioverföring till skördaraggregat – 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 (kompakt) elektriskt driven hydraulpump. Konceptet hade god potential till energibesparing men utmaningarna i komponentval gjorde att konceptet ansågs för osäkert att inkluderas i skördarkonceptet.
- Seriehybrid – I en seriehybrid driver dieselmotorn en generator som skapar el som kan mellanlagras i ett batteri och användas av elektriska motorer som driver hydrauliken. En seriehybrid är till synes något mera enkel och rättfram än kombinationshybriderna som valdes i koncepten, men på systemnivå innebär seriehybriden att det krävs ytterligare en elmaskin med tillhörande styrning per maskin. Att begränsa antalet sådana innebär en mindre komplex maskin med lägre resursanvändning vid tillverkning.
- Separata motorer för framdrivningen – För framdriften skulle motorkraften kunna fördelas antingen genom separata elmotorer på fram- och bakvagn, en motor per boggi eller en motor per hjul. När en skogsmaskin åker 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 för varje motor också en växellåda för att klara hastighetomfång och dragkraft. Det finns dock potentiella fördelar med separata elektriska motorer ur terrängkörningsperspektiv och troligen även energimässigt, men mera omfattande studier är nödvändiga för att kartlägga detta alternativ.

- Elektrisk framdrivning av skördaren – För skotaren stod framdrivningen för den största energiförbrukningen. För skördaren däremot innebar framdrivningen en så låg andel av energianvändningen att elektrifiering inte kunde motiveras.

6.3 Livscykelanalys

De miljömässiga för- och nackdelarna med de föreslagna koncepten studerades genom en livscykelanalys där de jämfördes med konventionella maskiner. 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. Vad gäller marknära ozon hittades dock inga signifikanta skillnader mellan koncepten och det presenteras därför inte i den fortsatta resultatredovisningen. Ozonet kommer dock från olika källor där diesel förbränning är den största enskilda källan men också produktion av batteri, vätgasinfrastruktur och generering av el är betydande källor. Bränslet som används i den konventionella maskinen och hybridkonceptet har beräknats ha en inblandning av biobränsle och fossil diesel som motsvarar den proportion som finns i det svenska skogsbruket idag, dvs 40% HVO-inblandning.

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, dvs de ingår inte i kalkylen. Det är mycket troligt att vätgaselektrolys i stor utsträckning kommer att göras med överskottsel, dvs elektricitet som vi annars inte hade kunnat använda. I basfallet anses ändå elektriciteten för elektrolysen vara svensk genomsnittsel.

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 användningsgasen större än tillverkningsgasen, medan det omvända förhållandet råder om överskottsel används för vätgasgenerering. Det batterielektriska konceptet har lägst klimatpåverkan, knappt hälften av det konventionella konceptets påverkan. Hybridkonceptets klimatpåverkan ligger närmre det konventionella konceptet än den batterielektriska. När överskottsel utan miljöbörda 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 skillnaderna i konceptens tillverkning och användning innebär hybridkonceptet 6,7 gånger så stor och det batterielektriska konceptet mer än 50 gånger så stor resursutarmning jämfört med det konventionella konceptet.

För att sätta skillnaderna mellan koncepten som ingår i kalkylen i proportion till en komplett maskins miljöpåverkan inkluderades en befintlig analys av tillverkningen av en skördare. Det innebär då att klimatpåverkan ökar med 7 kg CO₂-eq per timme för alla koncepten. Det innebär att den batterielektriska maskinen sannolikt har drygt hälften av den konventionella maskinens klimatpåverkan och hybridmaskinen fortsatt ligger närmre den konventionella maskinen. Sett till resursutarmning innebär då hela

hybridskördaren i stället 2,7 gånger så stor och den batterielektriska 17 gånger så stor resursutarmning som den konventionella skördaren.

Skotare

För skotare innebär det batterielektriska konceptet knappt hälften så stor klimatpåverkan som det konventionella konceptet. Hybridkonceptets påverkan ligger här närmre det batterielektriska konceptet än det konventionella. Vad gäller resursutarmningen så innebär hybridkonceptet 7,5 gånger så stor resursutarmning och batterikonceptet 41 gånger så stor resursutarmning som det konventionella konceptet.

Även här använder vi den befintliga analysen av en skördare för att sätta siffrorna i proportion. Trots att det är "fel" typ av maskin innehåller de i stort samma typ av material och komponenter. Med 7 kg CO₂-eq per timme extra från tillverkningen har den batterielektriska maskinen drygt hälften av den konventionella maskinens klimatpåverkan och hybridmaskinen ligger fortsatt närmre den batterielektriska maskinen än den konventionella. Sett till resursutarmning innebär då hela hybridskotaren i stället 2,8 gånger så stor och den batterielektriska 12 gånger så stor resursutarmning som den konventionella skotaren.

6.4 Livscykelkostnad

Komponenter

Kostnadsberäkningar har endast gjorts av de komponenter som skiljer sig åt mellan de olika koncepten. Komponenterna till det batterielektriska konceptet är betydligt dyrare i inköp än komponenterna till det konventionella konceptet. För skördaren kostar de i storleksordningen nio gånger så mycket och för skotaren drygt sju gånger så mycket. Hybridkonceptet kostar också komponentmässigt mer än det konventionella, men endast 25 % (skördare) till 58 % (skotare) mer. För de batteripack som ingår har ett pris på \$ 265 per kWh (Xie et al, 2023) antagits. Ett inköp av bränslecell (108 kW) och gastuber för att transportera vätgas har också inkluderats i beräkningarna, och delats mellan skördare och skotare i proportion till energiåtgången (62,8 kWh/timme för skördare och 45,6 kWh/timme för skotare).

Bränslekostnad

För bränslekostnad har en genomsnittlig bränsleåtgång per timme angivits till 18,3 l för skördare och 14,8 l för skotare. Utifrån simuleringar beräknas bränsleåtgången för hybridkoncepten vara 13,8 l för skördare och 8,45 l för skördaren, eller 75 % respektive 57 % av de konventionella maskinerna. Kostnaden för vätgas till bränslecellen i det batterielektriska konceptet har inte inkluderats i beräkningarna.

Investeringskostnad och värdeminskning

Dessa beräkningar grundar sig på den överskjutande investeringen, det vill säga hur mycket dyrare konceptmaskinerna är jämfört med den konventionella. Räntekostnaden för koncepten har beräknats genom att använda Stibor 90 räntan + 3 % på medelinvesteringen, vilken definieras som summan av merkostnaden per koncept och dess restvärde delat på två. Restvärdet är definierat som 15 % av inköpspriset, vilket är vad som är brukligt för dagens skogsmaskiner. Det där dock möjligt att hybridmaskiner eller heleelektriska maskiner skulle ha ett annat restvärde efter sex år och 16 000 timmar. Värdeminskningen blir den överskjutande investeringen minus restvärdet.

Totalkostnad

Den totala kostnaden för maskinkonceptet beräknas som summan av bränslekostnad, investeringskostnad och värdeminskning. För hybridkonceptet uppgår den till 79 % av kostnaden för det konventionella konceptet för skördare och 67 % för skotare. Kostnaden för de batterielektriska koncepten överstiger i båda fallen kostnaden av dess konventionella motsvarighet: för skotaren med 6 % och för skördaren med 25 %.

År 2030

Batteripriset per kWh är högre för lastbilar än för personbilar i dagsläget, vilket förmodas bero på att tillverkningen av batteipack till eldrivna personbilar är mycket större än till eldrivna lastbilar enligt en studie

av ICCT, the International Council on Clean Transportation (Xie et al, 2023). 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 (Xie et al, 2023). För andra komponenter i det elektriska drivsystemet som till exempel transmission, motor och växellåda beräknas prisminskningar på över 60 % fram till 2030, och priserna då uppgå till storleksordningen 23 USD/kW (Xie et al, 2023).

Vad gäller dieselpriiset så 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 (Kontrollstation för reduktionsplikten 2022 Delrapport 1 av 2). Eftersom skogsbruket erhåller skatterabatt (och drar av moms), kan ett rimligt dieselpreis år 2030 sättas till 20 kr. För konventionella dieselmotorer och bränsletankar används dagens priser i fortsatta beräkningar.

Efter en omräkning av resultaten med 2030 års priser på batterier och diesel, samt en justering av övriga priser i det elektriska drivsystemet enligt ovan, erhålls en helt annan kostnadskalkyl. I detta fall uppnår det batterielektriska konceptet en totalkostnad av 35 % (skördare) respektive 42 % (skotare) av det konventionella konceptet. För hybridmaskinen ses också en förbättring, men i mindre skala. Totalkostnaden för hybridkonceptet är 75 % (skördare) respektive 59 % (skotare) av det konventionella konceptet år 2030.

För att sätta kostnaderna i perspektiv till dem hos en komplett maskin har beräkningar genomförts där ett maskinpris på ytterligare 4 miljoner (skotare) och 5 miljoner (skördare) har lagts till samtliga koncept inklusive den konventionella maskinen. Räntekostnad och restvärde har beräknats i analogi med vad som beskrivits ovan förutom att räntan inte beräknats på den överskjutande investeringen utan på medelinvesteringen för maskinen i sin helhet. Motsvarande beräkningar har genomförts på såväl dagens kostnadskalkyl som analysen av kostnader år 2030. Resultaten av beräkningarna redovisas i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Relativ kostnad för hela konceptmaskinerna jämfört med den konventionella maskinen, idag och år 2030.

		Tusentals kronor (andel av konventionell maskin i %)	
		Skördare	Skotare
Idag	Hybridkoncept	-859 (-9 %)	-1 097 (-13 %)
	Batterielektriskt koncept	1 036 (+10 %)	211 (+ 3 %)
2030	Hybridkoncept	-1 467 (- 12 %)	-1 933 (-20 %)
	Batterielektriskt koncept	-3 799 (- 32 %)	-2 710 (-28 %)

Resultaten visar att hybridkonceptet är lönsamt redan idag men blir än mer lönsamt år 2030. Den batterielektriska maskinen kostar idag mer än den konventionella men år 2030 beräknas det ha en betydligt lägre kostnad. Det kan då ses som ett ekonomiskt utrymme för att köpa vätgas vilket inte är inkluderat i kalkylen.

6.5 Bidrag till utlysningens mål

Förstudien bidrar till målen i den riktade utlysningen "Fossilfria mobila arbetsmaskiner". Studien berör områdena:

- "Energieffektivisering genom hybridisering eller elektrifiering av fordonets driv- och hjälpsystem" genom att elektrifiering och hybridisering skogsmaskinernas system har varit centrala delar av studien.

- "Laddinfrastrukturfrågor kopplade till elektrifiering av arbetsmaskiner". Projektet belyser hur stora energibehoven är vid bruk av skogsmaskiner, även med energieffektivisering.
- "Teknik som stöder en övergång till förnybara bränslen" genom studiens övergripande fokus på energieffektivisering av skogsmaskiner. Om flytande förnybara bränslen kommer vara en del av framtida system kommer de troligtvis stå för en betydande del av deras livstidskostnader och utsläpp. Det är därför fortsatt angeläget att förbruka så lite som möjligt.

Förstudien bidrar till effektmålet i det ordinarie sakområdet "Energi & Miljö" om att till 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser samt minskning av emissioner såsom buller, partiklar och kväveoxider.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Gäller samtliga parter
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	För Skogforsk kommer resultaten att vara till nytta i framtida projekt kring energieffektivisering av skogsmaskiner. Där kan vi eventuellt samarbeta med andra parter i projektet igen. RISE har nytta av erfarenheterna i andra elektrifieringsprojekt.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt		
Introduceras på marknaden	X	Introduktionen av Danfoss "Digital Displacement"-pumpar har hittills fokuserat på grävmaskiner. Projektet har påvisat fördelarna med pumparna även för skogsmaskiner.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Zackrisson, Mats. 2023. Livscykelanalys av elektrifierade skogsmaskiner – skördare och skotare. RISE Rapport P115135

Englund, Martin 2023. Concepts of energy efficient electrified CTL forestry machines. Kommande konferensbidrag på 55th FORMEC and 7th Forest Engineering Conference (FEC)

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet visar på potential till en markant energibesparing för koncepten jämfört med konventionella maskiner. Den nödvändiga energimängden för ett arbetspass är dock så stor att batterielektriska maskiner blir otympliga och det blir svårt att transportera batterier för laddning från elnätet. Det är svårt att spekulera i hur så stora batteripack skulle rymmas på maskinen och hur byten skulle ske. Batterierna blir enklare att hantera och 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. Vid användning av en förbränningsmotor, oavsett bränsle, ger hybridisering som tillåter nedstängning av motorn en god energibesparing. Speciellt skotaren visar extra god potential tack vare det ojämna belastningsmönstret.

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. Den batterielektriska skördaren ger lägst klimatpåverkan; i storleksordningen 2-5 gånger lägre än den traditionella skördarens klimatpåverkan. Den traditionella skördaren ger däremot klart lägst resursutarmning; i storleksordningen 17-54 gånger mindre än den batterielektriska skördaren. I dagsläget är det dyrt att producera de batterier som behövs för de hybrid- och batterielektriska maskinerna. Det väntas dock en snabb effektivisering inom batteriindustrin med tillhörande prisminskningar. I kombination med väntat ökande bränslepriser innebär det en stor potential för båda typerna av elektrifierade koncept redan år 2030.

För den fortsatta forskningen finns 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 energilagringssätt kan vara exempelvis biogas, elektrobränslen (elektriskt framställda kolväteföreningar från industriavgaser) eller grön ammoniak (ammoniak producerad från certifierad el). Energiomvandlingens placering är en annan fråga, är det mera lämpligt att använda batterielektriska maskiner med laddning från ett separat el-aggregat eller ska omvandlingen placeras på maskinen. Är bränsleceller eller förbränningsmotorer mest lämpade ur ett helhetsperspektiv?

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, mm.
- 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 stor förbrukare idag med höga hydrauliska energiöverföringsförluster.
- Hur kan krandesign anpassas för elektriska drivdon, främst svängrörelserna bedöms ha relativt stor potential.
- Energikartläggningen av maskinerna kan förbättras och förståelsen för hur energianvändningen påverkas av olika körmoder och förhållanden kan utökas.

9 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

