



# El-traktorers potential att minska Sveriges klimatpåverkan

– En studie av maskinsystem i lantbruket

Oscar Lagnelöv, Gunnar Larsson, Anders Larsolle, Per-Anders Hansson



### Mistra Food Futures Report #10

El-traktorers potential att minska Sveriges klimatpåverkan – En studie av maskin-system i lantbruket

*Electric tractors potential in reducing Sweden's climate impact – A study of agricultural machinery systems*

**Författare:** Oscar Lagnelöv, Gunnar Larsson, Anders Larsolle, Per-Anders Hansson, Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet

Denna rapport är framtagen inom forskningsprogrammet Mistra Food Futures. Det övergripande målet för programmet är att skapa en vetenskapligt baserad plattform som bidrar till att det svenska livsmedelssystemet kan transformeras till ett system som är ekonomiskt, socialt och miljömässigt hållbart samt resilient och kan leverera hälsosam mat. Målet uppnås genom att utveckla ett nära samarbete mellan akademien och ett antal nyckelaktörer i det svenska livsmedelssystemet. Den här rapporten utgör en del av Mistra Food Futures arbete med att beskriva produktionssystem som minskar lantbrukets klimatpåverkan. Detta utgör en av de centrala frågeställningarna inom Mistra Food Futures.

Mistra Food Futures leds och samordnas av Sveriges lantbruksuniversitet SLU i samarbete med forskningsinstitutet RISE Research Institutes of Sweden och Stockholm Resilience Centre vid Stockholms universitet. Övriga partners inom programmet omfattar en bred representation av aktörer från akademi, näringsliv, branschorganisationer och regioner.

[www.mistrafoodfutures.se](http://www.mistrafoodfutures.se)

**Publikation:** Mistra Food Futures Report #10  
**Utgivningsår:** 2022  
**Utgivare:** Sveriges lantbruksuniversitet  
**Omslagsbild:** Midjourney AI  
**Tryck:** SLU Repro, Uppsala  
**ISBN:** 978-91-8046-769-8 (elektronisk), 978-91-8046-768-1 (tryckt)

FUNDED BY



The Swedish Foundation for  
Strategic Environmental Research

## Sammanfattning

I denna studie undersöktes potentialen för att minska klimatpåverkan i Svenskt lantbruk genom en övergång till lättare, elektriska och självkörande traktorer som drivs av el från batterier eller vätgas. Målen var att utveckla följande:

1. En tidslinje över teknikstegen i utvecklingen mot självkörande eltraktorer, där teknisk mognad och tid till marknad uppskattas.
2. En LCA med fokus på el-traktorers klimatpåverkan, jämfört med konventionella system.
3. En beräkning av potentialen till minskad klimatpåverkan på en nationell nivå.

Tidslinjen visade att det fanns flera steg innan de elektriska systemen är redo för marknad, även om dess komponenter är baserad på känd teknik. De är i just nu i demonstrationsfas och det bedömdes att de har 12-13 år tills teknisk marknadsmognad.

LCA visade på en klimatpåverkan från maskinanvändning på fält på 80 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för det batterielektriska systemet och 117 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för vätgassystemet, jämfört med 246 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för det konventionella dieselfallet. Dessa värden simulerades för en spannmålsbaserad växtföljd på lerjord. Minskningen kom främst från två källor, dels att el och vätgas i sig har lägre påverkan än diesel och dels att den ökade verkningsgraden hos elektriska drivlinor gör att mindre energi (50-65%) behövs.

Den nationella klimatpåverkan uppskattades genom att lägga till fler grödor och jordarter. Uppskattningen täckte alla 2,6 miljoner hektar åkermark i Sverige. Det resulterade i en klimatpåverkan på 536 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år för ett konventionellt dieselfall. Att övergå till batteritraktorer kunde minska detta med 65-81 % och en övergång till vätgas med 53-92 %. I båda fallen berodde intervallen på val av bränsleårsprung. Förnybara källor ledde till den största minskningen. Elektrifiering av lantbruksmaskiner skulle kunna leda till en sänkning av utsläppen från Svensk transportsektor med 2-3 %.

*Nyckelord:* Elektrifiering, klimatpåverkan, lantbruk, vätgas, batteri

## Abstract

In this study, the potential in reducing climate change by switching Swedish agriculture to lighter, electric and self-driving tractors fuelled by hydrogen or batteries was assessed. The following goals were set for the delivery:

1. A timeline of the technological development, where technology readiness and time to market were assumed.
2. An LCA with focus on climate change for electric tractors compared to a conventional system.
3. A calculation of the potential reduction of climate change on a national level.

The timeline showed that there were several steps in development before the electric systems were ready for market, even though they build on known technology. They are currently in the demonstration phase and are assumed to have 12-13 years until market readiness.

The LCA showed on a yearly climate impact of 80 kg CO<sub>2</sub>eq./ha for the battery-electric system and 117 kg CO<sub>2</sub>eq./ha for the hydrogen system, compared to 246 kg CO<sub>2</sub>eq./ha for the conventional system. These values were simulated for a grain based crop rotation on clay soil. The reduction mainly came from the lower impacts of the fuel, as both electricity and hydrogen have lower impacts than diesel, and that the higher driveline efficiency of the electric systems reduced the energy need with 50-65%.

The national climate impact was approximated by adding more crops and soil types. The calculation included all 2.6 million hectares of arable land in Sweden. The calculation resulted in a climate impact of 536 million kg CO<sub>2</sub>eq. /year for the conventional diesel scenario. Switching to battery-electric tractors could reduce this with 65-81% and to hydrogen with 53-92%. In both cases, the interval depended on the origin of the fuel. Electricity from renewable sources had the largest reduction potential. Electrification of agricultural machinery could lead to a reduction of the climate impact of Sweden's transport sector with 2-3%.

*Keywords:* Electrification, climate impact, agriculture, hydrogen, battery

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Metod</b> .....	<b>7</b>
2.1. Simuleringsmetod.....	7
2.1.1. Gård och maskinsystem .....	7
2.1.2. Modell och simulering .....	9
2.2. LCA.....	11
2.2.1. Livscykelinventering (LCI).....	12
2.2.2. Klimatpåverkan .....	13
2.3. Tidslinje för teknikutveckling.....	13
2.4. Nationell potential till minskad klimatpåverkan.....	14
2.4.1. Spannmål, vall och övriga grödor .....	14
2.4.2. Jordarter, kartering och geografisk placering .....	15
2.4.3. Bränsletypens påverkan .....	17
<b>3. Resultat och diskussion</b> .....	<b>19</b>
3.1. Simuleringsresultat .....	19
3.2. Klimatpåverkan .....	21
3.2.1. Tillverkning.....	21
3.2.2. Livscykelanalys .....	22
3.2.3. Bränsletypens roll .....	22
3.3. Tidslinje och steg i teknikutvecklingen .....	23
3.4. Nationell potential .....	26
3.4.1. Energiförbrukning.....	26
3.4.2. Klimatpåverkan .....	27
<b>4. Slutsats</b> .....	<b>30</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>31</b>



# 1. Inledning

Transportsektorn står för ca en tredjedel av Sveriges energianvändning (124 TWh under 2020) och är den sektor där mest petroleumprodukter används [1]. Av detta är en mindre del bränsle som används i lantbrukets maskiner, ca 1,45 TWh per år eller 148 miljoner liter diesel enligt Baky, et al. [2]. Eftersom lantbruket dels bidrar till de globala utsläppen av växthusgaser (11 % under 2010, [3]), dels också är känsliga för dess effekter är det viktigt att utsläppen från alla delar av lantbrukets produktion minskas, inklusive maskinernas. För att få en fossilfri och grön lantbrukssektor, och i förlängningen livsmedelssektor, är det viktigt att framtida maskinsystem övergår till bränslen med lägre klimatpåverkan.

Elektrifiering av fordon har lagts fram som en lösning för att minska transportsektorns klimatpåverkan och uppnå en fossilfri fordonsflotta. Grundanledningen är att fordons-elektrifiering gör det möjligt att byta ut oljebaserade drivmedel mot förnybart eller fossilfritt tillverkad el. Elektrifiering har visats ge minskad klimatpåverkan i personbilar, lätta lastfordon, lastbilar, gruvmaskiner och entreprenadmaskiner [4-7]. Även i lantbruket har elektrifiering föreslagits. Batteridrivna inomgårdslastare finns redan på marknaden och har visats ge stora besparingar i energianvändning utan förlorad arbetstakt [8] och eldrivna fälttraktorer har undersökts och testats av de stora maskintillverkarna [9-13] där man primärt har undersökt hybridtraktorer, rena eltraktorer i samma storlek som konventionella traktorer eller system med mindre, självgående traktorer som ofta är specialiserade på en fältsyssla, t.ex. ogrärensning, bekämpning eller sådd.

Lantbruksmaskinernas emissioner bidrar till 5-20 % av den totala klimatpåverkan för spannmål, beroende på plats, konventionell eller ekologisk odling, insatsmängd och produktionssystem [14-17]. Det är inte en majoritet av utsläppen, men inte heller en obetydlig mängd, speciellt inte när resterande del till stor del beror på förändrad markanvändning, lustgasutsläpp från åkern samt gödningsmedel, dvs. kategorier som är svårare att påverka utan att tappa produktivitet jämfört med påverkan från maskinsystemet.

Forskning har även indikerat att en elektrifiering av traktorer kombinerat med självkörande teknik leder till flera fördelar som ökad arbetstakt, minskade rörliga kostnader, minskad total miljöpåverkan och minskad maskinvikt som i sin tur leder till minskad markpackning [7, 18-21]. SLU har genomfört simuleringar och analyser med samma slutsatser, där en svensk spannmålsgårds fältarbete har simulerats för ett konventionellt system samt elektriska alternativ [22-24].

De tidigare studierna visade att enbart elektrifiering inte gav en tillräckligt hög arbetstakt på grund av de långa laddningstiderna kombinerat med för korta fältarbets-tillfällen. Detta ledde i sin tur till dels dåligt utnyttjande av personal och därmed höga förarkostnader, samt minskad skörd på grund av den låga arbetstakten. När systemet gjordes självkörande (även kallat autonomt) så uppkom flera intressant resultat. När maskinerna inte längre hade förare var det ett mindre problem att eltraktorerna inte fungerade med en förares schema. Att kunna köra dygnet runt ledde även till att små maskiner kunde ha en liknande arbetstakt som större maskiner, och därmed kunde maskinvikten minska. En 10-tons maskin kunde ersättas med 2 st. 3-tons maskiner. I stort ledde teknikkombinationen till en synergi där båda systemens fördelar kunde användas maximalt medan de täckte upp varandras nackdelar.

Dessa simuleringar utgick ifrån antaganden om ett fungerande, optimerat system i en nära framtid och undersökte endast spannmålsproduktion i Uppland. Liknande simule-ringar har gjorts för vallodling där både kostnader och klimatpåverkan undersöktes [25]. Med grund i dessa studier, befintlig forskning och väl underbyggda antaganden kommer det i denna studie göras följande:

1. En grov tidslinje över teknikstegen i utvecklingen mot självkörande eltraktorer kommer att tas fram och tidsavstånd till marknadsimplementering uppskattas.
2. En LCA kommer att genomföras med fokus på klimatpåverkan för ett elektrifierat system, med både batterier och vätgas som energikälla, jämfört med ett konventionellt system.
3. Klimatpåverkan för de olika teknikstegen kommer att redogöras för och en uppskattning av den nationella potentialen för minskad klimatpåverkan kommer att utföras genom uppskalning och simulering av olika geografiska omständigheter.

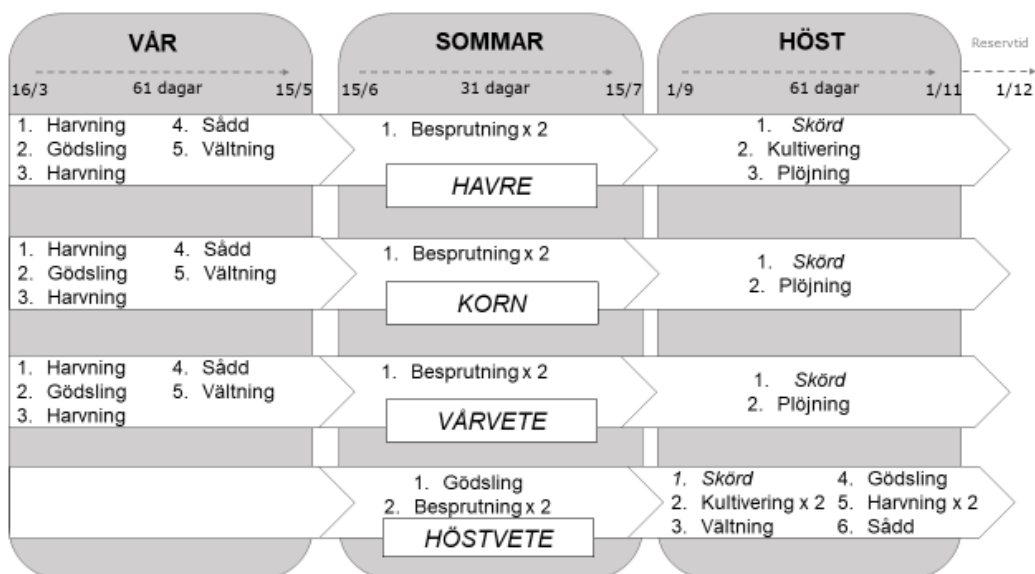


## 2. Metod

### 2.1. Simuleringsmetod

#### 2.1.1. Gård och maskinsystem

En spannmålgård på 200 ha som antogs befinna sig i Uppsalaområdet simulerades. Denna storlek har använts i tidigare studier. Fokus var på maskin användningen på fält och alla fältaktiviteter förutom vagnsdragning och skörd ingick i simuleringen. Detta då skördetröskan är väldigt annorlunda från traktorer och den intensiva, högförbrukande och effektkrävande användningen av maskinen är svår att ersätta med elektriska fordon. De spannmål som simulerades var havre, korn, höstvetete och vårvete, med alla grödor på lika stor areal. Dessa grödor valdes eftersom de är de vanligaste spannmålen i regionen, och vanligt odlade i Sverige i stort [26]. Ett konventionellt odlingsystem baserat på Nilsson [27] valdes och verifierades som relevant. Det inkluderade harvning, kultivering, besprutning, gödsling, plöjning, sådd och vältning, där de olika grödorna hade egna operationskedjor, enligt Figur 1.



Figur 1: Odlingsystem och tidsperioder för de olika spannmålen. Skörd är ej simulerat, men visas i maskinkedjan för ökad tydlighet.

Det antogs att fälten endast kunde bearbetas under perioden mellan 16 mars och 1 december, resten av året antogs olämpligt för regionen på grund av tjäle, väta och temperatur. De tillgängliga arbetsperioderna delades upp i vårbruk, höstbruk och en sommarperiod. Mellan dessa var växtperioder utan maskinaktiviteter. Dessa perioder, samt tidsintervall för sådd och skörd hämtades från empirisk data inhämtad av Myrbeck [28].

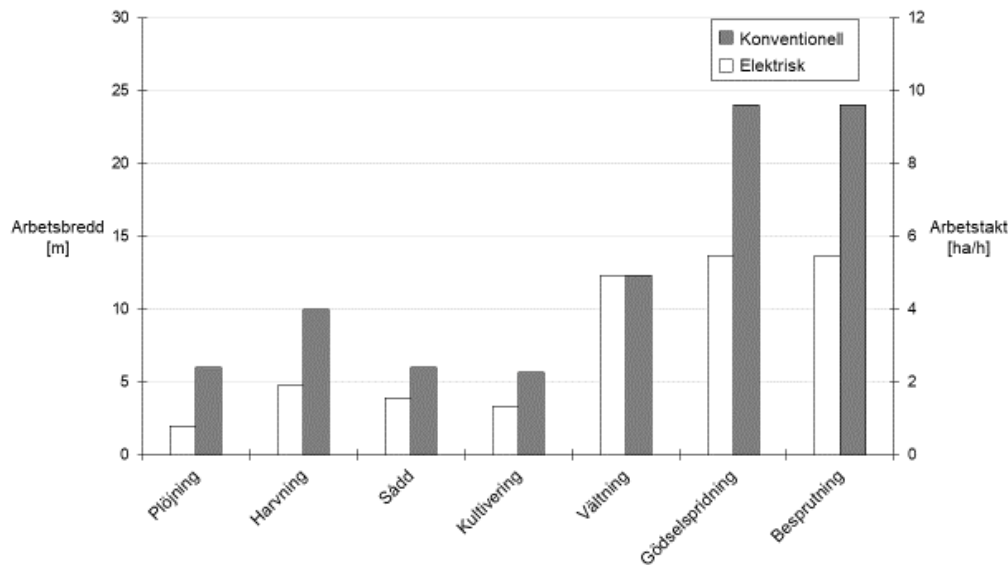
Det antogs att gården hade 12 fält som var i storleken 6-28 hektar med avstånd på 1-6 km till gårdscentrat, där laddning, tankning, påfyllnad av insatsmedel och byte av redskap skedde. Fälten hade en fälteffektivitet på 0.8, där 1.0 är en perfekt kvadrat och där en rektangel med skalan 2:1 är den mest effektiva reguljära formen [29, 30]. Oftast har fält någon faktor som minskar effektiviteten, t.ex. ojämna sidor, icke-optimal storlek, överlappning av redskap, brunnar eller andra hinder. Därför gjordes en generell minskning av fälteffektiviteten för att simulera realistiska förhållanden.

Maskinsystemet bestod av två delar, infrastrukturen och fordonet. Fordonssystemet bestod av traktor och redskap, vilket för det konventionella systemet innebar en 250 kW (335 hk) traktor med en vikt på 10.800 kg och en tank på 463 liter, baserad på ett aggregat av moderna traktorer i det effektintervallet (Valtra S294, Fendt 933 Vario, John Deere 7R330). Det elektriska systemet bestod av två självkörande, fullt elektriska traktorer med en effekt på 50 kW (67 hk) med en olastad vikt på 2.5 ton. Elen levererades genom batterier (även vätgas är ett realistiskt alternativ som undersöks i bränsleanalysen), där varje fordon hade 2 st. 100 kWh NCA-C li-jonbatterier, ett som följde maskinen under arbete och ett som laddades på gårdscentrat för snabbt byte. Det konventionella systemet var bemannat av en förare i fordonskabinen och kördes 10 timmar/dag varje dag, medan det elektriska systemet antogs övervakas på distans men vara självkörande. Operatören antogs behöva övervaka fordonen 30 % av tiden de var på väg, 20 % av tiden de arbetade på fält och 10 % av tiden då de laddade. För övriga aktiviteter behövdes ingen övervakning. Fallet med elektriska traktorer som drivs av vätgas visas också i Tabell 1, men om ingen ytterligare information ges syftar elektriska traktorer på batteridrivna.

Infrastrukturen innefattar allt som krävs för att traktorn ska kunna utföra sitt arbete. Majoriteten av infrastrukturen på gården antogs vara samma för alla fall och simulerades inte ytterligare. Infrastruktur för laddning och tankning skiljde sig åt, och simulerades. Det antogs att dieseltraktorerna använde en konventionell dieselpump med flöde 50 l/min och att eltraktorerna använde ett batteribytestsystem. Detta bestod av två snabbbladdare av kontakttyp med effekten 50 kW samt ett system för att snabbt byta ett urladdat batteri i traktorn mot ett fulladdat. Detta system baserades på liknande system från industrin [31] och kunde genomföra ett batteribytest på 10 minuter. Det tomma batteriet kopplades sen till snabbbladdarna medan traktorn var fri att fortsätta arbeta. Tidigare simuleringar [22] visade att detta system hade en betydligt högre arbetstakt än ett system där traktorn stannar kvar och laddar.

Tabell 1: Översikt av maskinparametrar för de simulerade systemen

Namn	Konventionell	Elektrisk (Batteri)	Elektrisk (H <sub>2</sub> )
Bränsle	Diesel	EI	EI (bränslecell)
Antal fordon	1	2	2
Effekt	250 kW (335 hk)	50 kW (67 hk)	50 kW (67 hk)
Buren energi	4684 kWh (463 l)	100 kWh	323 kWh
Drivlineeffektivitet (Bränsle→hjul)	26 %	74 %	60 %
Bränslesystem	Dieselpump	Batteribytesystem (+ CC/CV 50 kW snabbbladning)	Trycksatt vätgaspump
Väghastighet (topp)	35 km/h	35 km/h	35 km/h
Fälthastighet (medel)	5 km/h	5 km/h	5 km/h



Figur 2: Arbetsbredd och arbetstakt per fordon för de simulerade systemen. Observera att det elektriska systemet består av två fordon.

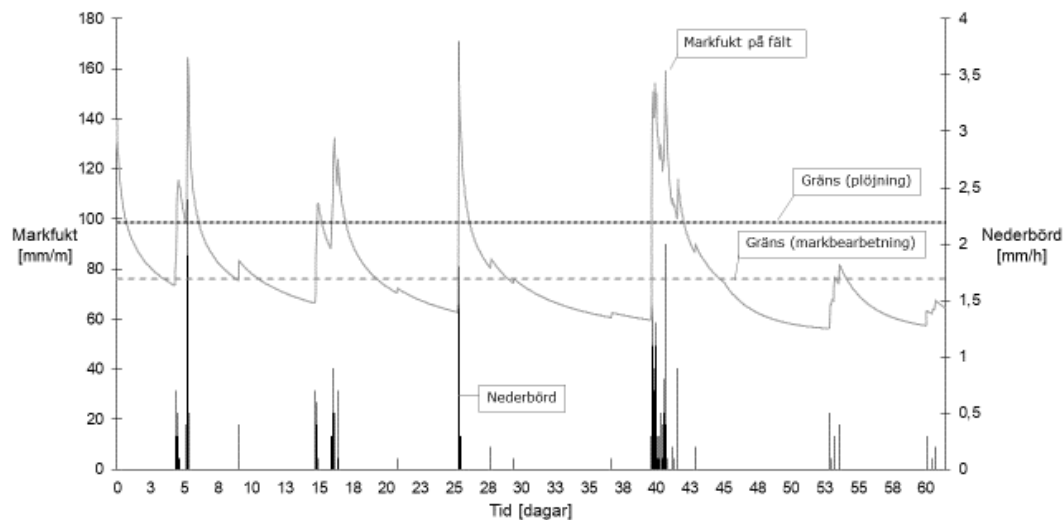
## 2.1.2. Modell och simulering

Simuleringen gjordes i Matlab och var av typen dynamisk diskret händelsesimulering. Detta innebar att simuleringen gjordes över tid, med ett år i taget som enhet. Simuleringen spårade också separata händelser för simuleringsagenten, dvs. traktorn. Detta kunde vara att traktorn stöter på dåligt väder och därför inte utför fältarbetet, eller att traktorn kommer in för laddning och inte hittar en ledig laddare, utan istället måste köa.

Simuleringen innefattade markdata, väderpåverkan, kraftbehov för fältarbeten, batteriurladdning, batteriåldrande samt de dynamiska element som kommer av att ha ett fordons-system med flera maskiner. De huvudsakliga resultaten var energianvändning, tid spenderad på olika aktiviteter, tidpunkt för de olika fältaktiviteterna, antal laddningar/tankningar samt batteristatus.

Väderpåverkan simulerades genom en vattenbalansmodell från Witney [29] där temperatur, solljus, nederbörd och markdata används för att beräkna markfukten på fälten. Om marken är för blöt kan traktorerna inte köra utan väntar på att den torkar. Dessa gränser

var 85 % av fältkapaciteten för allmän markbearbetning och 110 % för plöjning, vilket antogs baserat på de Toro and Hansson [32]. Väderdata hämtades från SMHIs mätningar i Uppsalaområdet över 30 år (1988-2018) [33, 34].



Figur 3: Exempel på väderpåverkan under de 60 första dagarna under 2008 enligt vattenbalansmodellen.

Kraftbehovet för fältarbeten beräknades enligt standardekvationer från ASAE [35] där marktyp, arbetsbredd, hastighet och redskapsparametrar påverkar kraftbehovet. Arbetsbredden för varje fordon varierades, d.v.s. den konventionella traktorn hade bredare redskap än de elektriska traktorerna. Traktorns kraftbehov beräknades genom summan av fordonsekvationer för friktion, luftmotstånd, acceleration, rörelsemotstånd och gradientkrafter [36]. Kraftåtgången vid vägtransport beräknades via samma fordonsekvationer, men en annan hastighet användes och redskapen beräknades inte ha någon påverkan utom sin vikt.

Fälten bearbetades utifrån ordningen som visas i Figur 1, där vissa grödor kräver olika maskinaktiviteter vid olika tidpunkter, med den största skillnaden mellan vårsått spannmål och höstsått vete. Traktorn var programmerad att göra alla sysslor i aktivitetsordningen och inte i fältordning, dvs. först harvades alla fält som skulle harvas, därefter spreds mineralgödsel på de aktuella fälten osv. istället för att det första fältet harvades, gödslades och såddes innan nästa fält påbörjades.

Energiåtgången var beroende på medeleffekten som kombinationen av traktor och redskap krävde. Detta gav även hur länge traktorn kunde vara ute på fält innan den behövde tanka eller ladda. Energiåtgången antogs i både diesel- och elfallet vara en genomsnittsförbrukning där traktorn var på fält antingen tills sysslan på fältet var klar eller tills energin var låg. I båda fallen återvände traktorn till gårdscentrat för nästa fält eller syssla. Traktorn var programmerad till att återvända när energin endast räckte till transport tillbaka till gården. För eltraktorn lades även en gräns till vid 20 % laddning för att undvika djupurladdning, vilket kan skada batteriet och minska dess effektiva livslängd. Laddningen eller

tankningen var i båda fallen simulerade som en rätlinjig funktion där laddningstakten berodde på tanken/batteriets energikapacitet och laddaren/pumpens energiflöde. Detta ledde till en tidsåtgång på 9 minuter för tankning av dieseltraktorn och 2 timmar för laddning av eltraktorbatteriet, även om eltraktorn tack vare batteribytestsystemet endast krävde 10 minuter för byte till ett fulladdat batteri.

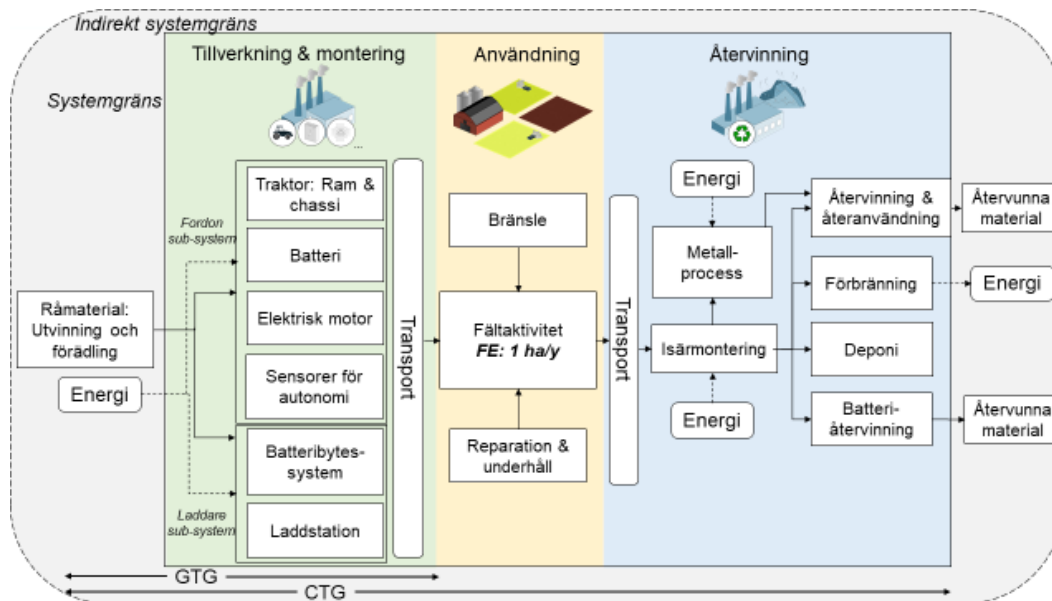
Batterier som används över tid tappar sin kapacitet för att hålla energi, så kallad kapacitetsförlust. Denna inkluderades i simuleringen där laddhastighet och antalet laddcykler användes som nyckelparametrar för att beskriva kapacitetsförlusten. När ett batteri hade tappat 20 % av sin originalkapacitet byttes det ut mot ett nytt batteri, vilket är standard för elfordon [37]. För det elektriska scenariot skedde detta efter 4240 cykler eller 15 år. Eftersom det elektriska scenariot hade fyra batterier som alla belastades med lika många årliga cykler skedde kapacitetsförlusten långsamt. Kapaciteten minskar även passivt över tid, vilket inte simulerades.

Simuleringen inkluderade även en modul som simulerar negativa effekter av markpackning, främst skördeförlust och ökad energiåtgång, utifrån de effekter som beskrivs i [38, 39]. Det antogs att konventionella fordon, som har en vikt på 10 800 kg bidrog till ytterligare markpackning medan de elektriska traktorerna, som väger 3 500 kg inklusive batterier, inte antogs packa marken ytterligare [40]. Markpackningen innebar en ökning av energiåtgången med totalt 29 % [40] och skördeförlusten uppgick till 8 % på lermark och 6 % som Svenskt genomsnitt [38].

## 2.2. LCA

För att bedöma klimatpåverkan för de olika systemen gjordes en livscykelanalys (LCA), inklusive livscykelinventering (LCI) och livscykelpåverkansanalys (LCIA). Den gjordes enligt ISO standard 14040:2006 [41], med vägning och Heuristiskt perspektivval från ReCiPe-modellen [42], i programmet SimaPro [43]. Studien utgick från modell och data från Lagnelöv, et al. [23]. Eftersom en kommande, eller framtida, teknik undersöktes så användes en process-baserad konsekvens-LCA, något som går i linje med rekommendationer i litteraturen [44, 45], även om det finns gott om metoddiskussioner rörande metodval för framtida teknologier [46].

Omfattningen av studien var tillverkning, användning och återvinningsfasen, där tillverkningen innefattade tillverkning och montering av traktorerna, batterier, laddinfrastrukturen och eventuella sensorsystem för autonom användning. Material och energianvändning för processer innan detta steg (t.ex. materialutvinning och förädling) inkluderades indirekt. Användningsfasen inkluderade bränsleanvändning, reparationer, underhåll och åtgång av AdBlue, oljor och smörjmedel. Återvinningsfasen inkluderade isärmontering, återbruk, återvinning, materialåtervinning, förbränning och deponi av delar och material i systemet, se Figur 4. På grund av studiens fokus på traktorer togs redskap inte med i analysen.



Figur 4: Systemgränser och omfattning av det studerade systemet. Materialflöden representeras med heldragna linjer och energiflöden med streckade linjer.

Den funktionella enheten 1 årligt arbetat hektar valdes för att representera resultatet för den varierande odlingen på den simulerade gården. Det är en relativt bred funktionell enhet, men då denna studie undersöker potentialer och innefattar stora arealer är den mer passande än t.ex. vikt av enskilda grödor eller liknande. Den går även enkelt att översätta mellan olika grödor.

### 2.2.1. Livscykelinventering (LCI)

Inventarielistor för elektriska traktorer är ovanliga, så data från sekundära källor, liknande fordonstyper och antaganden gjordes för att sammanställa en lista över delar och material som används i systemet. För mer detaljer, se Lagnelöv, et al. [23]. Listan, tillsammans med huvudkällor för inventariedata kan ses i Tabell 2. Insatsmedel (gödning, växtskyddsmedel, utsäde etc.), skörd, maskinhallar och markrelaterade utsläpp (förändrad markanvändning, fältutsläpp) är ej inkluderade då fokus är på maskinsystemet.

Tabell 2: Inventarielista över använda komponenter i de två systemen, uppdelade på fordonskategori och livscykelphas. Kategorier märkta med stjärna (\*) är inkluderade men i minskad skala jämfört med standardfallet.

Fas	Kategori	Komponent	Elektrisk	Konventionell	Källor	
Tillverkning och montering	Ram & chassi	Hytt		●	[47, 48]	
		Hjul	●	●	[47, 48]	
		Ram	●	●	[47, 48]	
		Chassi	●	●	[47, 48]	
	Drivlina	Bly-syra batteri			●	[48]
		Motor, förbränning			●	[48]
		Dieseltank			●	[48]
		Kraftöverföring & växlar	●*		●	[47, 48]
		Vätskor (motorolja, smörolja, AdBlue etc.)			●	[48]

		Li-jon batteri	•		[49]	
		Motor, förbränning (PMSM†)	•		[50]	
		Övriga komponenter	Autonoma system och sensorer	•		[23]
		Infrastruktur	Elektrisk laddare	•		[51]
			Batteribytestsystem	•		[31, 52]
Användning	Bränsle	Diesel		•	[53]	
		El	•		[1, 54, 55]	
	Reparation och underhåll	Reparationer	•	•	[48, 56]	
		Underhåll	•*	•	[48]	
Återvinning	Avfallshantering	Fordon	•	•	[48, 57, 58]	
		Laddinfrastruktur	•		[57]	
	Återvinning	Batteriåtervinning	•		[59]	

† PMSM: Synkron permanentmagnetsmotor (Permanent magnet synchronous motor)

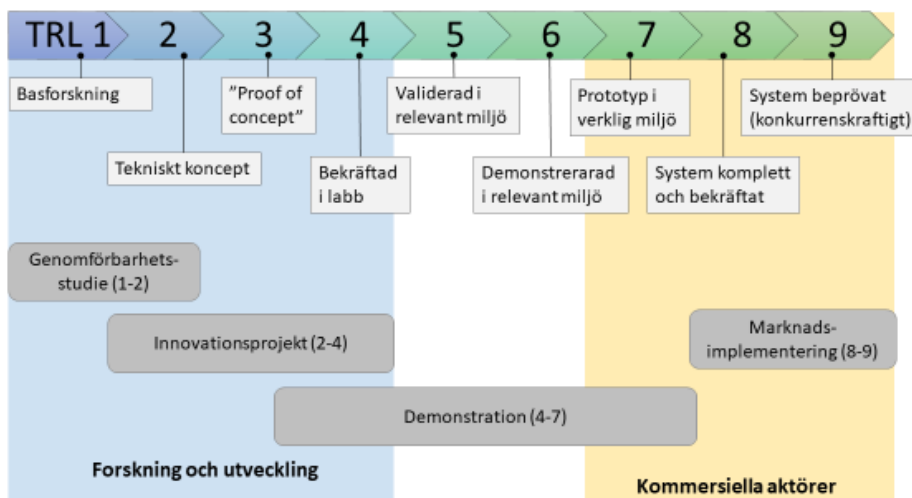
Vätgastraktorn antogs vara uppbyggd på samma sätt som den batteridrivna eltraktorn och ha samma tillverkningsprocesser och material, med skillnaden att batteriet räknades bort och en tank antogs produceras. Detta ansågs rimligt då tillverkningen av vätgas har visats vara upp till 80 % av klimatpåverkan för tyngre vätgasfordon [60]. Det antogs att vätgasen tillverkades med den vanligast använda metoden idag, nämligen reformering av ånga med hjälp av vätgas. Vätgas från elektrolys driven av el från vindkraft togs med som framtida alternativ [61].

### 2.2.2. Klimatpåverkan

Utsläppen som genererades av de olika faserna tillskrevs sedan en klimatpåverkansfaktor (potential till global uppvärmning, med enhet kg CO<sub>2</sub>eq.) med hjälp av data från databasen EcoInvent [62] och LCA-modellen ReCiPé [42, 63]. Klimatpåverkan summerades sedan över den undersökta tidsperioden, i detta fall systemets livslängd på 15 år, för att få en klimatpåverkan för hela livscykeln. De redovisades därefter i sina respektive LCA-faser för att enklare kunna skala upp resultatet.

## 2.3. Tidslinje för teknikutveckling

För att sätta elektriska självkörande traktorer i en tidsmässig kontext så gjordes en tidslinjeanalys. Den gjordes genom att bedöma TRL (*technology readiness level*, teknisk mognadsgrad) för de olika tekniska stegen i utvecklingen till fullt autonoma, elektriska traktorer från dagens konventionella traktorer. TRL är en skala i intervallet 1-9 där 1 är att grundprinciperna för systemet är kända (grundforskning) och 9 är att systemet är verifierat i den aktuella miljön, inklusive tillverkningskedjor (i princip tillgänglig för marknaden) [64], se Figur 5. Dessa steg sattes därefter upp på en tidslinje där nuvarande TRL samt tid till bred implementering (TRL 8-9) uppskattas. De primära resultaten för klimatpåverkan gavs för de olika stegen, så att även klimatpåverkan kunde spåras tidsmässigt. De olika stegen i detta fall var olika nivåer av autonomi, elektrifiering, fordonsvikt och olika laddningsinfrastrukturer där följande steg undersöktes.



Figur 5: Grafisk förklaring av TRL samt dess olika steg.

## 2.4. Nationell potential till minskad klimatpåverkan

En viktig del i att bedöma potentialen för en teknik är att se vilken påverkan den kan ha i ett större system. För att lyfta nivån på klimatpåverkan från gårdsnivå där endast spannmål odlades till en nationell nivå så gjordes antaganden och analyser för att innefatta andra jordarter och väderdata för andra platser i Sverige samt att även inkludera vallodling.

### 2.4.1. Spannmål, vall och övriga grödor

Simuleringarna berörde främst odlingen av blandat spannmål (höst- och vårvete, korn och havre) vilket kan antas vara representativ för svensk spannmålsodling, som utgör ca 37 % av grödorna som odlas i Sverige baserat på odlingshektar (ca 967 000 hektar av 2.6 miljoner ha) [65, 66]. Majoriteten av de resterande hektaren består av vall, mestadels odlad som djurfoder. Vall upptar ca 43 % av all odlingsbar hektar i Sverige och står tillsammans med spannmål för den överväldigande majoriteten av odlad mark i Sverige, då de tillsammans täcker ca 80 % av den tillgängliga åkermarken [66]. För att få en överblick av potentialen för minskningen av klimatpåverkan från maskinsystemet användes, förutom simuleringar av spannmålssystem, resultat från tidigare studier där elektriska traktorer simulerades i ekologisk vallodling [25]. Resultaten visade på en minskning av energianvändningen med 58 % för det elektriska fallet, från 450 till 185 kWh/ha. Dessa resultat samt tidigare beskriven simulering bör innefatta tillräckligt för att uppskatta de alternativa maskinsystemens potential på en nationell nivå.



Tabell 3: Energiåtgång och areal för grödor odlade på svensk åkermark. Anpassad från Baky, et al. [2] och validerad med data från Jordbruksverket [65, 66].

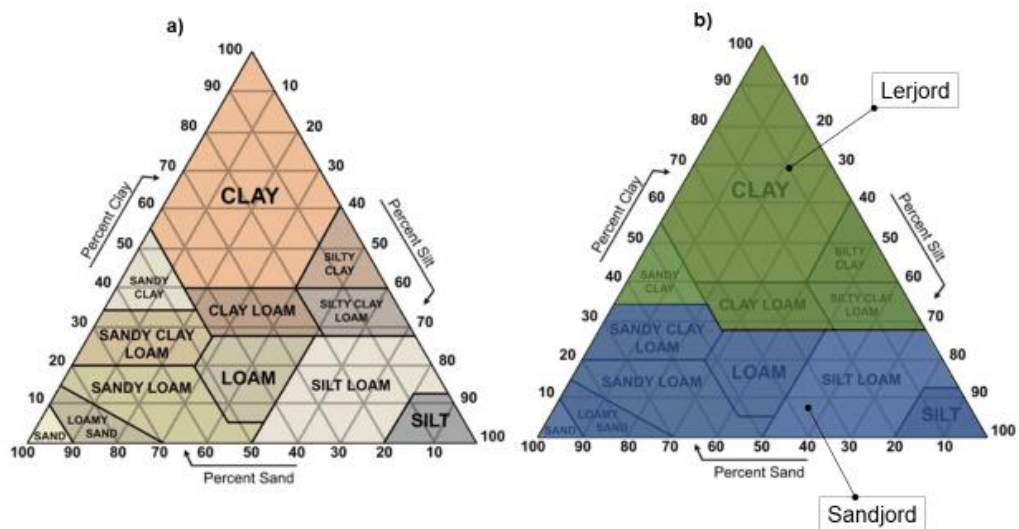
	Energiåtgång		Areal
	(l/ha)	(kWh/ha)	(2010, ha)
Höstvete	71	718	311 632
Vårvete	72	728	49 915
Råg	69	698	27 581
Höstkorn	67	678	10 396
Vårkorn	70	708	395 367
Havre	69	698	227 588
Rågvete	67	678	49 287
Blandsäd	66	668	15 955
Grönfoder	79	799	44 619
Slättervall	49	496	870 740
Betesvall	17	172	183 380
Frövall	21	212	14 260
Ärter & åkerbönor	63	637	17 414
Konservärter	129	1305	7 343
Bruna bönor	61	617	498
Matpotatis	136	1376	19 590
Stärkelsepotatis	150	1517	7 293
Sockerbetor	130	1315	36 778
Raps & rybs	60	607	89 506
Oljelin	65	658	3 534
Energiskog	-	-	14 201
Trädgårdsväxter	136	1376	14 727
Andra växtslag	40	405	5 595
Träda	7	71	146 527
Ospec. åkermark	20	202	7 583
		<b>Total areal (ha)</b>	<b>2 571 309</b>
<b>Genomsnitt Energiförbrukning (kWh/ha)</b>	<b>572</b>	<b>Total energiåtgång (kWh)</b>	<b>1,470 x 10<sup>9</sup></b>
<b>Energiförbrukning, exl. spannmål &amp; vall (kWh/ha)</b>	<b>535</b>	<b>Energiåtgång, exl. spannmål &amp; vall (kWh)</b>	<b>1,984 x 10<sup>8</sup></b>

För en uppskattning av potentialen till minskning för övriga grödor, som upptar 20 % av den odlade åkermarken, användes genomsnittet från Baky, et al. [2] där den genomsnittliga användningen för alla grödor exklusive spannmål och vall var 535 kWh/ha. Därigenom kunde även den direkta energiåtgången i svenskt lantbruk i form av diesel till fältmaskiner uppskattas till ca 1,47 miljarder kWh/år, eller 1,47 TWh/år.

#### 2.4.2. Jordarter, kartering och geografisk placering

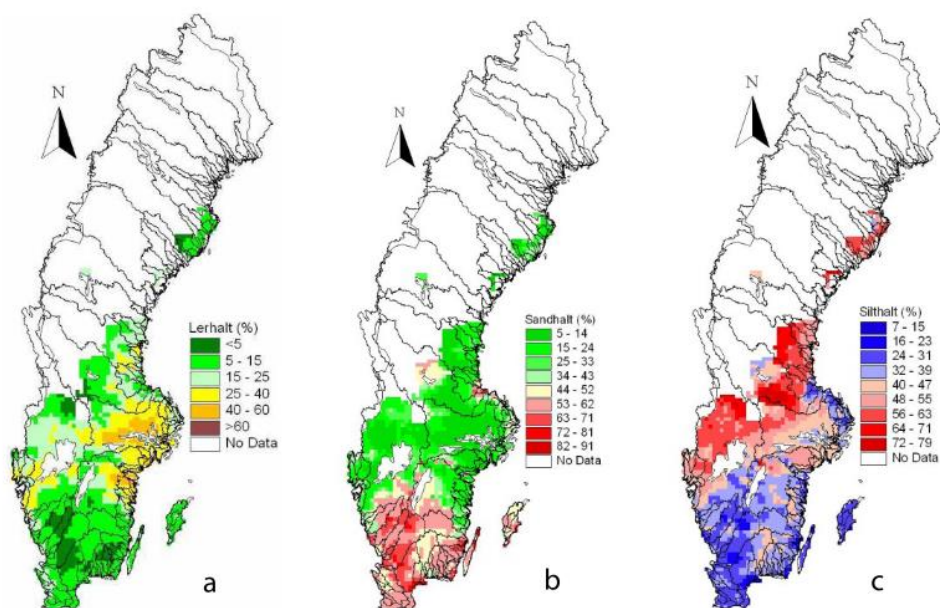
Simuleringarna gjordes primärt på jordartsdata för lermark i Uppland, vilken har hög lerhalt (>40%) jämfört med den många svenska jordar. För att kunna översätta resultaten till en

nationell nivå gjordes även simuleringar för sandjord, med värden tagna från Witney [29]. Kartor med jordartsaggregat från den nationella jordartskarteringen [67] användes för att bestämma huvudsaklig jordart (sandjord eller lerjord) i de olika delarna av Sverige och resultaten skalades upp därefter. Jordarterna bestämdes utifrån deras komponent, dvs. hög fraktion sand klassificerades som sandjord, enligt FAOs klassificeringssystem visad i Figur 6. Denna rudimentära uppdelning tar tillvara de delar av jordarternas sammansättning som ger störst inverkan på simuleringresultaten och därmed också den resulterande energiåtgången. Även om det finns många olika jordarter i Sverige och de har sina egna karaktärsdrag, så märks den största skillnaden mellan jord med hög lerhalt och jordar med låg lerhalt, vilket inkluderas här.



Figur 6: Texturtriangel med innehållsfraktion och resulterande jordart enligt FAOs klassificeringsmodell (a) och resulterande uppdelning i denna studie (b). Anpassad från Shahid, et al. [68].

Jordarterna påverkade vattenavrinningen och kraftåtgången för maskinsystemen. En förändring i jordarten ledde till förändrad total energianvändning vilket har potential till en stor förändring i klimatpåverkan. Ändrade vattenhållande förmåga kan leda till förändrad körbarhet och andra effekter av markpackning, vilket i sin tur kan påverka skördemängder. Dessa jordartstyper kombinerat med den geografiska fördelningen av vall och spannmål beskriven tidigare ger en förenklad, men representativ bild av var och när klimatpåverkan kan tänkas minska med elektriska maskinsystem.



Figur 7: Data från jordartskartering, där lerhalt (a), sandhalt (b) och silthalt (c) visas för Sverige, utifrån FAOs klassificeringssystem. Vita områden indikerar områden utan data. Figur från Paulsson, et al. [67].

### 2.4.3. Bränsletypens påverkan

Tidigare studier har visat att bränslet är en betydande faktor i klimatpåverkan från fordon, både för diesel och elektricitet [23, 58]. Till skillnad från mindre fordon så kommer mycket av påverkan från användningsfasen, då främst bränslet. En förenklad bränsleanalys gjordes därför för att undersöka de olika alternativen som finns för de olika traktortyperna. Där ingick ren diesel, diesel med låginblandning av HVO samt ren HVO för förbränningsmotorer [53, 69, 70]. För elektriska drivlinor ingick Svensk medel-elmix, Svensk marginal-elmix och Europeisk elmix [54, 55] samt vätgas producerad via elektrolys med vindkraftsel och vätgas från ångreforming via naturgas [61].

Tabell 4: Bränsletyper, innehåll och klimatpåverkan innan drivlineförluster. Klimatdata och fördelning tagna från [23, 53, 54, 61, 69].

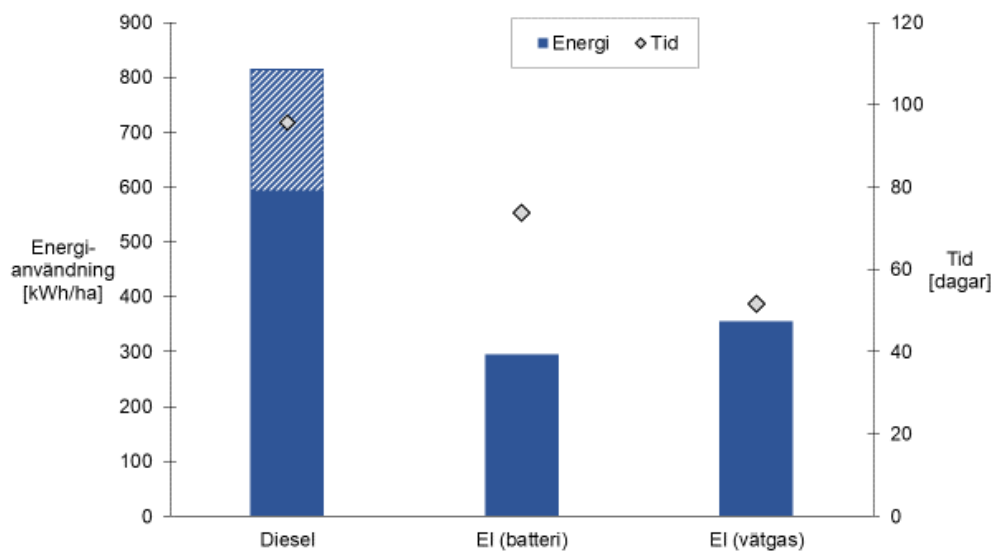
Typ	Bränsle	Innehåll	Klimatpåverkan vid pump (g CO <sub>2</sub> eq./kWh)
Förbränningsmotor	Diesel	100 % Diesel	266
	Diesel (17 % HVO)	83 % Diesel 17 % HVO	235
	HVO (Svenska råmaterial)	100 % HVO	85
El	Svensk	43 % vattenkraft 38 % kärnkraft 5 % övr. förnybara källor 8 % import	50
	Svensk marginal	41 % naturgas 35 % vindkraft 24 % biomassa	182

	Europeisk	50 % fossila bränslen 27 % kärnkraft 17 % vattenkraft 6 % övr. förnybara källor	216
Vätgas	Naturgas	Ångreformerad vätgas från 100 % naturgas	302
	Vindkraft	Elektrolyserad vätgas från vatten med el från 100 % vindkraft	25

## 3. Resultat och diskussion

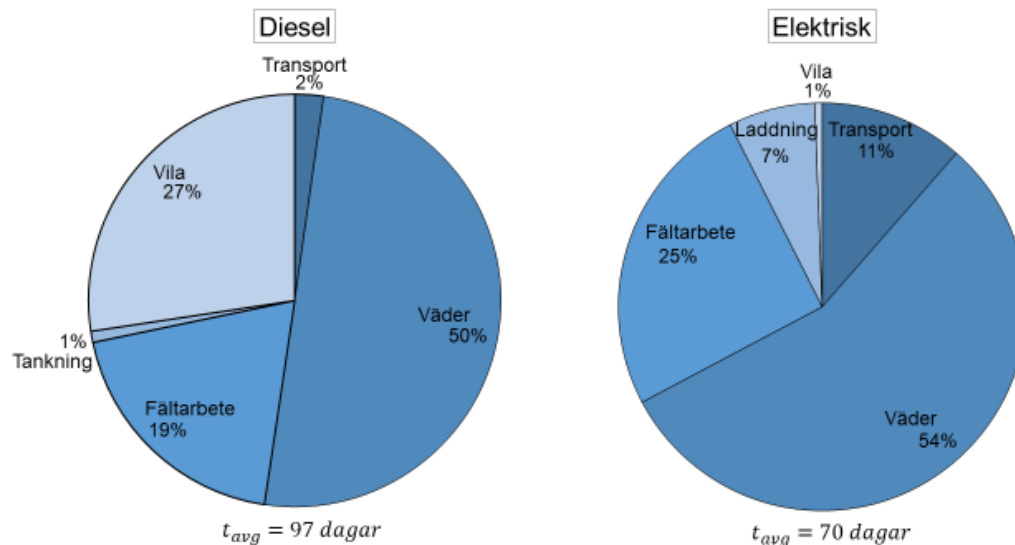
### 3.1. Simuleringsresultat

Simuleringen resulterade främst i energianvändning och tidsåtgång som totalt krävdes över de tre arbetsperioderna. Det visade på att man med optimerade elektriska traktorer kunde få en hög arbetstakt och kunna utföra alla sysslor i rimlig tid. I Figur 8 visas att den totala tiden som krävdes för att utföra alla fältarbeten var lägre för de elektriska alternativen än för den konventionella. Den aktiva tiden bestod av summan av de aktiva kalenderdagarna under arbetsperioderna, och om arbetet var klart snabbare blev den totala tiden lägre. Att den blev lägre för de elektriska fordonen berodde till stor del på att de arbetade upp till 24 timmar/dag jämfört med 10 timmar/dag, samt att två små traktorer i många fall hade högre arbetstakt per timme än en enskild stor maskin. Skillnaden i energiåtgång är även tydlig i Figur 8, där de elektriska alternativen på grund av sin högre drivlineeffektivitet har betydligt lägre energiåtgång än dieselsystemets 816 kWh/ha, minskningarna var 64 % för batteridrivlinan och 56 % för vätgasdrivlinan. En del av energiförbrukningen (28 %) resulterade från den ökade markpackningen för den tyngre dieseltraktorn. Energiförbrukningen hade även en väldigt liten spridning mellan åren, med standardavvikelser på 0,03-0,11 % av medelvärdet, vilket tyder på redundans i simuleringen och liten variation i årsvärden. Den aktiva tiden hade större standardavvikelser, på 16 dagar för dieselfallet och 11 för de elektriska.



Figur 8: Energiförbrukning (blå stapel, vänster axel) och tidsåtgång (grå diamant, höger axel) för de två fallen av elektrisk drivlina och den konventionella dieseltraktorn. Markpackningens ökning av energianvändningen inkluderad som diagonalt streckad del i stapeln.

I Figur 9 syns tidfördelningen för det konventionella och elektriska fallet, och den stora skillnaden är att det elektriska fallet minskar andelen vila då systemet är självkörande, men har ökade delar i transport och laddning. Detta då laddningen tar längre tid och har högre risk för kö, och att de har mindre energi än dieseltraktorn leder till att de oftare behöver åka tillbaka till gårdscentrat för att ladda batteriet. Fraktionen som består av fältarbete är också en rudimentär indikator på hur effektivt systemet är, då det är den tiden som är produktiv.



Figur 9: Fördelning av tid för de olika alternativen.

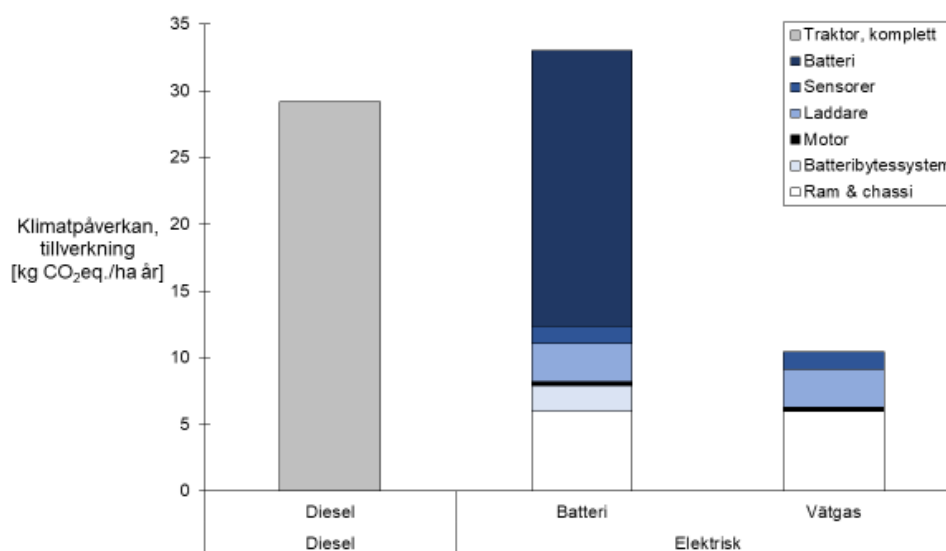
Skillnaden i aktiv tid och tidfördelningen har väldigt liten påverkan på de olika fallens klimatpåverkan, men är viktig för att förstå dynamiken i systemet och teknikens för- och nackdelar. T.ex. så är minskningen i energiåtgång mindre än den teoretiska på grund av de

ökade transportbehoven. Då den aktiva tiden för det konventionella fallet är baserad på standardvärden och kapacitet för svenskt lantbruk har det antagits att det är riktvärdet för fullgod kapacitet för fältarbete. Då båda de elektriska fallen är snabbare har det antagits att ingen ytterligare effekt på skörd, positiv eller negativ, fås av den ökade arbetstakten och kapaciteten.

## 3.2. Klimatpåverkan

### 3.2.1. Tillverkning

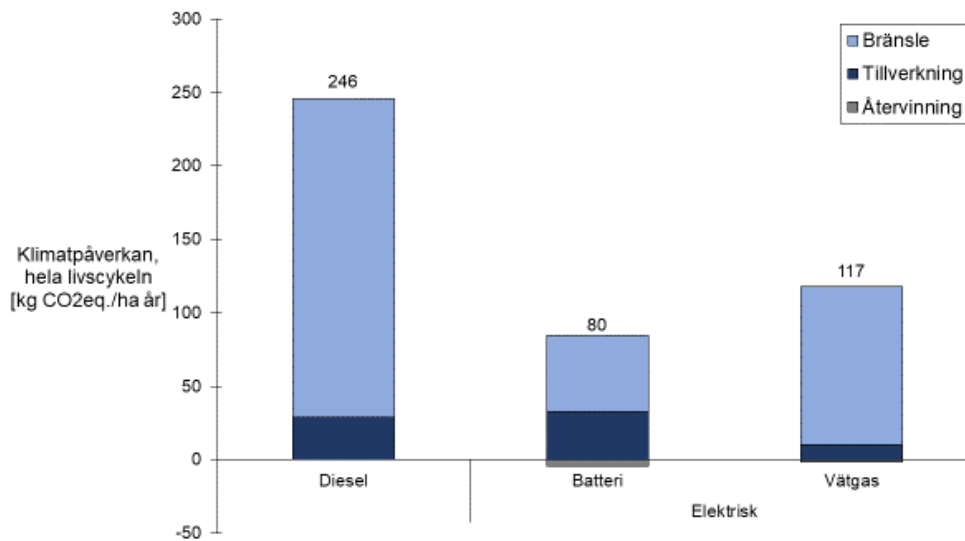
Klimatpåverkan från tillverkningen (eller Gate-to-gate, GTG) av traktorerna var störst för det elektriska systemet, till stor del på grund av tillverkningen av batterierna. Den totala påverkan från tillverkningen av batteritraktorerna och deras system var 33 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år, där batterierna stod för 63 %. Utöver det var påverkan låg på grund av den lägre fordonsvikten, även när laddningsstationen tillverkning och montering inkluderades. Den konventionella traktorns tillverkning hade också hög påverkan. I den är alla faktorer, inklusive återvinning medräknad, och på grund av den höga totalvikten och stora andelen metaller som används så blev klimatpåverkan ca 29 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år. Vätgassystemet visade sig ha låg klimatpåverkan i tillverkningen då det också hade lägre fordonsvikt och därmed mindre material och processer, men inte heller belastades med batteriernas påverkan. Alla värden är utslagna över 200 ha och 15 års livslängd.



Figur 10:Klimatpåverkan i tillverkningen av de olika traktorsystemen. Värdet för dieseltraktor är ej räknat per komponent, utan alla komponenter inklusive återvinning och reparationer är summerade.

### 3.2.2. Livscykelanalys

Fordonets hela livscykel inkluderade förutom tillverkning också bränsle, underhåll, reparationer samt återvinning och avfallshandling efter att den tekniska livslängden uppnåtts. Bränslet är den största kategorin för alla tre scenarion för livscykeln. Detta är extra tydligt i fallet med den konventionella dieseltraktorn där 15 års dieselanvändning har en klart större klimatpåverkan än tillverkningen. Totalt var dess årliga påverkan 246 kg CO<sub>2</sub>eq./ha varav dieselbränslet var nära 90 %. De elektriska alternativen gav en sänkning till 80 och 117 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för batteri och vätgas. Det motsvarar en minskning med 68 % för den batterielektriska drivlinan och 53 % för vätgasdrivlinan, jämfört med det konventionella systemet.



Figur 11: Klimatpåverkan för hela livscykeln för det konventionella dieselalternativet och de elektriska alternativen.

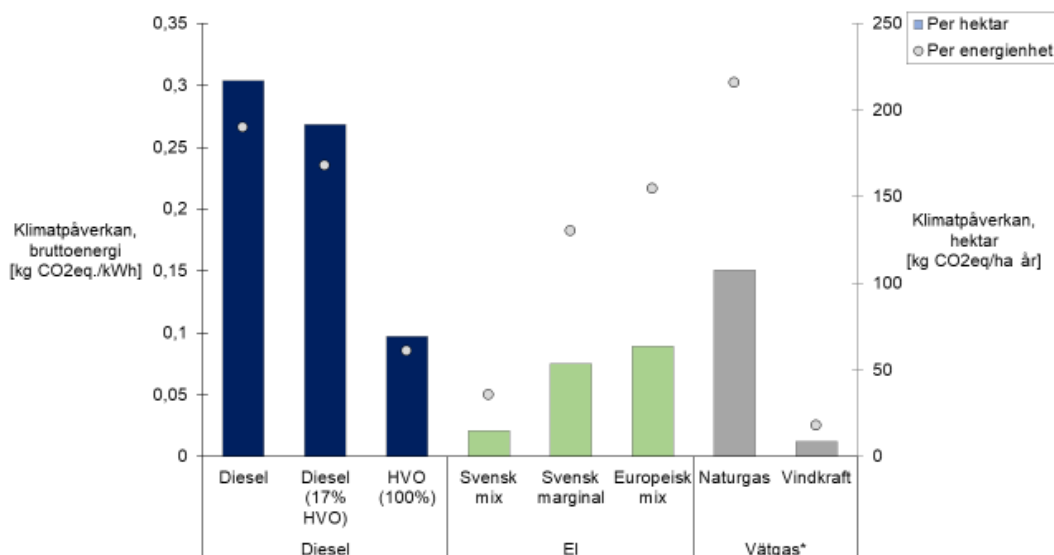
I båda de elektriska fallen bidrog bränslet till en stor del av påverkan, även om den totala påverkan var mindre än för det konventionella fallet. Minskningen i bränslepåverkan har två delar, dels har bränslet (svensk marginal el och vätgas från naturgas) mindre påverkan än diesel, men den högre effektiviteten i drivlinorna ser också till att det blir mindre energiförluster och att mindre total energi behövs (Figur 8). Den kombinerade effekten är det vi ser i Figur 11. Återvinningen ger en lite positiv påverkan för batteritraktorn, specifikt batteriåtervinning.

### 3.2.3. Bränsletypens roll

Då bränslet visade sig bidra till en stor del av klimateffekterna, och det för alla traktorsystem fanns flera olika alternativa bränslen eller olika ursprung, så gjordes en utvärdering av olika bränslen för grundfallet med spannmål på lerjord i Uppland, dels per



hektar och dels per kWh, se Figur 12. Det visade att även om vissa av tillverkningsmetoderna för vätgas eller ursprunget på el har liknande klimatpåverkan som diesel per enhet energi, så var det betydligt lägre ute på fältet, där verkningsgraden på drivlinan spelar roll. Den ökade verkningsgraden hos de elektriska drivlinorna gör att de flesta bränslen som används i en förbränningsmotor är sämre än i princip alla undersökta elektriska alternativ, med undantag av ren HVO från svenska råvaror, som är något bättre än vätgas tillverkad med naturgas som bas.



Figur 12: Klimatpåverkan för olika bränsletyper och ursprung, fördelade på huvudgrupperna förbränningsmotor (blå), el (grön) och vätgas (grå). Visad per energienhet (cirklar, vänster axel) och per hektar och år (staplar, höger axel). \*Vätgas inkluderar inte överföringsförluster.

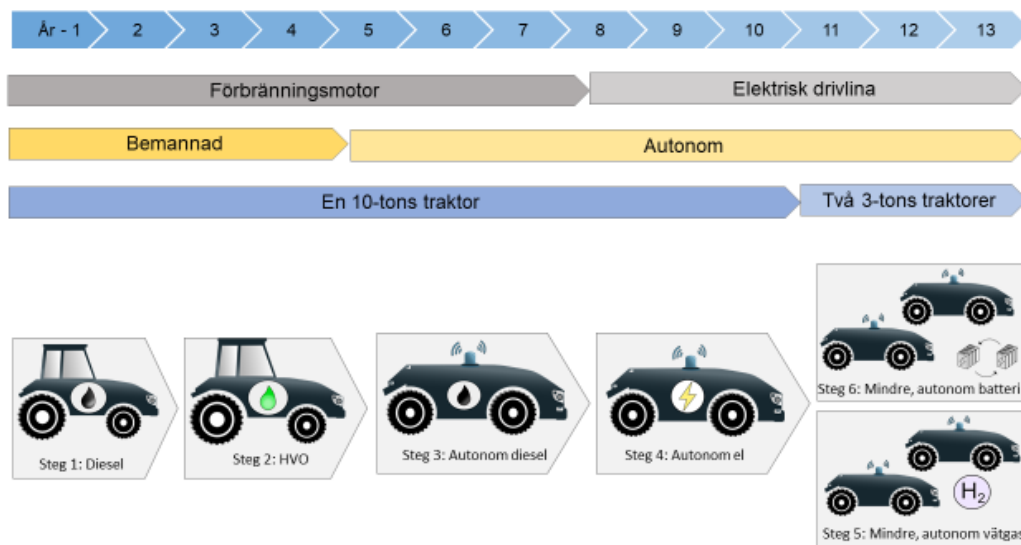
Värden för klimatpåverkan per energienhet (Figur 12) kombinerades med olika grödors och jordarstypers energiåtgång för att undersöka vilken påverkan bytet av bränsle kan få på en nationell nivå (Sektion 4). Intervallen mellan bränslena med högst och lägst klimatpåverkan i varje huvudkategori (förbränningsmotor, el och vätgas) ger även en uppskattning om realistiska värden för dessa kategorier. Det är inte troligt att ett praktiskt uppmätt värde ligger lägre än det lägsta eller högre än det högsta.

### 3.3. Tidslinje och steg i teknikutvecklingen

Ingen ny avgörande teknisk utveckling sker direkt, utan uppkommer oftast efter flera små steg i rätt riktning. Oftast sker denna stegvisa utveckling över lång tid, och för att få ett perspektiv på tidshorizonten för självkörande, elektriska traktorer diskuteras i detta avsnitt en tidslinje med nuvarande TRL-nivå för teknologin som används och uppskattat tidsintervall till marknadsfas. Detta kan ses i Tabell 5 och Figur 13.

Tabell 5: Tidsbedömning och TRL-nivå för de olika teknikstegen.

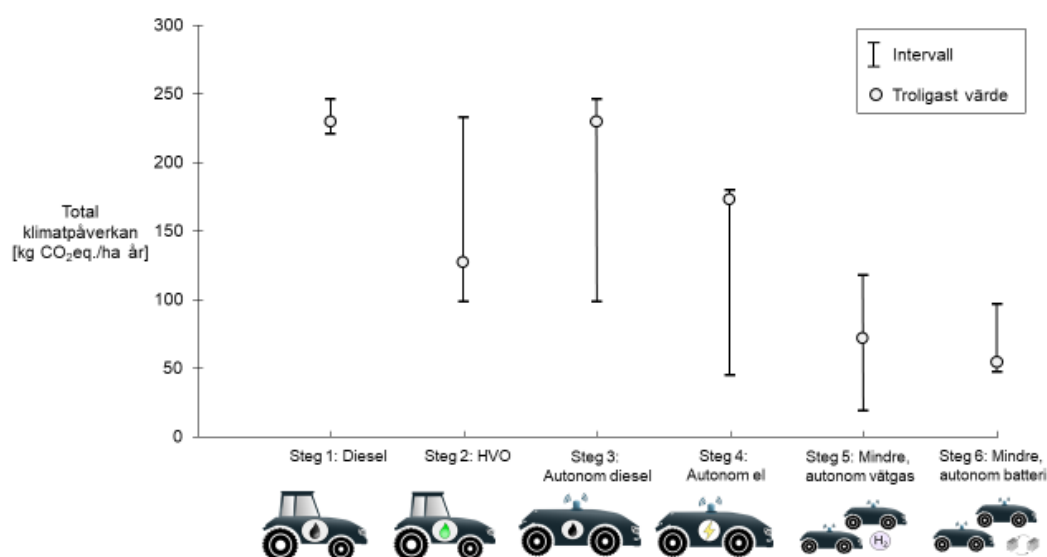
Steg:	Beskrivning	TRL-nivå	Uppskattad tid till marknad, TRL 8-9 (år)
1	Konventionell stor traktor med förare, låginblandad diesel	9	-
2	Konventionell stor traktor med förare, HVO	8	2
3	Autonom stor traktor, diesel	6-7	5
4	Autonom stor traktor, elektrisk	6	9
5	Flera små, autonoma, elektriska traktorer, vätgas	5-6	12
6	Flera små, autonoma, elektriska traktorer, batteri m. batteribytestsystem	4-5	13



Figur 13: Exempel på möjlig teknikutvecklingsväg (pathway) och tidslinje för de 6 beskrivna stegen från konventionell traktor till ett självkörande, elektriskt traktorsystem.

Ett problem med dessa tekniker är att de är en kombination av flera tekniker under utveckling. Ett exempel är att de elektriska traktorerna använder batterier, laddare, självkörande system och elektrisk drivlina som alla är på olika TRL-nivåer, samt att det kombinerade systemet i sig kan vara otestat. Det gör att sammanvägningen blir komplicerad och utgår från den del av systemet som har lägst TRL-nivå. Till detta tillkommer faktorer utöver teknikutveckling, forskning och innovation när tid till marknad skall uppskattas, såsom marknadskrafter, juridiska frågor och hur väl användare tycker om tekniken. Utöver den uppskattade tiden till en hög TRL-nivå, tillkommer också tiden för

att nå bred implementering och ersätta dagens dieseltraktorer. Om det antas att traktorer ersätts vid slutet av sin tekniska livslängd så kan det dröja, då tidigare studier rekommenderar 11 200 timmar innan de bör ersättas [35, 56, 71]. Maskinkalkylgruppen [72] rekommenderar en årlig användning på 450-850 timmar/år, och det simulerade genomsnittet i denna studie var 521 timmar/år vilket leder till 13-25 år innan traktorn ersätts. Det är inte ovanligt med att traktorer används i fullskalig drift längre än så. Andra faktorer, t.ex. bränslekostnader eller tvingande lagstiftning spelar även såklart in på förändringar i maskinparken. Det uppskattade värdet för den tid det skulle ta innan mindre, elektriska, självkörande eltraktorer hade uppnått bred marknadsintroduktion uppskattades till 12-13 år med bakgrund i TRL-nivå på de individuella systemen (Figur 13). Detta antar att incitament utöver de rent ekonomiska ges för att kunna nå målet om en fossilfri fordonsflotta 2030 [73].



Figur 14: Intervall för total klimatpåverkan (tillverkning, bränsle och återvinning) för de olika teknikstegen, inklusive troligt värde för klimatpåverkan vid marknadsintroduktion.

Klimatpåverkan för de olika teknikstegen redovisas i Figur 14, där alla steg i LCA inkluderades, och ett intervall för olika bränsletyper (tidigare redovisade i Figur 12) visades för att ge en uppfattning om möjligheterna för olika bränslen. Även om intervallerna för bränslena kan variera och det i vissa fall är stor skillnad mellan bränslet med lägst och högst påverkan, så visar de troliga värdena att de små traktorerna med vätgas eller batterielektricitet har låga totala utsläpp. Figur 14 kan också i sig användas som en tidslinje över utsläppen per hektar från lantbruket, då teknikstegen även representerar tid från det nuvarande systemet och framtida system.

## 3.4. Nationell potential

### 3.4.1. Energiförbrukning

Uppdelningen av Sveriges odlingsbara jordar i kategorierna sandjordar och lerjordar gav en fördelning på 67 % sandjordar och 33 % lerjordar enligt uppdelningen i Figur 6, utförd på data från mätningar på 12 502 platser genomförd av Paulsson, et al. [67], med sandjord främst i södra delarna av landet och lerjord främst kring Mälardalsregionen. Detta speglades genom simuleringar för lerjord och sandjord, där det antogs att 67 % av de odlade hektaren var på sandjordar och 33 % på lerjordar. Skillnaden återfanns främst i energiförbrukningen, där sandjordar har lägre energiförbrukning, vilket redovisas i Tabell 6.

Tabell 6: Simulerad energiförbrukning för olika maskinsystemalternativ och jordtyper.

Energiförbrukning (kWh/ha)	Diesel	El (batteri)	El (vätgas)
Sandjord	764	264	322
Lerjord	816	295	356

Grödorna som inkluderades (spannmål och vall) uppgick tillsammans till ca 80 % av den odlade åkermarken i Sverige [66], med uppdelningen 43 % vall och 37 % spannmål. De resterande 20 % upptas av åkrar i träda (6 %) oljeväxter (4 %), potatis (1 %) och sockerbeter (1 %), med övriga odlade växter på de resterande 8 %. På grund av brist på data huruvida de odlings- och maskinsystem som används på dessa hektar är kompatibla med hur elektriska traktorer fungerar gjordes endast en förenklad beräkning av dessa övriga 20 % och fokus lades på de 80 % som upptas av vall och spannmål.

Det antogs att den simulerade skillnaden mellan sandjord och lerjord för spannmål var representativ även för vall, då simuleringen i Engström and Lagnelöv [25] endast undersökte lerjord. Det antogs även att skillnaden i energiåtgång mellan batterier och vätgas kunde användas även för vall. I och med dessa antaganden kunde en enkel mall för energiförbrukningen i de beskrivna fallen konstrueras, vilket visas i Tabell 7. Angivna värden för dieseltraktorns energianvändning liknar de värden som ges i Baky, et al. [2] för både spannmål och vall, vilket indikerar att de är realistiska.

Tabell 7: Energianvändning för olika grödor, jordar och maskinalternativ. Energibesparing anger besparing för elektrisk drivlina jämfört med det konventionella scenariot.

	Energiförbrukning (kWh/ha)	Diesel	El (batteri)	El (vätgas)	Energibesparing
<b>Spannmål</b>	Sandjord	764	264	322	58-65 %
	Lerjord	816	295	356	56-64 %
<b>Vall</b>	Sandjord	423	166	203	52-61 %
	Lerjord	450	185	226	50-59 %

Ett antagande gjordes om att de beskrivna jordarterna och grödorna var okopplade parametrar och att en jämn fördelning kunde antas. Det finns stöd för att andelen vall ökar norrut i landet samt att det finns en koppling mellan höga skördar av spannmål och lerhaltig mark, men det går utöver detaljnivån som denna studie eftersträvar. Det finns exempel på alla kombinationer av gröda och jordtyp, och en jämn fördelning är lättare att hantera

analytiskt. För de 80 % av Sveriges areal som täcks av spannmål eller vall antogs fördelningen som visas i Figur 15.

	Spannmål 37%	Vall 43%	Övriga grödor 20%
Sandjord 67%	Spannmål, sandjord 25% (633 000 ha)	Vall, sandjord 29% (736 000 ha)	Övriga grödor, alla jordar 20% (511 000 ha)
Lerjord 33%	Spannmål, lerjord 12% (312 000 ha)	Vall, lerjord 14% (169 000 ha)	

Figur 15: Uppdelning av grödor och jordarter, enligt jämn fördelning av parametrar och med grov storleksfördelning, baserat på en total odlingsareal på 2,6 miljoner ha..

### 3.4.2. Klimatpåverkan

Energiförbrukningen för de olika jordarterna och grödorna kombinerades därefter med dess faktorer för klimatpåverkan för den specifika bränsletypen (Figur 15) för att få fram en klimatpåverkan för de olika fallen (Tabell 8). För de övriga grödorna användes genomsnittsvärdet som räknades ut från Baky, et al. [2] data (Avsnitt 2.4.1), 535 kWh/ha. Detta modifierades sedan med verkningsgraden i drivlinorna, där det antogs att genomsnittsvärdet hade den simulerade dieseldrivlinas verkningsgrad på 26 %. Till detta lades resten av resultaten av LCA till; tillverkning, underhåll och återvinning av traktorerna och infrastrukturen.

Tabell 8: Klimatpåverkan per areal för de olika jordarterna och grödorna.

	Klimatpåverkan (kg CO <sub>2</sub> eq./ha)	Förbränningsmotor	EI		Vätgas	
		Diesel	Svensk marginal	Svensk mix	Naturgas	Vindkraft
Spannmål	Sandjord	232	77	42	106	17
	Lerjord	246	82	43	117	18
Vall	Sandjord	142	59	37	70	14
	Lerjord	149	62	38	77	15
Övriga grödor	-	172	63	38	79	15

Resultaten skiljer sig något från de redovisade i liknande studier [23], vilket kan förklaras med att en högre energianvändning för dieselfallet antogs än i denna studie. Resultaten från Tabell 8 skalades upp till en nationell nivå med hjälp av arealfördelningen given i Figur 15. Det täcker in all rapporterad använd åkermark i Sverige, runt 2,6 miljoner hektar. Det som visas är att även om det är mindre klimatpåverkan på sandjord per hektar, så blir totalen större då det finns mer av den än lerjord. Det visas även att alla elektriska alternativen ger en stor minskning av klimatpåverkan. Den direkta klimatpåverkan från maskinarbetet summerades, vilket visas i Tabell 9.

Tabell 9: Årlig klimatpåverkan för maskinanvändningen i svenskt jordbruk för olika scenarion, grödor och jordarter

	Total klimatpåverkan (x10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> eq./år)	Förbränningsmotor	El		Vätgas	
		Diesel	Svensk marginal	Svensk mix	Naturgas	Vindkraft
<b>Spannmål</b>	Sandjord	147,1	48,6	26,5	67,3	10,8
	Lerjord	76,8	25,7	13,6	36,5	5,6
<b>Vall</b>	Sandjord	171,0	56,5	30,8	78,2	12,6
	Lerjord	54,0	22,6	13,8	28,0	5,3
<b>Övriga grödor</b>	-	147,1	48,6	26,5	67,3	10,8

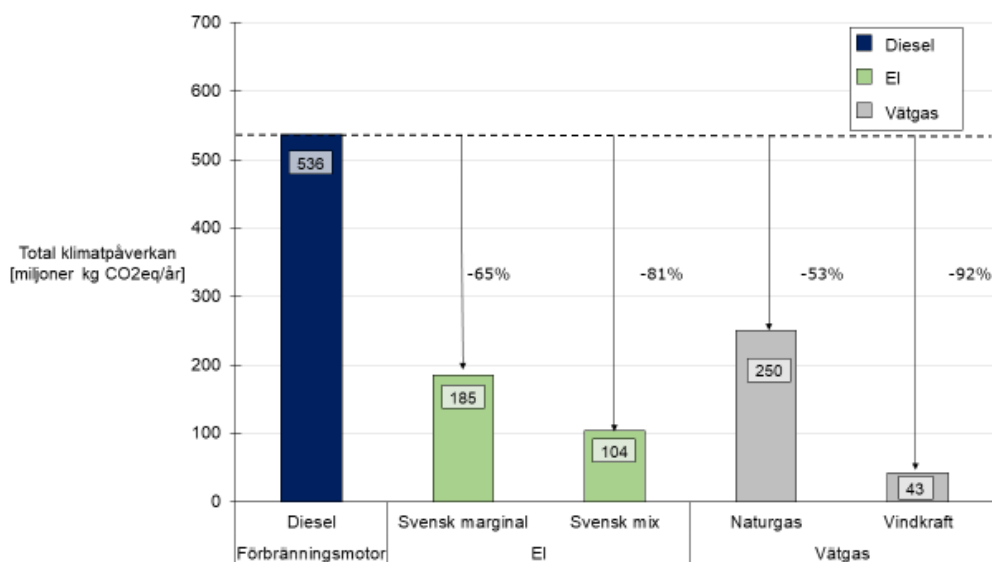
Tabell 10: Årlig total klimatpåverkan och jämförelser mellan olika maskinscenarion och bränslealternativ.

Total klimatpåverkan (x10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> eq./år)	Förbränningsmotor	El		Vätgas	
	Diesel	Svensk marginal	Svensk mix	Naturgas	Vindkraft
<b>Summa, spannmål &amp; vall</b>	448,8	153,3	8,5	209,9	3,4
<b>Övriga grödor</b>	87,7	3,2	2,0	4,0	7,6
<b>Totalsumma</b>	536,5	185,5	104,1	250,3	4,2
<b>Minskning jfr diesel</b>	-	-351,0	-432,4	-286,2	-494,6
<b>Minskning jfr. diesel</b>		65 %	81 %	53 %	92 %

Den totala energianvändningen beräknades till 1,486 TWh, ett värde nära de 1,45 TWh som Baky, et al. [2] och Jordbruksverket Statistics Sweden [66] redovisade. Detta kunde sänkas till 0,54 TWh genom att gå över till batterielektriska maskiner och 0,66 TWh genom en övergång till vätgas, minskningar med respektive 63 % och 55 %. Den totala klimatpåverkan för maskinanvändningen på fält i Svenskt lantbruk beräknades till 536 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år för det konventionella fallet, vilket kunde sänkas med 286-495 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år genom övergången till elektriska alternativ. Detta innebar en sänkning med 53-92 % jämfört med dagens system, vilket visas i Tabell 10. Sänkningen av utsläpp med klimatpåverkan som kan uppnås genom att byta till elektriska traktorer är i samma

storleksordning som utsläppen från alla Sveriges motorcyklar, bussar och flyg under 2021 (480 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år) [74] och skulle minska klimatpåverkan från den Svenska transportsektorn med 2-3 %.

Det är värt att nämna att det bästa alternativet för batteritraktorerna, den svenska genomsnittsmixen, är ett realistiskt alternativ redan idag, medan storskalig elektrolys av vätgas med förnybara elkällor är relativt utforskad och infrastrukturen outvecklad. Därför bör minskningen med 92 % ses som ett framtida målskenario som behöver ytterligare utveckling då utmaningarna främst bedöms ligga i infrastrukturen och uppskalning, inte i fordonen. De batterielektriska traktorerna lider dock något av att tillverkningsfasen har en relativt stor påverkan jämfört med diesel- och vätgatraktorer. Utökad användning av batterierna efter slutet på den tekniska livslängden (ett så kallat andra liv, *second life*) skulle minska batteriets totala klimatpåverkan och ge ökad nytta. En möjlighet är att använda batterierna för stationär ellagring på exempelvis gårdsnivå.



Figur 16: Total klimatpåverkan för de olika traktorsystemen.

## 4. Slutsats

I denna studie undersöktes potentialen för att minska klimatpåverkan i Svenskt lantbruk genom en övergång till fossilfria traktorer, specifikt till lättare, elektriska och självkörande traktorer som drivs av vätgas eller el från batterier. Målet var att beräkna den totala klimatpåverkan genom en LCA, göra en bedömning av den nationella potentialen samt göra en tidslinje där uppskattad tid till verklig storskalig användning uppskattades.

LCA visade på en klimatpåverkan från maskinanvändning på fält på 80 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för det batterielektriska systemet och 117 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för vätgasset, jämfört med 246 kg CO<sub>2</sub>eq./ha och år för det konventionella dieselfallet. Dessa värden simulerades för spannmål på lerjord. Till detta adderades resultat för vall och övriga grödor samt sandjord och det resulterade i en uppskattning av den årliga klimatpåverkan för Sveriges maskinanvändning. För ett konventionellt dieselfall beräknades detta till 536,5 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år. Att övergå till batteritraktorer kunde minska detta med 351-432 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år och en övergång till vätgas med 286-495 miljoner kg CO<sub>2</sub>eq./år. Detta kom främst från två källor, dels att el och vätgas i sig har lägre påverkan än diesel och att den ökade verkningsgraden hos elektriska drivlinor gör att mindre total energi behövs (50-65 % mindre). Den mest klimatvänliga energin är den som aldrig behöver produceras.

Tidslinjen visade på att båda dessa traktorsystem har en del utveckling och ett par steg på TRL-skalan kvar innan en bred implementering i lantbruket är aktuell. Komponenterna i sig är inte okända och det finns mycket välutvecklad teknik för både vätgasfordon och batterielektriska fordon, såväl som ett starkt industriintresse för självkörande fordon i många sektorer. Kombinationerna är dock mindre prevalenta, även om många större traktortillverkare prototypstestar både elektriska drivlinor och självkörande system. Tidslinjen som togs fram uppskattade att teknikerna för närvarande befinner sig i demonstrationsfasen (TRL-nivå 4-6) och är redo för implementering om 12-13 år, beroende på ekonomiska och politiska incitament, marknadskrafter och aktörsintresse.

Den resulterande slutsatsen är att det finns potential att med så mycket som 92 % sänka maskinsystemens klimatpåverkan genom en övergång till elektriskt drivlinor. Detta ger även en större frihet i bränsleproduktion, med möjlighet till både lokal, fossilfri och förnybar sådan. Elektriska drivlinor har även en inneboende potential till lågt klimatavtryck, då en större fraktion fossilfria bränslen i framtidens elmix leder till både fördelar i samhället i stort och hos elektriska fordons klimatavtryck.



## Referenser

- [1] The Swedish Energy Agency. (2020). *ET 2020:1, Energiläget 2020*. [Online] Available: <http://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/>
- [2] A. Baky, M. Sundberg, and N. Brown, "Kartläggning av jordbrukets energianvändning," JTI-Institutet för jordbruks- och miljöteknik, JTI, Uppsala, 2010. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:959931/FULLTEXT01.pdf>
- [3] F. Tubiello *et al.*, "The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990–2012," *Global change biology*, vol. 21, pp. 2655-2660, 2015, doi: 10.1111/gcb.128.
- [4] G. Cooney, T. Hawkins, and J. Marriot, "Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 5, pp. 689-699, 2013, doi: 10.1111/jiec.12024.
- [5] R. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeu-Bettez, and A. H. Strömman, "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 1, 2012, doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.
- [6] European Union. (2018). *No 13/2018, Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. [Online] Available: <https://www.eea.europa.eu>
- [7] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, and K. Tamm, "Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery," *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1184-1205, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/en11051184>.
- [8] O. Pettersson, "Energiförbrukning för batteridrivna kompaklastmaskin," JTI, Uppsala, Contractual report 2015. [Online]. Available: [http://www.jti.se/uploads/jti/URapport\\_JTI\\_batteritraktor\\_4.pdf](http://www.jti.se/uploads/jti/URapport_JTI_batteritraktor_4.pdf)
- [9] Fendt, "MARS: Robot system for planting and accurate documentation," A. GmbH, Ed., ed. <https://www.fendt.com/int/fendt-mars.html>: AGCO GmbH, 2017.
- [10] Fendt, "Fendt e100 Vario: The battery-powered compact tractor," A. GmbH, Ed., ed. <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario.html>, 2017.
- [11] John Deere, "SIMA awards for innovation," ed. <https://www.deere.co.uk/en/our-company/news-and-media/press-releases/2017/feb/sima-awards-for-innovation.html>, 2017.
- [12] John Deere, "Electric tractor powered by cable," ed. <https://www.deere.co.uk/en/our-company/news-and-media/press-releases/2019/february/GridCON.html>, 2019.
- [13] J. Caban, J. Vrabel, B. Sarkan, J. Zarajczyk, and A. Marczuk, "Analysis of the market of electric tractors in agricultural production," (in English), *Innovative Technologies in Engineering Production*, vol. 244, pp. 1-10, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403005>.
- [14] M. Holka, J. Jankowiak, J. F. Bienkowski, and R. Dabrowicz, "Life cycle assessment (LCA) of winter wheat in an intensive crop production system in

- Wielkopolska region (Poland)," *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 14, no. 3, pp. 535-545, 2016, doi: [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1403\\_535545](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1403_535545).
- [15] A.-G. Roer, A. Korsæth, T. M. Henriksen, O. Michelsen, and A. H. Strømman, "The influence of system boundaries on life cycle assessment of grain production in central southeast Norway," *Agricultural systems*, vol. 111, pp. 75-84, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2012.05.007>.
- [16] E. Moberg, M. W. Andersson, S. Säll, P.-A. Hansson, and E. Rööf, "Determining the climate impact of food for use in a climate tax—design of a consistent and transparent model," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, pp. 1715-1728, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01597-8>.
- [17] K. Henryson, T. Kätterer, P. Tidåker, and C. Sundberg, "Soil N<sub>2</sub>O emissions, N leaching and marine eutrophication in life cycle assessment – A comparison of modelling approaches," *Science of The Total Environment*, vol. 725, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138332>.
- [18] World Economic Forum, "Incentivizing Food Systems Transformation," in "Food Systems Initiative," McKinsey & Co, World Economic Forum, 2020-01-17 2020. [Online]. Available: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Incentivizing\\_Food\\_Systems\\_Transformation.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Incentivizing_Food_Systems_Transformation.pdf)
- [19] L. Grimstad and P. J. From, "Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. Pages 4588-4593, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1005>.
- [20] A. Ghobadpour, L. Boulon, H. Mousazadeh, A. S. Malvajerdi, and S. Raiffee, "State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable systems," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 4-13, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.00.
- [21] J. Lowenberg-DeBoer, K. Franklin, K. Behrendt, and R. Godwin, "Economics of autonomous equipment for arable farms," *Precis. Agric.*, vol. 22, pp. 1992-2006, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09822-x>.
- [22] O. Lagnelöv, G. Larsson, D. Nilsson, A. Larsolle, and P.-A. Hansson, "Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation," *Biosystems Engineering*, vol. 194, pp. 121-137, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.017>.
- [23] O. Lagnelöv, G. Larsson, A. Larsolle, and P.-A. Hansson, "Life Cycle Assessment of Autonomous Electric Field Tractors in Swedish Agriculture," *Sustainability*, vol. 13, p. 11285, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su132011285>.
- [24] O. Lagnelöv, S. Dhillon, G. Larsson, D. Nilsson, A. Larsolle, and P.-A. Hansson, "Cost analysis of autonomous battery electric field tractors in agriculture," *Biosystems engineering*, vol. 204, pp. 358-376, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.005>.
- [25] J. Engström and O. Lagnelöv, "An Autonomous Electric Powered Tractor - Simulations of All operations on a Swedish Dairy Farm," *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 182-187, 2018, doi: <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2018.03.006>
- [26] Statistics Sweden, "Agricultural statistics 2018," Agriculture and Energy Statistics Unit, Governmental Report 2018. [Online]. Available: <http://www.jordbruksverket.se/download/18.563019b71642b2ff18eee2a6/1530098111546/Kapitel%204%20Sk%C3%B6rdar.pdf>
- [27] B. Nilsson, "Planering av jordbrukets maskinsystem. Problem, modeller och tillämpningar," vol. Report no. 38, ed. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, 1976.

- [28] Å. Myrbeck, "Swedish Agricultural and Horticultural crops," Swedish Chemicals Agency, Swedish Chemicals Agency, Solna, Sweden, PM1/98, 1998. [Online]. Available: <https://www.kemi.se/publikationer/pm/1998/pm-1-98-swedish-agricultural-and-horticultural-crops>
- [29] B. Witney, *Choosing and Using Farm Machines*. London, England: Longman Scientific & Technical (in English), 1988.
- [30] D. Nilsson, H. Rosenqvist, and S. Bernesson, "Time demand for machine operations in small fields – a simulation study.," Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 2014. [Online]. Available: [https://pub.epsilon.slu.se/11860/11/nilsson\\_et\\_al\\_150206%20.pdf](https://pub.epsilon.slu.se/11860/11/nilsson_et_al_150206%20.pdf)
- [31] *Automatic Transfer Carriages*, St. Louis, MO, USA, PL-1500, 2019. [Online]. Available: <https://solusgrp.com/pdf/PL-1500%20Automatic%20Transfer%20Carriage.pdf>. Accessed: 2020-07-28.
- [32] A. de Toro and P.-A. Hansson, "Analysis of field machinery performance based on daily soil workability status using discrete event simulation or on average workday probability," (in English), *Agricultural Systems*, vol. 79, no. 1, pp. 109-129, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00073-8).
- [33] SMHI. *Meteorological observations*, 2020-03-15. [Online]. Available: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=precipitation24HourSum,stations=all,stationid=78400>
- [34] SMHI. *Meteorological observations: Percipitation*. [Online]. Available: <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=precipitationHourlySum,stations=all>
- [35] *Agricultural Machinery Management Data*, Standard ASAE D497.4, ASAE, ASABE, St. Joseph, MI, USA, 2000.
- [36] K. Reif and K.-H. Dietsche, K. Reif, Ed. *Bosch Automotive Handbook*, 9th ed. Robert Bosch GmbH, Germany: John Wiley & Sons Ltd, 2014, pp. 764-812; 880-892.
- [37] H. Berg, *Batteries for Electric Vehicles*. Cambridge, England: Cambridge University Press (in English), 2015, p. 197.
- [38] T. Keller, M. Sandin, T. Colombi, R. Horn, and D. Or, "Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning," *Soil & tillage research*, vol. 194, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.
- [39] A. R. Graves *et al.*, "The total costs of soil degradation in England and Wales," *Ecological Economics*, vol. 119, pp. 399-413, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>.
- [40] O. Lagnelöv, G. Larsson, A. Larssolle, and P.-A. Hansson, "Electric, autonomous tractors with lower weight leads to better economy and lower environmental impact through reduced soil compaction," Swedish University of Agricultural Science, Journal Article (Under review), 2022.
- [41] *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, Framework ISO, 2006. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [42] M. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, pp. 138-147, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- [43] PRé Sustainability, "SimaPro database manual - Methods library," Version 4.15 ed: PRé Sustainability, 2020.
- [44] R. J. Plevin, M. A. Delucchi, and F. Creutzig, "Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy

- Makers," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 1, pp. 73-83, 2014, doi: 10.1111/jiec.12074.
- [45] T. Ekvall, "Cleaner production tools: LCA and beyond," *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, no. 10, pp. 403-406, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00026-4).
- [46] J. A. Bergerson *et al.*, "Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 1, pp. 11-25, 2020, doi: DOI: 10.1111/jiec.12954.
- [47] S. Wolff, M. Seidenfus, K. Gordon, S. Álvarez, S. Kalt, and M. Lienkamp, "Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production," *Sustainability*, vol. 12, p. 5396, 2020, doi: 10.3390/su12135396.
- [48] T. Nemecek and T. Kägi, "Life cycle inventories of agricultural production systems," Swiss Centre of Life Cycle Inventories, 2007, vol. ecoinvent report no. 15.
- [49] T. Le Varlet, O. Schmidt, A. Gambhir, S. Few, and I. Staffel, "Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101230>.
- [50] A. Nordelöf, E. Grunditz, A.-M. Tillman, T. Thiringer, and M. Alatalo, "A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine - Technical and Methodological Description, version 1.01," SPINE database, 2017. [Online]. Available: [http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/LCI\\_model\\_report\\_PMSM\\_v1.01.pdf](http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/LCI_model_report_PMSM_v1.01.pdf)
- [51] A. Lucas, C. A. Silva, and R. C. Neto, "Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles," *Energy Policy*, vol. 41, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.015.
- [52] Toyota Material Handling, "Pedestrian lowlifter truck 1,8-2,5 ton," vol. Version 7, ed: Toyota Material Handling, 2020, pp. 1-4.
- [53] N. Jungbluth, "Erdöl," Swiss centre for life cycle inventories, Duebendorf, CH, 2007, vol. Ecoinvent report No. 6-IV.
- [54] R. Itten, R. Frischknecht, and M. Stucki, "Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid," Paul Scherrer Institut, 2014.
- [55] Swedish Environmental Protection Agency, "National Inventory Report Sweden 2020," in "National inventory reports (NIR)," Swedish Environmental Protection Agency, UNFCCC, 2020-04-14 2020, vol. Sweden, 2020. [Online]. Available: <https://unfccc.int/documents/224123>
- [56] ASABE, "Agricultural Machinery Management Data," American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA, 2011, vol. ASAE D497.7 MAR2011 (R2020). [Online]. Available: <https://elibrary.asabe.org/pdfviewer.aspx?GUID=C362B1DC-CB58-4510-B728-009AA5D96818>
- [57] P. v. Loon, L. Olsson, and P. Klintbom, "LCA guidelines for electric vehicles," Research Institute of Sweden, Report 2018. [Online]. Available: <https://www.ri.se/sites/default/files/2019-06/Bilaga%20%2C%20LCA%20Guidelines%20for%20electric%20vehicles.pdf>
- [58] A. D. Duce *et al.*, "Guidelines for the LCA of electric vehicles," 285571, 2013. [Online]. Available: [http://www.elcar-project.eu/fileadmin/dokumente/Guideline\\_versions/eLCAR\\_guidelines.pdf](http://www.elcar-project.eu/fileadmin/dokumente/Guideline_versions/eLCAR_guidelines.pdf)
- [59] J. M. P. Serrano, José O. , J. M. da Silva, A. Pinheiro, and M. Carvalho, "Tractor Energy Requirement in Disc Harrow Systems," *Biosystems Engineering*, vol. 98,

- no. 3, pp. 286-296, 2007, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.08.002>.
- [60] L. Iannuzzi, J. A. Hilbert, and E. E. S. Lora, "Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29694-29705, 2021, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.065>.
- [61] E. Cetinkaya, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Life cycle assessment of various hydrogen production methods," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2071-2080, 2012, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.064>.
- [62] R. Hischer *et al.*, "Documentation of changes implemented in ecoinvent data v2.1," ecoinvent, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009.
- [63] National Institute for Public Health and the Environment, "ReCiPe 2016 v1.1 - Report I: Characterization," Ministry of Health, Welfare and Sport, RIVM, P.O. Box 1 | 3720 BA Bilthoven, The Netherlands, 2016, vol. V1.1.
- [64] European Commission. "Why using TRLs?" European Commission.  
<https://cdn1.euraxess.org/career-development/researchers/manual-scientific-entrepreneurship/major-steps/trl> (accessed 2022-08-22, 2022).
- [65] (2021). *JO1901, Jordbruksstatistisk sammanställning 2021*. [Online] Available:  
<https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2021-08-16-jordbruksstatistisk---sammanstallning-2021>
- [66] Swedish Board of Agriculture. (2019). *Jordbruksstatistisk sammanställning 2019*. [Online] Available:  
<https://jordbruksverket.se/download/18.5b7c91b9172c01731757d898/1592479793521/2019.pdf>
- [67] R. Paulsson, F. Djodjic, C. C. Ross, and K. Hjerpe, "Nationell Jordartskartering," The Swedish Board of Agriculture, 2015. [Online]. Available:  
[https://www2.jordbruksverket.se/download/18.4288f19214fb7ec78849af18/1441973777932/ra15\\_19.pdf](https://www2.jordbruksverket.se/download/18.4288f19214fb7ec78849af18/1441973777932/ra15_19.pdf)
- [68] S. A. Shahid, M. Zaman, and L. Heng, "Salinity and Sodicity Adaptation and Mitigation Options," in *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*: Springer, Cham, 2018, pp. 55-89.
- [69] A. Källmén, S. Andersson, and T. Rydberg, "Well-to-wheel LCI data for HVO fuels on the Swedish market," f3 - The Swedish knowledge centre for renewable transportation fuels, 2019. [Online]. Available:  
<https://f3centre.se/sv/forskningsprojekt/well-to-wheel-livscykeldata-for-hvo-branslen-pa-den-svenska-marknaden/>
- [70] S. Soam and K. Hillman, "Factors influencing the environmental sustainability and growth of hydrotreated vegetable oil (HVO) in Sweden," *Bioresource Technology Reports*, vol. 7, p. 100244, 2019, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100244>.
- [71] Z. Mileusnić, M. Tanasijević, R. Miodragović, A. Dimitrijević, and M. Urošević, "Tractor Lifetime Assessment Analysis," *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 197-204, 2019, doi: 10.15832/ankutbd.403823.
- [72] Maskinkalkylgruppen, "Maskinkostnader 2020," Hushållningssällskapet, Maskinkonsulterna, Ludvig & co, Maskinkalkylgruppen, Agricultural economic catalogue 2020, vol. 2020. [Online]. Available: <http://maskinkostnader.se/>
- [73] Ministry of the Environment. (2013). *SOU 2013:84, Fossilfrihet på väg*.
- [74] Naturvårdsverket. "Inrikes transporter, utsläpp av växthusgaser." Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/data-och->

[statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/#:~:text=Stor%20utsl%C3%A4ppsminskning%20fr%C3%A5n%20personbilar%20under,9%2C4%20miljoner%20ton%202021.](#) (accessed 2022-08-31, 2022).



