



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 18028

Examensarbete 30 hp
Juni 2018

Simulering av system för laddning av eldrivna autonoma jordbruksfordon

Ana de Afonseca

REFERAT

Simulering av system för laddning av eldrivna autonoma jordbruksfordon

Ana de Afonseca

Detta examensarbete bestod av en fallstudie som undersökte den mest lämpliga utformningen av laddinfrastrukturen för eldrivna autonoma jordbruksfordon, i syfte att öka produktivitet och minska investerings- och elkostnader samt elförbrukning. Som metod skapades kömodeller i MATLAB-programmet Simulink där två eller tre jordbruksfordon utförde fältarbete på en spannmålsgård i södra Sverige som odlade havre. En laddnings-/bytesstation kunde användas, olika antal batterier fanns tillgängliga vid bytesstationen och laddningsstrategi kunde bytas från att fordonen åker och laddar då batterinivån når en viss gräns till att laddningsstationen skickar en signal när den är ledig.

De aspekter som undersöktes för de olika utformningarna var elförbrukning, investerings- och elkostnader, antal laddningscykler samt icke-produktiv tid. Den icke-produktiva tiden var den tid fordonen spenderade på att åka till och från station, i kö, samt vid station. Den valda uppbyggnaden av modellerna var ej kompatibel med Simulink då två laddningsstationer skulle simuleras. Det var därför ej möjligt att utvärdera den icke-produktiva tiden för modellen med två laddningsstationer.

Resultatet visade att den icke-produktiva tiden blev betydligt kortare då högre laddningseffekt användes för en laddningsstation. Investeringskostnaderna ökade markant då högre laddningseffekt och en laddningsstation användes, men inte lika mycket som då två laddningsstationer med högre laddningseffekt användes. Att byta laddningsstrategi gav ingen nämnvärd påverkan på icke-produktiv tid per fordon. Dessutom är det svårt att säga hur den alternativa strategin, strategi 2, går att tillämpa i praktiken då det kan krävas en mer avancerad teknik hos laddningsstationerna.

Vid användning av en bytesstation hade varken antal batterier eller antal fordon någon nämnvärd påverkan på den icke-produktiva tiden. Valet av batterilagringsskapacitet hade en stor påverkan på antalet laddningscykler per år. Elförbrukningen och elkostnaderna påverkades mer av avståndet mellan fält och station för laddningsstationsmodellerna än av en ökad batterilagringsskapacitet. För bytesstationsmodellerna påverkade batterilagringsskapaciteten främst på grund av att fler batterier används vilket skiftar påverkan från avståndet till batterilagringsskapaciteten.

Resultatet i detta examensarbete ger indikationer på vilka faktorer som bidrar till en mer fördelaktig utformning av laddinfrastrukturen. Vid användning av laddningsstationer var dessa faktorer högre laddningseffekt, högre batterilagringsskapacitet samt kortare avstånd mellan fält och station. Vid användning av bytesstation var det främst en högre batterikapacitet. För bedömning av lämpligt antal stationer, antal fordon, samt strategi behöver ytterligare studier utföras med en högre detaljeringsgrad samt större variationer av modellparametrarna. Hur olika strategier kan tillämpas i praktiken behöver vidare undersökas, gärna i kombination med fälttester. Även eventuella begränsningar i hur systemen kan utformas behöver undersökas genom simulering av flera olika exempelgårdar.

Nyckelord: Jordbruk, autonoma fordon, eldrivna fordon, energiförbrukning, kostnader

Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet

Lennart Hjelm's väg 9, Box 7032, 750 07 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.

ABSTRACT

Simulation of charging systems for electric autonomous agricultural vehicles

Ana de Afonseca

This MSc project consisted of a case study that investigated how the charging infrastructure for electric autonomous agricultural vehicles should be designed in order to increase productivity, and reduce investment costs, electricity costs and electric consumption. Queue models were created in Simulink in MATLAB where two or three vehicles could be utilized on a farm in southern Sweden that produced oats. A charging-/swapping station could be used and different number of batteries were available at the swapping station. Two charging strategies could be used; the vehicles charge their batteries when the battery level is too low or the charging station sends a signal when it is available for charging. Aspects that were evaluated were the electricity consumption, investment and electricity costs, number of charging cycles and the non-productive time. The non-productive time was the time a vehicle spent driving to and from the charging station, in queue waiting to charge and at the charging station. The model was not compatible with Simulink when two charging stations were simulated, the non-productive time could therefore not be evaluated.

The non-productive time was considerably shorter when a higher charging power was used for one charging station. The higher charging power also resulted in a considerable increase for the investment costs, and even more so when two charging stations were used. The usage of different charging strategies had little effect on the non-productive time. Moreover the application of an alternative strategy could require more advanced technology in the charging stations.

Neither the number of vehicles nor the number of batteries had any higher effect on the non-productive time when a battery swapping station was used. A higher battery storage capacity led to a longer battery life and to higher investment costs. The electricity consumption and electricity costs were mostly affected by the distance between station and agricultural field when charging stations were used. The battery storage capacity affected the most when battery swapping stations were used due to the higher number of batteries used.

The results from this MSc project gives indications on which factors contribute to a more favourable design of the charging infrastructure. These factors were higher charging power, higher battery storage capacity, and shorter distance between field and station, if charging stations are to be used; If a battery swapping station is to be used, solely a higher battery capacity. More studies with greater model detail, and greater model parameter variations, are required for evaluation of suitable number of stations, number of vehicles, and charging strategy. The application of different charging strategies needs to be further evaluated with more complex strategies in combination with field tests. It is also relevant to examine different types of farms in order to detect possible limitations in how the charging infrastructure can be designed.

Key word: Agriculture, autonomous vehicles, electric vehicles, electricity consumption, costs

*Department of energy and technology, Swedish university of agricultural sciences
Lennart Hjelms väg 9, Box 7032, SE-750 07 Uppsala, Sweden. ISSN 1401-5765*

FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och avslutar studier inom civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik på Uppsala Universitet och Sveriges lantbruksuniversitet.Handledare var Gunnar Larsson och ämnesgranskare var Daniel Nilsson, båda vid institutionen för energi och teknik, SLU.

Examensarbetet utfördes inom projektet ”Eldrivna autonoma arbetsmaskiner inom lantbruket – effekter av teknikval och systemutformning” med projektnummer P44831-1. Detta projekt finansieras av Energimyndigheten.

Jag vill rikta ett stort tack till Gunnar för genomgående hjälp och stöd under arbetets gång och till Daniel för värdefulla synpunkter som har höjt nivån på arbetet. Jag vill även tacka Oscar Lagnelöv och Martin Ericson som har arbetat inom samma projekt för hjälp med datainsamling.

*Ana de Afonseca
Uppsala, maj 2018*

Copyright © Ana de Afonseca och institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet.

UPTEC W 18 028, ISSN 1401-5765.

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2018.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Autonoma eldrivna jordbruksfordon kan användas inom jordbruket för att minska växthusgasutsläpp. Jordbruksarbetet kan även effektiviseras då de autonoma jordbruksfordonen inte kräver en förare och därmed exempelvis kan utföra arbete under natten.

Att införskaffa autonoma eldrivna fordon innebär kostnader samt att elförbrukningen blir förändrad för det fältarbete som ska utföras, i jämförelse med traditionella jordbruksfordon. Det är viktigt att minimera kostnader såsom inköpskostnader och elförbrukningskostnader, samt att minimera den elanvändning som uppstår då fordonen ska försörjas med el.

Denna fallstudie undersökte hur laddinfrastrukturen kan utformas för en jordbruksgård som använder eldrivna autonoma jordbruksfordon. Syftet var att öka produktiviteten och att minska investerings- och elkostnader samt onödig elförbrukning som kan uppstå om laddinfrastrukturen inte planeras ordentligt utefter de behov som finns.

För att undersöka hur laddinfrastrukturen kan utformas skapades kömodeller i MATLAB-programmet Simulink. Modellerna simulerade hur köbildningen ser ut när två eller tre jordbruksfordon utför fältarbete då en laddnings-/bytesstation används. Olika antal batterier fanns tillgängliga vid bytesstationen och ett byte av laddningsstrategi kunde ske från att fordonen åker och laddar då batterinivån når en viss gräns till att laddningsstationen skickar en signal när den är ledig, i syfte att förkorta kötiden.

De aspekter som undersöktes för de olika utformningarna var elförbrukning, investerings- och elkostnader, antal laddningscykler och icke-produktiv tid. Den icke-produktiva tiden var den tid fordonen spenderade på att åka till och från station, i kö, samt vid station för att laddas.

På grund av problem i modellen kunde ej två laddningsstationer simuleras korrekt och det blev felaktiga värden för den icke-produktiva tiden. Därmed var det endast möjligt att utvärdera kostnaderna som uppstod då två laddningsstationer användes samt den totala energiförbrukningen.

Resultatet visade att den icke-produktiva tiden per fordon blev betydligt kortare då högre laddningseffekt användes för en laddningsstation, då en högre laddningseffekt innebär att fordonen kunde laddas snabbare. Investeringskostnaderna ökade markant då högre laddningseffekt och en laddningsstation användes, men inte lika mycket som då två laddningsstationer med högre laddningseffekt användes. Det är därmed lämpligare att använda färre laddningsstationer med en högre laddningseffekt som kan ladda fordonen under en kortare tid.

Att byta laddningsstrategi gav ingen nämnvärd påverkan på den icke-produktiva tiden per fordon. Dessutom är det svårt att säga hur den alternativa strategin, strategi 2, går att tillämpa i praktiken då det kan krävas en mer avancerad teknik hos laddningsstationerna. Strategi 2 fokuserade på att korta ner kötiden för fordonen, det hade därmed varit av värde att undersöka en strategi som även försöker korta ned tiden fordonen spenderar på att köra mellan fält och station. En sådan strategi kan eventuellt vara en som tar hänsyn till var fordonet befinner sig på fältet då det behöver ladda.

Vid användning av en bytesstation hade varken antal batterier eller antal fordon någon nämnvärd påverkan på den icke-produktiva tiden. Valet av batterilagringskapacitet, det

vill säga hur länge ett fordon kan utföra fältarbete innan det behöver laddas, hade en stor påverkan på antalet laddningscykler per år. Antal laddningscykler för ett batteri säger hur många gånger ett batteri kan laddas och urladdas innan det behöver bytas ut, och är därmed livslängden på batteriet. En högre batterilagringskapacitet bidrog även till högre investeringskostnader varpå det är lämpligare att välja färre fordon med en högre batterilagringskapacitet för att kunna erhålla en högre produktivitet men hålla nere investeringskostnaderna.

Elförbrukningen och elkostnaderna påverkades mer av ett ökat avstånd mellan fält och station för laddningsstationsmodellerna än av lagringskapaciteten i batterierna. För bytesstationsmodellerna påverkade batterilagringskapaciteten främst på grund av att fler batterier används vilket skiftar påverkan från avståndet till batterilagringskapaciteten.

Resultatet i detta examensarbete ger indikationer på vilka faktorer som bidrar till en mer fördelaktig utformning av laddinfrastruktur för autonoma eldrivna jordbruksfordon. Vid användning av laddningsstationer var dessa faktorer högre laddningseffekt, högre batterilagringskapacitet samt kortare avstånd mellan fält och station. Vid användning av bytesstation var det främst en högre batterilagringskapacitet.

För bedömning av lämpligt antal stationer, antal fordon, samt strategi behöver ytterligare studier utföras med en högre detaljeringsgrad samt större variationer av modellparametrarna. Hur olika strategier kan tillämpas i praktiken behöver vidare undersökas, gärna i kombination med fälttester. Det är även relevant att undersöka eventuella begränsningar i hur systemen utformas genom att simulera flera olika exempelgårdar.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 TIDIGARE STUDIER	2
1.3 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	3
1.4 AVGRÄNSNINGAR	4
2 TEORI	4
2.1. SVENSKA SPANNMÅLSJORDBRUK	4
2.2 AUTONOMA JORDBRUKSFORDON	4
2.3 BATTERIER	6
2.4 LADDNINGS- OCH BYTESSTATIONER	7
2.5 SIMULINK	8
3 METOD	9
3.1 MODELLPARAMETRAR FÖR EXEMPELGÅRD	9
3.1.1 Tidsperioder för spannmålsodlingen i modellen	9
3.1.2 Kostnader för exempelgård	10
3.2 MODELLPARAMETRAR FÖR AUTONOMA JORDBRUKSFORDON	11
3.2.1 Energi och tidsåtgång	11
3.2.2 Investeringskostnader för autonoma jordbruksfordon	14
3.3 MODELLPARAMETRAR FÖR BATTERI	15
3.3.1 Energiåtgång, tidsåtgång och kostnad	15
3.4 MODELLPARAMETRAR FÖR LADDNINGS- OCH BYTESSTATIONER	16
3.4.1 Energi och tid	16
3.4.2 Kostnader laddnings- och bytestationer	16
3.5 KÖSIMULERINGSMODELLER	17
3.5.1 Uppbyggnad av kösimuleringsmodeller	17
3.5.2 Utdata från kösimuleringsmodeller	21
3.5.3 Begränsningar i modellen	21
4 RESULTAT	22
4.1 ÖVERBLICK AV SIMULERINGSMODELLERNA	22
4.2 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA ANTAL STATIONER	27
4.3 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA STRATEGIER	29
4.4 BYTESSTATIONER: OLIKA ANTAL BATTERIER	30
4.5 ÖVRIGA RESULTAT	34
5 DISKUSSION	38
5.1 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA ANTAL STATIONER	38

5.2 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA STRATEGIER	39
5.3 BYTESSTATIONER: OLIKA ANTAL BATTERIER	39
5.4 ÖVRIGA RESULTAT	40
5.4.1 Modelldiskussion	41
5.5. SAMMANSTÄLLNING AV DISKUSSION	41
6 SLUTSATS	43
7 REFERENSER	45
7.1 PUBLICERADE REFERENSER	45
7.2 WEBBASERADE REFERENSER	47
APPENDIX A: TABELLER	49
APPENDIX B: FIGURER	54
APPENDIX C: MATLAB-KOD	56

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Klimatproblematiken som har vuxit fram sedan industrialiseringen gör att nya tekniker måste utvecklas för att minska växthusgasutsläppen. Inom jordbruket kan autonoma eldrivna jordbruksfordon minska dessa utsläpp när de används istället för jordbruksfordon som drivs på bensin eller diesel.

Det finns flera fördelar med ett eldrivet autonomt jordbruksfordon. En simuleringsstudie visade att det kan vara ekonomiskt samt energimässigt fördelaktigt att välja det autonoma, eldrivna alternativet framför ett jordbruksfordon som drivs på diesel när användningsfasen inkluderas i undersökningen. En dieseltraktor kan bytas ut mot två autonoma eldrivna maskiner av mindre storlek till en lägre kostnad och lägre energianvändning. Utbytet leder även till lägre emissioner av växthusgaser (Engström & Langelöv 2017).

Ännu en fördel är att jordbruksarbetet kan effektiviseras då det inte finns samma tidsbegränsningar som med en förare och jordbruksarbetet kan utföras under natten. Att det inte finns samma tidsbegränsning som med en förare leder till att de autonoma eldrivna jordbruksfordonen kan ladda oftare. Detta medför att mindre batterier av lägre kapacitet kan användas. Effektivisering leder även till lägre lönekostnader, dessutom kan mindre fordon användas vilket leder till minskad markpackning tack vare den lägre vikten hos de mindre fordonen (Pedersen et al. 2006).

Det finns även negativa aspekter som tillkommer då autonoma eldrivna jordbruksfordon används istället för traditionella jordbruksfordon. En aspekt är att autonoma eldrivna jordbruksfordon har en högre inköpskostnad då den teknik som krävs, till exempel batterierna, är dyra att tillverka (Faria et al. 2012). Sedan är produktionen av elkomponenterna en energiintensiv process som leder till negativ miljöpåverkan, främst från råvaruutvinningen (Notter et al. 2010; Bauer et al. 2015).

En annan negativ aspekt är att en tränad traktorförare kan ta hänsyn till variabler som autonoma jordbruksfordon ej klarar av att analysera med dagens teknik. Föraren kan till exempel ta hänsyn till markens egenskaper för att erhålla en så effektiv körning som möjligt, vilket ett autonomt jordbruksfordon i vissa fall ej klara av att utföra lika väl på egen hand.

De arbetsuppgifter som kan utföras av autonoma jordbruksfordon inom jordbruket med högre eller lägre precision är bland annat skörd, plantering, ogrärensning och skadedjursbekämpning beroende på vad som efterfrågas, tack vare inbyggd teknik som GPS- och bildbehandlingssystem (Billingsley et al. 2008; Yaghoubi et al. 2013).

För att tillföra el till de eldrivna jordbruksfordonen finns det främst två alternativ: att batteripaket laddas i laddningsstationer eller att batteripaket byts ut i bytesstationer. Det finns även projekt som syftar till att utveckla eldrivna traktorer som är direktkopplade till elnätet via kabel (Larsson 2018). Kostnaden och effektiviteten hos respektive laddningssystem beror av ett antal olika faktorer. Exempelvis påverkar antalet battericykler i en station hur stor den optimala energilagringskapaciteten är som leder till lägst kostnader vid användning av bytesstationer (Lombardi et al. 2010). Andra faktorer som påverkar är var batteriet laddas eller byts ut, hur många laddnings- och bytesstationer som finns på gården, fältstorlek och elpris. Även vilka energikällor elen kommer ifrån, elmix, påverkar.

Då ett jordbruk investerar i autonoma eldrivna jordbruksfordon är det viktigt att minska kostnader, såsom inköpskostnader och elkostnader, samt att minska energianvändning när fordonen ska försörjas med el. För att göra detta måste en lämplig elinfrastruktur utformas för att så långt som möjligt säkerställa att den energi som erhålls utnyttjas effektivt. Det behöver undersökas hur egenskaper på en gård, såsom energiåtgång, påverkar antalet laddnings- eller bytesstationer samt var de ska vara lokaliserade. En strategi behöver därför utformas för effektivt användande av stationerna och fordonen.

1.2 TIDIGARE STUDIER

Det finns flertalet studier som undersöker olika aspekter av laddinfrastruktur för autonoma fordon, men de berör främst fordon som ska användas i biltrafiken. De studier som listas i detta avsnitt behandlar hur en lämplig utveckling av laddnings- och/eller bytesstationer kan ske för privatbilismen i städer.

He et al. (2013) undersökte hur valet av laddningsstation skiljer sig för förare av elhybridfordon som utgår från samma startposition. En matematisk modell skapades som tog hänsyn till förarens planerade körtid, vilka laddningsstationer som kunde väljas utifrån en startposition, kostnaden för att ladda ett eldrivet fordon samt det aktuella elpriset. Elnätet och elpriset varierade lokalt beroende på utbud och efterfrågan. Den matematiska modellen räknade fram en jämvikt av de nämnda aspekterna som visade på hur många förare som åker till respektive möjlig laddningsstation. Modellen användes sedan för att på en makroskopisk nivå bestämma hur många laddningsstationer ett storstadsområde bör ha. Resultatet visade på att elnätet och elpriset påverkades av vilket laddningsbehov fordonen hade så vid planering av laddningsstationsplacering är det viktigt att ta hänsyn till hur stort laddningsbehovet kommer att vara (He et al. 2013).

I en studie av Nie och Ghamami (2013) jämfördes nyttan av att använda en högre energikapacitet i batterier, i kilowattimmar, mot en högre laddningsstationseffekt, i kilowatt. Den matematiska modellen som skapades beräknade hur stor energikapacitet och laddningsstationseffekt som krävs för att minska de sociala kostnaderna samtidigt som en viss nivå av service erhålls från laddningsstationerna. Det resultat som erhöles visade på att det finns fler fördelar med att sänka batteriproduktionskostnaderna och använda en lägre energikapacitet än att utveckla batterierna för en ökad energikapacitet.

Det är därmed mer gynnsamt att använda batterier med lägre energikapacitet och öka laddningsstationseffekten. Resultatet visade även att det högsta antalet laddningsstationer som krävs, och därmed den lägsta energikapaciteten i batterierna, bestäms av den servicenivå som önskas samt hur snabbt ett batteribyte kan utföras. Modellens resultat gav att en högre energikapacitet i batterier krävs då en laddningsstation används istället för en batteribytesstation, däremot går det ej att avgöra vilken metod som är att föredra för att minska de totala kostnaderna (Nie & Ghamami 2013).

För att hitta den mest lämpliga strategin för placering samt storlek av laddningsstationer för eldrivna bilar, undersökte Sadeghi-Barzani et al. (2014) hur den totala kostnaden kan minimeras. Några aspekter som ingick i studien var markkostnader, kostnader för att bygga laddningsstationer, elkostnader och förlust av el från fordonen vid körning till laddningsstation. Resultatet visade att den totala kostnaden till största del bestod av elförlusten från fordonen samt kostnaden av att bygga laddningsstationer (Sadeghi-Barzani et al. 2014).

Avsaknaden av studier som undersöker hur laddinfrastrukturen kan utformas för jordbruk visar på att detta är ett kunskapsområde som behöver studeras.

1.3 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

I denna fallstudie undersöktes den mest lämpliga utformningen av laddinfrastrukturen för autonoma eldrivna jordbruksfordon på en simulerad exempelgård med syftet att öka produktiviteten i systemet och minska investerings- och elkostnader samt elförbrukning. Exempelgården antas vara representativ för typiska jordbruksgårdar i södra Sverige och olika utformningar av laddningsstationer samt bytesstationer utvärderades för exempelgården.

Följande huvudfrågeställningar ska besvaras i projektet:

- Under vilka förutsättningar, med avseende på energibehov och kostnader, är det relevant att bygga en extra laddningsstation?
- Är det en bättre strategi att fordonen åker och laddar när laddningsstationen är ledig, jämfört med när batteriets energinivå blir för låg, i syfte att minska icke-produktiv tid samt att laddningsstationerna och fordonen utnyttjas effektivt?
- Hur många batterier (av en viss storlek) ska finnas tillgängliga på bytesstationen?

För att besvara frågeställningarna skapades dynamiska kösimuleringsmodeller i MATLAB-programmet Simulink.

Som upplägg för resterande avsnitt i denna rapport beskriver avsnitt 2 den generella teorin kring huvudämnesområdena i denna studie. Avsnitt 3 beskriver den metod som använts och avsnitt 4 redovisar resultatet. Resultatet diskuteras i avsnitt 5 och avsnitt 6 tar upp slutsatser samt förslag på framtida studier.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

De avgränsningar som sattes för denna studie redovisas nedan.

- Gården var en spannmålgård i södra Sverige med normala jordförhållanden.
- Spannmålgården hade en areal på 200 ha (i ett enda sammanhållet skifte).
- De autonoma eldrivna jordbruksfordonens motorkapacitet var 50 kW.
- Elpriset var konstant för simuleringsperioden (en odlingssäsong).
- Endast investeringskostnaderna för jordbruksfordonen samt dess komponenter inkluderades.

2 TEORI

Generella beskrivningar av de olika huvudämnesområdena som ingår i denna studie redovisas i detta avsnitt.

2.1. SVENSKA SPANNMÅLSJORDBRUK

Förhållandena för hur gynnsamt det är att odla skiljer sig mellan norra och södra Sverige. Växtperioden för en odling i Skåne kan vara 100 dygn längre än växtperioden för en odling i Norrbotten och kommer därmed att börja tidigare under året (Jordbruksverket uå).

De grödor som främst odlas i Sverige är spannmål och vall. Spannmål består av gräsarter med ätliga frön och Sveriges spannmålsodling utgörs främst av råg, vete, korn och havre. Vall består av gräs och klöver som odlas för att bli foder till betesdjur. Spannmål och vall odlas på 85–90 % av de svenska åkrarna och resterande 10–15 % av åkrarna utnyttjas av övriga grödor såsom potatis, grönsaker, oljeväxter, ärtor och sockerbeter (Einarsson 2015).

Spannmålsodlingar finns i hela Sverige men de är främst belägna i Skånes län, Västra Götalands län, Östergötlands län samt Uppsalas län, där de utgör 60 % av den totala odlingsarealen för spannmål. Det län som odlar mest spannmål totalt sett är Skånes län. Skånes län odlar mest vete, råg och korn, däremot odlas mest havre och rågvete i Västra Götalands län (Eklöf 2014).

2.2 AUTONOMA JORDBRUKSFORDON

Marknaden för autonoma jordbruksfordon är relativt ny. Flera klassiska traktorföretag samt forskningsgrupper utvecklar egna modeller av autonoma jordbruksfordon med olika egenskaper.

Exempel på autonoma jordbruksfordon som snart finns ute på marknaden är robot-serien Thorvald (Saga Robotics 2018a; Saga Robotics 2018b). Serien består av tre modeller, en större som kan användas på åkrar, en mindre som kan användas inomhus i växthus och en som kan användas i forskningssyfte. Samtliga modeller är mindre än traditionella jordbruksfordon och bidrar inte nämnvärt till markpackning. Beroende på vilken precision som önskas kan upp till fyrhjulsdrift tillämpas och beroende på vilken kraft som krävs av roboten kan upp till fyrhjulsstyrning tillämpas. De uppgifter som kan utföras av robot-serien är bland annat ogräsrensning, UV-behandling mot mögel och övervakning av stress hos växter (Saga Robotics 2018a; Saga Robotics 2018b).

Ett annat exempel på autonoma jordbruksfordon är DOT som kan utföra flertalet uppgifter inom jordbruk, gruvsdrift och byggarbete (DOT - Autonomous Farm Technology 2018). Fordonet uppdateras kontinuerligt med data om den omgivande miljön och är även utrustat med sensorer för att erhålla information på kort avstånd samt på långt avstånd. Fordonet kan använda informationen som det erhåller från omgivningen för att ta egna beslut och i de fall då fordonet ej vet hur det ska agera skickas en varning till jordbrukaren. För att starta DOT krävs det att jordbrukaren har skapat och godkänt en planerad körväg för de fält som ska brukas (DOT - Autonomous Farm Technology 2018).

Företaget Fendt som tillverkar jordbruksmaskiner har ett EU-finansierat forskningsprojekt vid namn Xaver där de utvecklar autonoma produktionssystem (Fendt 2018). Systemet består av flera eldrivna små fordon och ett större eldrivet fordon som sköter transport, laddning av batterier och precisionsnavigering av de mindre fordonen. De mindre fordonen är de som utför fältarbete. De navigeras med hjälp av satelliter och kommunicerar med det större fordonet via en molntjänst. Vid plantering av frön behöver jordbrukaren planera sådden och hantera logistiken för hur de mindre fordonen ska transporteras, vilket kan göras via en app. De mindre fordonen kan hantera data från individuella plantor samtidigt som de tar hänsyn till ekonomiska, ekologiska och tekniska faktorer, vilket medför att de kan utföra fältoperationer med stor precision (Fendt 2018).

Greenbot är ett autonomt jordbruksfordon som kan utföra fältoperationer för odlingar såsom fruktodlingar och trädgårdsodlingar samt för jordbruk (Precision Makers 2018). Fordonet finns i två olika bredder och är fyrhjulsstyrd för lättare manövrering av fordonet. Fordonet kan bland annat klippa gräs, så och plöja helt autonomt, och för vissa uppgifter kan fordonet även planera sin rutt. Då fordonet stöter på hinder som det ej känner igen slutar den utföra fältarbete och informerar jordbrukaren (Precision Makers 2018).

2.3 BATTERIER

Det finns olika typer av batterier som är lämpliga för att användas i eldrivna fordon. Några exempel på batterier som används av fordonsindustrin är blyackumulatorm, nickel-kadmiumackumulatorm, nickel-metallhydridackumulatorm och litiumjonbatteriet (Manzetti & Mariasiu 2015).

Blyackumulatorm, som även kallas blybatteriet, är den äldsta batterivarianten som används internationellt idag. Tillverkningsprocessen är billig och blybatteriets effekt per viktenhet är inte alltför låg jämfört med andra batterier. Detta gör att blybatteriet kan vara en billig lösning vid val av batteri till eldrivna bilar, i den mån dess sämre egenskaper inte hindrar användning av blybatteriet. Nackdelar med blybatteriet är exempelvis riskerna kopplade till hantering av sura lösningar, att bly finns i konstruktionen och att batteriet har en låg energikapacitet per volym- och viktenhet (Manzetti & Mariasiu 2015).

Nickel-kadmiumackumulatorm har en lång livslängd då batteriet har ett högt antal laddningscykler och därmed kan laddas samt urladdas fler gånger än vissa andra batterier. Den största nackdelen med nickel-kadmiumackumulatorm är att batteriet använder sig av tungmetallen kadmium som har en negativ påverkan på miljön (Manzetti & Mariasiu 2015).

Nickel-metallhydridackumulatorm har liknande uppbyggnad och tillverkningsprocess som nickel-kadmiumackumulatorm. Den stora fördelen med nickel-metallhydridackumulatorm är att den maximala energikapaciteten inte gradvis sänks på grund av att batteriet laddas vid tillfällen när det inte har urladdats tillräckligt. Däremot har nickel-metallhydridackumulatorm en lägre energikapacitet jämfört med exempelvis litiumjonbatterier (Manzetti & Mariasiu 2015).

Litiumjonbatterier har en hög effektkapacitet samt en hög energikapacitet per vikt. Nackdelar med batteriet är att det har en hög kostnad, att det finns risk för överhettning samt att batteriet har en begränsad livslängd då det har ett lägre antal laddningscykler (runt 1000) (Manzetti & Mariasiu 2015).

En sammanställning av de olika batterityperna redovisas i tabell 1.

Tabell 1 Den specifika energin, effekten per vikt samt antalet laddningscykler för respektive batterityp (Manzetti & Mariasiu 2015).

Batterityp	Specifik energi [Wh/kg]	Effekt per vikt [W/kg]	Antal laddningscykler
Blyackumulator	40	180	500
Nickel-kadmiumackumulator	60	150	1350
Nickel-metallhydridackumulator	70	1000	1350
Litiumjonbatteri	125	1800	1000

2.4 LADDNINGS- OCH BYTESSTATIONER

De laddningsstationstyper som finns idag är för normal laddning, halvsnabb laddning och snabbbladdning (Sbordone et al. 2015).

Laddningseffekten överstiger aldrig 3,7 kW vid normal laddning. Den är lämpad för laddning över en längre tid, såsom under natten, och kan användas av privatpersoner samt på långtidsparkeringar för eldrivna fordon (Sbordone et al. 2015; Svensk energi 2015).

Laddningseffekten vid halvsnabb laddning är mellan 3,7 kW och 22 kW. Denna typ av laddning är lämplig då laddningen behöver ske under en kortare tid. Den är även lämplig att använda för att undvika effektoppar i elnätet då det lättare går att styra när det eldrivna fordonet ska laddas vid kortare laddningstider. Halvsnabb laddning kan användas av privatpersoner samt vid publika laddningsstationer (Sbordone et al. 2015; Svensk energi 2015).

Laddningseffekten vid snabbbladdning överstiger 22 kW. Vid snabbbladdning ska tiden det tar för det eldrivna fordonet att ladda vara minimal och denna typ av laddningsstation används främst vid publika laddningsstationer (Sbordone et al. 2015; Svensk energi 2015).

Bytesstationer finns, och utvecklas, i mindre omfattning än laddningsstationer. Tre företag som håller på, alternativt har försökt, att utveckla bytesstationer är Tesla, Better place samt svenska företaget Powerswap (Ladda elbilen 2013; Gunther 2013; Söderholm 2017; Nohrstedt 2017).

Teslas batteribytesprojekt gick ut på att lyfta upp fordonen för att underlätta åtkomsten till batteriet (Korosec 2015; Nohrstedt 2017). Fordonet kunde köra upp på två spår där det lyftes upp med domkrafter. Därefter skruvades bultarna av för att batteriet skulle kunna tas ut och ersättas med ett nytt. Efter bytet skruvades bultarna tillbaka på fordonet och processen tog drygt nittio sekunder (Ladda elbilen 2013). Projektet lyckades ej slå igenom bland potentiella användare utan lades på is, men nya patentsökningar från Tesla tyder på att detta projekt kommer att tas upp igen (Korosec 2015; Nohrstedt 2017).

Better Place skapade bytesstationer där robotar kunde åka in under ett fordon för att byta batteriet på drygt fem minuter (Gunther 2013). Företaget tog över ägandet av batterierna vilket möjliggjorde för billigare eldrivna fordon. De erbjöd batteribytetjänsten för en månadsavgift som inkluderade kostnad för batteri samt elförbrukning, baserat på hur många mil fordonet har kört. Företaget gick i konkurs när de ej lyckades få fler investerare. En anledning till att företaget inte gjorde vinst var att lokala myndigheter hindrade samt försenade de tillstånd som krävdes för uppbyggnad av bytesstationerna. En annan anledning var att företaget hoppades på att tillverkare av eldrivna fordon skulle anpassa fordonen till att vara kompatibla med tekniken som användes vid bytesstationerna. Dessvärre hade enbart en tillverkare gjort detta (Gunther 2013).

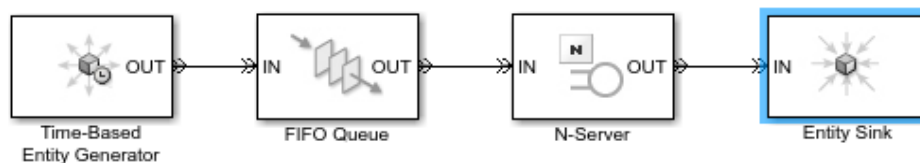
Det svenska företaget Powerswap har utvecklat en batteribytesmaskin som kan installeras på bensinstationer. Bytet kommer att ta tre minuter och tekniken är relativt billig samt tar ej upp för stor plats enligt företaget. Företaget söker för närvarande EU-bidrag som kan bekosta installationer av bytessystemet (Nohrstedt 2017; Söderholm 2017).

2.5 SIMULINK

Simulink är ett program inom MATLAB som möjliggör utveckling och simulering av olika system. En modell kan skapas genom att block med olika egenskaper kopplas ihop för att efterlikna verkliga eller teoretiska system. Simulink kan även användas tillsammans med MATLAB, då kan exempelvis algoritmer som är inbyggda i MATLAB användas vid simulering i Simulink genom tillägg av MATLAB-kod till ett block (MathWorks 2018).

De centrala blocken som kan användas vid uppbyggande av kösystem är ”Entity Generator”, ”Queue” och ”N-server”. Det första blocket, ”Entity Generator” skapar entiteter vilket motsvarar kunderna som kommer att ingå i kösystemet. Entiteternas skapande kan vara händelsebaserat eller tidsbaserat. Själva kön i systemet, ”Queue”, kan ha flera egenskaper, till exempel om det är först-in-först-ut-principen som gäller eller om det är en prioriteringskö. Blocket ”Server” är det block som ger tjänsten till kunden vilket exempelvis motsvarar kassan i en mataffär. Olika egenskaper kan tillämpas och varieras, till exempel hur många som kan ge tjänsten i systemet.

I figur 1 redovisas ett enklare kösystem som har skapats i Simulink med de block som är centrala för uppbyggnad av kösystem. Det är ett kösystem med tidsbaserad generering av entiteter och en kö enligt först-in-först-ut-principen där N är antalet som kan serva entiteterna.



Figur 1 Ett förenklat kösystem uppbyggt av block i Simulink. Sista blocket till höger, ”Entity Sink”, eliminerar de tidigare genererade entiteterna.

3 METOD

Metodavsnittet redovisar de modellparametrar som användes i denna studie och avslutas med en beskrivning av uppbyggnaden av simuleringsmodellerna.

3.1 MODELLPARAMETRAR FÖR EXEMPELGÅRD

Exempelgården representerade en spannmålsodling i södra Sverige. Det antogs att odlingen bestod av ett sammanhållande skifte för att förenkla modelleringen och jordförhållandena antogs vara ”normala”.

Arealen var 200 ha då detta ansågs vara en tillräckligt stor areal för att jordbrukaren ska kunna investera i autonoma jordbruksfordon. Laddnings-/bytesstationerna befann sig vid fältet eller på ett längre avstånd från fältet.

Storleken på gårdens huvudsäkring motsvarar den mängd el som kan förbrukas samtidigt. Huvudsäkringen på gården var 63 A, 150 A eller 250 A, beroende på vilken typ av laddningsstation som användes, för att kunna tillmötesgå den strömstyrka som laddningsstationerna kräver.

Elpriset för exempelgården antogs vara konstant för simuleringsperioden (230 dygn).

3.1.1 Tidsperioder för spannmålsodlingen i modellen

På spannmålsgården odlades endast en gröda för att förenkla simuleringarna. Den valda grödan var havre och de fältoperationer som utfördes i simuleringen bestämdes i samråd med handledare.

Tidsperioderna för när de olika fältoperationerna borde utföras var tagna ur en rapport av de Toro (2004). Där beräknades antalet dygn det är sannolikt att jordbruksarbete kan utföras per månad i Malmö. För fältoperationen ogräsbekämpning bestämdes tidsperioden utifrån en guide från Lantmännen (Lantmännen Lantbruk 2016). Samtliga fältoperationer samt tidsperioder listas i tabell 2.

Tabell 2 De olika fältoperationerna som ingick i simuleringen tillsammans med vilka tidsperioder de skulle utföras inom.

Fältoperation	Tidsperiod
Sladdning	16 mars – 15 maj
Harvning	16 mars – 15 maj
Konstgödselspridning	16 mars – 15 maj
Harvning	16 mars – 15 maj
Sådd	16 mars – 15 maj
Vältning	16 mars – 15 maj
Konstgödselspridning	16 mars – 15 maj
Ogräsbekämpning	15 juni – 15 juli
Stubbearbetning	1 september – 31 oktober
Plöjning	1 september – 31 oktober

Fältoperationerna utfördes under ett år. Simuleringstiden sattes till 230 dygn vilket var antalet dygn från att första fältoperationen skulle börja till att den sista fältoperationen skulle vara utförd.

Skörden av havre ingick ej som fältoperation då denna operation utförs av skördetröskor som är specialiserade för uppgiften. Det blir antagligen inte aktuellt för en jordbrukare att ersätta en skördetröska med den typ av fordon som användes i denna studie.

3.1.2 Kostnader för exempelgård

De energirelaterade kostnader som hörde till spannmålsodlingen var elkostnaden och kostnaden av att öka huvudsäkringen.

Den elkostnad som användes i denna studie var medelvärdet för el under år 2017, beräknat utifrån månadsvärden av rörligt elpris hos Vattenfall (Vattenfall 2018). Observera att elpriset ej inkluderar skatter, nätkostnad och moms.

Som uppskattning av pris för att öka huvudsäkringen togs exempelpriser från Luleå Energi (Luleå Energi 2017). Exempelgården antogs ha en initialhuvudsäkring på 63 A, varpå priset för att öka huvudsäkringen sattes till skillnaden mellan priset för 63 A och den huvudsäkring som önskas. Samtliga elrelaterade kostnader hörande till spannmålsodlingen redovisas i tabell 3.

Tabell 3 Kostnader för el samt kostnader för att öka huvudsäkringens på exempelgården.

Kostnader	Pris
El [kr/kWh]	0,37
Öka från 63 A till 150 A [kr]	28 440
Öka från 63 A till 250 A [kr]	55 860

3.2 MODELLPARAMETRAR FÖR AUTONOMA JORDBRUKSFORDON

Antalet autonoma jordbruksfordon som användes var antingen två eller tre.

Motorkapaciteten var 50 kW och fordonen antogs arbeta dygnet runt.

3.2.1 Energi och tidsåtgång

Fältoperationsspecifik energi och tidsåtgång för autonoma jordbruksfordon

För varje fältoperation har fordonen en viss effekt samt avverkningstakt. Som uppskattning för denna data för ett autonomt jordbruksfordon användes en rapport där dessa aspekter var uppmätta för olika traditionella jordbruksfordon, eftersom data saknades för autonoma jordbruksfordon. Den data som användes ur rapporten i denna studie var för en Valtra 6600 traktor som hade en effekt på 75 kW (Lindgren et al. 2002).

Genom att dividera den fältoperationsspecifika effekten för traktorn, $P_{t,i}$, som var angiven i kilowatt med avverkningstakten, $AT_{t,i}$, som var angiven i hektar per timme kunde energi per yta, $E_{pha,i}$, erhållas med enheten kilowattimmar per hektar för varje fältoperation enligt ekvation 1.

$$\frac{P_{t,i} [kW]}{AT_{t,i} [\frac{ha}{h}]} = E_{pha,i} [\frac{kWh}{ha}] \quad (1)$$

För att beräkna hur lång tid respektive fältoperation skulle ta i dygn, $t_{f,i}$, multiplicerades det inverterade värdet av avverkningstakten med gårdsstorleken, A . Detta dividerades sedan med antalet timmar per dygn, n , vilket är 24, enligt ekvation 2.

$$\frac{1}{n[h]} \frac{1}{AT_{t,i} [\frac{ha}{h}]} A[ha] = t_{f,i} [dygn] \quad (2)$$

Den totala energin som åtgår för respektive fältoperation, $E_{tot,i}$, beräknades genom att multiplicera energin per ytenhet med gårdsstorleken enligt ekvation 3. Den resulterande enheten blev antalet kilowattimmar.

$$E_{pha,i} [\frac{kWh}{ha}] A[ha] = E_{tot,i} [kWh] \quad (3)$$

För fältoperationerna harvning, stubbearbetning och plöjning översteg effekten den valda motorkapaciteten på 50 kW. För dessa sattes effekten till 50 kW och en ny avverkningstakt beräknades fram som reflekterade effektsänkningen genom att dividera den nya effekten med värdet för energi per ytenhet enligt ekvation 4.

$$\frac{P_{t,ny,i}[kW]}{E_{pha,i}[\frac{kWh}{ha}]} = AT_{t,ny,i}[\frac{ha}{h}] \quad (4)$$

Data saknades för sladdning och ogräsbekämpning. Sladdningens energibehov antogs vara likvärdig energibehovet för vältning och ogräsbekämpningens energibehov antogs vara likvärdig energibehovet för konstgödselspridning.

Samtliga värden tagna från rapporten av Lindgren et al. (2002) samt beräknade värden, redovisas i tabell 4.

Tabell 4 Data för effekt och avverkningstakt samt den beräknade totala tidsåtgången och totala energiåtgången för respektive fältoperation (Lindgren et al. 2002).

Fältoperation	Effekt [kW]	Avverkningstakt [ha/h]	Total tidsåtgång [dygn]	Total energiåtgång [kWh]
Sladdning	16	3,67	2,27	871
Harvning	50	7,02	1,19	1 430
Konstgödselspridning	16	11,00	0,76	291
Harvning	50	7,02	1,19	1 430
Sådd	39	2,26	3,69	3 450
Vältning	16	3,67	2,27	872
Konstgödselspridning	16	11,00	0,76	291
Ogräsbekämpning	16	11,00	0,76	291
Stubbearbetning	50	0,91	9,2	11 000
Plöjning	50	1,25	6,67	8 000

Fordonsspecifik energi och tidsåtgång för autonoma jordbruksfordon

För att köra ett jordbruksfordon från fält till en laddnings- eller bytesstation åtgår det en viss mängd energi beroende på sträcka och fordonets vikt. För att erhålla denna energi samt tidsåtgång för ett fordon med den valda effekten på 50 kW användes en traktor med liknande effekt i beräkningarna.

Det autonoma fordonets elkomponenter och teknik bidrar till en högre vikt samtidigt som vikten från komponenter på en traditionell traktor, som förarhytt, kan dras av. Därför antogs vikten för det autonoma jordbruksfordonet vara likvärdig den totala vikten för en traktor med liknande motorkapacitet och ett batteripaket. Den traktor som valdes i denna studie var modell 5065E från John Deere då den hade en motorkapacitet på 48,5 kW vilket var nära den valda motorkapaciteten för studien på 50 kW. Fordonets massa erhöles från TractorData (2015).

I denna studie användes två olika sträckor som jordbruksfordonen behövde köra för att komma till stationen. För alternativet då stationen var belägen vid fältet antogs avståndet vara 600 m. Detta var den kortaste sträckan som kunde användas för att simuleringsmodellen skulle vara stabil. Ett kortare avstånd resulterade i att värdet för en modellparameter blev lägre än simuleringstidssteget på 0,001 dygn, vilket påverkar noggrannheten i simuleringsresultatet. Då stationen var belägen vid gården var avståndet 2500 m. Detta var medelavståndet mellan en gård och ett fält beräknat utifrån en rapport av Engström et al. (2015).

Den energi som åtgår för att köra ett fordon från fält till laddnings- eller bytesstation beräknades utifrån fordonets rullmotstånd som beräknades enligt ekvation 6 där F är rullmotståndskraften i Newton, C_r är en rullmotståndskoefficient och N_f är normalkraften. Normalkraften var i detta fall fordonets massa i kilogram, m , multiplicerat med tyngdaccelerationen, g , enligt ekvation 5.

$$m[kg]g \left[\frac{m}{s^2} \right] = N_f[N] \quad (5)$$

$$F[N] = C_r N_f[N] \quad (6)$$

Rullmotståndet multiplicerades med sträckan fordonet åker för att komma till laddnings- eller bytesstationen, d . Detta gav energin, E_f , i enheten Newtonmeter, vilket motsvarar energin i Joule enligt ekvation 7. Därefter multiplicerades detta med en omräkningsfaktor för att erhålla energin i kilowattimmar.

$$F[N]d[m] = E_f[J] \quad (7)$$

Rullmotståndskoefficienten erhöles från HPWizard (2018) där den valda däcktypen var traktordäck och den valda marktypen var torr jordväg.

Tidsåtgången för att köra ett fordon från fält till station, t_k , beräknades genom att dividera sträckan med hastigheten, v , och därefter dividera med antalet timmar på ett dygn för att erhålla tidsåtgången i dygn enligt ekvation 8.

$$\frac{d[m]}{v[\frac{m}{h}] n[h]} = t_k[dygn] \quad (8)$$

Samtliga erhållna värden som användes för att beräkna energi- och tidsåtgången vid körning av ett fordon från fält till station, redovisas i tabell 5, förutom vikten för batteripaketet. Vikten för batteripaketet redovisas i tabell 7.

Tabell 5 Erhållna värden som användes för att beräkna den energi samt tid som åtgår för att köra ett fordon från fält till laddnings- eller bytesstation.

Fordonsparametrar	Erhållna och beräknade värden
C_r	0,03
Omräkningsfaktor, [J] till [kWh]	3 600 000
g [m/s ²]	9,81
Vikt traktor [kg]	2 300
Avstånd 1 [m]	600
Avstånd 2 [m]	2 500
Hastighet [m/h]	30 000

3.2.2 Investeringskostnader för autonoma jordbruksfordon

Då marknaden för autonoma jordbruksfordon är ny och det inte finns tillräckligt med information tillgängligt för att kunna bestämma kostnaden har den antagits motsvara priset för en traktor, för ett batteri och för ett autonomt tillägg. Batterikostnad redovisas i nästkommande avsnitt och kostnad för traktor samt autonomt tillägg redovisas nedan.

Nypris för den valda traktormodellen kunde ej erhållas. I denna studie sattes kostnaden för den valda traktormodellen, 5065E från John Deere, till medelkostnaden av tre begagnade traktorer av samma modell från år 2017, som erhöles från förmedlingssidan traktor pool (2018). Då priset för de begagnade traktorerna skilde sig relativt lite beräknades medelvärdet ut för endast tre traktorer. Det beräknade medelvärdet som användes som kostnad för den valda traktormodellen redovisas i tabell 6 och de priser som kostnaden beräknades utifrån redovisas i tabell A1 i Appendix A.

Kostnaden för det autonoma tillägget togs från en artikel angående ett samarbete mellan företaget Precision Maker och John Deere där de utvecklade helautonom teknik som kunde utrustas på en traktor från John Deere (Niléhn 2017). Det uppskattade priset för tillägget redovisas i tabell 6.

Tabell 6 De priser som användes i studien för de autonoma jordbruksfordonen.

Priser för autonoma jordbruksfordon	
Traktor [kr]	335 000
Autonomt tillägg [kr]	450 000

3.3 MODELLPARAMETRAR FÖR BATTERI

Två olika litiumjonbatterier som tillverkas av Tesla har använts vid simuleringen. Det ena batteriet heter Tesla Smart och det andra batteriet heter Tesla Model S.

3.3.1 Energiåtgång, tidsåtgång och kostnad

Enligt produktinformationen för batteriet Tesla Smart är det rekommenderat att använda åtta moduler för ett batteripaket och för batteriet tesla Model S rekommenderas användning av tio moduler för ett batteripaket (EV West 2014a; EV West 2014b). Batteriernas lagringskapacitet per modul, totala lagringskapacitet, totala vikt samt pris redovisas i tabell 7.

Tabell 7 Data för de batterier som ingick i simuleringen. För batteriet Tesla Smart ingick åtta moduler i ett batteripaket, för batteriet Tesla Model S ingick tio moduler i ett batteripaket.

Batteriegenskaper	Tesla Smart	Tesla Model S
Lagringskapacitet/modul [kWh]	3	5,3
Lagringskapacitet batteripaket [kWh]	24	53
Vikt batteripaket [kg]	152	249
Pris batteripaket [kr]	45 500	120 000

För att förlänga ett batteris livstid ska de översta och lägsta procenten av lagringskapaciteten i batteriet ej utnyttjas. Batteritillverkare brukar ofta specificera antalet laddningscykler för då 80 % av energin i batteriet kan utnyttjas, varpå den tillgängliga energin i batteriet i denna studie sattes till 80 % (Battery University 2016; Battery University 2018).

Maxkapaciteten i batteripaketet som kunde utnyttjas av fordonen i denna studie var 90 % av batteripaketets kapacitet (E_{\max}). För att batteripaketet inte skulle bli urladdade sattes den lägsta energinivån i batteripaketet innan laddning till 10 % av batteripaketets kapacitet (E_{\min}). Den tillgängliga energin som då kunde utnyttjas av fordonen var $E_{\max} - E_{\min}$.

Batteripaketet behövde även innehålla tillräckligt med energi för att ta sig till och från laddnings- och bytesstationen. Den energi som åtgick för att köra mellan fält och station adderades till E_{\min} samt subtraherades från E_{\max} .

3.4 MODELLPARAMETRAR FÖR LADDNINGS- OCH BYTESSTATIONER

Tre olika laddningsstationer användes i denna studie. Den första är från företaget Autocharge och de andra två är från Siemens. Den från Autocharge är passande för gårdens huvudsäkkring på 63 A och de andra två kräver en högre huvudsäkkring. Data för samtliga stationer har förmedlats via det projekt detta examensarbete ingick i på SLU.

3.4.1 Energi och tid

Laddningsstationen från Autocharge var modellen Laddbox Pro som har en effekt på 22 kW. Laddningsstationerna från Siemens var två Siemens Plug-In DC Charging modeller. Deras effekt var 60 kW samt 100 kW och huvudsäkringen behövde öka till 150 A respektive 250 A.

För att beräkna hur lång tid det skulle ta att ladda ett fordon med respektive laddningsstation, t_L , dividerades den tillgängliga energin i batteripaketet, E_B , med effekten hos stationen, P_L . Detta dividerades därefter med n för att erhålla tiden i antal dygn, se ekvation 9.

$$\frac{E_B[kWh]}{P_L[kW]} \frac{1}{n[h]} = t_L[dygn] \quad (9)$$

Det finns få modeller av bytesstationer som är i användning idag. De som finns är tillverkade för privatbilismen samt yrkesfordonsbilismen och dessa stationer kan byta många batterier på kort tid. Tekniken bakom dessa egenskaper är kostsam och egenskaperna är inte nödvändiga för ett jordbruk som har ett begränsat antal jordbruksfordon.

Då en bytesstation möjliggör att batterierna kan laddas utan att jordbruksfordonen behöver vänta vid stationen såsom vid en laddningsstation antogs det att bytesstationen kan ha en lägre laddningseffekt. I denna studie hade bytesstationen samma laddningseffekt som den laddningsstation med lägst laddningseffekt, på 22 kW.

3.4.2 Kostnader laddnings- och bytesstationer

Inköpskostnaden för Laddbox Pro från Autocharge samt inköpskostnaderna för laddningsstationerna Siemens Plug-In DC Charging redovisas i tabell 8.

En grov uppskattning av inköpskostnaden för bytesstationen utgick från inköspriser för en laddningsstation samt bytesstation från Tesla. Teslas laddningsstationer och bytesstationer är byggda för att hantera en hög omsättning av bilar (Ladda Elbilen 2013; Keeney 2016). Genom att dividera priset för bytesstationen med priset för laddningsstationen kunde kvoten för hur mycket dyrare Teslas bytesstation är jämfört med laddningsstationen erhållas. Denna kvot multiplicerades med priset för laddningsstationen som hade en laddningseffekt på 22 kW, som uppskattning för vad bytesstationen i denna studie kan kosta.

Samtliga inköspriser, erhållna samt beräknade, redovisas i tabell 8 tillsammans med inköspriserna för laddningsstationerna.

Tabell 8 Inköspriser för laddningsstationer samt uppskattade för bytesstation.

Laddnings-/bytesstation	Pris [kr]
Laddbox Pro (22 kW)	17 900
Siemens Plug-in DC Charging (60 kW)	273 000
Siemens Plug-in DC Charging (100 kW)	273 000
Tesla Supercharger	1 430 000
Tesla bytesstation	4 210 000
Uppskattad kostnad bytesstation (kvot: $421/143=2,94$)	52 600

3.5 KÖSIMULERINGSMODELLER

För att undersöka vilken utformning som var mest lämplig för exempelgården skapades totalt sex olika varianter av en simuleringsmodell i Simulink. Samtliga varianter består av samma grunduppbyggnad av block. Tillägg av block har varierats för att simulera olika antal fordon, om det är en batteristation eller laddningsstation, samt olika laddningsstrategier.

3.5.1 Uppbyggnad av kösimuleringsmodeller

Modellerna börjar med att fordonen är ute på fält och utför fältoperation 1. Batterinivån registreras och fordonet slutar arbeta samt åker till en laddnings-bytesstation då batterinivån når E_{\min} . Fordonet laddar/byter batteriet då stationen är ledig, annars ställer sig fordonet i kö. När fordonet har laddat/bytt batteriet åker det tillbaka till fältet för att fortsätta med fältoperation 1.

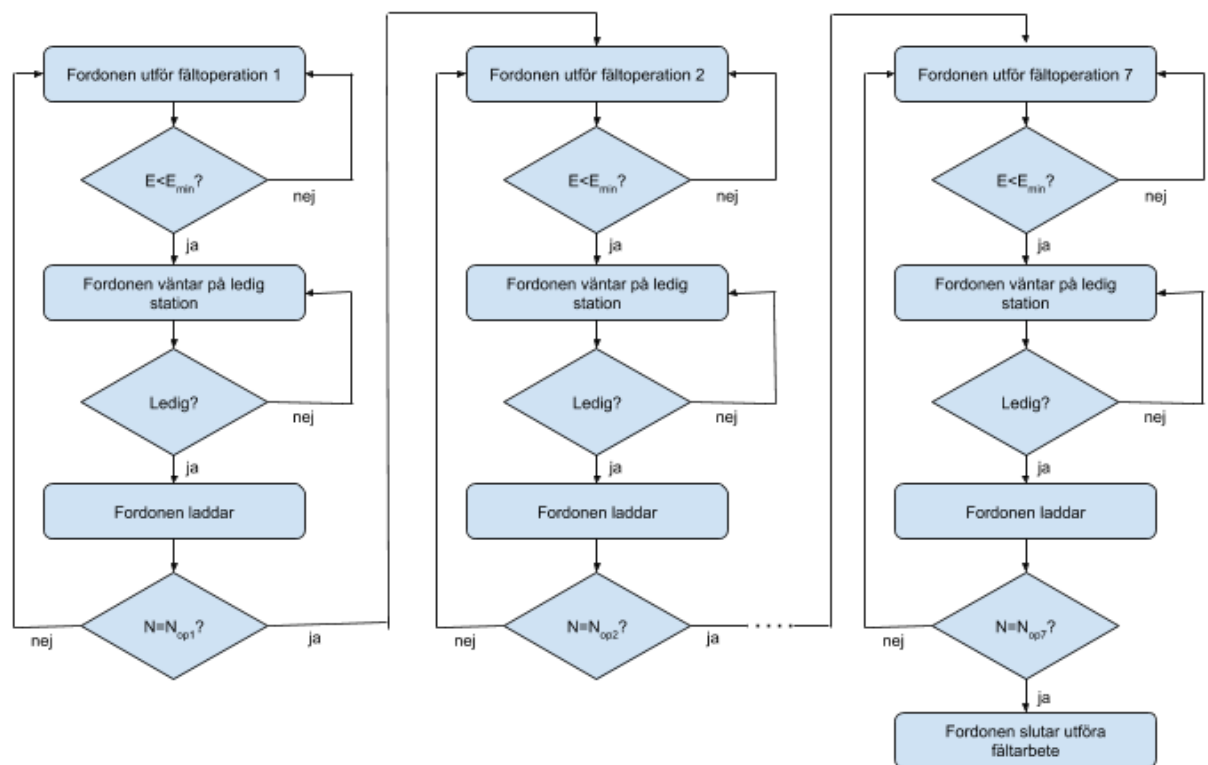
Antal gånger fordonen sammanlagt behöver ladda/byta batteri för att utföra en fältoperation beräknades i MATLAB genom att dividera den fältoperationsspecifika energin med den tillgängliga energin i batteriet. Då fordonen har laddat/bytt batteriet de gånger som krävs för en fältoperation börjar de arbeta på nästa fältoperation. Detta pågår såvida simuleringstiden befinner sig inom någon av de tre tidsperioderna. Om exempelvis sista fältoperationen för tidsperiod 1 är utförd (konstgödselspridning), slutar fordonen att arbeta och startar igen när tidsperiod 2 startar. Då börjar fordonen att arbeta med ogräsbekämpningen.

Ett attribut kopplades till respektive fordon, vilket gav dem en egen identitet. Vilket fordon som har laddat/bytt batteriet registreras och signalen skickas till den del i modellen där fältarbetet utförs. Signalen registreras där och det fordon som har laddat/bytt batteriet aktiveras återigen för att kunna utföra arbete tills batterinivån når E_{\min} . Att fordonen hade egna attribut möjliggjorde för en mer verklighetstrogen simulering då fordonens behov av att ladda kunde ske vid olika tidpunkter eller samtidigt. Det fanns då möjlighet för interaktion mellan fordonen vilket skapade dynamik i simuleringsmodellerna.

För att simulera bytesstationen kopplades en räknare till stationen. Då det antal batterier som finns tillgängliga vid bytesstationen har bytts ut, utöver de som finns i fordonen, pausar stationen för fortsatt batteribyte. Pausen pågår den tid det tar att ladda ett batteri då laddningseffekten är 22 kW, och beroende på vilken lagringskapacitet i batteriet som används kommer den att variera.

För att undersöka lämpliga strategier för laddningsstationer skapades två varianter, strategi 1 och strategi 2. I strategi 1 kommer fordonen att åka till en laddningsstation då batterinivån når E_{\min} . Strategi 1 var grundstrategin i laddningsstationsmodellerna och kommer ej benämnas ytterligare i denna rapport. I strategi 2 skickar laddningsstationen en signal till fordonen när den är ledig för laddning. Fordonen avbryter fältarbetet och åker till laddningsstationen om batterinivån understiger en rimlig nivå, vilket i detta fall var 30 % av batteriets tillgängliga energi. Strategi 2 undersöktes då den eventuellt kan korta ner den tid fordonen spenderar i kö och därmed den tid fordonen är icke-produktiva.

En överblick av modellernas uppbyggnad vid simulering av laddnings-/bytesstationer med grundstrategin redovisas i figur 2 för den första tidsperioden i simuleringen, period 1. I flödesschemat är E batterinivån för fordonen, E_{\min} är den batterinivå då fordonen behöver ladda, N är antal gånger fordonen sammanlagt har laddat och $N_{op,i}$ är antal gånger fordonen sammanlagt behöver ladda för att utföra fältoperation i .



Figur 2 Flödesschema för laddnings-/bytestationsmodellerna i period 1 då grundstrategin tillämpades.

Modellerna som skapades var:

- Modell 1: Två fordon arbetar och en laddningsstation används.
- Modell 2: Tre fordon arbetar och en eller två laddningsstationer används.
- Modell 3: Två fordon arbetar och en laddningsstation används med strategi 2.
- Modell 4: Tre fordon arbetar och en laddningsstation används med strategi 2.
- Modell 5: Två fordon arbetar och en bytestation används. Ett, två eller tre batterier, utöver de i fordonen, finns tillgängliga vid batteristationen.
- Modell 6: Tre fordon arbetar och en bytestation används. Ett, två, tre eller fyra batterier, utöver de i fordonen, finns tillgängliga vid batteristationen.

I tabell 9 redovisas en översikt av utformningen av de olika modellerna där M1–M6 motsvarar modell 1–modell 6.

Tabell 9 Schema över utformningen av de olika modellerna.

Antal fordon	Strategi 1	Strategi 1	Strategi 2	1 bytesstation
	1 laddningsstation	2 laddningsstationer	1 laddningsstation	
2	M1		M3	M5 (1,2,3 batterier)
3	M2	M2	M4	M6 (1,2,3,4 batterier)

Modell 2 användes för att undersöka när det är relevant att bygga en extra laddningsstation. Modell 1, modell 2, modell 3 och modell 4 användes för att undersöka hur en lämplig strategi för laddningsstationerna kan se ut. Modell 5 och modell 6 användes för att undersöka hur många batterier som borde finnas tillgängliga vid bytesstationen.

De parametrar som varierades för samtliga modeller redovisas i tabell 10.

Tabell 10 Parametrar som användes för de olika simuleringsmodellerna.

Samtliga modeller	
Modellparameter	Värden
Avstånd mellan fält och laddnings-/bytesstation [m]	600 & 2500
Lagringskapacitet, batteri [kWh]	24 & 53
Laddningsstationsmodeller	
Modellparameter	Värden
Laddningseffekt [kW]	22, 60 & 100
Bytesstationsmodeller	
Modellparameter	Värden
Laddningseffekt [kW]	22
Tid att byta batteri [h]	0,144

För att verifiera att modellerna simulerades korrekt undersöktes grafer för när ett fordon behövde ladda, när fordonet kom in i kön och fick lämna kön, när fordonet började ladda och hade laddat färdigt, samt vilken tid fordonet fortsatte med fältarbetet. Var fordonet befann sig kunde följas och det kunde säkerställas att tiderna som åtgick stämde överens med de aktuella värdena för modellparametrarna.

3.5.2 Utdata från kösimuleringsmodeller

Den utdata som främst analyserades från simuleringarna var investeringskostnaderna, genomsnittliga icke-produktiva tiden per fordon, antal laddningscykler, energiförbrukning samt kostnad av energiförbrukning för respektive utformning av modell och parametrar.

Investeringskostnaderna som erhöles från simuleringarna bestod av investeringskostnaderna för fordonen, batterier och laddningsstationer där laddningsstationskostnaderna även inkluderade kostnaden av att öka huvudsäkringens då laddningseffekten var 60 kW och 100 kW.

Genomsnittliga icke-produktiva tiden per fordon var den tid fordonen spenderade utanför fältet från att ett fordon behövde ladda/byta batteri till att det återigen fick fortsätta arbeta. Icke-produktiva tiden bestod av den tid det tog för ett fordon att åka till och från stationen, den tid som spenderades i kö samt den tid det tog att ladda/byta batteri. När ett fordon skickade värdet noll innebar det att fordonet utförde fältarbete, när värdet var ett innebar det att fordonet inte var på fält, och den icke-produktiva tiden beräknades genom integration av tiden fordonen befann sig utanför fält.

Antal laddningscykler beräknades för respektive utformning av modell och parametrar genom dividering av antalet gånger fordonen sammanlagt behövde ladda/byta batteri, med antalet fordon i den aktuella modellen.

Energiförbrukningen och kostnaden av energiförbrukningen bestod av den energi som åtgick för att köra mellan fält och station samt den energi som åtgick för att utföra samtliga fältoperationer. Energiförbrukningen samt kostnaden för energiförbrukningen varierade beroende på vilket batteri som användes samt hur långt avståndet var mellan fält och station.

3.5.3 Begränsningar i modellen

Modellernas uppbyggnad var tyvärr inte kompatibel med Simulink vid användande av två laddningsstationer. Om fler än ett fordon ville ladda samtidigt, och båda laddningsstationerna var lediga, blev de även färdigladdade samtidigt. Utsignalen från laddningsstationen var inte kapabel att skicka båda signalerna samtidigt, utan endast en av dem var synlig. Detta innebar även att endast attributet från det fordon vars signal gick fram ur laddningsstationen kunde skickas till den del av modellen där fältarbetet utfördes. Då fortsatte fordonet, vars signal gick fram, att arbeta men det fordon som ej fick sin signal igenom laddningsstationen fortsatte inte att arbeta.

Detta påverkade hur många fordon som faktiskt arbetade i modellen, men även hur lång den icke-produktiva tiden per fordon blev. I modell 2 när två laddningsstationer används utförde fordon 1 enbart fältarbete en gång för varje tidsperiod tills batterinivån nådde E_{\min} . Fordon 2 och fordon 3 fortsatte att arbeta som de skulle, eftersom de aldrig laddade samtidigt.

Fordonet som inte fortsatte att arbeta när två laddningsstationer används skickade kontinuerligt en utsignal med värdet ett då det inte återvände till fältet. Detta innebär att det fordonet fick längre icke-produktiv tid än de fordon som återvände till fältet.

Då den icke-produktiva tiden för när två laddningsstationer används var missvisande kunde den genomsnittliga icke-produktiva tiden ej jämföras med den genomsnittliga icke-produktiva tiden för då en laddningsstation används.

4 RESULTAT

Resultatet som erhöles från simuleringarna redovisas nedan och den MATLAB-kod som användes för simuleringarna redovisas i Appendix C. Först redovisas en överblick av simuleringsmodellerna samt vilka resultat de gav. Därefter är resultatet uppdelat utefter vilken frågeställning som undersöktes och avslutas med ett generellt resultat kring de olika utformningarna av exempelgården.

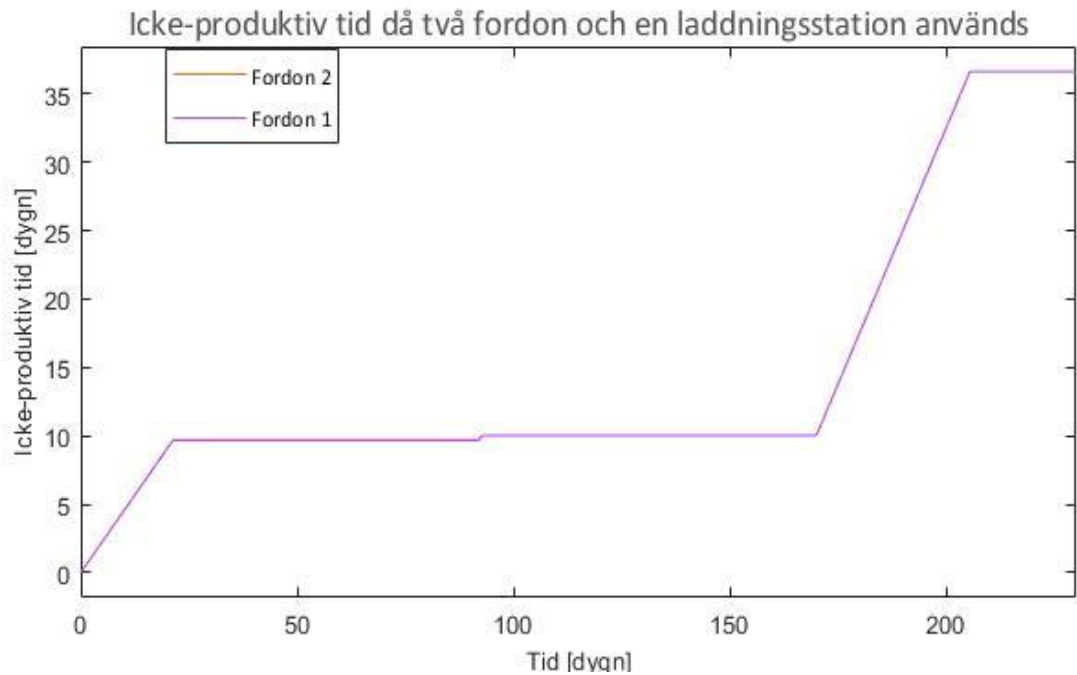
Samtliga stapeldiagram är skapade utifrån data som redovisas i tabell A2–A19 i Appendix A.

4.1 ÖVERBLICK AV SIMULERINGSMODELLERNA

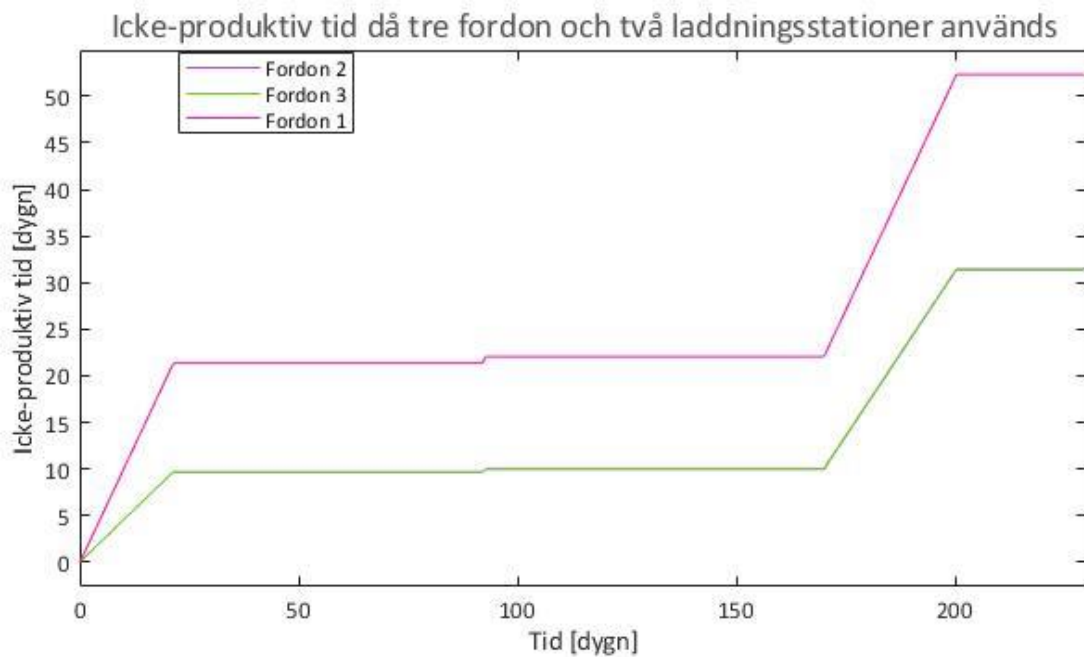
Figur 3 och figur 4 visar den ackumulerade icke-produktiva tiden för varje fordon då två fordon och en laddningsstation användes i modell 1 respektive när tre fordon och två laddningsstationer användes i modell 2. Den ackumulerade icke-produktiva tiden per fordon är nästintill identisk för fordon 1 och fordon 2 i modell 1, varpå de ej går att urskilja i figur 3.

Den korrekta icke-produktiva tiden kunde ej erhållas för modell 2 då två laddningsstationer användes, och i figur 4 går det att se hur den icke-produktiva tiden för fordon 1 är betydligt högre än för fordon 2 och fordon 3, som har nästintill identisk icke-produktiv tid.

Det går att urskilja tre intervall då jordbruksfordonen är aktiva och den icke-produktiva tiden kan ackumuleras. Ett intervall i början av simuleringen, ett kortare intervall i mitten av simuleringen och ett längre intervall närmare slutet av simuleringen. Dessa intervall motsvarar tiden fordonen arbetar i period 1, period 2 samt period 3. I period 2 utförs endast ogräsbekämpning, varpå detta intervall är kortast. I period 3 utförs stubbearbetning och plöjning, vilka har högst totala energiåtgång av de olika fältarbetena. Stubbearbetning och plöjning har dessutom lägst avverkningstakt, varpå intervallet för period 3 är längre än intervallet för period 1 och period 2. Fältoperationerna kunde utföras med god tidsmarginal inom de tre perioderna för samtliga modellkonfigurationer.



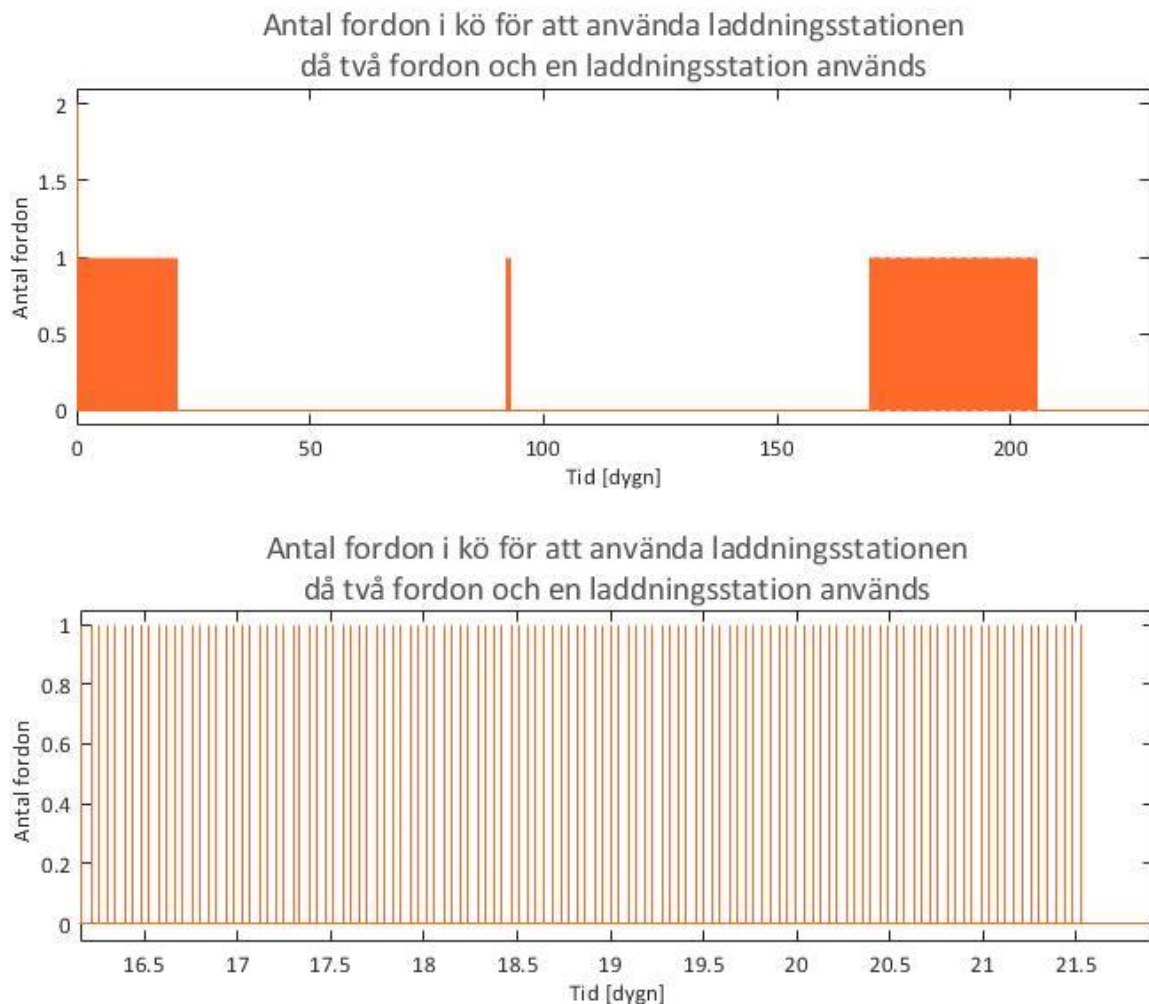
Figur 3 Den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordonen då två fordon och en laddningsstation används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh, laddningseffekten var 22 kW och avståndet mellan fält och station var 2500 m.



Figur 4 Den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordonen då tre fordon och två laddningsstationer används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh, laddningseffekten var 22 kW och avståndet mellan fält och station var 2500 m.

Tiden som åtgår för ett fordon att åka mellan fält och laddningsstation går att erhålla genom att dividera sträckan med hastigheten och därefter multiplicera med två. Tiden som åtgår för att ladda ett fordon går att erhålla genom att dividera batteriets lagringskapacitet med stationens laddningseffekt. Då laddningseffekten är 22 kW, batterilagringskapaciteten är 24 kWh och avståndet är 2500 m som i figur 3 och i figur 4 tar det 0,17 timmar för ett fordon att åka mellan fält och station samt 1,09 timmar att ladda ett fordon. Som jämförelse tar det 29 timmar att utföra fältoperationen harvning, enligt tabell 4.

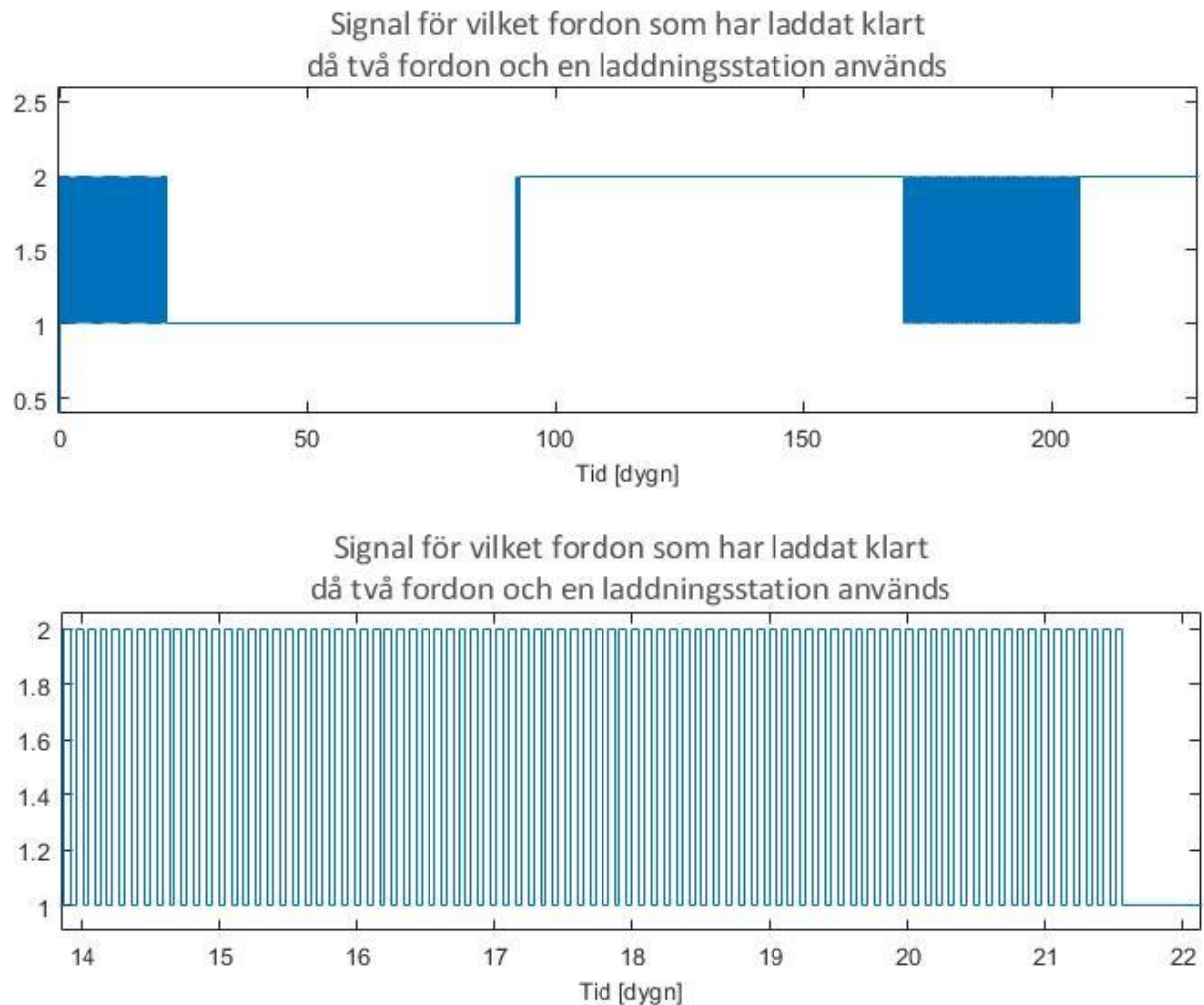
Figur 5 visar hur många fordon som befann sig i kö under simuleringen av modell 1 tillsammans med en närbild från period 1. De tidpunkter i närbilden då värdet är 1 befinner sig ett fordon i kö, de tidpunkter då värdet är 0 befinner sig inga fordon i kö.



Figur 5 Antal fordon som väntar i kö för att få använda laddningsstationen.

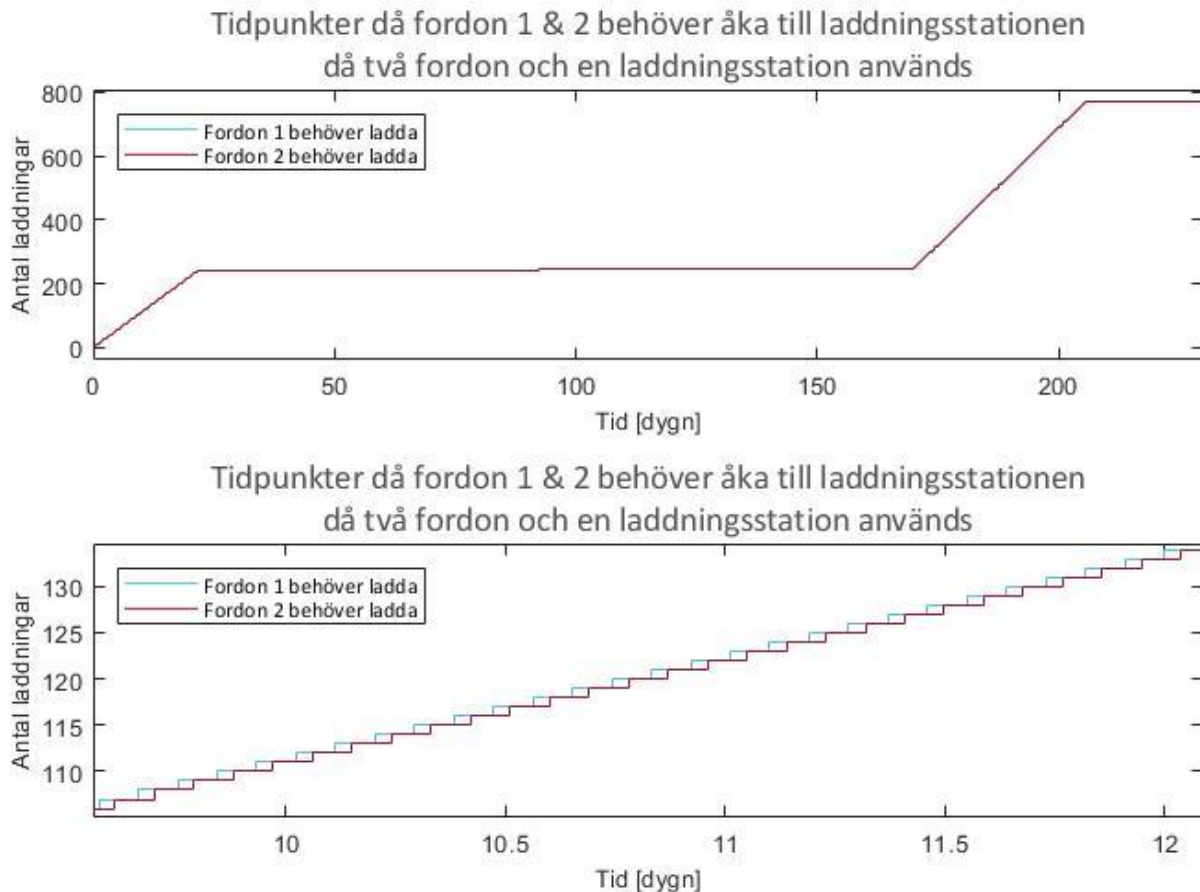
Laddningseffekten var 22 kW, batteriets lagringskapacitet var 24 kWh och avståndet mellan fält och station var 2500 m. I b) ses en närbild av period 1.

Figur 6 visar vilket fordon som var färdigladdat vid simulering av modell 1 och redo att fortsätta med fältarbete under simuleringen tillsammans med en närbild från period 1. Då fordon 1 hade laddat klart var värdet 1 tills fordon 2 har laddat klart, då värdet blev 2 istället.



Figur 6 Signal för vilket fordon som har laddat klart och ska återvända till fältet för att arbeta. Laddningseffekten var 22 kW, batteriets lagringskapacitet var 24 kWh och avståndet mellan fält och station var 2500 m. I b) ses en närbild av period 1.

Figur 7 visar när fordon 1 och fordon 2 behövde åka till laddningsstationen för att batterinivån hade nått E_{\min} under simuleringen av modell 1 tillsammans med en närbild från period 1. Det går att urskilja tidpunkterna för när de två fordonen behöver ladda i närbilden där det går att se att fordon 1 kontinuerligt behöver ladda innan fordon 2.

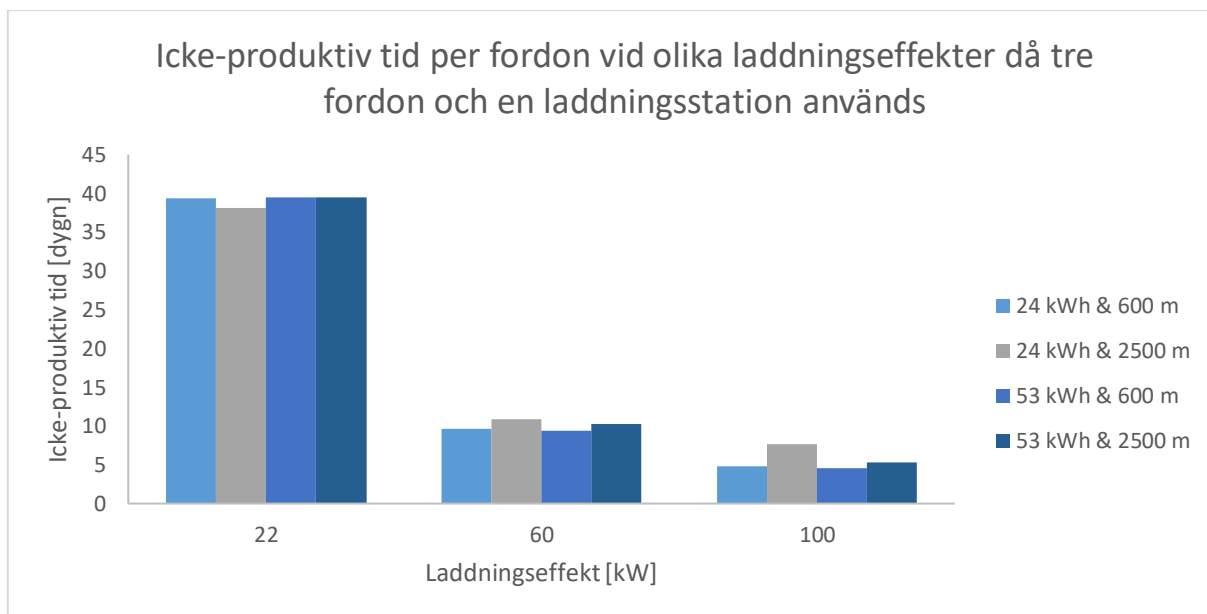


Figur 7 Tidpunkter då batterinivån för fordon 1 och 2 har nått E_{\min} och de behöver åka till laddningsstationen. Laddningseffekten var 22 kW, batteriets lagringskapacitet var 24 kWh och avståndet mellan fält och station var 2500 m. I b) ses en närbild av period 1.

4.2 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA ANTAL STATIONER

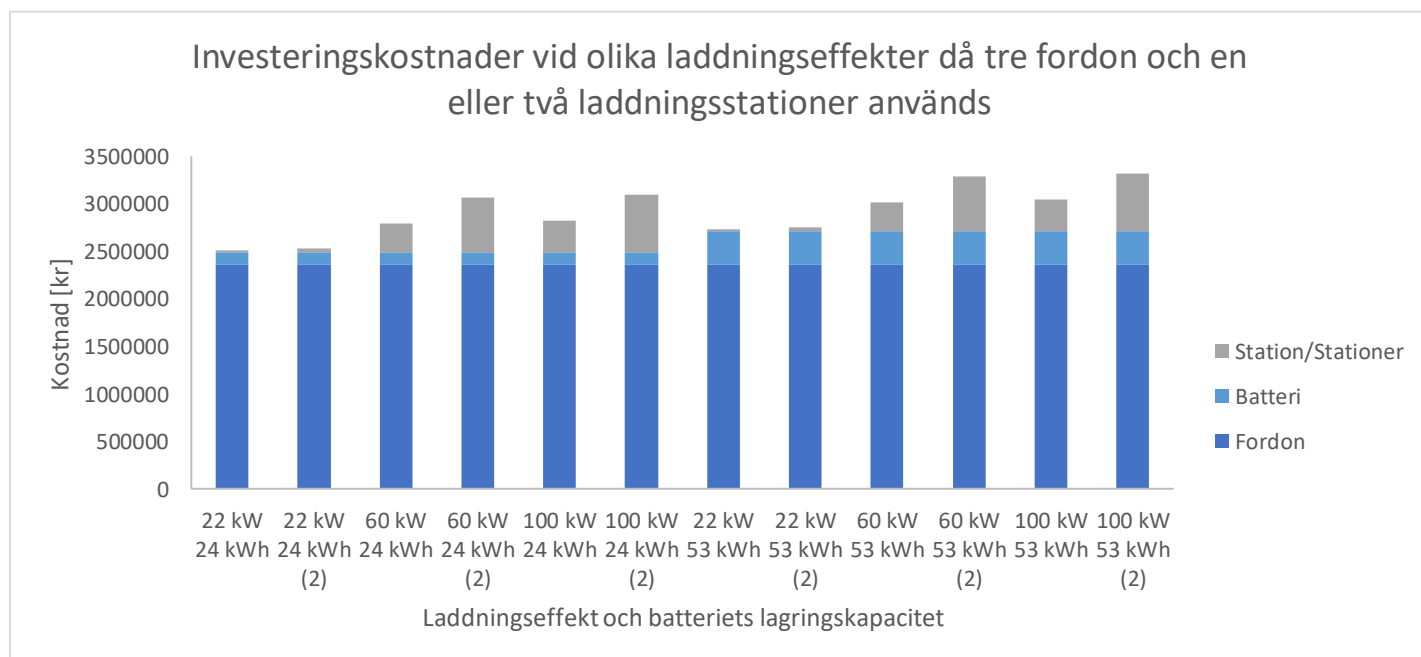
Resultatet av att öka antal laddningsstationer då tre autonoma jordbruksfordon användes på fältet redovisas nedan.

Figur 8 visar hur den icke-produktiva tiden för varje fordon påverkades av en ökad laddningseffekt vid användning av en laddningsstation i modell 2. Enligt simuleringsresultatet förkortas den icke-produktiva tiden per fordon drastiskt med ca trettio dygn då laddningseffekten ökar från 22 kW till 60 kW. Den icke-produktiva tiden blir kortare även då laddningseffekten ökar från 60 kW till 100 kW, men endast med ca fem dygn.



Figur 8 Icke-produktiv tid per fordon vid olika laddningseffekter då tre fordon och en laddningsstation används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.

Figur 9 visar hur investeringskostnaden påverkades av en ökad laddningseffekt vid användning av en respektive två laddningsstationer i modell 2. De staplar med beteckningen (2) representerar kostnaderna då två laddningsstationer används. Uppsäkringskostnader ingår i stationskostnaderna då laddningseffekten är 60 kW och 100 kW.



Figur 9 Investeringskostnad vid olika laddningseffekter då tre fordon och en eller två laddningsstationer används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.

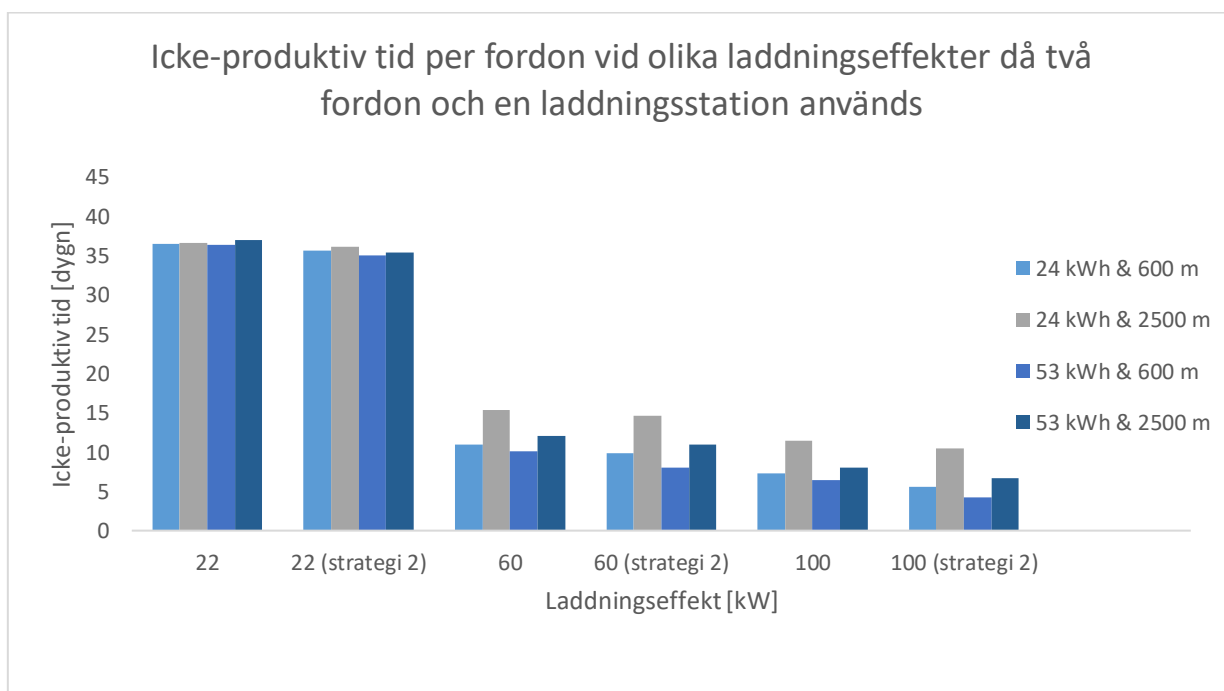
4.3 LADDNINGSSTATIONER: OLIKA STRATEGIER

Resultatet av att byta strategi vid användning av en laddningsstation redovisas nedan.

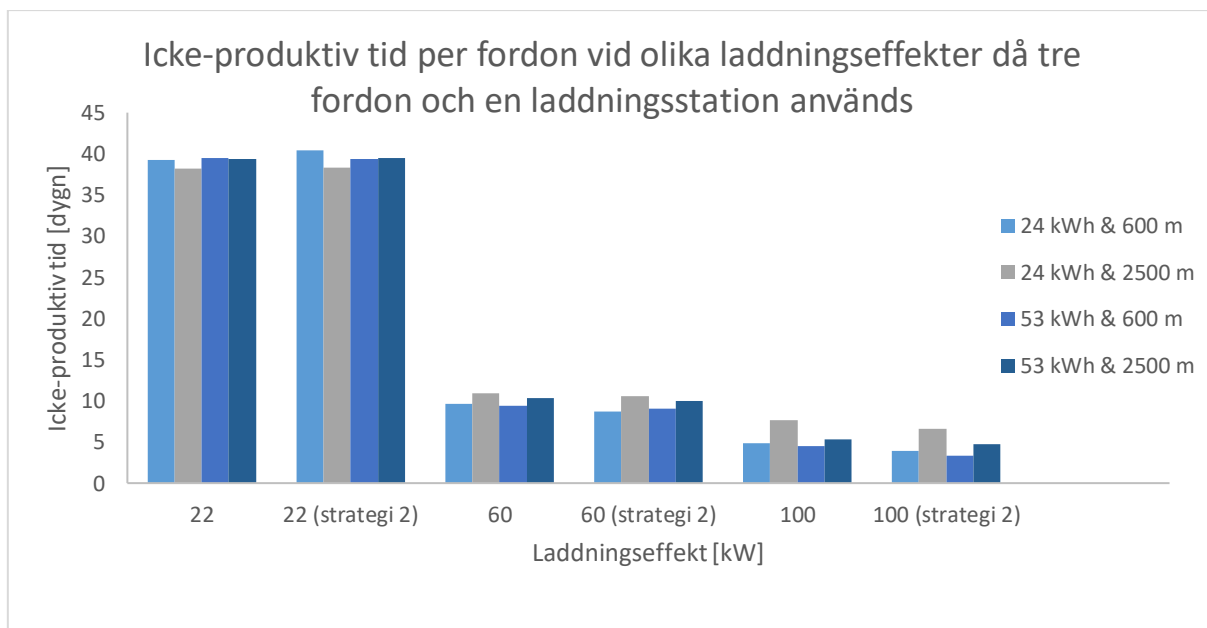
Figur 10 visar hur den icke-produktiva tiden per fordon påverkades av en ökad laddningseffekt för respektive strategi då två autonoma jordbruksfordon användes i modell 3. Figur 11 visar hur den icke-produktiva tiden per fordon påverkades av en ökad laddningseffekt då tre autonoma jordbruksfordon användes med de olika strategierna i modell 4.

Figur 10 visar att strategi 2 har en marginellt kortare icke-produktiv tid per fordon för modell 3 då laddningseffekten är 22 kW och två fordon används jämfört med grundstrategin, strategi 1. För resterande laddningseffekter blir skillnaden något större.

Då tre fordon används i modell 4 ger strategi 2 en något längre icke-produktiv tid per fordon när laddningseffekten är 22 kW, enligt figur 11. För resterande laddningseffekter ger strategi 2 en kortare icke-produktiv tid per fordon.



Figur 10 Icke-produktiv tid per fordon vid olika laddningseffekter då två fordon och en laddningsstation används med de olika strategierna. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.



Figur 11 Icke-produktiv tid per fordon vid olika laddningseffekter då tre fordon och en laddningsstation används med de olika strategierna. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.

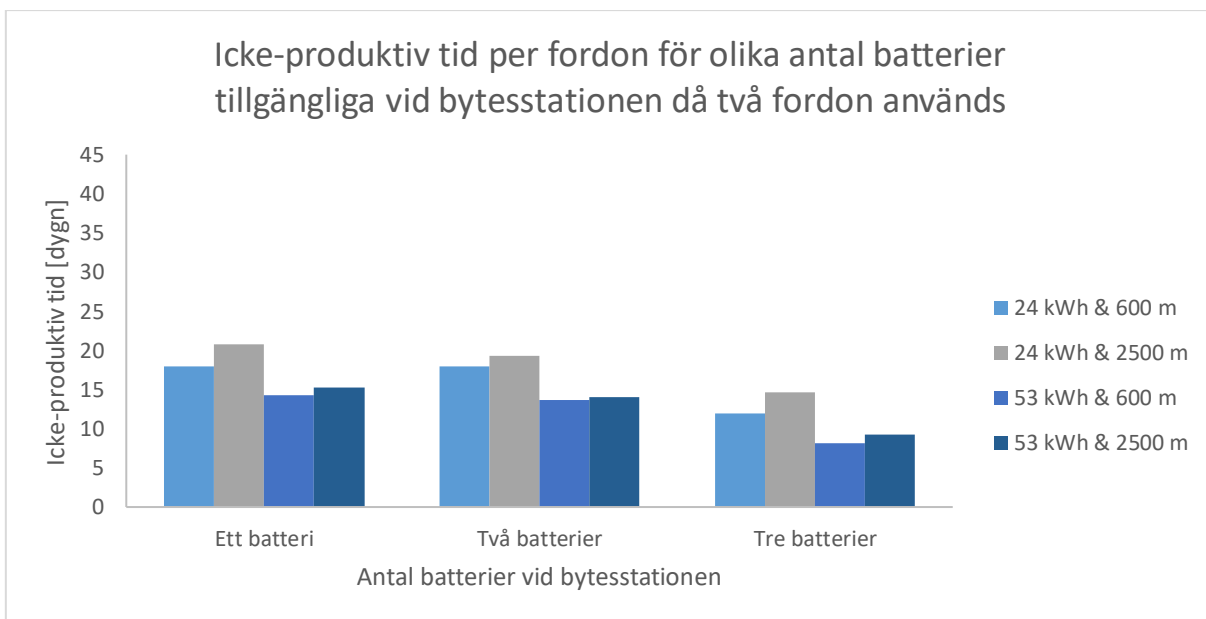
4.4 BYTESSTATIONER: OLIKA ANTAL BATTERIER

Resultatet av att variera antalet batterier som fanns tillgängliga vid bytesstationen, utöver de i fordonen, redovisas nedan. Även skillnaden mellan om det var två eller tre autonoma jordbruksfordon som användes redovisas.

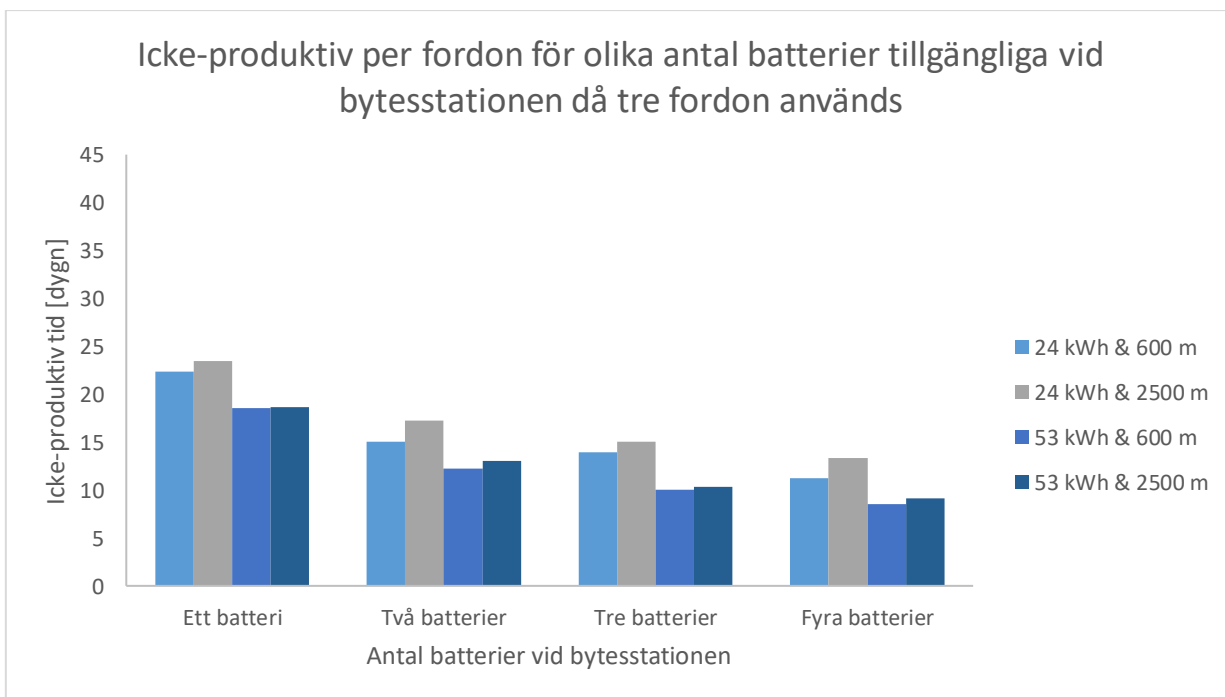
Figur 12 och figur 13 visar hur den icke-produktiva tiden påverkades av ett ökat antal batterier för modell 5 respektive modell 6.

Simuleringsresultatet av modell 5 i figur 12 visar att den icke-produktiva tiden per fordon påverkas marginellt, med ca en dag, av att öka antal batterier tillgängliga vid bytesstationen från ett till två då två fordon används. När antal batterier ökar från två batterier till tre batterier så påverkas den icke-produktiva tiden mer och förkortas med ca fem dygn.

Då tre fordon används i modell 6 påverkas den icke-produktiva tiden per fordon som mest då antalet batterier vid bytesstationen ökar från ett till två med ca sex dygn enligt figur 13. Då antalet batterier vid bytesstationen ökar från två till tre och från tre till fyra förkortas den icke-produktiva tiden per fordon med ca tre dygn för varje ökning.

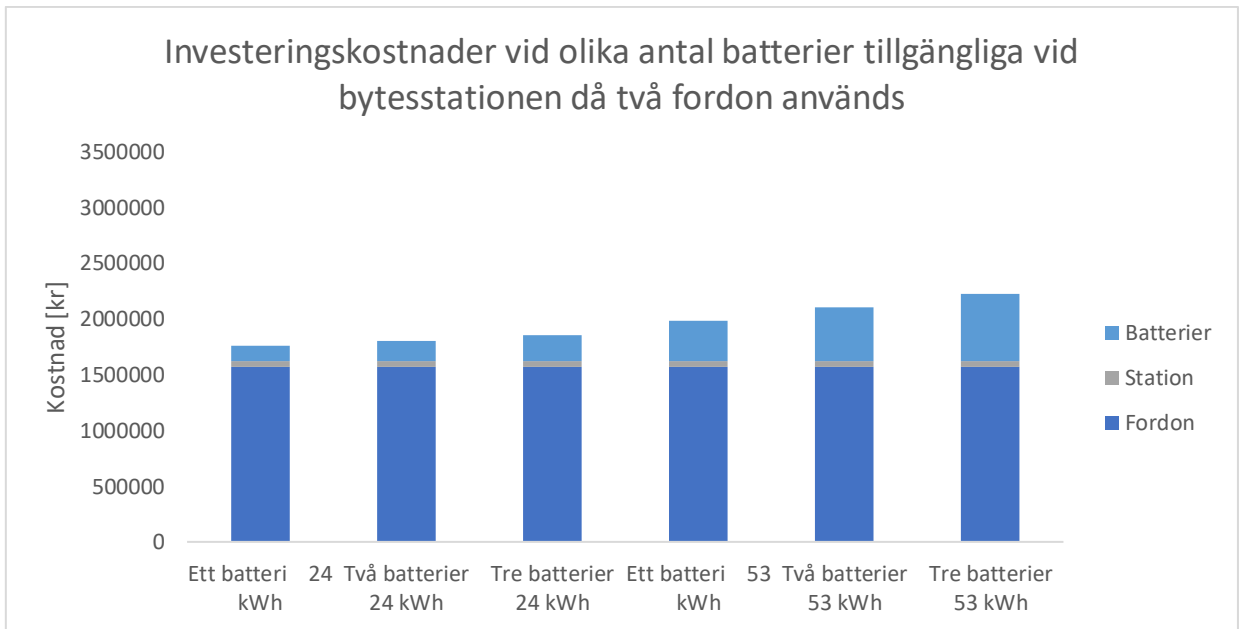


Figur 12 Icke-produktiv tid per fordon för olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen då två fordon används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.

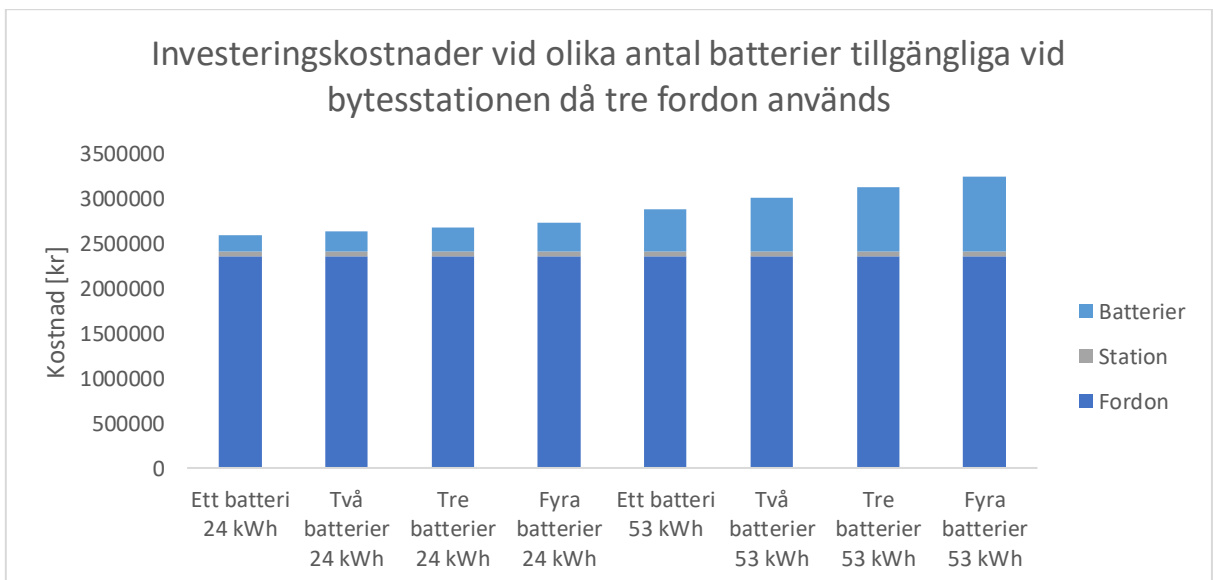


Figur 13 Icke-produktiv tid per fordon för olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen då tre fordon används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.

Figur 14 och figur 15 visar hur investeringskostnaden påverkades av ett ökat antal batterier för modell 5 respektive modell 6. Investeringskostnaderna är högre då tre fordon används i modell 6 oavsett vilken batterilagringsskapacitet som används och hur många batterier som finns tillgängliga vid bytesstationen.

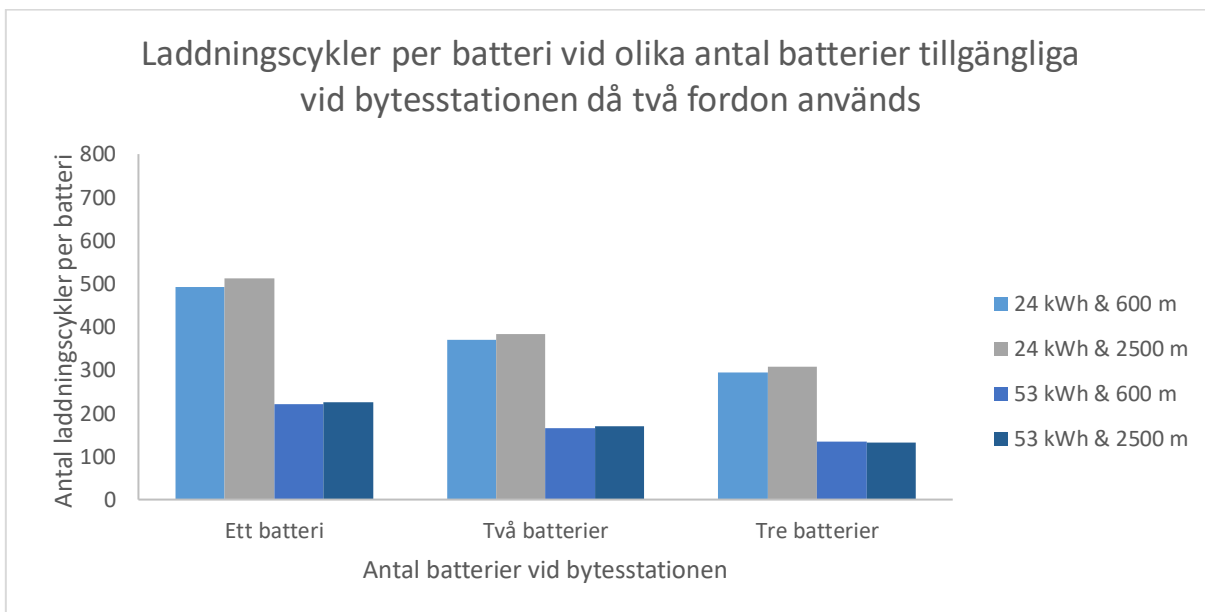


Figur 14 Investeringskostnader vid olika antal batterier tillgängliga vid bytesstationen då två fordon används. Batteriets lagringsskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.

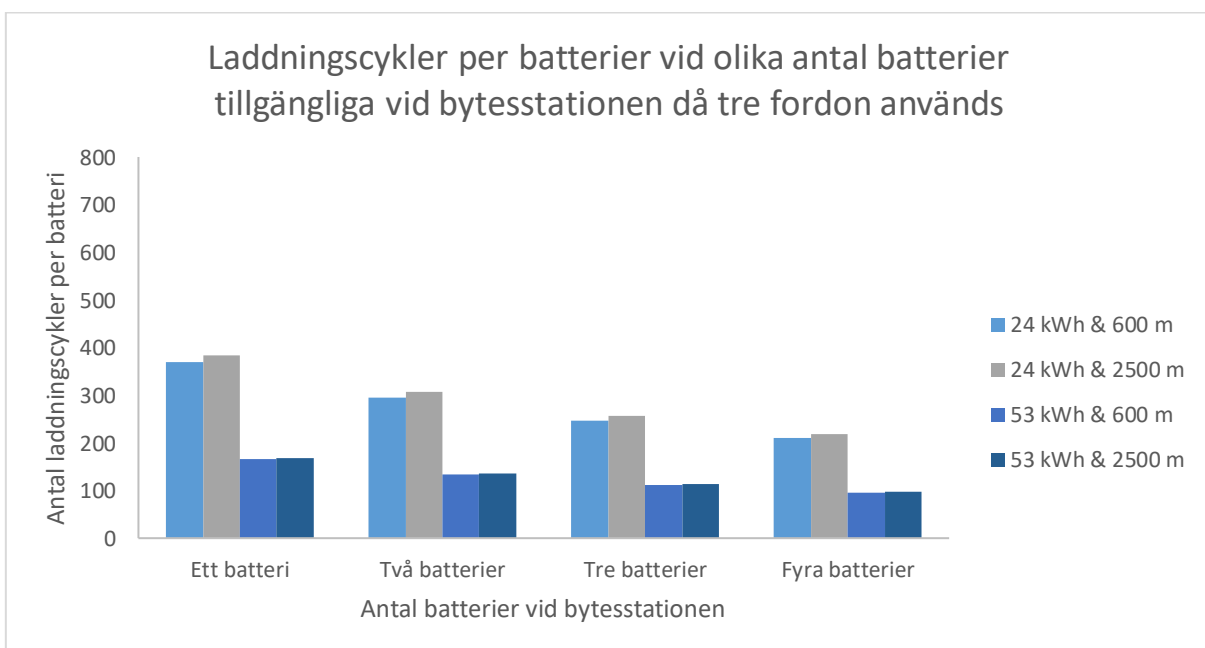


Figur 15 Investeringskostnader vid olika antal batterier tillgängliga vid bytesstationen då tre fordon används. Batteriets lagringsskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.

Figur 16 och figur 17 visar hur antalet laddningscykler per batteri som cirkulerade mellan fordonen och bytestationen påverkades av ett ökat antal batterier för modell 5 respektive modell 6. Då ett batteri fanns tillgängligt vid bytestationen cirkulerade totalt tre batterier, då två batterier fanns tillgängliga cirkulerade totalt fyra batterier, och då tre batterier fanns tillgängliga cirkulerade totalt fem batterier.

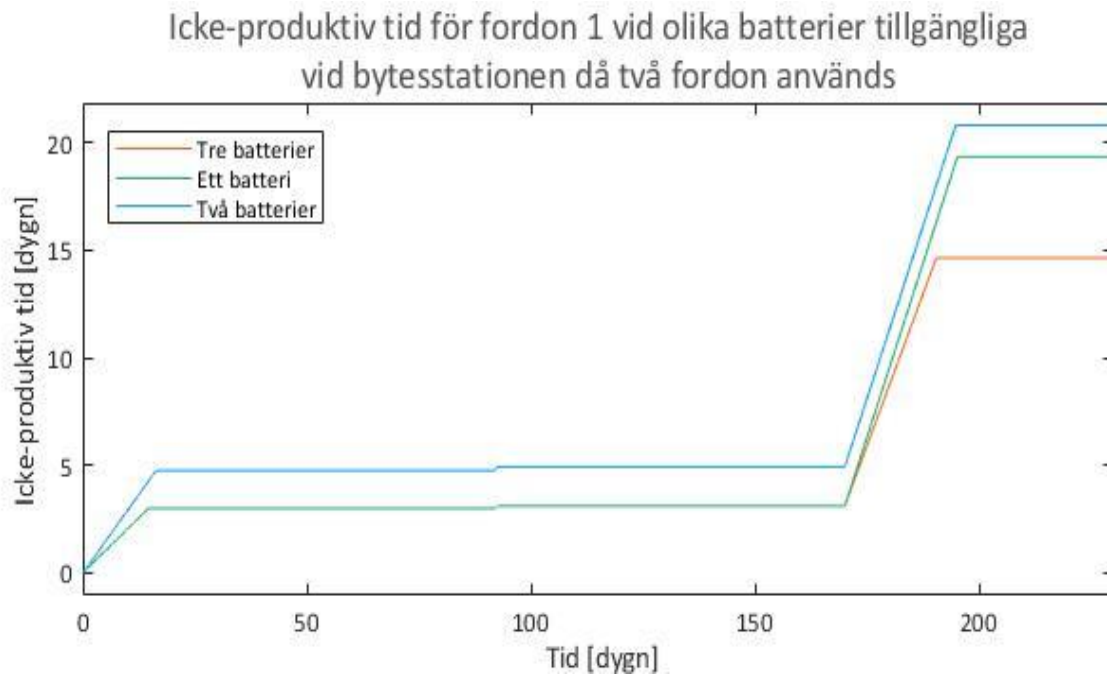


Figur 16 Laddningscykler per batteri vid olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen då två fordon används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.



Figur 17 Laddningscykler per batteri vid olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen då tre fordon används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh och avståndet mellan laddningsstationen och fält var 600 m eller 2500 m.

Slutligen visar figur 18 hur den icke-produktiva tiden för fordon 1 ackumulerades genom tiden för olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen vid simulering av modell 5.

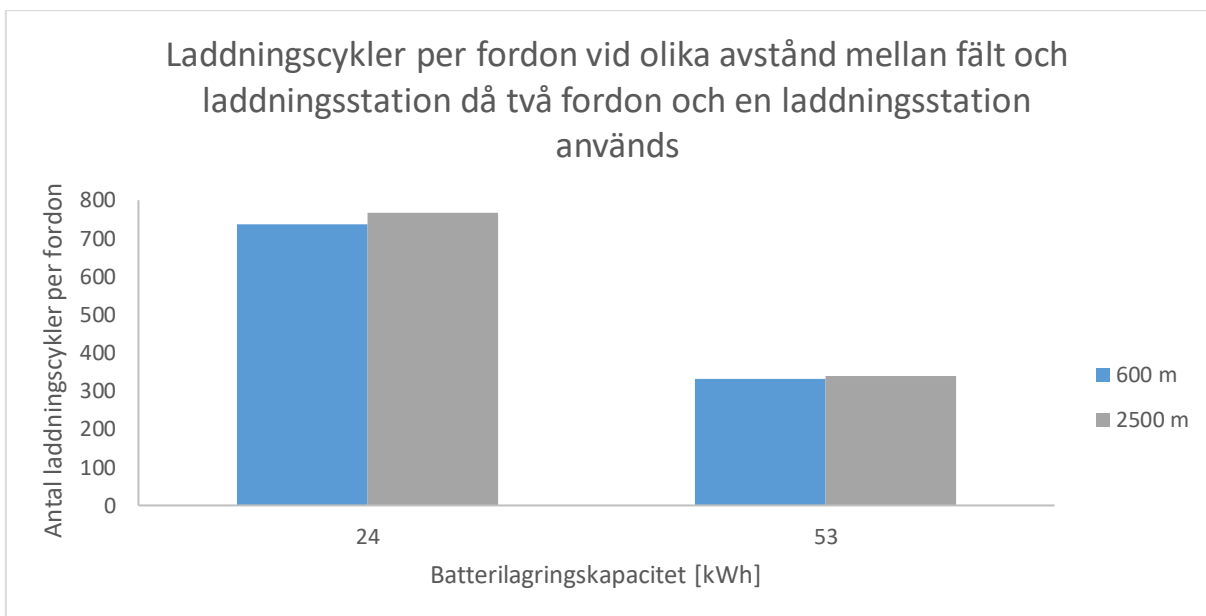


Figur 18 Den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordon 1 vid olika antal batterier tillgängliga vid bytestationen då två fordon används.

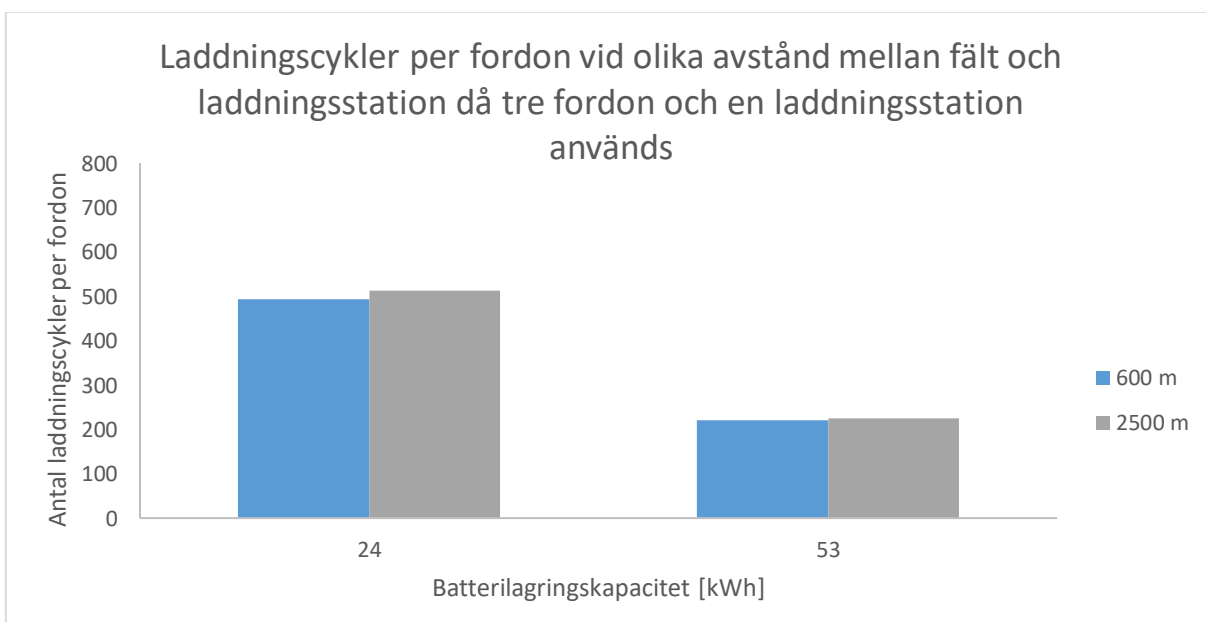
4.5 ÖVRIGA RESULTAT

Här redovisas resultat som bidrar till den generella diskussionen kring utformning av en lämplig laddinfrastruktur samt uppbyggnaden av simuleringssmodellen.

Figur 19 och figur 20 visar hur antalet laddningscykler per fordon påverkades av en ökad batterilagringskapacitet då en laddningsstation användes i modell 1 och modell 2. Antal laddningscykler per år vid användning av laddningsstation påverkas främst av vilken lagringskapacitet som används i batteriet. Att använda en högre lagringskapacitet leder till hundratals färre laddningscykler.

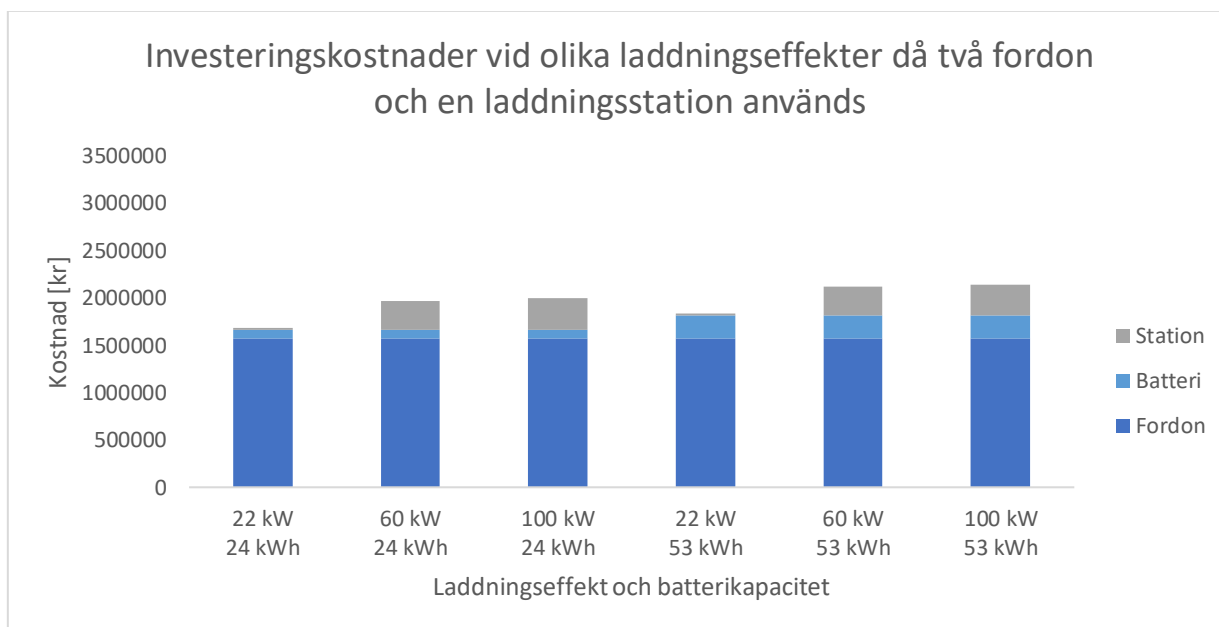


Figur 19 Laddningscykler per fordon för olika batterilagringskapaciteter då två fordon och en laddningsstation används. Avstånd mellan fält och laddningsstation var 600 m eller 2500 m.



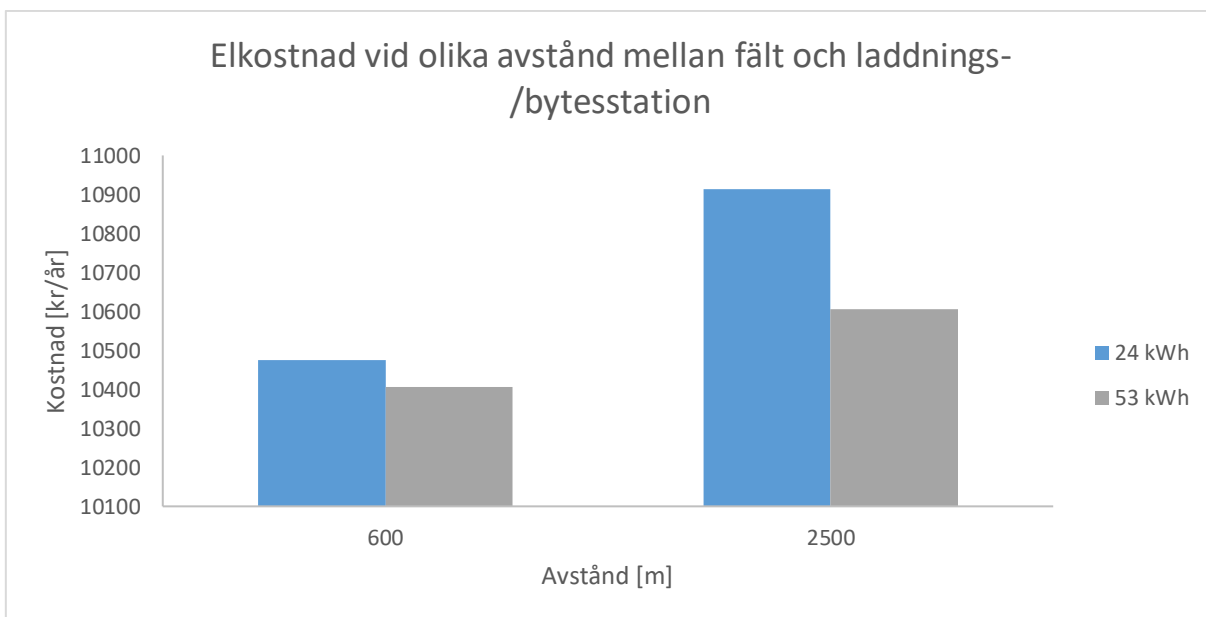
Figur 20 Laddningscykler per fordon för olika batterilagringskapaciteter då tre fordon och en laddningsstation används. Avstånd mellan fält och laddningsstation var 600 m eller 2500 m.

Figur 21 visar hur investeringskostnaderna påverkades av en ökad laddningseffekt då två autonoma jordbruksfordon och en laddningsstation användes i modell 1. Investeringskostnaderna redovisas för när batteriets lagringskapacitet var 24 kWh respektive 53 kWh. Stationskostnaden är svår att urskilja i figuren då laddningseffekten är 22 kW, detta på grund av att den är betydligt lägre än de totala investeringskostnaderna.

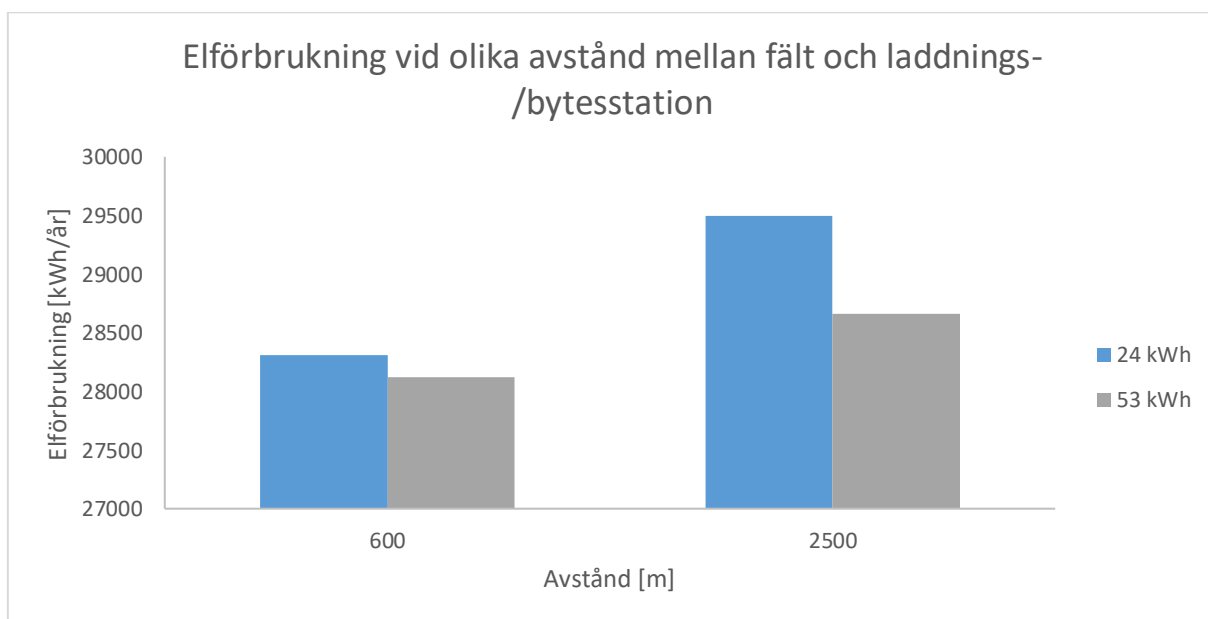


Figur 21 Investeringskostnader vid olika laddningseffekter då två fordon och en laddningsstation används. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.

Figur 22 visar hur elkostnaden påverkades av ett ökat avstånd mellan fält och laddnings-/bytesstation och figur 23 visar hur elförbrukningen påverkades av ett ökat avstånd mellan fält och laddnings-/bytesstation. Elkostnaderna och elförbrukningen gäller för samtliga simuleringskonfigurationer då de endast var beroende av batteriets lagringskapacitet och avstånd mellan fält och station. Observera att y-skalan börjar på 10 100 kr/år i figur 22 och 27 000 kWh/år i figur 23.



Figur 22 Elkostnad vid olika avstånd mellan fält och laddnings-/bytesstation. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.



Figur 23 Elförbrukning vid olika avstånd mellan fält och laddnings-/bytesstation. Batteriets lagringskapacitet var 24 kWh eller 53 kWh.

5 DISKUSSION

5.1 LADDNINGSSATIONER: OLIKA ANTAL STATIONER

Då den icke-produktiva tiden per fordon då två laddningsstationer användes inte kunde erhållas på grund av begränsningar i simuleringsmodellen kan ingen jämförelse göras med den icke-produktiva tiden i figur 8. Det är dock rimligt att anta att den icke-produktiva tiden per fordon kommer att vara kortare för varje laddningseffekt då två laddningsstationer används jämfört med då en laddningsstation används. Detta på grund av att det blir en större sannolikhet att ett fordon kommer fram till en ledig laddningsstation.

Ett värde som sticker ut från simuleringsresultatet av modell 2 i figur 8 är då batteriets lagringskapacitet är 24 kWh, avståndet mellan fält och laddningsstation är 2500 m och laddningseffekten är 22 kW. Den icke-produktiva tiden är kortare än för de andra konfigurationerna med samma laddningseffekt men borde vara längre eftersom batteriets lagringskapacitet är lägst, vilket bidrar till fler laddningstillfällen, och avståndet är längst, vilket bidrar till en längre körtid utanför fält.

För att undersöka detta utstickande värde simulerades modellen med lägre och högre batterilagringskapaciteter än 24 kWh men med samma batterivikt, dessa undersökningar redovisas i figur B1 samt figur B2 i Appendix B. Undersökningen gav att det var period 3 som påverkade och att när batteriets lagringskapacitet var ett jämnt tal blev den icke-produktiva tiden kortare för det större avståndet mellan fält och station. När batteriets lagringskapacitet var ett ojämnt tal blev den icke-produktiva tiden längre för det större avståndet mellan fält och station. Beteendet var troligast på grund av hur värdena för modellparametrarna avrundades i MATLAB och ej på grund av slumpen. Beteendet kunde ej återfinnas då batteriets lagringskapacitet var 53 kWh. Dock har avståndet en liten betydelse på den icke-produktiva tiden jämfört med laddningseffekten.

Batterilagringskapacitetens påverkan på den icke-produktiva tiden är obetydlig då avståndet mellan laddningsstation och fält är 600 m då en laddningsstation används enligt figur 8. En ökning av batteriets lagringskapacitet påverkar den icke-produktiva tiden mer då avståndet är 2500 m, men inte lika mycket som en ökning av laddningseffekten gör. Detta resultat kunde även ses i studien av Nie och Ghamami (2013) där det visade sig att det finns fler fördelar med att använda batterier av lägre kapacitet och att istället satsa på ökad laddningseffekt.

Det kortare avståndet mellan fält och laddningsstation ger en kortare icke-produktiv tid per fordon då en laddningsstation används med de högre laddningseffekterna. Dock påverkar laddningseffekten den icke-produktiva tiden per fordon mycket mer än vad avståndet gör.

Figur 9 visar att investeringskostnaderna för modell 2 då en laddningsstation används främst påverkas av en ökning av laddningseffekten från 22 kW till 60 kW då en laddningsstation används. När laddningseffekten ökar från 60 kW till 100 kW är

ökningen av investeringskostnaderna marginell. Även en ökning av batteriets lagringskapacitet påverkar investeringskostnaden, dock inte lika mycket som val av laddningsstation.

Figur 9 visar även att investeringskostnaderna för modell 2 då två laddningsstationer används knappt påverkas av en extra laddningsstation då laddningseffekten är 22 kW. Däremot påverkas investeringskostnaderna markant då två laddningsstationer med de högre laddningseffekterna används. Detta beror på att laddningsstationerna från Siemens med de högre laddningseffekterna hade ett betydligt högre inköpspris. Dessutom tillkommer en kostnad för att öka huvudsäkringens vilket inte tillkommer för laddningsstationen med lägre laddningseffekt.

5.2 LADDNINGSSATIONER: OLIKA STRATEGIER

Den icke-produktiva tiden per fordon är längre för strategi 2 då laddningseffekten är 22 kW och tre fordon används, enligt figur 11, vilket kan bero på att samtliga fordon får en signal när laddningsstationen är ledig och om samtliga har en batterinivå under den valda gränsen på 30 % kommer de att åka till laddningsstationen. Då laddningseffekten inte är så hög kommer detta bidra till en längre laddningstid.

Om modellen hade tagit hänsyn till vilket fordon som hade lägst batterinivå kunde detta ha undvikits, men ett sådant tillägg var inte möjligt i Simulink på så sätt som modellen är uppbyggd. Utsignaler från vissa block hade behövt bli insignaler till andra block, men dessa insignals- och utsignalsblock hade lästs av samtidigt i simuleringen. Det hade resulterat i att utsignalsblocken inte hade skickat över rätt information i rätt tid till insignalsblocken.

Vid jämförelse av antal fordon som används då strategi 2 tillämpas blir resultatet följande. Tre fordon leder till längre icke-produktiv tid per fordon då laddningseffekten är 22 kW. Då laddningseffekten är 60 kW samt 100 kW kommer två fordon leda till en längre icke-produktiv tid per fordon. Däremot är skillnaderna inte så stora utan det är laddningseffekten som har störst påverkan.

Två fordon borde leda till kortare icke-produktiv tid per fordon då färre fordon behöver köa vid laddningsstationen men varje fordon behöver ladda färre gånger när tre används. Då fordonen kan laddas snabbare kommer själva kötiden att påverka den icke-produktiva tiden mindre och antal gånger ett fordon laddas har större påverkan.

5.3 BYTESSTATIONER: OLIKA ANTAL BATTERIER

Icke-produktiv tid per fordon är kortare då två fordon används än om tre fordon används, förutom då två batterier finns tillgängliga vid bytestationen, enligt figur 12 och figur 13. Även då två batterier finns tillgängliga vid bytesstationen borde den icke-

produktiva tiden vara kortare när två fordon används eftersom att det är färre fordon som behöver köa för samma antal batterier.

Figur 18 visar den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordon 1 för olika antal batterier tillgängliga vid bytesstationen då två fordon används i modell 5. Den icke-produktiva tid per fordon är längst då två batterier finns tillgängliga vid bytesstationen och det är främst i period 1 den ökar mer då två batterier används än om ett eller tre batterier används. Då denna trend kunde återfinnas för samtliga utformningar av batterilagringskapacitet samt avstånd mellan fält och bytesstation tyder detta på att den icke-produktiva tiden vid användning av två batterier är längre då två fordon används. Dock är det mer sannolikt att detta inte stämmer, och att det snarare är något parametervärde i modellen som påverkas av att två batterier används.

Då batteriet med högre lagringskapacitet har en högre inköpskostnad än batteriet med lägre lagringskapacitet kommer investeringskostnaderna att öka mer när antal batterier ökar då den högre lagringskapaciteten används, vilket kan ses i figur 14 och figur 15.

Antal laddningscykler per batteri påverkas främst av vilken batterilagringskapacitet som används, men även av hur många batterier samt hur många fordon som används, enligt figur 16 och figur 17. Då batteriets lagringskapacitet ökar minskar antalet battericykler mer då två fordon används än när tre fordon används. Då ett batteri finns tillgängligt vid bytesstationen sänker en ökning av batteriets lagringskapacitet antal laddningscykler med nästan 300.

5.4 ÖVRIGA RESULTAT

Batteriet med en lagringskapacitet på 24 kWh kostar 45 500 kr och batteriet med en lagringskapacitet på 53 kWh kostar 120 000 kr. Det lägsta antalet laddningscykler som kan tjänas in om den högre lagringskapaciteten väljs är 271, vilket gäller då avståndet mellan fält och laddningsstation är 600 m och då tre fordon används med en laddningsstation, enligt figur 20.

Med en lagringskapacitet på 24 kWh blir antalet laddningscykler per år 492 och då batteriets livslängd är runt 1000 laddningscykler betyder det att ett nytt batteri behöver införskaffas efter ca två år. Högre lagringskapacitet ger 221 laddningscykler per år vilket innebär att ett nytt batteri behöver införskaffas efter ca 4,5 år. Innan batteriet med högre lagringskapacitet behöver bytas ut kommer tre batterier med lägre lagringskapacitet att ha införskaffats vilket skulle kosta 137 000 kr, jämfört med 120 000 kr för batteriet med högre lagringskapacitet.

Under en tioårs-period kommer 6 batterier med lägre lagringskapacitet ha införskaffats för 273 000 kr, alternativt 3 batterier med högre lagringskapacitet för 360 000 kr. Det är kostnadsmässigt mer fördelaktigt att använda den lägre lagringskapaciteten, däremot kommer batteriet med lägre lagringskapacitet att leda till mer underhåll av fordonen då batteriet behöver bytas fler gånger.

Elförbrukningen och elkostnaderna påverkades mer av ett ökat avstånd mellan fält och station än av en ökad lagringskapacitet i batteriet för samtliga modellkonfigurationer enligt figur 22 och figur 23. Detta går att relatera till resultatet från studien av Sadeghi-Barzani et al. (2014) där de visade att elförbrukningen för fordonen att ta sig till en laddningsstation påverkar totalkostnaden.

5.4.1 Modelldiskussion

Det hade varit önskvärt att kunna undersöka hur den icke-produktiva tiden påverkas av olika antal laddningsstationer då laddningseffekten har visats ha en stor påverkan.

Figur 3 samt figur 4 visar hur den icke-produktiva tiden ackumuleras för två fordon med en laddningsstation samt för tre fordon med två laddningsstationer då samma värden på resterande modellparametrar har använts. Icke-produktiv tid per fordon då två fordon används är liknande för fordon 1 och fordon 2, varpå de inte går att urskilja i figur 3. Detsamma gäller för fordon 2 och fordon 3 i figur 4 men fordon 1 har en avsevärt längre icke-produktiv tid, vars orsaker har beskrivits i avsnitt 3.5.3, "Begränsningar i modellen". För att undvika denna begränsning hade simuleringsmodellerna behövt ha en annan uppbyggnad.

En annan begränsning med modellerna var att avståndet mellan fält och station inte kunde bli mindre än 600 m. Detta avstånd representerades i modellen med ett "Transport delay" block i Simulink där ett krav var att värdet skulle var lika med, eller högre, än värdet på simuleringstidssteget. Dock kunde ett avstånd på 600 m motiveras med att fältet hade en storlek på 200 ha, och beroende på var ett fordon befinner sig på fältet när det behöver laddas kommer det att få köra olika långt fastän stationen är belägen vid fältet.

5.5. SAMMANSTÄLLNING AV DISKUSSION

Resultatet från denna fallstudie gäller under de givna förutsättningarna. För simuleringsstudier med andra förutsättningar, såsom val av grödor, fordonsstorlek och fältstorlek, kan resultatet bli annorlunda. Denna studie indikerar däremot fortfarande vilka aspekter som är viktigare att ta hänsyn till än andra vid utformning av laddinfrastruktur för ett jordbruk som använder eldrivna autonoma jordbruksfordon.

Vid val av antalet laddningsstationer hade det varit intressant att se hur mycket den icke-produktiva tiden påverkas av att använda två laddningsstationer jämfört med en. Dock gick det att se att de högre laddningseffekterna gav en betydligt kortare icke-produktiv tid per fordon, och vid användning av två laddningsstationer resulterade valet av högre laddningseffekter även i en betydligt högre investeringskostnad. Detta kan relateras till studien av Sadeghi-Barzani et al. (2014) där de visade att installation av laddningsstationer har en stor påverkan på kostnaderna relaterade till eldrivna fordon. Dessa observationer, tillsammans med observationen att en laddningsstation med hög laddningseffekt redan leder till en kort icke-produktiv tid per fordon, tyder på att det är lämpligare att använda en laddningsstation istället för två.

Om fler fordon hade undersökts med en modell som kunde visa den korrekta icke-produktiva tiden per fordon, samt om inköspriserna inte skiljde sig för laddningsstationerna som de gjorde i denna studie, hade eventuellt flera laddningsstationer kunnat vara mer fördelaktigt. Det hade även varit av intresse att på regional/nationell nivå undersöka påverkan på ett rörligt elpris då He et al. (2013) visade att fordonens laddningsbehov påverkar elnätet och elpriset.

Vid undersökning av lämplig laddningsstationsstrategi visade simuleringsresultatet överlag att strategi 2 leder till en kortare icke-produktiv tid per fordon. Då den inte påverkas mycket vid jämförelse av två eller tre fordon med strategi 2, samt att tre fordon leder till en betydligt högre investeringskostnad än två fordon, är det lämpligast att välja strategi 2 med två fordon. Dock påverkade inte valet av strategi den icke-produktiva tiden per fordon avsevärt, och det är svårt att säga om strategi 2 kräver mer avancerad teknik i laddningsstationen eller om det är enkelt att programmera en laddningsstation till att följa strategi 2. Detta tyder på att en ytterligare strategi som kan tänkas påverka den icke-produktiva tiden mer än vad strategi 2 gör borde undersökas där det även undersöks hur pass rimligt det är att tillämpa den nya strategin. Då strategi 2 skapades för att korta ner kötiden kan det vara aktuellt att skapa en strategi som även kortar ner tiden det tar att köra från fält till station genom att exempelvis även ta hänsyn till var fordonet är beläget på fältet.

Vid undersökning av antal batterier som ska finnas tillgängliga vid bytesstationen visade simuleringsresultatet att valet av batteriets lagringskapacitet hade en stor påverkan på antalet laddningscykler per år, därmed är det lämpligast att välja den högre lagringskapaciteten vid användning av en bytesstation. Den högre lagringskapaciteten bidrog till högre investeringskostnader, varpå det även är lämpligare att använda två fordon med tre batterier vid bytesstationen för att erhålla en kortare icke-produktiv tid samtidigt som investeringskostnaderna inte blir för höga.

Detta resultat avviker från det resultat Nie och Ghamami erhöll (2013). De kom fram till att en högre lagringskapacitet i batteriet krävs då en laddningsstation används istället för en bytesstation, men resultatet i denna rapport visar att det både för laddningsstationen och bytesstationen är fördelaktigt att använda en högre lagringskapacitet.

Elförbrukningen och elkostnaderna påverkades mer av ett ökat avstånd mellan fält och station än av en ökad lagringskapacitet i batteriet. Då storleken av elförbrukningen relaterade till den icke-produktiva tiden per fordon kunde liknande trend ses för den icke-produktiva tiden per fordon för samtliga laddningsstationsmodeller.

Trenden gick däremot inte att se i resultatet från bytesstationsmodellerna men detta beror på att de använder fler batterier vilket skiftar påverkan från avståndet till lagringskapaciteten. Dock är det fortfarande främst laddningseffekten som påverkar den icke-produktiva tiden vilket återigen samstämmer med resultatet från Nie och Ghamami (2013). Detta tyder på att användningen av fordonen och laddningsstationer blir effektivare då ett kortare avstånd används mellan fält och station samt att användningen av fordonen och bytesstationen blir effektivare då en högre lagringskapacitet i batteriet används. Det visar även på att laddningseffekten inte får vara för låg för varken laddningsstationer eller bytesstationer.

6 SLUTSATS

I detta examensarbete har lämplig utformning av system för laddning av eldrivna autonoma jordbruksfordon undersökts genom simulering i syfte att få en så hög produktivitet som möjligt med så låg elförbrukning samt låga investerings- och elkostnader som möjligt.

Resultatet från denna fallstudie ger endast indikationer på vilka faktorer som är viktiga vid utformning av laddinfrastruktur för autonoma eldrivna jordbruksfordon. En högre batterilagringskapacitet samt en högre laddningseffekt tycks genomgående för de olika utformningarna vara mer fördelaktigt.

Resultaten från denna fallstudie tyder på att:

- Det inte är relevant att bygga en extra laddningsstation eftersom en laddningsstation med hög laddningseffekt redan bidrar till låg icke-produktiv tid.
- Att använda en laddningsstrategi som enbart kortar ner kötiden för jordbruksfordonen är ingen lämplig strategi då den marginellt kortar ner den icke-produktiva tiden.
- Att placera laddningsstationerna nära fältet samt använda en högre laddningseffekt medför både ett effektivt utnyttjande av laddningsstationerna och ett effektivt utnyttjande av fordonen.
- Vid val av antal batterier som ska finnas vid en bytesstation är det lämpligt att välja färre batterier med en högre lagringskapacitet.

För att närmare kunna bestämma exempelvis antal stationer och vilka strategier som är lämpligast behöver ytterligare studier utföras som innehåller en högre detaljeringsgrad samt större variation av värdena för modellparametrarna. Även fler strategier behöver utforskas där det även undersöks hur de olika strategierna fungerar i praktiken. Lämpligt kan då vara att kombinera studierna med fälttester som sker i samarbete med utvecklare av laddningsstationer/autonoma eldrivna jordbruksfordon. Dessutom är det relevant att undersöka flera olika exempelgårdar för att eventuella begränsningar i hur systemen utformas ska kunna detekteras.

7 REFERENSER

7.1 PUBLICERADE REFERENSER

Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H.J., Del Duce, A. & Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy*, vol. 157, ss. 871–883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.019>

Billingsley, J., Visala, A. & Dunn, M. (2008). Robotics in Agriculture and Forestry. I: Siciliano, B. & Khatib, O. (red), *Springer Handbook of Robotics*. Heidelberg: Springer, ss. 1065–1077.

de Toro, A. (2004). *Assessment of Field Machinery Performance in Variable Weather Conditions Using Discrete Event Simulation*. Diss. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet.

Einarsson, P. (2015). *Faktaunderlag: Rent mjöl i påsen? – Om spannmålsodling, miljöpåverkan och konsumtion*. Stockholm: Naturskyddsföreningen (Upplaga 1)

Eklöf, P. (2014). *Marknadsöversikt – Spannmål*. Jönköping: Jordbruksverket (Rapport 2014:08)

Engström, J., Gunnarsson, C., Baky, A., Sindhøj, E., Eksvärd, J., Orvendal, J. & Sjöholm, N. (2015). *Energieffektivisering av jordbrukets logistik – pilotprojekt för att undersöka potentialer*. Uppsala: JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI-rapport: Lantbruk & Industri, nr 441)

Engström, J. & Langelöv, O. (2017). *Batteridrivnen autonom jordbruksmaskin - Simulering av maskinaktiviteter på en svensk gård*. Uppsala: RISE Research Institutes of Sweden (SP Rapport 2017:27).

Faria, R., Moura, P., Delgado, J. & de Almeida, A.T. (2012). A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Conversion and Management*, vol. 61, ss. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.023>

Gunther, M. (2013). Better Place: what went wrong for the electric car startup?. *The Guardian*, 5 mars.

He, F., Wu, D., Yin, Y. & Guan, Y. (2013). Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 47, ss. 87–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.09.007>

Keeney, A. (2016). Update|Supercharger: A Charge Could Cost Half the Price of Gas. *ARK Invest*, 11 juli.

Korosec, K. (2015). Tesla's battery swap program is pretty much dead. *Fortune*, 10 juni.

Lantmännen Lantbruk. (2016). *Odling - Guide för tillväxt*. [Broschyr]. Malmö: Lantmännen Lantbruk. Tillgänglig: <https://www.lantmannenlantbruk.se/Documents/V%C3%A5ra%20tj%C3%A4nster/Best%C3%A4ll%20broschyrer/Odling%202016%20pdf.pdf> [2018-03-08]

Lindgren, M., Pettersson, O., Hansson, P.A. & Norén, O. (2002). *Jordbruks- och anläggningsmaskinernas motorbelastning och avgasemissioner – samt metoder att minska bränsleförbrukning och avgasemissioner*. Uppsala: JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI-rapport Lantbruk & Industri, 308).

Lombardi, P., Heuer, M. & Styczynski, Z. (2010). Battery Switch Station as storage system in an autonomous power system: optimization issue. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. Providence, USA 25–29 juli. DOI: 10.1109/PES.2010.5589914

Manzetti, S. & Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, ss. 1004–1012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.010>

Nie, Y.M. & Ghamami, M. (2013). A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 57, ss. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.010>

Niléhn, A. (2017). R8 utan förare i Danmark. *Lantbruksnytt*, 13 december.

Nohrstedt, L. (2017). Robot byter bilbatteri – redan nästa år. *Ny Teknik*, 1 november.

Notter, D.A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R. & Althaus, H.J. (2010). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, vol. 44 (17), ss. 6550–6556. DOI: 10.1021/es903729a

Pedersen, S.M., Fountas, S., Have, H. & Blackmore, B.S. (2006). Agricultural robots—system analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture*, vol. 7 (4), ss. 295–308. DOI: 10.1007/s11119-006-9014-9

Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghannavieh, A. & Kazemi-Karegar, H. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, vol. 125, ss. 289–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.077>

Sbordone, D., Bertini, I., Di Pietra, B., Falvo, M.C., Genovese, A. & Martitano, L. (2015). EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm. *Electric Power Systems Research*, vol. 120, ss. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.033>

Söderholm, E. (2017). Svenska företaget som satsar på batteribyte i elbilar – pilotförsök redan nästa år?. *Recharge*, 8 november.

Yaghoubi, S., Akbarzadeh, N.A., Bazargani, S.S., Bazarani, S.S., Bamizan, M. & Asl, M.I. (2013). Autonomous Robots for Agricultural Tasks and Farm Assignment and Future trends in Agro Robots. *International journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 13 (3), ss. 1–6. Tillgänglig: http://www.ijens.org/Vol_13_I_03/134301-1303-8989-IJMME-IJENS.pdf [2018-01-18]

7.2 WEBBASERADE REFERENSER

Battery University (2016). *BU-802c: How Low can a Battery be Discharged?*. Tillgänglig: http://batteryuniversity.com/learn/article/premature_voltage_cut_off [2018-03-12]

Battery University (2018). *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*. Tillgänglig: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries [2018-04-25]

DOT - Autonomous Farm Technology (2018). *About DOT*. Tillgänglig: <https://seedotrun.com/about.php> [2018-01-29]

EV West (2014a). *18650-3*. Tillgänglig: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=329 [2018-03-12]

EV West (2014b). *Tesla MS*. Tillgänglig: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=4&products_id=463 [2018-03-12]

Fendt (2018). *Fendt FutureFarm – Project Xaver*. Tillgänglig: <https://www.fendt.com/int/xaver.html> [2018-06-01]

HPWizard (2018). *Tire friction and rolling resistance coefficients*. Tillgänglig: <http://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html> [2018-03-12]

Jordbruksverket (uå). *Fakta om svenskt jordbruk*. Tillgänglig: https://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_ovrigt/ovr2.pdf [201-04-25]

Ladda Elbilen (2013). *Teslas batteribytestation*. Tillgänglig: <http://www.laddaelbilen.se/2013/06/23/teslas-batteribytestation-17321736> [2018-04-04]

Luleå Energi (2017). *Prislista elnät*. Tillgänglig: <https://www.luleaenergi.se/globalassets/privatkund/dokument/avtalsvillkor/elnat-prislista-2017.pdf> [2018-04-19]

MathWorks (2018). *Simulink*. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/products/simulink.html> [2018-05-20]

Precision Makers (2018). *Greenbot*. Tillgänglig: <https://www.precisionmakers.com/en/greenbot-2/> [2018-06-01]

Saga Robotics. (2018a). *Saga Robotics*. Tillgänglig: <https://sagarobotics.com/> [2018-01-29]

Saga Robotics (2018b). *W series: working horse - pure power*. Tillgänglig: <https://sagarobotics.com/blogs/news/162130055-w-series-br-working-horse-pure-power> [2018-01-29]

Svensk energi (2014). *Laddinfrastruktur för elfordon: Vägledning för att sätta upp laddstation eller laddstolpe – tredje versionen*. Tillgänglig: http://www.svenskenergi.se/Global/Dokument/V%C3%A4gledningar/Sv%20Energi_la ddinfrastruktur%20uppdaterad%2026%20sept%202014.pdf [2018-03-12]

Larsson, G. (2018). *Kabeldriven eltraktor ersätter diesel*. Tillgänglig: <https://www.slu.se/kabeltraktor> [2018-04-25]

TractorData (2015). *John Deere 5065E*. Tillgänglig: <http://www.tractordata.com/farmtractors/005/7/9/5792-john-deere-5065e.html> [2018-03-11]

traktor pool (2018). *Begagnade John Deere 5065E Traktorer till salu*. Tillgänglig: <https://www.traktorpool.se/begagnat/b-Traktorer/95/c-John-Deere/85/model/5065E/> [2018-04-15]

Vattenfall (2018). *Prishistorik över rörligt elpris*. Tillgänglig: <https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/rorligt-elpris/prishistorik/> [2018-03-11]

APPENDIX A: TABELLER

Tabell A1 Priser för de begagnade traktorerna som användes till beräkning av medelvärde i studien (traktor pool 2018).

Priser för begagnade traktorer	
Begagnad traktor 1 [kr]	326789
Begagnad traktor 2 [kr]	337616
Begagnad traktor 3 [kr]	341437

Följande tabeller redovisar det resultat som erhöles vid simulering av två fordon.

Tabell A2 Investeringskostnader för bytesstation.

Antal batterier, lagringskapacitet	Kostnad batterier [kr]	Kostnad station [kr]	Kostnad fordon [kr]
Ett batteri, 24 kWh	136 490	52 597	1 570 562
Två batterier, 24 kWh	181 990	52 597	1 570 562
Tre batterier, 24 kWh	227 490	52 597	1 570 562
Ett batteri, 53 kWh	358 540	52 597	1 570 562
Två batterier, 53 kWh	478 050	52 597	1 570 562
Tre batterier, 53 kWh	597 570	52 597	1 570 562

Tabell A3 Investeringskostnader för laddningsstation.

Laddningseffekt, lagringskapacitet	Kostnad batterier [kr]	Kostnad station [kr]	Kostnad fordon [kr]
22 kW, 24 kWh	90 955	17 890	1 570 562
60 kW, 24 kWh	90 955	301 440	1 570 562
100 kW, 24 kWh	90 955	328 860	1 570 562
22 kW, 53 kWh	239 030	17 890	1 570 562
60 kW, 53 kWh	239 030	301 440	1 570 562
100 kW, 53 kWh	239 030	328 860	1 570 562

Tabell A4 Laddningscykler per batteri för bytesstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Antal laddningscykler, ett batteri	Antal laddningscykler, två batterier	Antal laddningscykler, tre batterier
600 m, 24 kWh	492	369	295
2500 m, 24 kWh	512	384	307
600 m, 53 kWh	221	166	135
2500 m, 53 kWh	225	169	133

Tabell A5 Laddningscykler per fordon för laddningsstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Antal laddningscykler
600 m, 24 kWh	737
2500 m, 24 kWh	768
600 m, 53 kWh	332
2500 m, 53 kWh	338

Tabell A6 Icke-produktiv tid per fordon för laddningsstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 22 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 60 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 100 kW
600 m, 24 kWh	36,5	11,0	7,3
2500 m, 24 kWh	36,6	15,3	11,4
600 m, 53 kWh	36,4	10,1	6,5
2500 m, 53 kWh	36,9	12,1	8,0

Tabell A7 Icke-produktiv tid per fordon för laddningsstation med strategi 2.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 22 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 60 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 100 kW
600 m, 24 kWh	35,6	9,9	5,6
2500 m, 24 kWh	36,2	14,6	10,5
600 m, 53 kWh	35,0	8,0	4,2
2500 m, 53 kWh	35,4	11,0	6,7

Tabell A8 Icke-produktiv tid per fordon för bytesstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], ett batteri	Icke-produktiv tid [dygn], två batterier	Icke-produktiv tid [dygn], tre batterier
600 m, 24 kWh	17,9	17,9	11,9
2500 m, 24 kWh	20,8	19,3	14,6
600 m, 53 kWh	14,2	13,7	8,2
2500 m, 53 kWh	15,2	14,1	9,2

Följande tabeller redovisar det erhållna resultatet från simuleringarna vid användande av tre fordon.

Tabell A9 Investeringskostnader för bytesstation.

Antal batterier, lagringskapacitet	Kostnad batterier [kr]	Kostnad station [kr]	Kostnad fordon [kr]
Ett batteri, 24 kWh	181 990	52 597	2 355 853
Två batterier, 24 kWh	227 490	52 597	2 355 853
Tre batterier, 24 kWh	272 985	52 597	2 355 853
Fyra batterier, 24 kWh	318 480	52 597	2 355 853
Ett batteri, 53 kWh	478 050	52 597	2 355 853
Två batterier, 53 kWh	597 570	52 597	2 355 853
Tre batterier, 53 kWh	717 080	52 597	2 355 853
Fyra batterier, 53 kWh	836 590	52 597	2 355 853

Tabell A10 Investeringskostnader för en laddningsstation.

Laddningseffekt, lagringskapacitet	Kostnad batterier [kr]	Kostnad station [kr]	Kostnad fordon [kr]
22 kW, 24 kWh	136 490	17 890	2 355 843
60 kW, 24 kWh	136 490	301 440	2 355 843
100 kW, 24 kWh	136 490	328 860	2 355 843
22 kW, 53 kWh	358 540	17 890	2 355 843
60 kW, 53 kWh	358 540	301 440	2 355 843
100 kW, 53 kWh	358 540	328 860	2 355 843

Tabell A11 Investeringskostnader för två laddningsstationer.

Laddningseffekt, lagringskapacitet	Kostnad batterier [kr]	Kostnad station [kr]	Kostnad fordon [kr]
22 kW, 24 kWh	136 490	35 780	2 355 843
60 kW, 24 kWh	136 490	574 440	2 355 843
100 kW, 24 kWh	136 490	601 860	2 355 843
22 kW, 53 kWh	358 540	35 780	2 355 843
60 kW, 53 kWh	358 540	574 440	2 355 843
100 kW, 53 kWh	358 540	601 860	2 355 843

Tabell A12 Laddningscykler per batteri för bytesstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Antal laddningscykler, ett batteri	Antal laddningscykler, två batterier	Antal laddningscykler, tre batterier	Antal laddningscykler, fyra batterier
600 m, 24 kWh	369	295	246	211
2500 m, 24 kWh	384	307	256	219
600 m, 53 kWh	166	133	111	95
2500 m, 53 kWh	169	135	113	97

Tabell A13 Laddningscykler per fordon för laddningsstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Antal laddningscykler
600 m, 24 kWh	492
2500 m, 24 kWh	512
600 m, 53 kWh	221
2500 m, 53 kWh	225

Tabell A14 Icke-produktiv tid per fordon för laddningsstation.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 22 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 60 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 100 kW
600 m, 24 kWh	39,3	9,6	4,8
2500 m, 24 kWh	38,2	10,9	7,6
600 m, 53 kWh	39,5	9,4	4,5
2500 m, 53 kWh	39,4	10,3	5,3

Tabell A15 Icke-produktiv tid per fordon för två laddningsstationer.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 22 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 60 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 100 kW
600 m, 24 kWh	34,9	17,9	14,2
2500 m, 24 kWh	38,7	22,2	18,4
600 m, 53 kWh	33,9	16,8	13,1
2500 m, 53 kWh	35,7	18,8	14,7

Tabell A16 Icke-produktiv tid per fordon för laddningsstation med strategi 2.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 22 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 60 kW	Icke-produktiv tid [dygn], laddningseffekt 100 kW
600 m, 24 kWh	40,4	8,7	3,9
2500 m, 24 kWh	38,3	10,6	6,6
600 m, 53 kWh	39,4	9,1	3,3
2500 m, 53 kWh	39,5	10,0	4,8

Tabell A17 Icke-produktiv tid per fordon för bytestation.

Avstånd, lagringskapacitet	Icke- produktiv tid [dygn], ett batteri	Icke- produktiv tid [dygn], två batterier	Icke- produktiv tid [dygn], tre batterier	Icke- produktiv tid [dygn], fyra batterier
600 m, 24 kWh	22,4	15,0	14,0	11,3
2500 m, 24 kWh	23,4	17,2	15,0	13,3
600 m, 53 kWh	18,5	12,2	10,1	8,5
2500 m, 53 kWh	18,7	13,0	10,4	9,1

Följande tabeller redovisar det erhållna resultatet från simuleringarna vid användande av två samt tre fordon.

Tabell A18 Total energiförbrukning.

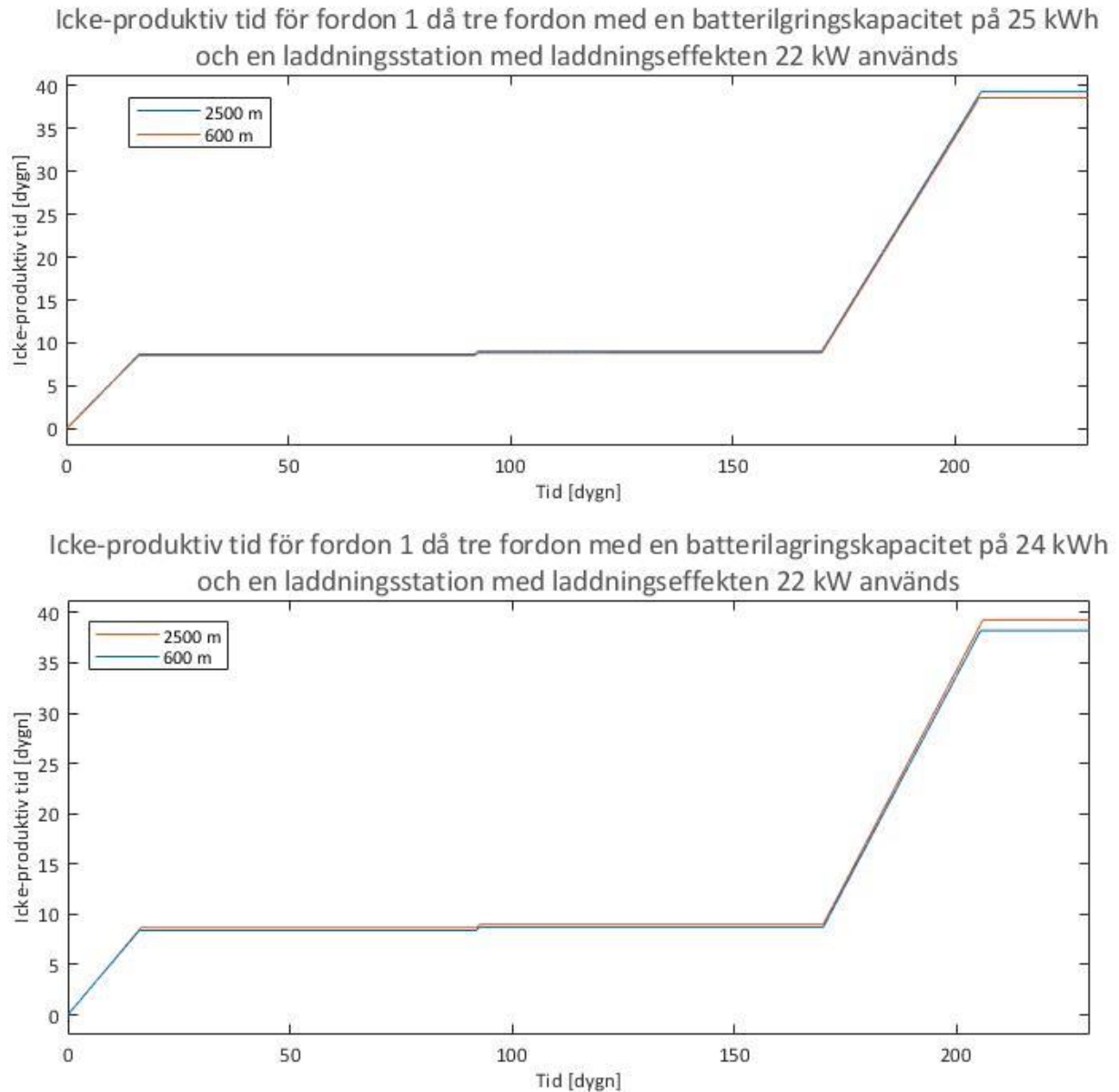
Avstånd, lagringskapacitet	Energiförbrukning [kWh]
600 m, 24 kWh	28 312
2500 m, 24 kWh	29 497
600 m, 53 kWh	28 124
2500 m, 53 kWh	28 662

Tabell A19 Elkostnad.

Avstånd, lagringskapacitet	Energiförbrukning [kr/år]
600 m, 24 kWh	10 475
2500 m, 24 kWh	10 914
600 m, 53 kWh	10 406
2500 m, 53 kWh	10 605

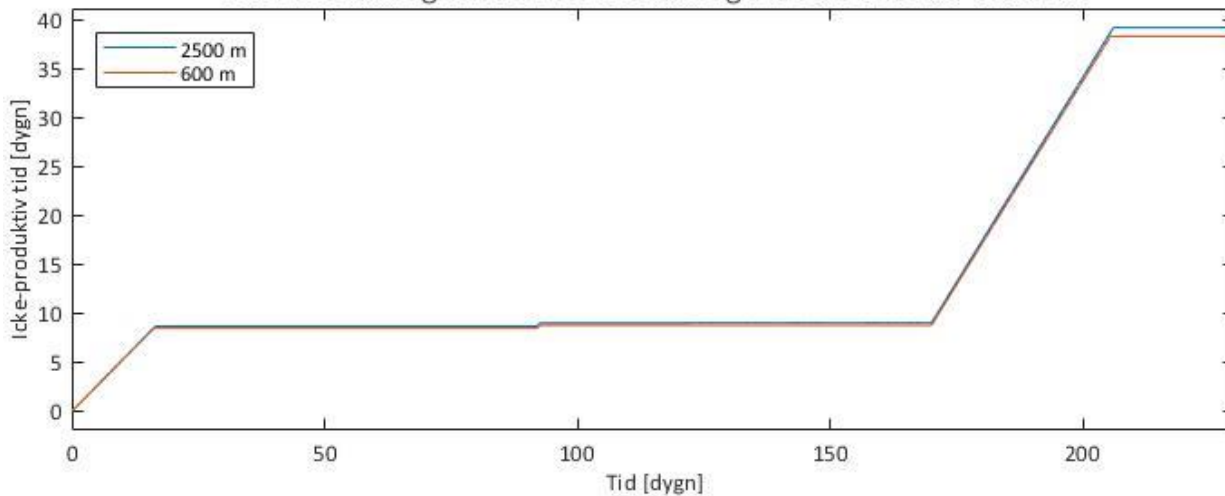
APPENDIX B: FIGURER

Figurer från undersökning av avstickande värde då tre fordon och en laddningsstation med laddningseffekten 22 kW används för den lägre batterilagringskapaciteten.

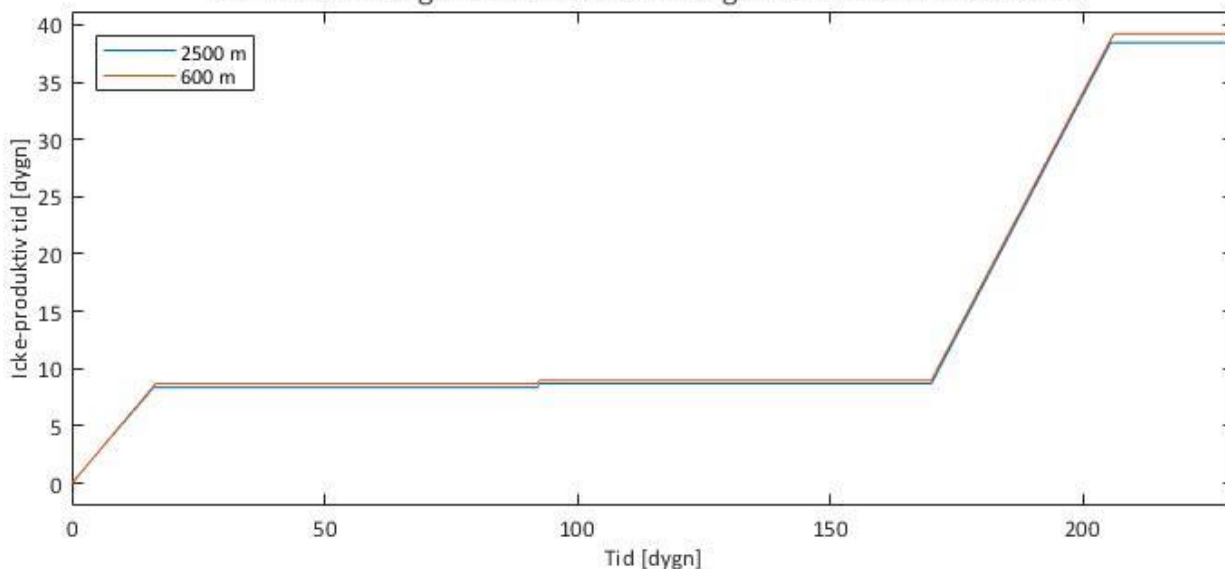


Figur B1 Den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordon 1 vid olika avstånd mellan fält och station då batteriets lagringskapacitet är 25 respektive 24 kWh. Tre fordon samt en station med laddningseffekten 22 kW används.

Icke-produktiv tid för fordon 1 då tre fordon med batterilagringskapacitet på 23 kWh och en laddningsstation med laddningseffekten 22 kW används



Icke-produktiv tid för fordon 1 då tre fordon med en batterilagringskapacitet på 22 kWh och en laddningsstation med laddningseffekten 22 kW används



Figur B2 Den ackumulerade icke-produktiva tiden för fordon 1 vid olika avstånd mellan fält och station då batteriets lagringskapacitet är 23 respektive 20 kWh. Tre fordon samt en station med laddningseffekten 22 kW används.

APPENDIX C: MATLAB-KOD

MATLAB-kod som användes för simuleringarna. Koden börjar med beräkning av indata till simuleringsmodellerna. Flera simuleringsmodeller skapades och varje variant hade en egen del av MATLAB-koden som genererar rätt indata till den specifika modellen. Då en modell simulerades fick endast den kod som var relaterad till den valda modellen köras i MATLAB, varpå en del av koden är bortkommenterad.

```
clear
%% ENERGIPARAMETRAR
%Batteristorlek (24,53) och vikt [kW] & [kg]
CB=55;

if CB == 24
    mB=152.4;
elseif CB == 53
    mB=249;
end

%Gårdsstorlek [ha]
S=200;
% Avståndet mellan station och fält (600, 2500) [m]
D=600;
%Laddarens effekt (22,60,100) [kW]
CL=22;
%Fordonets hastighet [km/h]
V=30;

% Antal batterier vid bytesstation (2,3,4 extra förutom de i fordonen)
% och hur många bytesstationer(1)
nb=1; nbs=1;
% Antal laddningsstationer (1,2)
ns=1;
% Tid att byta batteri
tb=0.006;

% Energin som åtgår för att köra mellan station och fält [kwh]
E=0.03*(2298.3525+mB)*9.81*D/(3.6*(10^6)); E=round(E,3);
% Tid att köra sträcka
T=((D/1000)/V/24)*2; T=round(T,3);

% Max/min energi som kan användas i batteriet och totala användbara
energin
Emax=(CB*0.9)-E; Emin=(CB*0.1)+E; EB=Emax-Emin; EB=round(EB,3);

% Ny Emin för Alt_Laddning (strategi 2). Blir en viss procent av
% tillgängliga energin
Ny=0.3;

% Effekt för varje fältoperation [kW]
SladdC=16; HarvC=57; GodselC=16; SaddC=39;
ValtC=16; OgrasC=16; StubbC=69; PlojC=54;
```



```

% Avverkningstakt för varje fältoperation [ha/h]
SladdA=3.67; HarvA=8; GodselA=11; SaddA=2.26; ValtA=3.67;
OgrasA=11; StubbA=1.25; PlojA=1.35;

% Energi per yta för varje fältoperation [kwh/ha]
SladdEY=SladdC/SladdA; HarvEY=HarvC/HarvA;
GodselEY=GodselC/GodselA; SaddEY=SaddC/SaddA;
ValtEY=ValtC/ValtA; OgrasEY=OgrasC/OgrasA;
StubbEY=StubbC/StubbA; PlojEY=PlojC/PlojA;

% Sänkt effekt som matchar motorn på fordonet [kw]
HarvC=50; StubbC=50; PlojC=50;

% Ny beräknad avverkningstakt med den lägre effekten [ha/h]
HarvA=HarvC/HarvEY; StubbA=StubbC/StubbEY;
PlojA=PlojC/PlojEY;

% Total tidsåtgång för varje fältoperation [d]
SladdT=inv(SladdA)*S/24; HarvT=inv(HarvA)*S/24;
GodselT=inv(GodselA)*S/24; SaddT=inv(SaddA)*S/24;
ValtT=inv(ValtA)*S/24; OgrasT=inv(OgrasA)*S/24;
StubbT=inv(StubbA)*S/24; PlojT=inv(PlojA)*S/24;

% Total energiåtgång för varje fältoperation [kwh]
SladdtotE=SladdEY*S; HarvtotE=HarvEY*S; GodseltotE=GodselEY*S;
SaddtotE=SaddEY*S; ValttotE=ValtEY*S; OgrastotE=OgrasEY*S;
StubbtotE=StubbEY*S; PlojtotE=PlojEY*S;

% Antal gånger fordonen behöver laddas för varje fältoperation
SladdN=SladdtotE/EB; SladdN=round(SladdN,3);
HarvN=HarvtotE/EB; HarvN=round(HarvN,3); GodselN=GodseltotE/EB;
GodselN=round(GodselN,3); SaddN=SaddtotE/EB; SaddN=round(SaddN,3);
ValtN=ValttotE/EB; ValtN=round(ValtN,3); OgrasN=OgrastotE/EB;
OgrasN=round(OgrasN,3); StubbN=StubbtotE/EB; StubbN=round(StubbN,3);
PlojN=PlojtotE/EB; PlojN=round(PlojN,3);

% Hur länge ett fordon kan jobba innan det behöver ladda för
% respektive fältoperation [d]
SladdD=EB/SladdC/24; HarvD=EB/HarvC/24; GodselD=EB/GodselC/24;
SaddD=EB/SaddC/24; ValtD=EB/ValtC/24; OgrasD=EB/OgrasC/24;
StubbD=EB/StubbC/24; PlojD=EB/PlojC/24;

% Step-size i simulering
s=0.001;

% För att få input till integratorn som motsvarar hur batterinivån
% sjunker måste SladdD delas med Step-size för att få fram antal
% simuleringsssteg
% som krävs. Sedan divideras den tillgängliga energin i batteriet (EB)
% med detta för att få steglängden i y-led. Därefter delas det med

```

```

% steglängden i x-led (Step-size) för att få fram input till
% integratorn.
SladdI=SladdD/s; HarvI=HarvD/s; GodselI=GodselD/s;
SaddI=SaddD/s; ValtI=ValtD/s; OgrasI=OgrasD/s;
StubbI=StubbD/s; PlojI=PlojD/s;
SladdI=EB/SladdI/s; HarvI=EB/HarvI/s; GodselI=EB/GodselI/s;
SaddI=EB/SaddI/s; ValtI=EB/ValtI/s; OgrasI=EB/OgrasI/s;
StubbI=EB/StubbI/s; PlojI=EB/PlojI/s;

% Blir samma värde för sladdning, godselspridning, vältning och
% ogräsbekämpning --> input1
% Samma värde för harvning, stubbearbetning och plöjning -->Input2
% Ett eget värde för sådd --> Input3
Input1=-round(SladdI,3);
Input2=-round(HarvI,3);
Input3=-round(SaddI,3);

% Tid det tar att ladda ett fordon [d]
TL=EB/CL/24;
TL=round(TL,3);

% För batteribytesstationen finns det en integrator som kontrollerar
% pausning av N-server. Tiden det tar att ladda (TL) divideras med
% Step-Size (s). Tillgängliga energin i batteriet (EB) divideras sedan
% med detta.
n=TL/s;
Input4=-EB/n/s; Input4=round(Input4,3);

% Tid för transport + tid för laddning
TTL=T+TL;

%% KOSTNADSPARAMETRAR
% Kostnad för ett batteri
if CB == 24
    kostB=45497.50;
elseif CB == 53
    kostB=119513.35;
end

% Kostnad för fler batterier
if nb == 1
    kostnB=kostB;
elseif nb == 2
    kostnB=2*kostB;
elseif nb == 3
    kostnB=3*kostB;
elseif nb == 4
    kostnB=4*kostB;
elseif nb == 5
    kostnB=5*kostB;
elseif nb ==6

```

```

    kostnB=6*kostB
end

% Kostnad för en laddningsstation och ökning av huvudsäkring
if CL == 22
    kostLS=17890;
    kostHS=0;
elseif CL == 60
    kostLS=273000;
    kostHS=43270-14830;
elseif CL == 100
    kostLS=273000;
    kostHS=70690-14830;
end

% Kostnad för bytesstation (2,94 % av laddningsstation)
kostBS=kostLS*2.94;
if nbs == 1
    kostBS=kostBS;
elseif nbs == 2
    kostBS=2*kostBS;
end

% Kostnad för fler laddningsstationer
if ns == 1
    kostnLS=kostLS;
elseif ns == 2
    kostnLS=2*kostLS;
elseif ns == 3
    kostnLS=3*kostLS;
end

% Elkostnader för brukning av fält
elpris=0.37; %[kr/kwh]
totelF=(SladdtotE+(2*HarvtotE)+(2*GodseltotE)+OgrastotE+PlojtotE+Saddt
otE+StubbtotE+ValttotE);
kostelF=totelF*elpris;

% Elkostnader för körning mellan fält och station
totelK=E*2*(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+SaddN+StubbN+Val
tN);
kostelK=totelK*elpris;

% Fordonskostnad + autonomt tillägg
kostF=335281+450000;

%% BATTERISTATIONER

%% SIMULERING BATTERIBYTESSTATION2
% in = Simulink.SimulationInput('Batteribytesstation2');
%
```

```

% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/E1','value',num2str(EB));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Emin1','value',num2str(Emin
));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Emax1','value',num2str(Emax
));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Input1','value',num2str(Inp
ut1));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Input2','value',num2str(Inp
ut2));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Input3','value',num2str(Inp
ut3));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Input4','value',num2str(Inp
ut4));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Bytesstation','Servicetime'
,num2str(tb));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Bytesstation','Numberofserv
ers',num2str(nbs));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/ValtN','value',num2str(Valt
N));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/HarvN','value',num2str(Harv
N));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/GodselN','value',num2str(Go
dselN));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/OgrasN','value',num2str(Ogr
asN));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/PlojN','value',num2str(Ploj
N));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/SaddN','value',num2str(Sadd
N));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/SladdN','value',num2str(Sla
ddN));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Stubbn','value',num2str(Stu
bbN));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Transport1','delay',num2str
(T));

```

```

% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Transport2','delay',num2str
(T));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Compare','value',num2str(nb
));
% in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation2/Counter1','value',num2str(n
b));
%
% out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')

% % EKONOMI BATTERIBYTESSTATION2
% Inkopskost=kostnB+kostBS+kostHS+(2*kostF)+(2*kostB)
% Kostnadbatterier=kostnB+(2*kostB)
% Kostnadstation=kostBS
% kostfordon=(2*kostF)
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING BATTERIBYTESSTATION2
% totalEnergi=totelF+totelK
%
BattericyklerPerBatteri=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+Sad
dN+StubbN+ValtN)/(nb+2);
% BattericyklerPerBatteri=round(BattericyklerPerBatteri)

%% SIMULERING BATTERIBYTESSTATION3
% in = Simulink.SimulationInput('Batteribytesstation3');
%
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/E1','value',num2str(EB));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Emin1','value',num2str(Emin
));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Emax1','value',num2str(Emax
));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Input1','value',num2str(Inp
ut1));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Input2','value',num2str(Inp
ut2));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Input3','value',num2str(Inp
ut3));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Input4','value',num2str(Inp
ut4));
%     in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Bytesstation','Servicetime'
,num2str(tb));

```

```

%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Bytesstation','Numberofserv
ers',num2str(nbs));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/ValtN','value',num2str(Valt
N));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/HarvN','value',num2str(Harv
N));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/GodselN','value',num2str(Go
dselN));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/OgrasN','value',num2str(Ogr
asN));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/PlojN','value',num2str(Ploj
N));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/SaddN','value',num2str(Sadd
N));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/SladdN','value',num2str(Sla
ddN));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Stubbn','value',num2str(Stu
bbN));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Transport1','delay',num2str
(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Transport2','delay',num2str
(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Transport3','delay',num2str
(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Compare','value',num2str(nb
));
%      in =
in.setBlockParameter('Batteribytesstation3/Counter1','value',num2str(n
b));
%
% out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')
%
% %EKONOMI BATTERIBYTESSTATION3
% Inkopskost=kostnB+kostBS+kostHS+(3*kostF)+ (3*kostB)
% kostbatteri=kostnB+(3*kostB)
% kostfordon=(3*kostF)
% koststation=kostBS
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING BATTERIBYTESSTATION3
% totalEnergi=totelF+totelK

```

```

%
BattericyklerPerBatteri=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+SaddN+StubbN+ValtN)/(nb+3);
% BattericyklerPerBatteri=round(BattericyklerPerBatteri)

%% ALTERNATIVA LADDNINGSSTATIONER (strategi 2)

%% SIMULERING ALT_LADDNINGSSTATION2
% in = Simulink.SimulationInput('Alt_Laddningsstation2');
%
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Emin1','value',num2str(Emin));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/E1','value',num2str(EB));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Gain','Gain',num2str(Ny));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Emax1','value',num2str(Emax));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Input1','value',num2str(Input1));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Input2','value',num2str(Input2));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Input3','value',num2str(Input3));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Laddningsstation','Service time',num2str(TL));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Laddningsstation','Number of servers',num2str(ns));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/ValtN','value',num2str(ValtN));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/HarvN','value',num2str(HarvN));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/GodselN','value',num2str(GodselN));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/OgrasN','value',num2str(OgrasN));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/PlojN','value',num2str(PlojN));
%     in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/SaddN','value',num2str(SaddN));

```

```

%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/SladdN','value',num2str(Sl
addN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Stubbn','value',num2str(St
ubbN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Transport1','delay',num2st
r(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation2/Transport2','delay',num2st
r(T));
%
% out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')
%
% % EKONOMI ALT_LADDNINGSSSTATION2
% Inkopskost=(2*kostB)+(2*kostF)+kostnLS+kostHS
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING ALT_LADDNINGSSSTATION2
% totalEnergi=totelF+totelK
%
BattericyklerPerFordon=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+Plojn+Sadd
N+Stubbn+ValtN)/2;
% BattericyklerPerFordon=round(BattericyklerPerFordon)

%% SIMULERING ALT_LADDNINGSSSTATION3
% in = Simulink.SimulationInput('Alt_Laddningsstation3');
%
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Emin1','value',num2str(Emi
n));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/E1','value',num2str(EB));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Gain','Gain',num2str(Ny));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Emax1','value',num2str(Emax
));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Input1','value',num2str(In
put1));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Input2','value',num2str(In
put2));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Input3','value',num2str(In
put3));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Laddningsstation','Service
time',num2str(TL));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Laddningsstation','Numero
fservers',num2str(ns));

```



```

%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/ValtN','value',num2str(Val
tN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/HarvN','value',num2str(Har
vN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/GodselN','value',num2str(G
odselN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/OgrasN','value',num2str(Og
rasN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/PlojN','value',num2str(Plo
jN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/SaddN','value',num2str(Sad
dN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/SladdN','value',num2str(Sl
addN));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Stubbn','value',num2str(St
ubbn));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Transport1','delay',num2st
r(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Transport2','delay',num2st
r(T));
%      in =
in.setBlockParameter('Alt_Laddningsstation3/Transport3','delay',num2st
r(T));
%
% out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')
%
% % EKONOMI ALT_LADDNINGSSSTATION3
% Inkopskost=(3*kostB)+kostnLS+kostHS+(3*kostF)
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING ALT_LADDNINGSSSTATION3
% totalEnergi=totelF+totelK
%
BatteryklerPerFordon=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+Sadd
N+Stubbn+ValtN)/3;
% BatteryklerPerFordon=round(BatteryklerPerFordon)

%% LADDNINGSSSTATIONER

%% SIMULERING LADDNINGSSSTATION2
% in = Simulink.SimulationInput('Laddningsstation2');
%

```

```

%
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Emin1','value',num2str(Emin));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Emax1','value',num2str(Emax));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Input1','value',num2str(Input1
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Input2','value',num2str(Input2
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Input3','value',num2str(Input3
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Laddningsstation','Servicetime
',num2str(TL));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Laddningsstation','Numberofser
vers',num2str(ns));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/ValtN','value',num2str(ValtN)
);
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/HarvN','value',num2str(HarvN)
);
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/GodselN','value',num2str(Godse
lN));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/OgrasN','value',num2str(OgrasN
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/PlojN','value',num2str(PlojN)
);
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/SaddN','value',num2str(SaddN)
);
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/SladdN','value',num2str(SladdN
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/StubbN','value',num2str(StubbN
));
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Transport1','delay',num2str(T)
);
%   in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation2/Transport2','delay',num2str(T)
);
%
%
% out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')

```

```

%
% % EKONOMI LADDNINGSSSTATION2
% Inkopskost=(2*kostB)+(2*kostF)+kostnLS+kostHS
% kostbatteri=(2*kostB)
% kostladdare=kostnLS+kostHS
% kostfodon=2*kostF
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING LADDNINGSSSTATION2
% totEnergi=totelF+totelK
%
BattericyklerPerFordon=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+Sadd
N+StubbN+ValtN)/2;
% BattericyklerPerFordon=round(BattericyklerPerFordon)

%% SIMULERING LADDNINGSSSTATION3
in = Simulink.SimulationInput('Laddningsstation3');

    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Emin1','value',num2str(Emin));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Emax1','value',num2str(Emax));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Input1','value',num2str(Input1
));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Input2','value',num2str(Input2
));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Input3','value',num2str(Input3
));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Laddningsstation','Servicetime
',num2str(TL));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Laddningsstation','Numberofser
vers',num2str(ns));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/ValtN','value',num2str(ValtN)
);
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/HarvN','value',num2str(HarvN)
);
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/GodselN','value',num2str(Godse
lN));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/OgrasN','value',num2str(OgrasN
));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/PlojN','value',num2str(PlojN)
);

```

```

    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/SaddN','value',num2str(SaddN))
;
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/SladdN','value',num2str(SladdN));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/StubbN','value',num2str(StubbN));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Transport1','delay',num2str(T));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Transport2','delay',num2str(T));
    in =
in.setBlockParameter('Laddningsstation3/Transport3','delay',num2str(T));

out = parsim(in,'ShowSimulationManager','on')

% %EKONOMI LADDNINGSSSTATION3
% Inkopskost=(3*kostB)+(3*kostF)+kostnLS+kostHS
% kostbatteri=(3*kostB)
% koststation=kostHS+kostnLS
% kostfordon=3*kostF
% Rorligkost=kostelF+kostelK
% % TOTAL ENERGIFÖRBRUKNING LADDNINGSSSTATION3
% totEnergi=totelF+totelK
%
BattericyklerPerFordon=(SladdN+(2*HarvN)+(2*GodselN)+OgrasN+PlojN+SaddN+StubbN+ValtN)/3;
% BattericyklerPerFordon=round(BattericyklerPerFordon)

```