

Dimensionering av laddningsdepå för tunga elektrifierade fordon

En ekonomisk och miljömässig skalbarhetsanalys

Automation och mekatronik, Elektroteknik, Teknisk Fysik

Hanna Ekeroth, Hampus Karlsson, Jakob Lindberg, Noah Lindow
Kerim Mahmutovic, Ella Sander

KANDIDATUPPSATS 2025

Dimensionering av laddningsdepå för tunga elektrifierade fordon

En ekonomisk och miljömässig skalbarhetsanalys

HANNA EKEROTH
HAMPUS KARLSSON
JAKOB LINDBERG
NOAH LINDOW
KERIM MAHMUTOVIC
ELLA SANDER



CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik (E2)
Elkraftteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025

© Hanna Ekeröth, Hampus Karlsson, Jakob Lindberg, Noah Lindow, Kerim Mahmutovic, Ella Sander, 2025.

Handledare: Torbjörn Thiringer, Meryem Ahouad, Elkraftteknik
Examinator: Jimmy Ehnberg, Elkraftteknik

Kandidatuppsats 2025
Institutionen för Elektroteknik (E2)
Elkraftteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Framsida: Bilden visar en visualisering av energiflödet i laddningsdepån

Skrivet i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2025

Sammandrag

Projektets syfte var att presentera ett förslag för en laddningsdepå med ett Battery Energy Storage System (BESS) där depåns effekttoppar minimeras. I rekommendationen skulle även ekonomiska och miljömässiga faktorer vägas in.

För att möjliggöra en tydlig analys och sätta upp ett ramverk för projektet presenterades tre scenarier. Dessa scenarier användes för att utforska nyttan med BESS och för att slutligen rekommendera en depådesign. Följande tre scenarier analyseras: Scenario 1 där det inte finns ett BESS och ingen av lastbilarna lunchladdar. Scenario 2 där sex av tio lastbilar lunchladdar med BESS. Scenario 3 där alla lastbilar lunchladdar med BESS. De tre scenarierna bedöms också i kombination med antingen 10 kV- eller 400 V elnätsanslutning.

Rapportens slutsats blev att scenario 3 är det rimligaste scenariot att implementera då det presterar bäst i hållbarhetsanalysen och näst bäst i ekonomianalysen. Att det i scenario 1 och 2 finns lastbilar som inte lunchladdar innebär också att batterierna för dessa scenarier väger ungefär 9 ton. Denna vikt ansågs orimlig vilket bidrog till att scenario 3 valdes. För scenario 3 valdes en 10 kV anslutningen då denna gav lägst månadsavgifter. För detta scenario krävs ett BESS med kapacitet på 3750 kWh.

Abstract

The purpose of the project is to present a proposal for a charging depot with a Battery Energy Storage System (BESS) where the depots maximum power is minimized. In the recommendation, economic and environmental effects are also considered.

To enable a clear analysis and establish a framework for the project, three scenarios are presented. These scenarios are used to explore the benefit of BESS and to finally recommend a depot design. The following three scenarios are analyzed: Scenario 1 where there is no BESS and no truck charges during lunch. Scenario 2 where six of ten trucks lunch charge with assistance of a BESS. Scenario 3 where all trucks lunch charge with assistance of a BESS. The three scenarios are also considered in combination with either a 10 kV or 400 V electrical grid connection.

The report concludes that scenario 3 is the most reasonable to implement since it performs best in the sustainability analysis and second-best in the economic analysis. In scenarios 1 and 2 there are trucks that do not charge during lunchtime which means that the batteries for these scenarios weigh approximately 9 tonnes. This weight is considered unreasonable and further contributes to the choice of scenario 3. For scenario 3 a 10 kV grid connection is selected because it has lower monthly fees. This scenario requires a BESS with a capacity of 3750 kWh.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte	1
1.2	Problemformulering	2
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar	3
2	Teori	4
2.1	Produktion, distribution och transformation i svenska elnätet	4
2.2	Effekttariffer	4
2.3	Generellt om batterier	5
2.4	Litiumjonbatterier	5
2.5	Batteridegradering	6
2.6	Ekvationer för beräknad batteristorlek i en lastbil	7
2.7	Dimensionering av BESS kapacitet i depån	8
2.8	Miljömässig aspekt	8
2.9	Nuvärdesmetoden och återbetalningstid	9
3	Metod	10
3.1	Tre scenarion	10
3.2	Tillvägagångssätt för litteraturanlys	11
3.3	Hantering av egna illustrationer och modeller	11
4	Resultat och analys	12
4.1	Litiumjonbatterier	12
4.2	Batteridegradering LFP	14
4.3	Ekonomiska elnätsförutsättningar	15
4.4	Lastbilsbatteriernas storlek	15
4.5	Scenario 1: Ingen lunchladdning	19
4.6	Scenario 2: Delvis lunchladdning	20
4.7	Scenario 3: Endast lunchladdning	22
4.8	Totala kostnader	26
4.9	Analys med nuvärdesmetoden och återbetalningstid	28
4.10	Miljömässig analys	29
5	Diskussion	31
5.1	Jämförelse mellan batterier och väteceller	31
5.2	Utvärdering av anslutningsalternativen	31
5.3	Återförsäljning av BESS	32
5.4	Fler inkomstkanaler för BESS	32
5.5	Second life batteries i BESS	33
5.6	Utvärdering av scenarion	33
6	Slutsats	35
7	Appendix	39

1 Introduktion

I juni 2024 hade 107 länder som tillsammans ansvarar för 82% av de globala växthusgasutsläppen skapat en plan och ett löfte för nettonollutsläpp[1]. Däribland finns EU-länderna som har ett bindande mål om nettonollutsläpp senast 2050[1]. För att kunna uppnå detta krävs det att användningen av fossila bränslen minskar och att i allt större utsträckning använda elektricitet[1]. I den här undersökningen kommer elektrifieringen att referera till övergången från fossila bränslen till elektrisk energi, en omställning som kräver både teknisk utveckling och förändring av infrastruktur.

En stor sektor som påverkas av elektrifieringen är transportsektorn där det idag sker stor teknisk utveckling inom tunga elektrifierade fordon - ellastbilar [2]. En viktig aspekt för att göra elektriska lastbilar till en genomförbar produkt i framtidens samhälle är en fungerande och utbyggd laddningsinfrastruktur.

Att plocka ut mycket energi under kort tid - att ladda tunga elfordon snabbt ställer höga krav på elnätet. Elnätet har begränsad kapacitet att leverera den energin vid specifika tider och platser[3]. Det är därför fördelaktigt att reducera den maximala effekten tagen från nätet och jämna ut den kontinuerliga elkonsumtionen hos sådana laddstationer.

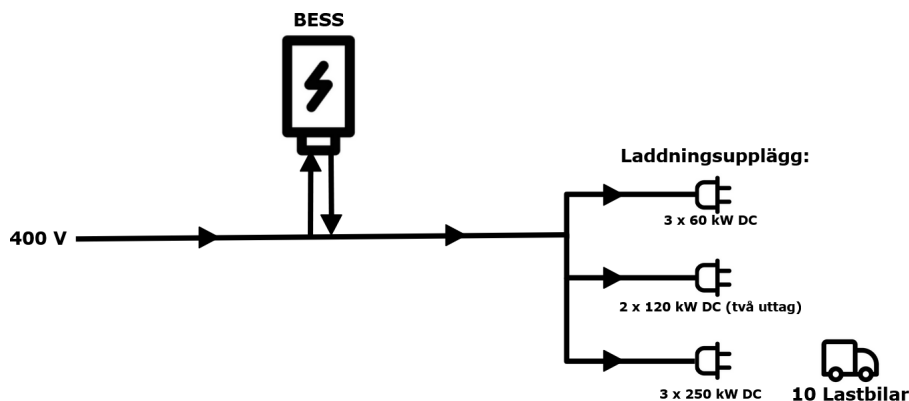
Ett sätt att jämna ut elkonsumtionen vid stora effektuttag är ett lokalt energilager, även kallat Battery Energy Storage System (BESS)[4]. Ett BESS är en batteribank som kan laddas kontinuerligt när lastbilarna inte gör det och stödja elnätet under korta perioder då hög effekt behöver plockas ut[4]. Detta reducerar den tillfälliga toppeffekten som annars skulle uppkomma när lastbilarna snabbbladdas. BESS möjliggör därigenom laddning om det är effektbrist i nätet, ger laddstationen möjlighet att ladda när elpriset är lågt och leder till att laddstationen kan använda en lägre säkringsnivå vilket reducerar kostnaden för laddstationen[5].

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att presentera generella rekommendationer för en laddningsdepå med ett BESS där maxeffektuttag minimeras. Resultatet utvärderar den ekonomiska och miljömässiga hållbarheten. För att uppnå detta syfte finns ett antal delmål som presenteras i form av frågeställningar. Sålunda är en central del i denna studie att kompensera effekttoppar i laddningsdepån så att den uttagna effekten från elnätet hålls på en jämnare nivå.

1.2 Problemformulering

Laddningsdepån med ett BESS är utformad efter vissa förutsättningar. Anläggningen används för att ladda tio elektriska lastbilar som nyttjas i kommersiellt syfte. Dessa fordon kör en sträcka på 600 km varje dag och utgår från Hisingen där depån är tänkt att placeras. Anläggningen har en baseffekt på 20 kW och laddarna använder sig av ett trefas 400 V system. På anläggningen finns totalt tio laddstationer med alla olika effekt. Laddningsmöjligheterna är: 3 x 60 kW, 2 x 120 kW (två uttag) samt 3 x 250 kW. Lastbilarna laddas med likström och alla lastbilar laddas under natten med en lägre effekt på upp till 60 kW per lastbil. Denna koppling illustreras med hjälp av figur 1 nedan.



Figur 1: Visualisering av energiflödet i depån.

1.3 Frågeställningar

Med detta i åtanke har ett antal frågeställningar konstruerats. Dessa undersöks och analyseras i rapporten och utvärderas slutligen i diskussionen.

1. Är den föreslagna lösningen lönsam utifrån ett ekonomiskt perspektiv och hållbar utifrån ett miljömässigt perspektiv.
2. Vilken storlek på batterierna i lastbilarna krävs för att de ska kunna genomföra sitt arbete?
3. Hur stor behöver energilagringsskapaciteten vara i depån?
4. Hur ska energin lagrad i depån fördelas under ett dygn för att bäst komplettera elnätet?

1.4 Avgränsningar

För att minska antalet variabler och göra projektet genomförbart inom de ramar som satts har följande avgränsningar tillämpats.

- Rapporten ser enbart till elektriskt drivna lastbilar. Alltså är hybridlastbilar inte något som tas i beaktning.
- Undersökningen använder sig av förenklade värden. Beräkningar kommer grunda sig på approximationer.
- Laddningsdepån antas operera med effektfaktor 1 ($\cos \varphi = 1$), det vill säga att endast aktiv effekt förbrukas och ingen reaktiv effekt förbrukas.
- Lastbilarnas vikt antas vara samma samt inkludera batteriets tyngd för att underlätta beräkningar.
- Lastbilsförarnas lunch är uppdelade i två lunchskift där varje skift är en timme lång, denna timme används för laddning.
- I denna rapport antas batterier i lastbilar och BESS vara förbrukade då 80% av originalkapacitet återstår samt att hela batteriet då säljs vidare till 40% av inköpspriset.
- Round Trip Efficiency (RTE) i BESS antas vara 100%, vilket innebär att det inte sker några energiförluster vid användning av BESS i depån.
- I jämförelsen mellan 400 V och 10 kV anslutning till elnätet utesluts kostnader associerade med den transformatorn som behövs i 10 kV fallet för att förse laddarna med 400 V.
- För förenklade beräkningar antas att batterier vid användning inte påverkar miljön mer än elektriciteten som används.
- En dollar (USD) antas motsvara 10 svenska kronor (SEK).

2 Teori

För att erhålla relevanta resultat och slutligen rekommendationer för framtiden behöver "state-of-the-art" bestämmas. Alltså hur ser tekniken ut idag och vad är nästa utvecklingssteg. Teoridelen syftar till att bestämma just detta och presentera relevanta modeller samt ekvationer som senare används för att analysera frågeställningarna.

2.1 Produktion, distribution och transformation i svenska elnätet

Enligt [6] produceras elektricitet i Sverige på olika sätt där de vanligaste metoderna är vattenkraft, kärnkraft och vindkraft. I artikeln framgår att den huvudsakliga produktionen sker i de nordliga delarna av landet och ofta på platser som är långt ifrån den tänkta användningsplatsen. Från detta uppstår ett behov av att transportera elektricitet stora avstånd för att tillgodose behov i olika delar av landet.

I [7] förklaras det hur distributionen av elektricitet sker i flera steg. Det första är transport via stamnätet. Här transporteras elektricitet med hög spänning, 400 kV, långa avstånd med små förluster. Även om Sverige har en överproduktion på elektricitet över tid, uppstår det situationer med effektbrist framförallt i de södra delarna. Detta är på grund av att stamnätet har en begränsad överföringskapacitet, vilket leder till en flaskhals i distribueringen mellan norr och söder under perioder med högt effektuttag. I regionnätet distribueras elektricitet med lägre spänning, 42-152 kV, ut till större städer och industrier. Slutligen används lokalnätet där elektricitet med spänning från 400 V till 20 kV når hushåll och småföretag.

För att ha möjligheten att transportera elektricitet vid olika spänningsnivåer, från höga spänningsnivåer i stamnätet ner till de låga spänningar som används i hushållen, används transformatorer. En transformator är en spänningsnivåomvandlare. I [8] förklaras det hur transformatorn ändrar förhållandet mellan spänning och ström vilket möjliggör att samma elektriska system kan användas för flera olika applikationer. Transformatorn består huvudsakligen av tre komponenter, en primärspole, sekundärspole samt en järnkärna. Det som sker när en transformator används är att den överför elektrisk energi mellan de olika spolarna genom elektrisk induktion. När växelström passerar genom primärspolen skapas ett varierande magnetfält. Järnkärnan kanaliserar detta magnetfält och leder det vidare till sekundärspolen där en spänning induceras. Förhållandet mellan antalet varv i primärspolen och sekundärspolen avgör om spänningen ökar eller minskar.

2.2 Effekttariffer

Enligt [9] är effekttariffer ett viktigt verktyg när det kommer till att jämna ut effekttoppar. Tarifferna medför att konsumentens elavgift inte endast baseras på hur mycket el som förbrukas utan även hur höga effekttoppar som uppnås. Effektbaserad prissättning används som ett styrmedel och incitament för konsumenten att försöka sprida ut sin effektanvändning under dygnet. Det finns huvudsak två delar av distributionsnätet i Sverige, ett högspänningsnät på 10 kV mer riktat åt större kunder där förbrukningen är mer förutsägbar. Samt ett 400 V-nät som riktar sig mer åt mindre elkunder så som hushåll, butiker och mindre företag.

Effekttarifferna skiljer sig enligt [9] mellan dessa två spänningsnivåer. För 400 V-nät är tarifferna generellt sett högre jämfört med 10 kV nätet. Detta beror på att nätbolagen har högre kostnad per levererad kilowattimme. Några faktorer som orsakar den högre kostnaden är större förluster vid överföring, högre investerings- och driftkostnader per kund samt att alla kunder delar på nätets kostnad. Mindre kunder så som hushåll har även mindre förutsägbara belastningsmönster. Detta betyder att nätet måste dimensioneras så att det kan hantera stora variationer i effektuttag.

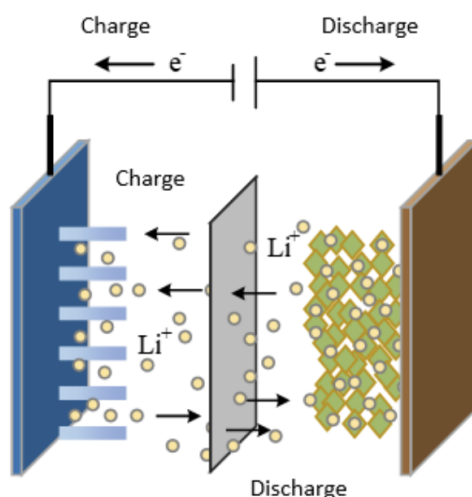
På 10 kV-anslutningen däremot är tarifferna generellt lägre då det är lättare att optimera nätet [10]. De kunder som är anslutna på denna nivå är ofta industrier eller större verksamheter med en mer jämn och förutsägbar förbrukning. Detta underlättar för nätbolagen att dimensionera nätet optimalt och man kan därmed ha en lägre kostnad. Nätet behöver inte ta hänsyn till samma typ av variation i effektuttaget. En annan faktor är att större verksamheter som är anslutna till 10 kV-nätet har sin egen transformator vilket gör både investerings- och driftkostnaderna lägre för nätbolagen. Samma typ av förlust vid överföring sker inte heller då överföringen sker snabbt i högspänningsnätet. Genom att ha lägre tariffer på högspänningsnivå ger nätbolagen också incitament till större konsumenter att välja denna anslutningsnivå.

2.3 Generellt om batterier

Enligt [11] är batterier en anordning som används för att lagra energi. Det som sker är att elektrisk ström som kommer in i batteriet omvandlas till kemisk potential. Ett batteri består av två elektriska terminaler kallade elektroder. Den negativt laddade elektroden kallas anod och den positivt laddade för katod. Mellan dessa finns en vätska som kallas elektrolyt där en separator är placerad. När ett batteri laddas rör sig elektroner genom kretsen samtidigt som joner rör sig genom elektrolyten. I ett batteri kan elektroner och joner röra sig i båda riktningar genom kretsen och elektrolyten. När elektronerna rör sig från katoden till anoden ökar den kemiska potentiella energin, vilket laddar batteriet. När elektronerna istället rör sig i motsatt riktning omvandlas den lagrade kemiska energin till elektrisk energi i kretsen och batteriet laddas ur.

2.4 Litiumjonbatterier

Enligt [12] kan litiumjonbatterier karakteriseras som ett energilagringssystem vilket förlitar sig på insättningsreaktioner i båda elektroderna där litiumjoner fungerar som laddningsbärare. En separator används för att låta litiumjoner passera mellan elektroderna och förhindra kortslutning. Detta visas i figur 2, med illustrerade transportriktningar av joner när batteriet betar sig som en energikälla. Elektroner rör sig från anod till katod via en sluten krets samtidigt som litiumjoner rör sig från anod till katod via elektrolyten för att behålla laddningsneutralitet.



Figur 2: Illustration på hur elektroner och litiumjoner transporteras i ett litiumjonbatteri.

Det finns olika typer av litiumjonbatterier, där de största skillnaderna ligger i materialen katoden består av. I artikel [12] presenteras sex stycken olika katodkemier; Litium Kobolt Oxid (LiCoO_2), Litium Nickel Oxid (LiNiO_2), Litium Mangan Oxid (LiMn_2O_2), Litium Järn Fosfat (LiFePO_2), Litium Nickel Mangan Kobolt Oxid ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$) och Litium Nickel Cobolt Aluminium Oxid ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$). Dessutom visar artikel [13] att litiumjonbatterier ligger högt rankade när det gäller Coulombisk Effektivitet (CE), även kallat laddningseffektivitet. Detta är förhållandet mellan total uttagen laddning från batteriet och total laddning givet till batteriet över en full cykel i uppladdningsbara batterier. Enligt [13] har litiumjonbatterier en CE som når över 99% och förbättras efter fler cykler. För att bevisa detta cyklades litiumjonbatterier i 18650-format från Panasonic, E-one Moli, Sony, LG och Samsung. Några gick från 99,1% till 99,5% efter 15 cykler och några från 99,5% till 99,9% efter 30 cykler. Kontinuiteten i repeterade tester var hög och detta tyder på att litiumjoner är ett stabilt batterisystem.

2.5 Batteridegradering

Batterier är förbrukningsbara komponenter som har ett begränsat antal laddnings- och urladdningscykler. Efter en viss period blir kapaciteten samt prestanda sämre och detta kan leda till att batteriet behöver bytas ut. I artikel [14] förklaras att termen State of Health (SoH) används för att kvantifiera detta. Det är alltså ett mått på hur det nuvarande batteriets kapacitet skiljer sig från dess nominella värde. Vidare tydliggör författarna att när det kommer till batteridegradering finns det många faktorer som påverkar hur snabbt och hur mycket ett batteri degraderar. Några av dessa faktorer är antalet cykler batteriet går igenom, State of Charge (SoC), temperatur, C-tal och Depth of Discharge (DoD).

I artikel [15] beskrivs innebörden av dessa begrepp. Här specificeras att SoC visar hur mycket laddning batteriet har och anges i en procentandel mellan 0-100%. DoD är ett mått på hur djupt ett batteri cyklas, d.v.s går ett batteri från 80% till 15% är DoD 65%. Dessutom förklarar författaren att hastigheten ett batteri kan laddas eller urladdas beskrivs med ett C-tal. 1C innebär att batteriet laddas ur fullständigt på 1h om det levererar sin fulla kapacitet uttryckt i amperetimmar. Om batteriet istället levererar halva sin kapacitet tar det dubbelt så lång tid att ladda ur. På samma sätt innebär ett högre C-tal, t.ex. 2C, att batteriet laddas ur på 30 minuter om det kontinuerligt levererar sin maxkapacitet.

Enligt [16] kan C-tal beräknas med följande formel

$$C_{\text{tal}} = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

där C_{tal} är C-tal, P är effekten som batteriet laddas eller urladdas med och S är batteriets storlek/kapacitet.

Temperatur är en faktor som påverkar batteriet både vid användning och när batteriet är passivt. Enligt [17] skapas värme då batteriet laddas och urladdas. Mängden värme som skapas beror vid laddning till stor del av hur snabbt denna laddning sker, alltså vid högre laddningshastigheter genereras mer värme. Värmen ökar risken för skador på elektrolyten och kemiska reaktioner. Artikel [18] påpekar att nedbrytningshastigheten fördubblas för varje 10°C. Exempelvis, om ett batteri skulle hålla i 10 år vid 25°C kommer det endast att hålla i 5 år vid 35°C. Enligt [17] innebär även extremt låga temperaturer försämringar för batteriet. Vid 0°C och lägre bromsas litiumjonerna ner. Detta är särskilt farligt vid snabbaddning då litium kan försvinna ur batteriets aktiva kretslopp och försämra batteriets kapacitet permanent.

Antalet cykler batteriet genomgått påverkar dess laddningskapacitet mycket enligt [18] då struktur och materialkomposition förändras varje gång litiumjoner flyttas mellan anod och katod. En annan faktor som påverkar batteriets åldrande är mekanisk stress som till stor

del orsakas av DoD. Vid varje laddning och urladdning av batteriet sker expansion och kontraktion av elektroderna. Dessa kontraktioner och expansioner orsakar mikrosprickor i materialet samt gör så att det uppstår förlorad elektrisk kontakt i vissa delar. Den mekaniska stressen blir värre vid stora DoD. Vilket leder till att cykler med djupa urladdningar och höga laddningar sliter mer på batteriet. Ett batteri som laddas relativt snabbt och djupt sägs då genomgå fler ekvivalenta cykler än vid långsammare och grundare laddning. Antal ekvivalenta cykler under en tid definieras

$$\#n = \frac{L + U}{2E}, \quad (2)$$

där $\#n$ är antal ekvivalenta cykler, L är total energi laddad, U är total energi urladdad och E är batteriets kapacitet.

Med hjälp av [19] tas en förenklad åldringsmodell fram för att kunna observera batteriers åldrande mer konkret

$$C_n = C_0 e^{-kn}. \quad (3)$$

Här är C_0 batteriets initiala kapacitet, C_n är batteriets kapacitet efter n ekvivalenta cykler och k är degraderingskonstanten som mäts i nedbrytningshastighet per ekvivalent cykel.

2.6 Ekvationer för beräknad batteristorlek i en lastbil

För att avgöra batteristorleken S som krävs för en lastbil som kör en viss sträcka utan att laddas kan följande ekvation användas,

$$S = e \frac{d}{(l_{\max} - l_{\min})c}. \quad (4)$$

Variabeln e motsvarar den energiförbrukning per kilometer som lastbilen förbrukar vilket mäts i kWh/km. Konstanten c anger vid vilken nivå batteriet anses ha degraderat så mycket att det är förbrukat. Om batteriet exempelvis degraderat till 80% blir $c = 0.8$. Faktorn d i ekvationen står för den totala körsträckan per arbetsdag i kilometer. Slutligen motsvarar l_{\max} batteriets SoC i början av arbetsdagen och l_{\min} batteriets SoC i slutet av dagen. Skillnaden mellan dessa visar hur stor del av batteriets totala kapacitet som utnyttjas. Genom att dividera den totala körsträckan med den tillgängliga procentandelen av batteriets kapacitet fås den körsträcka som lastbilen teoretiskt kan köra.

För de lastbilar som snabbbladdar under lunchen behöver en separat beräkning göras för att bestämma batteristorleken. Om batteristorleken åter betecknas med variabeln S och batteriets SoC rör sig från l_{\max} i början av arbetsdagen till l_{\min} urladdat i slutet av arbetsdagen kan detta beräknas med sambandet

$$l_{\max}S - e\frac{d}{2} + q - e\frac{d}{2} = l_{\min}S \quad (5)$$

$$S = \frac{ed - q}{l_{\max} - l_{\min}}. \quad (6)$$

I (5) som sedan skrivs om till (6) avser d hela dagens körsträcka där halva sträckan körs innan lunch och halva efter. Körsträckan multiplicerad med fordonets energiförbrukning per kilometer ger den energi som förbrukas innan nästa laddning. Under lunchen laddas fordonet under en timme med q kW. Genom att lösa ut S ur (5) kan alltså batteristorleken för en lunchladdande lastbil bestämmas. Ett problem med (6) är att den inte lämnar någon

marginal för batteriets degradering över tid. Därför har följande samband utvecklats utifrån denna

$$S = \left(\frac{ed - q}{l_{\max} - l_{\min}} \right) \frac{1}{c}. \quad (7)$$

Detta uttryck härstammar alltså från (6) där S har lösts ut, men en division har adderats. Precis som i (4) representerar c vid vilken nivå batteriet anses ha degraderat så mycket att det är förbrukat. På detta sätt tas batteriets degradering i beaktning i detta uttryck.

2.7 Dimensionering av BESS kapacitet i depån

För att avgöra lämplig kapacitet på BESS för ett givet scenario har följande uttryck tagits fram

$$E_{\text{BESS,BOL}} = \frac{u}{c(l_{\max} - l_{\min})}, \quad (8)$$

där $E_{\text{BESS,BOL}}$ är BESS kapacitet vid Beginning Of Life (BOL) och u är BESS djupaste laddning/urladdning under ett dygn. Variabeln u bestäms av hur BESS används och ska säkerställa att den kan möta efterfrågan på energi.

2.8 Miljömässig aspekt

En viktig aspekt i varje produkt och design är hur ekologiskt hållbar den är. När det gäller att bedöma en produkts miljömässiga påverkan används ofta något som kallas livscykelanalys (LCA). Det finns olika typer av LCA och i [20] presenteras fyra stycken: vagger-till-grav, vagger-till-vagger, vagger-till-grind och källa-till-hjul. Vagger-till-grav är den traditionella typen från utvinning av material till avyttring av produkt. Vagger-till-vagger är en ny typ av LCA där avfallshantering och återvinning beaktas. Detta cirkulära tänk med återanvändning har blivit vanligt i dagens samhälle. Vagger-till-grind är en del av den traditionella LCA:n, men slutar när produkten lämnar fabriken. Källa-till-hjul är en typ av LCA som lämpar sig bäst för fordon då resultatet heltäckande utvärderar utsläppen för fordonet.

Ett vanligt mått vid analys av miljöpåverkan är Greenhouse Gas (GHG), ett utsläpp som mäts i koldioxidekvivalenter ($\text{CO}_{2\text{ekv}}$). I [20] står det att olika typer av litiumjonbatterier har olika miljöpåverkan. Detta beror främst på att vissa av materialen som katoden tillverkas av kräver mycket energi vid brytning och bearbetning[20].

Vidare visar tabell 1 olika energikällors bidrag till sveriges elproduktion under 2024 [21].

Tabell 1: Sveriges elproduktion år 2024 [21]

Energikälla	Summa [GWh]	Andel [%]
Värme kraft, icke-förnybart	1 653	1
Värme kraft, förnybart	10 109	6
Vindkraft	40 819	24
Vattenkraft	64 380	38
Solkraft	4 145	2
Kärnkraft	48 733	29
Total elproduktion	169839	100

Utifrån denna tabell kan det konstateras att endast den icke-förnybara värmekraften som utgör 1% av elproduktionen har en negativ miljöpåverkan. Enligt [22] motsvarar tillverkning av en kWh, ett utsläpp av 0.94 kg $\text{CO}_{2\text{ekv}}$ i ett värmekraftverk drivet av kol.

Utsläppen vid tillverkning av ett litiumjonbatteri kan beräknas enligt

$$U_t = Sv \quad (9)$$

där U_t är totala utsläppen i kg $\text{CO}_{2\text{ekv}}$ vid tillverkning av batteriet, S är batteristorleken i kWh och v är utsläppen i kg $\text{CO}_{2\text{ekv}}$ /kWh för tillverkning av batteriet. Vid analys av batterianvändning kan utsläppen per år för ett litiumjonbatteri istället beräknas

$$U_a = xakfwm \quad (10)$$

där U_a är totala utsläppen i kg $\text{CO}_{2\text{ekv}}$ /år, x är antalet lastbilsbatterier, a är antal arbetsdagar per år, k är daglig körsträcka i km, f är förbrukningen i kWh/km, w är utsläpp i kg $\text{CO}_{2\text{ekv}}$ per tillverkad kWh elektricitet och m är procentandelen av den använda elektriciteten som bidrar negativt till miljön.

2.9 Nuvärdesmetoden och återbetalningstid

För att värdera investeringar eller projekt används en metod kallad nuvärdesmetoden (NVM)[23]. NVM beräknar hur mycket framtida investeringar, både inkomster och utgifter, är värda idag. Metoden bygger på principen att pengar idag är mer värda än pengar i framtiden, eftersom pengar kan investeras och växa över tid. Formeln för detta är

$$NVM = \sum_{t=1}^{\text{livslängd}} \frac{K_t}{(1+r)^t} - K_0, \quad (11)$$

där K_0 är den initiala investeringen. Diskonteringsräntan är den räntesats som används för att räkna om framtida pengar till dagens värde, där en hög procentsats innebär att framtida pengar blir mindre värda idag. På samma sätt innebär en låg procentsats att framtida pengar nästan är lika mycket värda som de är idag. För stora företag med en stabil verksamhet används ofta en räntesats på 7%[24]. I (11) betecknas diskonteringsräntan som r . K_t är kassaflödet vid tidpunkten t , mätt i år. Kassaflödet beräknas

$$K = \text{Intäkter} - \text{Utgifter}. \quad (12)$$

Följande villkor gäller för det värde på NVM som fås via (11).

$$NVM = \begin{cases} > 0 & \text{Projektet eller investeringen kan vara lönsam} \\ < 0 & \text{Projektet eller investeringen är troligen inte lönsam} \\ = 0 & \text{Projektet eller investeringen är varken lönsamt eller kostsamt} \end{cases}$$

Slutligen används

$$\text{Återbetalningstid} = \frac{K_0}{\bar{K}_t}, \quad (13)$$

för att bestämma hur lång tid det tar för investeringen att betala av sig och potentiellt bli lönsam[23].

3 Metod

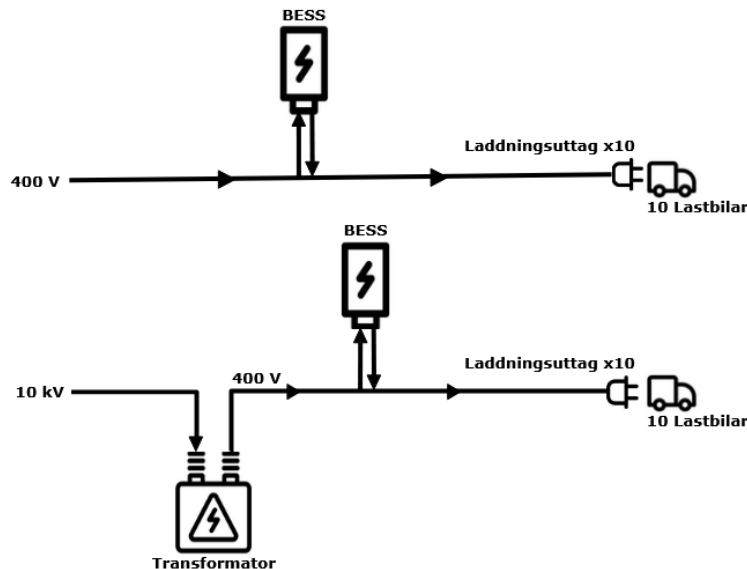
Denna studie innefattar många variabler vilket gör den vetenskapliga analysen komplex. Aspekter som effektivitet av energilagring, ekonomisk lönsamhet samt miljöpåverkan ska alla utvärderas. För att möjliggöra en tydligare analys samt strukturera arbetet har tre scenarion utformats. Dessa används som grund för att besvara frågeställningarna och dessutom ge en bättre inblick till när det blir som mest lönsamt att utnyttja ett BESS i en laddningsdepå.

3.1 Tre scenarion

Sträckan varje lastbil kör per dag är satt till 600 km. Hur ofta och vilken tid på dygnet fordonet laddas har en direkt påverkan på hur mycket ett BESS utnyttjas. För en längre körsträcka utan laddning krävs ett större batteri i lastbilarna. Om en lunchladdning planeras varje dag kan batteristorleken minskas eftersom bara halva körsträckan avverkas innan ytterligare laddning. För att kunna analysera i vilken tillämpningsgrad ett BESS är mest lönsamt har följande tre scenarion utformats:

1. Inga av lastbilarna laddas under lunchen. Istället används ett större batteri som klarar av en hel dags körsträcka utan att laddas under dagen. En central del i denna rapport innefattar den ekonomiska lönsamheten med ett energilagringssystem i en laddningsdepå. Därför analyseras detta scenario för att ge en bättre helhetsbild av eventuella vinster och förluster med att utesluta ett BESS helt från laddningsdepån.
2. Av de tio lastbilarna som kör varje dag laddas totalt sex lastbilar över lunchen i två omgångar. Lunchladdningen är därmed två timmar lång där tre lastbilar laddas under första timmen och tre nya laddas under den andra. BESS används under denna snabbbladdning men alltså enbart till sex lastbilars lunchladdning.
3. Samtliga lastbilar laddas under lunchen och har mindre batterier. BESS används i större utsträckning. Här antas att det finns fem st ladduttag med 250 kW så att alla kan snabbladdas.

Dessa tre scenarion ska sedan utvärderas vid anslutning till 400 V respektive 10 kV nät, sex varianter kommer därigenom utvärderas. Tre scenarion med två anslutningsalternativ.



Figur 3: Systembild på allternativen 400V nätanslutning och 10kV anslutning.

3.2 Tillvägagångssätt för litteraturanlys

Litteraturanalysen baseras på rapporter och artiklar av såväl populärvetenskaplig som vetenskaplig karaktär. Valet av dessa är specifikt inriktat på att besvara frågeställningarna och har därmed styrts av vilken information som behövs för att skapa en bra grund till beräkningar och modellering. När frågeställningarna fastställts bröts dessa ner i mindre frågor och sammanställdes i en tankekarta för att ge en tydligare överblick för arbetets fokus. Arbetsförloppet i denna tankekarta återfinns i rubrikernas struktur i detta dokument. Scopus samt Scopus AI användes primärt för att hitta vetenskapliga artiklar och avhandlingar.

3.3 Hantering av egna illustrationer och modeller

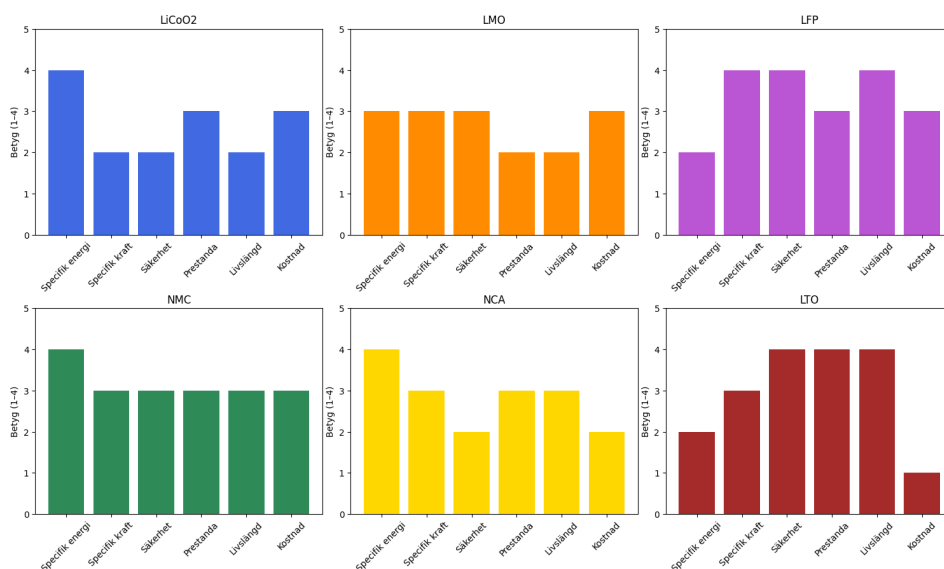
I projektet används illustrationer och modeller för att presentera resultat och göra jämförelser baserat på faktainsamlingen som har gjorts. Framtagandet av dessa har främst skett med hjälp av egenutvecklade program i Python.

4 Resultat och analys

Denna undersökning använder rapporter och artiklar för att utvärdera tillgängliga tekniker som finns idag och hur de kan användas i laddningsdepån. Med stöd av teorin ges djupare förståelse vilket i sin tur styr hur depån designas. Utöver detta skapas egna modeller för att identifiera mönster och samband utifrån de tre scenarion som analysen baseras på.

4.1 Litiumjonbatterier

I [12] hävdas att det i dagsläget inte finns någon egentlig utmanare till litiumjonbatteriet. Figur 4 är framtagen med hjälp av data från samma artikel och jämför olika katodkemier i litiumjonbatterier för elektriska fordon med hänsyn till flera aspekter. Ju högre sammanlagd stapel för respektive graf desto mer önskvärdt är batteriet. De aspekter som tas i beaktning är specifik energi, specifik kraft, säkerhet, prestanda, livslängd och kostnad. Specifik energi är energi per viktenhet, vilket bestämmer räckvidden. Specifik kraft innebär förmågan att leverera mycket ström, vilket avgör potentiell acceleration. Säkerhet är en central aspekt när det gäller batterier i elektriska fordon då för många olyckor kan ändra allmänhetens idag positiva åsikter om elektriska fordon. Prestanda syftar till vilket skick batteriet har när det används i extrema temperaturförhållanden. Livslängden reflekterar antalet cykler batteriet kan fullborda. Kostnaden innefattar teknologins genomförbarhet, med nödvändiga säkerhetssystem, batterihantering för övervakning av laddningstillstånd, klimatkontroll för längre livslängd samt 8-10 års garanti som bidrar till denna utmaning.



Figur 4: Jämförelse av sex olika typer av litiumjonbatterier som används i elektriska fordon. Det är tre av batterierna som sticker ut, Litium Nickel Mangan Kobolt Oxid (NMC), Litium Nickel Kobolt Aluminium Oxid (NCA) och Litium Järn Fosfat (LFP).

Som Figur 4 visar är det tre av batterierna som utmärker sig lite extra, nämligen NMC, NCA och LFP. I [12] skrivs det att NMC designas för att få hög specifik energi eller kraft med hög densitet. Orsaken till detta är kombinationen av nickel och mangan. Nickel har hög specifik energi men låg stabilitet. Mangan formar en spinell, vilket är en mineral där syre ingår i en kubisk kristallstruktur. Denna spinellstruktur ger låg inre resistans men har däremot låg specifik energi. Fördelningen av materialen i batteriet varierar hos olika tillverkare som har gått från NMC111 till NMC442 till NMC622 till numera NMC811. Siffrorna

anger fördelningen mellan nickel, mangan och kobolt, där t.ex NMC811 innebär 80% nickel, 10% mangan och 10% kobolt. NCA-batterier har likheter med NMC-batterier i och med dess höga specifika energi och höga specifika kraft, samt långa livslängd. I jämförelse med de andra batterityperna är NCA inte lika säkert, vilket gör att de behöver ytterligare säkerhetssystem för att bättre lämpa sig i elektrifierade fordon. Det kostar dessutom mer att tillverka ett NCA-batteri i jämförelse med andra. LFP-batterier erbjuder god elektrokemisk prestanda med låg resistans, hög toppström och lång livslängd. Fosfatet hjälper till att stabilisera elektroden mot överladdning och ger en högre tolerans mot värme, vilket begränsar nedbrytning av materialet. LFP-batterier har ett brett temperaturspann, de kan användas mellan +60°C till -30°C och har låg sannolikhet att utsättas för temperaturrusning. Temperaturrusning är ett tillstånd där ökad temperatur leder till intensivare kemiska reaktioner som i sin tur leder till ökad temperatur, en okontrollerad ond spiral. I [17] skriver författarna att LFP har låg yttemperatur över hela laddningscykeln vilket gör det till ett termiskt stabilt system. Från [12] nämns att LFP-batterier med dess höga effekt i proportion till vikt, höga säkerhet och kemins begränsning av temperaturrusning gör dem populära i elfordon.

För att få en tydlig överblick över hur kemierna skiljer sig åt presenteras tabell 2. Den bör inte ses som definitiv utan mer som ett riktvärde baserad på tillgänglig information[25]. För att få ett definitivt pris och livslängd behövs att en offert till batteriåterförsäljare skickas in. Informationen i tabellen hänvisar till cellnivå för de olika kemierna. Med livslängd menas hur många cykler det tar för batteriet att nå 80% kapacitet.

Tabell 2: Jämförelse av de sex olika litiumjonkemierna[25].

Batterityp	Pris/kWh USD	Energitäthet Wh/kg	Livslängd Cykler
NMC	100	250	3000
NCA	120	260	2000
LFP	80	160	3500
LCO	150	250	<1000
LMO	120	150	1000
LTO	200	110	>7000

Ur tabell 2 konstateras att NMC och NCA har liknande priser på grund av snarlika katodkemier. LMO är också prisvärd men har en kort livslängd. LCO har en hög andel kobolt vilket gör den dyrare än övriga batterier. LFP är det mest prisvärda med en hög livslängd.

Litiumjonbatterier har en viss miljöpåverkan, dels vid tillverkning och dels vid användning. I [20] används GHG-utsläpp för att jämföra de olika batteriernas miljöpåverkan och i tabell 3 presenteras utsläppen i CO_{2ekv} vid tillverkning av de tre batterityper som hittills varit de bästa alternativen för projektets ändamål.

Tabell 3: Utsläpp av kg CO_{2ekv}/kWh i olika steg vid tillverkning av NMC-811, NCA och LFP litiumjonbatterier[20].

Batterityp	GHG [kg CO _{2ekv} /kWh]			
	Katod	Montering	Annat	Total
NMC-811	39.86	27.65	19.12	86.63
NCA	33.11	28.42	17.20	78.73
LFP	10.9	31.98	17.91	60.79

När det gäller utsläppen för batterier vid användning är de relativt låga eftersom endast elektricitet används. Därför påverkas utsläppen endast av hur elektriciteten som används

produceras. Eftersom den använda elektriciteten antas ha samma fördelning som tabell 1 bidrar endast 1% negativt till miljön. Med (10) beräknas utsläppen från användning av tio lastbilsbatterier enligt

$$U_a = xakfwm = 10 \cdot 365 \cdot 600 \cdot 1.1 \cdot 0.94 \cdot 0.01 \text{ ton CO}_{2\text{ekv}}/\text{år} = 22.64 \text{ ton CO}_{2\text{ekv}}/\text{år}$$

och är samma för alla batterityper eftersom de kör samma dagliga sträcka och har samma energiförbrukning.

Utifrån tabell 2 och 3 konstateras att LFP är den bästa kemin för projektets ändamål, både för lastbilsbatterierna och för BESS, då den har ett lågt pris med en lång livslängd. Den är även den bästa kemin ur ett miljömässigt perspektiv, gällande tillverkning. Nackdelen är en låg energitäthet, vilket i praktiken innebär att batteriet blir tyngre.

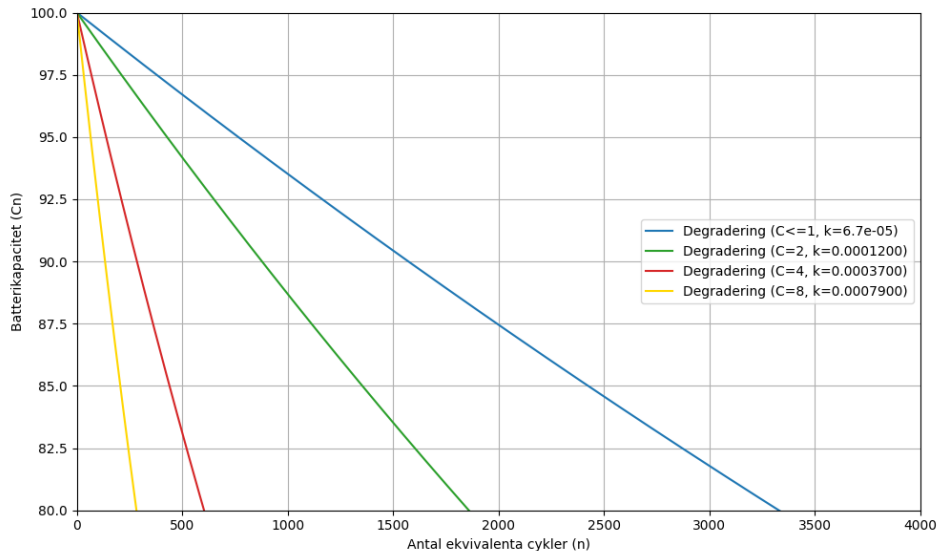
4.2 Batteridegradering LFP

För scenario 2 och scenario 3 genomförs lunchladdningar vilka projektet har valt att lägga som två pass på 1 h styck så totalt 2 h av lunchladdning. BESS laddar lastbilarna i 2 h men varje lunchladdande lastbil laddas bara i 1 h, då det är längden på lunchrasten.

Batterier har ett användningsområde för C-tal, dessa bör beaktas för att garantera batteriets prestanda och livslängd. I [17] förklaras att LFP-batterier vanligtvis har ett C-tal runt 0.5 C - långsam laddning och 1.5-2 C - snabbladdning. Detta kan anpassas beroende på applikation och användningsområde.

Författarna i [17] påpekar även att snabbladdning har visat en hastigare nedbrytning av batteriers kapacitet och effektförmåga. Denna laddstil är viktig för att göra elektriska fordon konkurrenskraftiga gentemot fossila fordon. Detta eftersom räckvidd och långa laddningstider är det största hindret för elektriska fordon[17].

Ekvation (3) används för att skapa figur 5 för LFP-batteriers degrading med avseende på C-tal. Med värden $C_n = 0.8$ och $C_0 = 1$.



Figur 5: Modellering av batteridegradering för olika C-tal

Under förutsättningar att batteriet används vid optimal temperatur på 25°C, 65% DoD och urladdning $\leq 1 C$ används en degraderingskonstant, k , för LFP på 0.0067%. Denna konstant

har tagits fram med hjälp av tester gjorda på LFP-batteriers degradering [26]. För högre C-tal fås en högre degraderingskonstant vilket estimerats med hjälp av testdata från [27].

De högre C-talens beräkningar är inte relevanta för det här projektet då batterierna i fråga är så stora i förhållande till hur mycket de laddas, vilket bestämmer C-talet. Det minsta batteriet i lastbilarna är också det batteri som laddas under kortast tid, 1 h lunch, vilket resulterar i det högsta C-talet för projektet. Detta C-tal blir endast 0.4 enligt (1) där $S_{l, \text{åldrat}} = 631 \text{ kWh}$ och $P = 250 \text{ kW}$. Detta C-tal är $< 1C$ och klassas enligt [17] som långsam laddning.

I figur 5 kan det utläsas att det tar cirka 3330 ekvivalenta cykler för ett LFP-batteri i optimala förhållanden som har ett C-tal $\leq 1C$ att sjunka till 80% batterikapacitet, vilket har satts som lägre gräns för användandet av batteriet i denna applikation.

4.3 Ekonomiska elnätsförutsättningar

Laddningsdepån är tänkt att anslutas på Hisingen i Göteborg. Ägaren av elnätet på Hisingen är Göteborg Energi Nät AB (GENAB) och således används deras uppgifter i kommande resonemang. GENAB erbjuder två anslutningalternativ som är relevant för typen av laddningsdepå som presenteras i denna studie. Laddarna i depån använder sig av 400 V huvudspänning. Laddarna kan således matas direkt från elnätet med en 400 V anslutning. Alternativt kan depån kopplas till en 10 kV anslutning med en egen 10/0.4 kV transformator för att uppnå 400 V matningsspänning till laddarna. Nedan i tabell 4 redovisas de elnätsavgifter som är förknippade med de olika anslutningsalternativen.

Tabell 4: Elnätsavgifter för företagskunder i GENAB:s nät 2025 inklusive 25% moms [5].

Anslutning	Fast avgift	Elöverföring	Energiskatt	Effekttariff**	Reaktiv effekt
400 V*	906.25 kr/mån	14.125 öre/kWh	54.875 öre/kWh	76.9375 kr/kW, mån	-
10 kV	1250 kr/mån	7.75 öre/kWh	54.875 öre/kWh	65.5 kr/kW, mån	20.75 kr/kVAr, mån

* Gäller för anslutningar med huvudsäkring över 63A

** Multipliceras med medelvärdet av månadens tre högsta timmedeleffekttoppar som inträffar vid olika dygn

BESS antas ha 100% RTE och laddningsdepån antas ej förbruka reaktiv effekt enligt avgränsningarna. Detta innebär att mängden energi som krävs för att möta depåns energibehov endast styrs av anläggningens basbelastning, lastbilarnas körsträcka och lastbilarnas energi-effektivitet. Det innebär i sin tur att den enda faktorn som varierar i den totala månatliga elnätsavgiften för respektive anslutningsalternativ är hur väl effekttoppar och således även effekttariff-kostnaden kan minimeras.

4.4 Lastbilsbatteriernas storlek

Denna studie baseras på att två kategorier av lastbilar finns tillgängliga. Den första har ett större batteri och kör en hel arbetsdag utan att ladda. Den andra har ett mindre batteri och snabbbladdar en timme vid lunchen när halva körsträcken är avklarad.

Enligt [28] påverkar DoD ett batteris livslängd. Fortsatt förklaras det att Elektriska fordon ofta använder runt 60% av batteriets kapacitet för att behålla dess livslängd. Denna studie har tillämpat laddning mellan 80% SoC och än 15%. Genom att studera dagens elektriska

tunga lastbilar kan det konstateras att det finns olika energiförbrukningar per kilometer för olika lastbilsmodeller och tillverkare. Enligt [29] förbrukar Volvo lastvagnars modell Volvo FH Electric 1.1 kWh/km. Denna siffra kommer användas i beräkningar för detta projekt. Avståndet en lastbil kör per arbetsdag är 600 km och batteriet betraktas som förbrukat då det har degraderat till 80% av sin ursprungliga kapacitet. För att beräkna batteristorleken S_s på lastbilarna med större batteri används (4). Genom att parametrisera (4) fås

$$S_s = e \frac{d}{(l_{\max} - l_{\min})c} = 1.1 \frac{600}{(0.8 - 0.15)0.8} \text{kWh} = 1269 \text{kWh},$$

vilket alltså ger storleken på batteriet i lastbilarna som inte laddas under lunchen.

För de lastbilar som däremot laddar under lunchen benämns batteristorleken som S_1 och för att bestämma denna används (6). Det som skiljer (4) från (6) är lunchladdningen som tillför $q = 250 \text{ kW}$ för en timmes laddning. Då e , d och c har samma värde som tidigare parametriseras (6) och ger

$$S_1 = \left(\frac{ed - q}{l_{\max} - l_{\min}} \right) \frac{1}{c} = \left(\frac{1.1 \cdot 600 - 250}{0.8 - 0.15} \right) \frac{1}{0.8} \text{kWh} = 788 \text{kWh},$$

vilket är storleken på batteriet i lastbilarna som laddas under lunchen.

Med tanke på energiförbrukning och körsträcka behöver bägge typerna av lastbil laddas med 660 kWh för att klara förbrukningen på 660 kWh under ett dygn. En god uppskattning av den genomsnittliga kapaciteten som lastbilbatterierna kommer ha under sin livslängd är att ta det aritmetiska medelvärdet av dess kapacitet vid inköp (100%) och dess kapacitet innan försäljning (80%). Detta beräknas till 90% av kapaciteten vid inköp vilket är 1142 kWh för S_s . Genom att parametrisera (2) fås

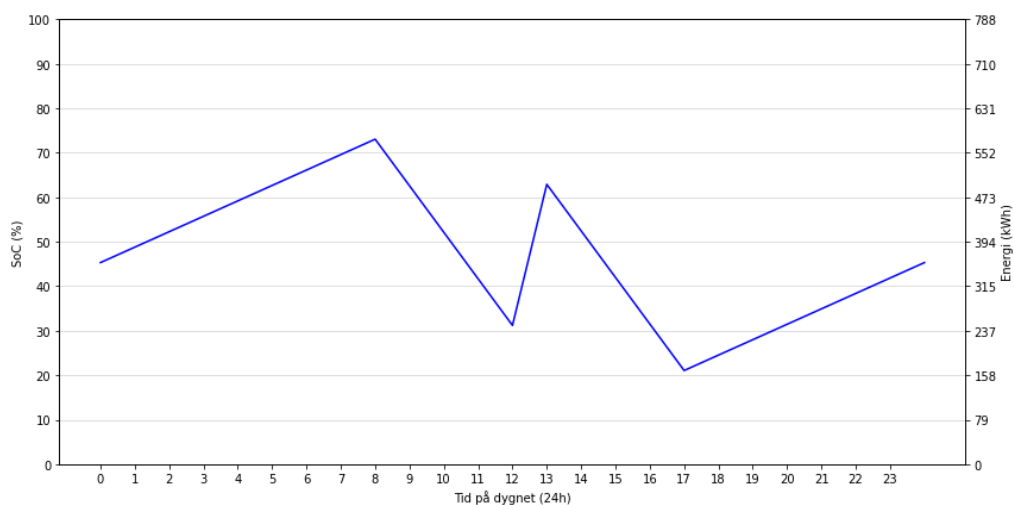
$$\#n = \frac{L + U}{2E} = \frac{660 + 660}{2 \cdot 1142} = 0.58$$

vilket är antalet ekvivalenta cykler per dygn för de stora lastbilbatterierna. För det mindre batteriet är motsvarande medelvärde för dess kapacitet 709 kWh. Ytterligare en parametrisering av (2) ger

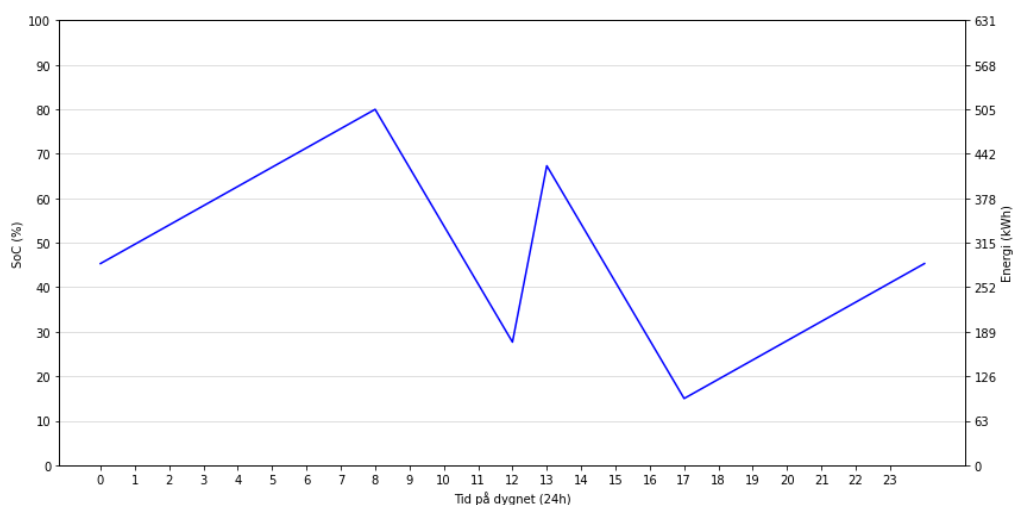
$$\#n = \frac{660 + 660}{2 \cdot 709} = 0.93$$

ekvivalenta cykler per dygn för de mindre lastbilbatterierna.

I figurerna 6, 7, 8 och 9 nedan illustreras SoC för de två storlekarna av lastbilbatterier under ett dygn vid 100% SoH respektive 80% SoH. I dessa exempel startar föraren sin arbetsdag kl 08:00 och slutar kl 17:00.



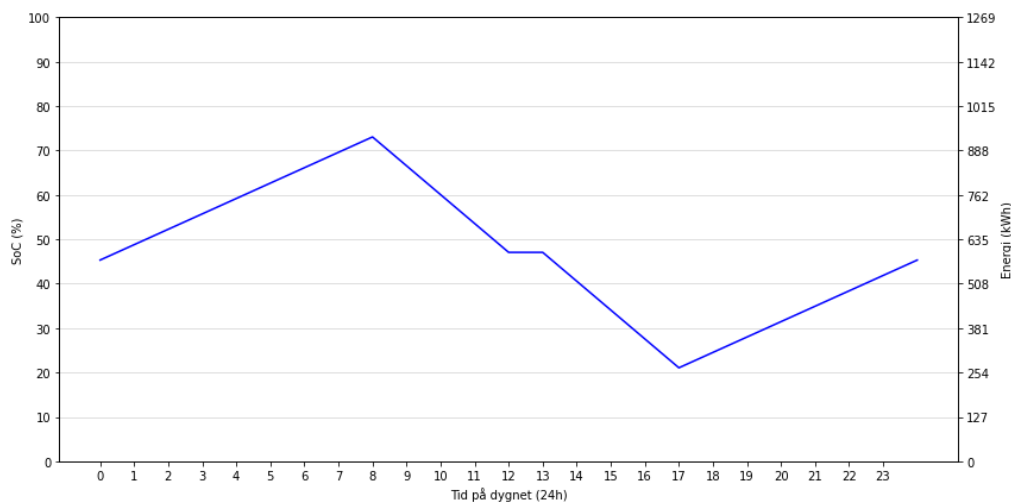
Figur 6: SoC över ett dygn för lastbilarna som snabbaddas under lunch vid 100% SoH. Lastbilsbatteriernas kapacitet är 788 kWh när det köps in. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal laddningseffekt under lunch på 250 kW är 0.32. Batteriet laddas med 410 kWh under 15 timmar nattetid vilket innebär en laddningseffekt på 27 kW.



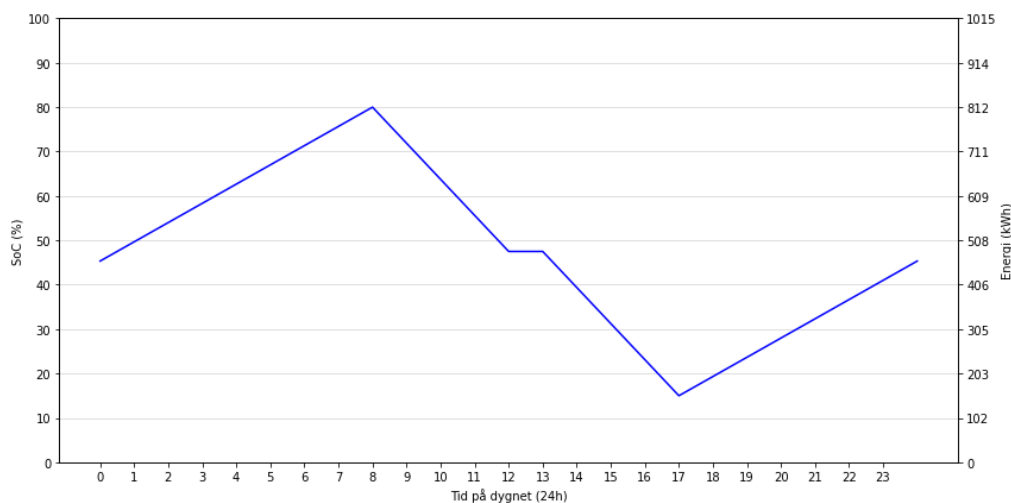
Figur 7: SoC över ett dygn för lastbilarna som snabbaddas under lunch vid 80% SoH. Lastbilsbatteriernas kapacitet är 631 kWh innan det byts ut. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal laddningseffekt under lunch på 250 kW är 0.40. Batteriet laddas med 410 kWh under 15 timmar nattetid vilket innebär en laddningseffekt på 27 kW.

I figurerna 6 och 7 visas den mindre batteristorleken där batteriet laddas ur under första halvan av arbetsdagen för att sedan snabbaddas på lunchen. Därefter fortsätter föraren köra tills arbetsdagen är slut. Baserat på att lastbilsbatteriernas kapacitet når 80% av ursprunglig kapacitet efter 3330 ekvivalenta cykler och att batterierna i de lastbilar som snabbaddas går igenom 0.93 ekvivalenta cykler per dygn blir livslängden 3580 dygn eller ≈ 119.3 månader. Inköpspriset för ett av de mindre lastbilsbatterierna $S_1 = 788$ kWh baserat på tabell 2 för LFP och en växelkurs 1 USD = 10 SEK är 630 400 kr. Vid försäljning uppskattas lastbils-

batteriet värde till 40% av inköpspriset. Utslaget blir då den månatliga kostnaden för ett av de mindre lastbilsbatterierna 3170 kr/mån. I figurerna 8 och 9 avläses det större batteriets laddning/urladdningskurva.



Figur 8: SoC över ett dygn för lastbilarna som endast laddas nattetid vid 100% SoH. Lastbilsbatteriernas kapacitet är 1269 kWh när det köps in. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt när lastbilen körs på 82.5 kW är 0.07. Batteriet laddas med 660 kWh under 15 timmar nattetid vilket innebär en laddningseffekt på 44 kW. Platån mitt på dagen beror på förarens lunchpaus.



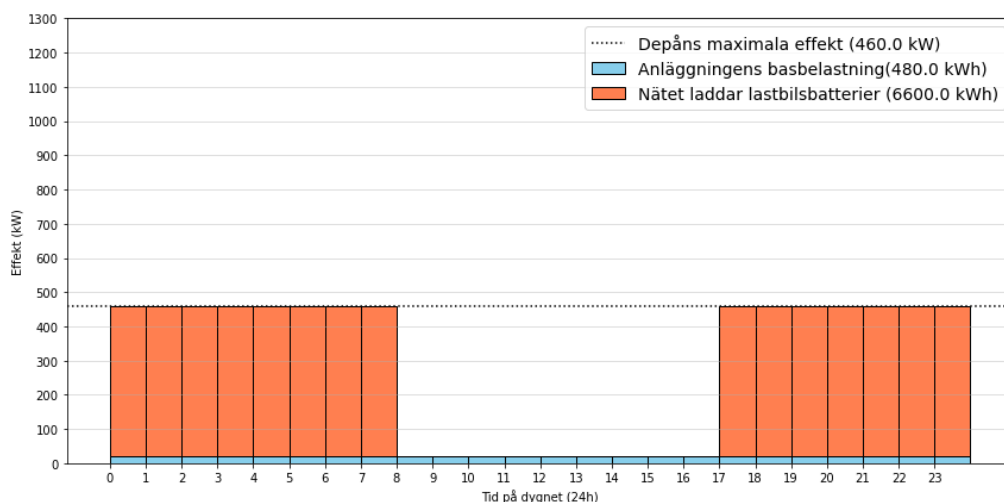
Figur 9: SoC över ett dygn för lastbilarna som endast laddas nattetid vid 80% SoH. Lastbilsbatteriernas kapacitet är 1015 kWh innan det byts ut. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt när lastbilen körs på 82.5 kW är 0.08. Batteriet laddas med 660 kWh under 15 timmar nattetid vilket innebär en laddningseffekt på 44 kW. Platån mitt på dagen beror på förarens lunchpaus.

Baserat på att lastbilsbatteriernas kapacitet når 80% av ursprunglig kapacitet efter 3330 cykler och att batterierna i de lastbilar som endast laddas nattetid går igenom 0.58 ekvivalenta cykler per dag blir livslängden 5737 dygn eller ≈ 191.2 månader. Inköpspriset

för ett av de större lastbilsbatterierna på $S_s = 1269 \text{ kWh}$ baserat på tabell 2 för LFP och en växelkurs $1 \text{ USD} = 10 \text{ SEK}$ är $1\,015\,200 \text{ kr}$. Vid försäljning uppskattas lastbilsbatteriet värde till 40% av inköpspriset. Utslaget blir då den månatliga kostnaden för ett av de större lastbilsbatterierna 3186 kr/mån .

4.5 Scenario 1: Ingen lunchladdning

Som specificerat tidigare bygger scenario 1 på att inga lastbilar laddar under arbetsdagen. Det är alltså tio lastbilar som har storleken $S_s = 1269 \text{ kWh}$ varpå inget BESS behövs. Lastbilsbatterierna har tillräcklig kapacitet för att klara av att köra den dagliga körsträckan. Den sammantagna energibalansen för laddningsdepån under ett dygn illustreras i figur 10.



Figur 10: Energibalans för scenario 1. Depåns maximala effekt, det vill säga högsta timmedeleffekttoppen tagen från nätet är 460 kW .

Anläggningens baseeffekt är konstant 20 kW , vilket blir en basbelastning på 480 kWh under 24 h och illustreras som blå. Under 15 h på natten laddas lastbilsbatterierna från nätet med 6600 kWh vilket de orangea staplarna visar. Detta motsvarar en kontinuerlig effekt på 440 kW och genom att addera baseeffekten till detta ges den maximala effekten som depån utnyttjar vilket är 460 kW . Eftersom ingen laddning med hög effekttopp sker under lunchtiden blir energiöverföringen till lastbilarna över ett dygn jämn vilket syns i figur 10 då staplarna har en konstant effekt under natten.

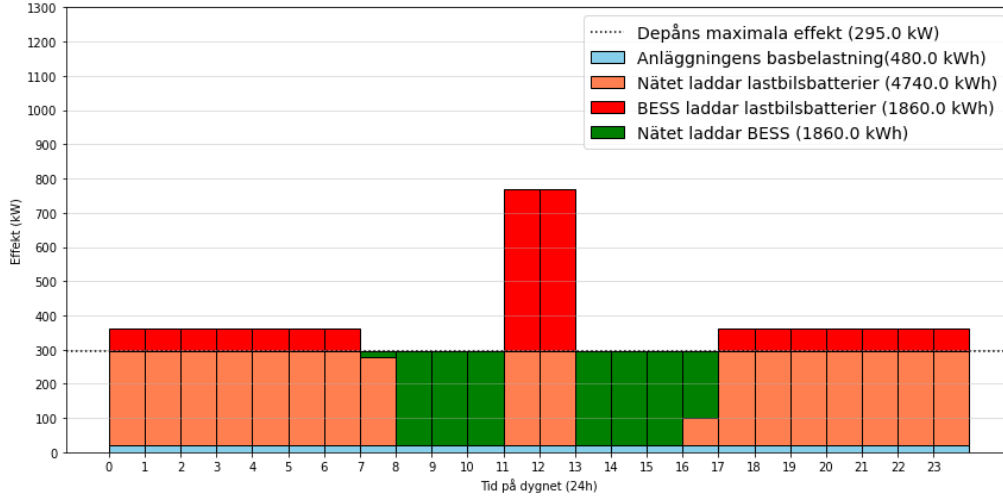
Vad gäller den ekonomiska aspekten av detta scenario beräknas effekttariffkostnaden med hjälp av tabell 4. Depåns maximala effekt tagen från nätet är 460 kW och detta ger en kostnad på $35\,391 \text{ kr/mån}$ för en 400 V anslutning samt $30\,130 \text{ kr/mån}$ med 10 kV anslutning. Lastbilsbatterierna är alla tio av större storlek. Enligt tidigare beräkning är denna kostnad 3186 kr/mån och detta ger en total kostnad på $31\,860 \text{ kr/mån}$ för samtliga lastbilsbatterier i depån. Alla beräknade värden för detta scenario har sammanställts i tabell 5 nedan.

Tabell 5: Samtliga beräknade kostnader för scenario 1

Effekttariffkostnad 400 V anslutning	35391 kr/mån
Effekttariffkostnad 10 kV anslutning	30130 kr/mån
Total kostnad för lastbilsbatterier	31860 kr/mån

4.6 Scenario 2: Delvis lunchladdning

I denna konfiguration lunchladdar sex lastbilar och dessa har en batteristorlek på $S_1 = 788$ kWh. Fyra lastbilar lunchladdar inte och dessa har batteristorleken $S_s = 1269$ kWh. I och med att de sex lastbilarna med mindre batterier lunchladdas används ett BESS i detta scenario. Den sammantagna energibalansen för laddningsdepån under ett dygn illustreras i figur 11.



Figur 11: Energibalans för scenario 2. Depåns maximala effekt, det vill säga högsta timmedeleffekttoppen tagen från nätet blir 295 kW.

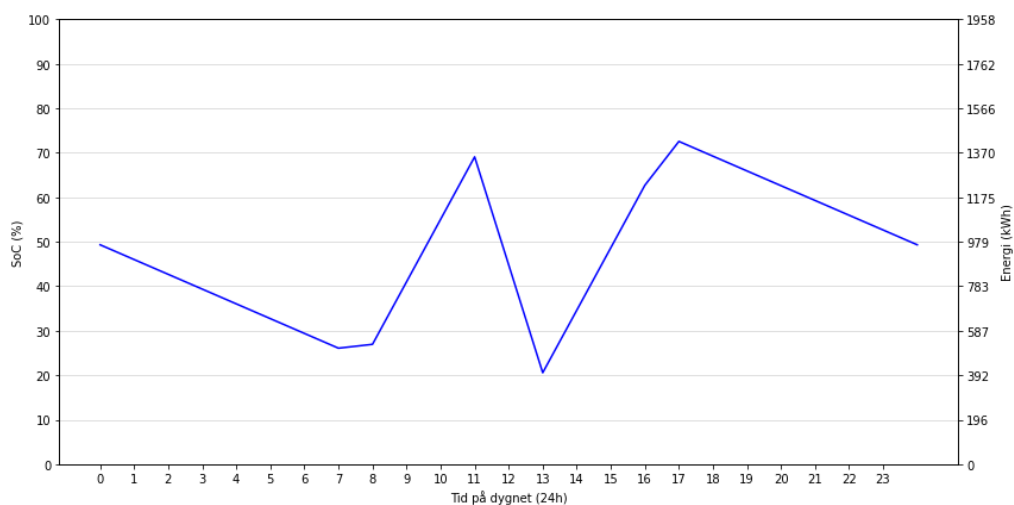
I detta scenario används BESS med syftet att minska effekttoppen under lunchladdningen. Anläggningens baseeffekt förblir densamma men effektbehovet för dagen ser annorlunda ut eftersom det är en annan konfiguration av lastbilar. I figur 11 illustreras den effekt som BESS bidrar till lastbilarnas laddning som röd. Lunchladdningen sker i två omgångar där tre lastbilar kommer in åt gången. Varje lastbil laddas med 250 kW under en timme för att sedan köra vidare. Under den tiden som samtliga lastbilar är ute och kör laddas BESS och detta är den gröna arean i figuren. Då BESS används för att ladda lastbilarna markeras detta som rött. Genom att flytta den streckade linjen som markerar depåns maximala effekt, samma som timmedeleffekttoppen, ändras storlekarna på areorna för såväl orange som grön och röd. När den gröna arean är lika stor som den röda innebär det att BESS täcker lastbilarnas energibehov samtidigt som den minimerar depåns maximala effekt. Utifrån grafen avläses att den högsta timmedeleffekttoppen tagen från nätet är 295 kW och att BESS laddar lastbilarna med 1860 kWh under ett dygn.

För att bestämma kapaciteten för BESS i detta scenario används (8). Den största laddningen av BESS sker i den gröna arean i bild 11 mellan klockan 13.00-17.00 vilket motsvarar 1018 kWh. SoC rör sig från 80% till 15% under en arbetsdag och batteriet behålls tills det degraderat till 80% av sin ursprungliga kapacitet. Genom att parametrisera (8) med detta fås

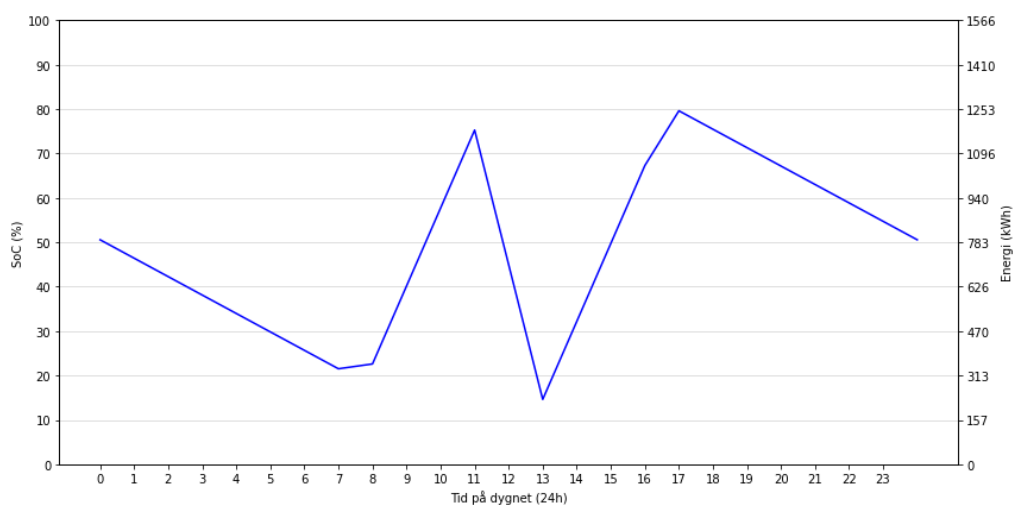
$$E_{\text{BESS,BOL},2} = \frac{u}{c(l_{\text{max}} - l_{\text{min}})} = \frac{1018}{0.8(0.8 - 0.15)} \text{ kWh} = 1958 \text{ kWh}$$

som kapaciteten $E_{\text{BESS,BOL},2}$ för BESS i scenario 2.

I figur 12 samt 13 illustreras SoC för BESS under ett dygn vid inköp respektive då det säljs vidare vid 80% av sin ursprungliga kapacitet.



Figur 12: SoC under ett dygn i starten av BESS livslängd i depån. Kapaciteten är 1958 kWh vid inköp. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt under lunch på 475 kW är 0.24.



Figur 13: SoC över ett dygn i slutet av BESS livslängd. BESS säljs vidare efter att ha degraderat till 80% av ursprunglig kapacitet. Notera att BESS cykel blir djupare ju mer den degraderats. BESS kapacitet är 1566 kWh vid försäljning. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt under lunch på 475 kW är 0.30.

Eftersom storleken på BESS enligt (8) är anpassad för degradering innebär det att kapaciteten av detta är större än dagsbehovet till att börja med. Detta syns i figur 12 där SoC rör sig i ett smalare intervall under dagen. I bild 13 har batteriet degraderat till 1566 kWh vilket innebär att större andel av batteriets lagrade energi behöver nyttjas.

BESS laddas med 1860 kWh och laddas ur med 1860 kWh under ett dygn. En god uppskattning av den genomsnittliga kapaciteten som BESS har under sin livslängd är att ta det aritmetiska medelvärdet av dess kapacitet vid inköp, 100% och dess kapacitet innan försäljning, 80%. Detta beräknas till 90% av kapaciteten vid inköp alltså 1762 kWh i scenario 2. Parametrisering av (2) ger

$$\#n = \frac{L + U}{2E} = \frac{1860 + 1860}{2 \cdot 1762} = 1.06$$

ekvivalenta cykler per dygn för BESS. Baserat på detta och att BESS når 80% av ursprunglig kapacitet efter 3330 ekvivalenta cykler blir BESS livslängd i depån 3155 dygn eller ≈ 105.2 månader.

Inköpspriset för ett BESS gjord av typ LFP beräknas med hjälp av tabell 2. En växelkurs 1 USD = 10 SEK och en kapacitet på 1958 kWh ger en total kostnad på 1 566 400 kr. Vid försäljning uppskattas BESS värde till 40% av inköpspriset. Utslaget blir då den månatliga kostnaden för BESS 8934 kr/mån.

Kostnaden för lastbilsbatterierna tas även i beaktning. I detta scenario nyttjas fyra lastbilar med de större batterierna och sex lastbilar med de mindre batterierna. Som beräknats tidigare är kostnaden för ett stort batteri 3186 kr/mån och de små batterierna kostar 3170 kr/mån. Således blir den totala månatliga utgiften 31 764 kr/mån.

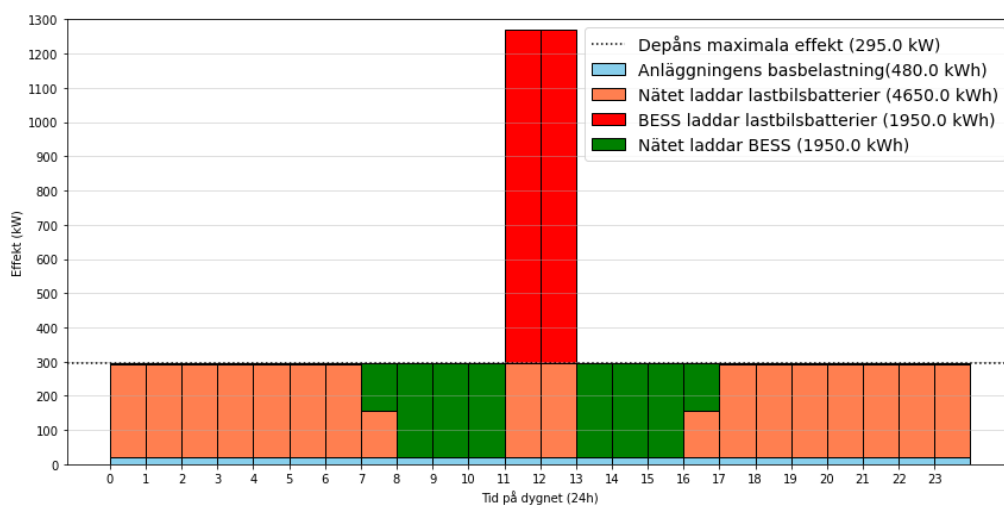
Dessutom utvärderas även utgifter relaterade till elnätets anslutning. För dessa beräkningar användes tabell 4 där effekttariffkostnaden beräknades till 22 697 kr/mån vid 400 V anslutning och 19 323 kr/mån med 10 kV anslutning. Samma beräkning gjordes även för scenario 2 då BESS exkluderades och all effekt istället hämtades från nätet, för att synliggöra den månatliga kostnadsskillnaderna. Då blir nätet maximala effekt istället 770 kW vilket ger en kostnad på 59 242 kr/mån för 400 V anslutning och 50 435 kr/mån för 10 kV anslutning. Med hjälp av dessa värden kan besparingen i elnätsavgifter på grund av BESS beräknas. Denna fastslås vara 36 545 kr/mån vid 400 V anslutning och 31 112 kr/mån för 10 kV. Dessa kostnader för scenario 2 har sammanställts i tabell 6 nedan.

Tabell 6: Samtliga beräknade kostnader för scenario 2

Effekttariffkostnad 400 V anslutning med BESS	22697 kr/mån
Effekttariffkostnad 400 V anslutning utan BESS	59242 kr/mån
Besparing av elnätsavgifter på grund av BESS med 400 V anslutning	36545 kr/mån
Effekttariffkostnad 10 kV anslutning med BESS	19323 kr/mån
Effekttariffkostnad 10 kV anslutning utan BESS	50435 kr/mån
Besparing av elnätsavgifter på grund av BESS med 10 kV anslutning	31112 kr/mån
Månatlig kostnad för BESS	8934 kr/mån
Total kostnad för lastbilsbatterier	31764 kr/mån

4.7 Scenario 3: Endast lunchladdning

I detta slutgiltiga scenario består depån av tio lastbilar där samtliga har ett litet batteri av storleken $S_1 = 788$ kWh. I problemformuleringen specificerades att anläggningen har tre stycken laddare med effekten 250 kW. Eftersom detta scenario bygger på lunchladdning av fem lastbilar åt gången förutsätts att samtliga kan laddas med 250 kW var. Energibalansen under ett dygn i depån illustreras i figur 14.



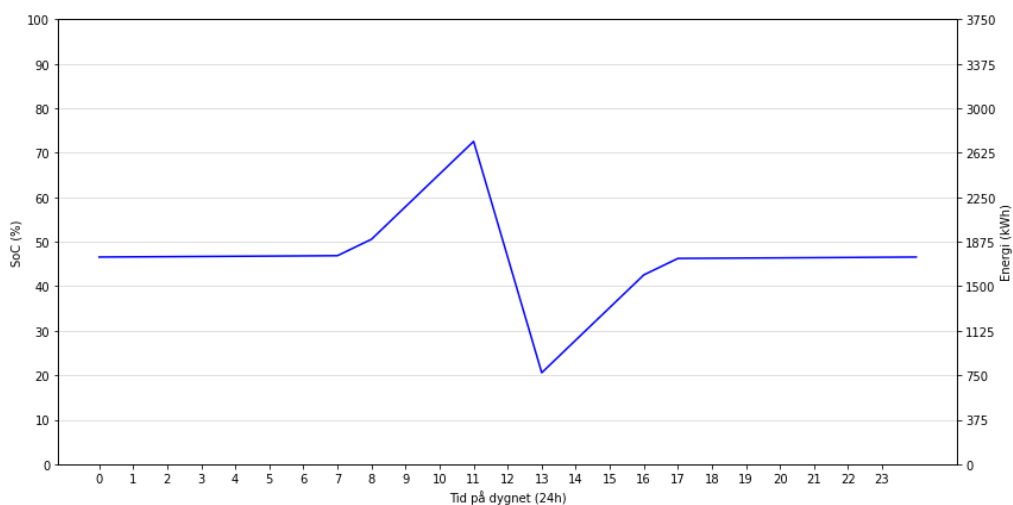
Figur 14: Energibalans för scenario 3. Depåns maximala effekt, det vill säga högsta timmedeleffekttoppen tagen från nätet blir 295 kW.

Här syns att BESS används i större utsträckning och enbart under lunchladdningssekvensen. Detta orsakas av att den effekt som efterfrågas mellan klockan 11.00 och 13.00 är så stor att tiden på förmiddagen och eftermiddagen då BESS kan laddas inte räcker till. Under ett dygn laddas BESS med 1950 kWh och laddar ur lika mycket vilket kan ses i figur 14. Då samma värden som tidigare används för konstanter c , l_{\max} och l_{\min} ger en parametrering av (8)

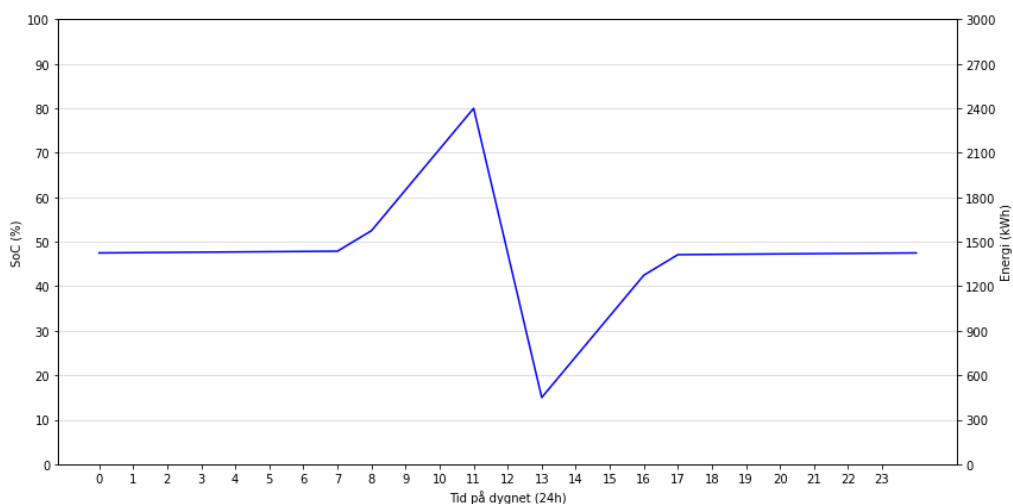
$$E_{\text{BESS,BOL},3} = \frac{u}{c(l_{\max} - l_{\min})} = \frac{1950}{0.8(0.8 - 0.15)} \text{ kWh} = 3750 \text{ kWh}$$

som kapaciteten för BESS i scenario 3.

I bild 15 och 16 visas SoC för BESS under ett dygn i nyskick samt då det degraderat till 80% av sin kapacitet.



Figur 15: SoC över ett dygn i starten av BESS livslängd i depån. BESS kapacitet är 3750 kWh vid inköp. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt under lunchen på 975 kW är 0.26.



Figur 16: SoC över ett dygn i slutet av BESS livslängd i depån. BESS säljs vidare efter att ha degraderat till 80% av ursprunglig kapacitet. Notera att BESS cykel blir djupare ju mer den degraderats. BESS kapacitet är 3000 kWh vid försäljning. Maximalt C-tal under ett dygn vid denna tidpunkt enligt (1) baserat på en maximal urladdningseffekt under lunchen på 975 kW är 0.33.

Även här syns att kapaciteten på BESS är större än nödvändigt till en början för att lämna utrymme för degradering.

BESS laddas med 1950 kWh och urladdas med 1950 kWh under ett dygn. Genom att ta det aritmetiska medelvärdet av BESS kapacitet uppskattas den genomsnittliga kapaciteten under BESS livslängd. Denna beräknas till 90% av den ursprungliga kapaciteten vilket är 3375 kWh. Med parametrisering av (2) framtas

$$\#n = \frac{L + U}{2E} = \frac{1950 + 1950}{(2)(3375)} = 0.58$$

som antalet ekvivalenta cykler per dygn för BESS. Baserat på detta och att BESS når 80% av ursprunglig kapacitet efter 3330 ekvivalenta cykler blir BESS livslängd i depån 5763 dygn eller ≈ 192.1 månader.

Inköpspriset för ett BESS av typ LFP beräknas med hjälp av tabell 2. En växelkurs 1 USD = 10 SEK och en kapacitet på 3750 kWh ger en totalkostnad på 3 000 000 kr. Vid försäljning uppskattas BESS värde till 40% av inköpspriset. Utslaget blir då den månatliga kostnaden för BESS 9370 kr/mån.

Vad gäller kostnaden för lastbilsbatterierna är alla tio av mindre storlek. Enligt tidigare beräkning är denna kostnad 3170 kr/mån över batteriernas livslängd och detta ger en total kostnad på 31 700 kr/mån över deras livslängd för alla lastbilsbatterier i depån.

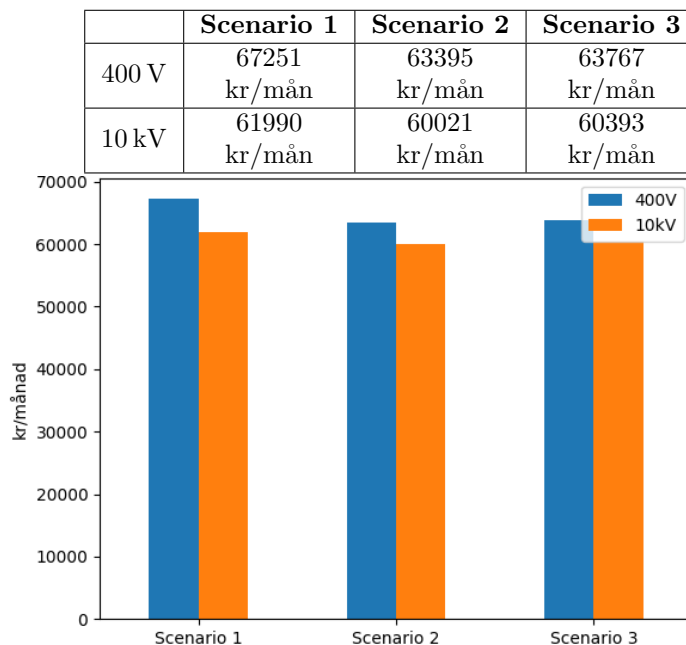
Ytterligare en ekonomisk aspekt är effekttariffkostnader som tillkommer beroende på vilket typ av anslutning som görs till elnätet. Med hjälp av tabell 4 beräknas priset för detta. Med anslutningen är 400 V blir kostnaden för effekttariffer 22697 kr/mån och för 10 kV blir den 19 323 kr/mån. Dessutom beräknas kostnaden för systemet då lösningen BESS utesluts. Denna utgift fastslås som 97 711 kr/mån för 400 V anslutning och 83 185 kr/mån vid 10 kV anslutning. Slutligen kan besparingen i elnätsavgifter beräknas för de olika anslutningarna. Nettobesparingen blir alltså 75 014 kr/mån om anslutningen är 400 V och 63 862 kr/mån om anslutningen är 10 kV. Dessa resultat har sammanställts i tabell 7.

Tabell 7: Sammanställda kostnader för scenario 3

Effekttariffkostnad 400 V anslutning med BESS	22697 kr/mån
Effekttariffkostnad 400 V anslutning utan BESS	97711 kr/mån
Besparing av elnätsavgifter på grund av BESS vid 400 V anslutning	75014 kr/mån
Effekttariffkostnad 10 kV anslutning med BESS	19323 kr/mån
Effekttariffkostnad 10 kV anslutning utan BESS	83185 kr/mån
Besparing av elnätsavgifter på grund av BESS vid 10 kV anslutning	63862 kr/mån
Månatlig kostnad för BESS	9370 kr/mån
Total kostnad för lastbilsbatterier	31700 kr/mån

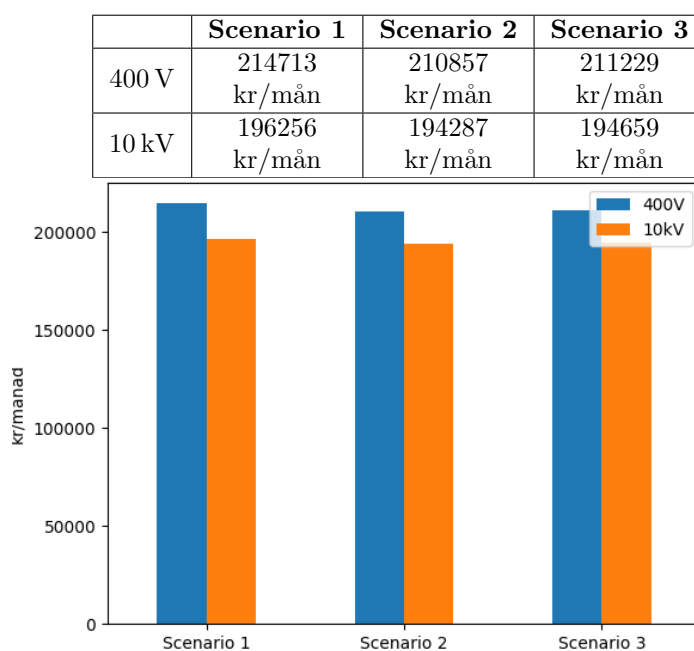
4.8 Totala kostnader

I figur 17 nedan redovisas de kostnader som tidigare beräknats för respektive anslutning och scenario.



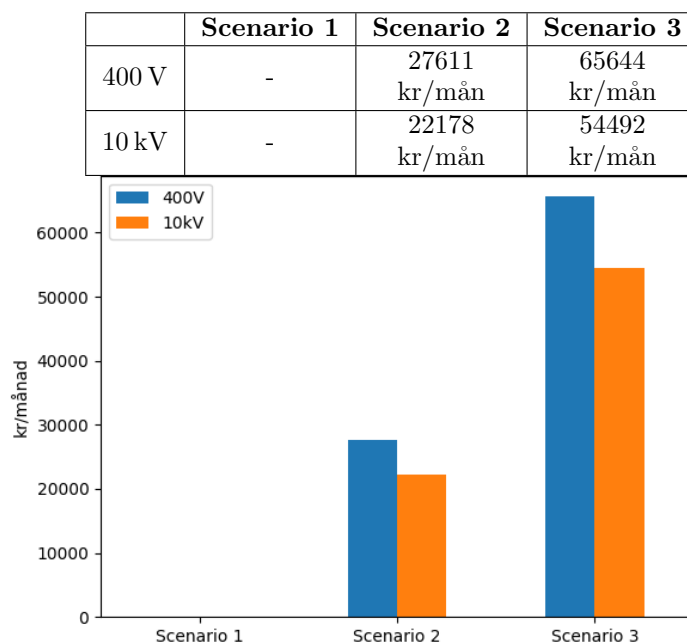
Figur 17: Månadskostnad för lastbilsbatterier, BESS och effekttariffavgift för varje anslutningsalternativ och scenario.

Utöver effekttariffavgiften som är medräknad i figur 17 finns i enighet med tabell 4 en fast avgift, elöverföringsavgift och energiskatt som betalas varje månad. I alla scenarion förbrukas 7080 kWh per dygn i depån. Räknat med en månad på 30 dygn blir den totala månatliga energiförbrukningen i depån således 212.4 MWh. Det leder till en månatlig kostnad för fast avgift och energiförbrukning som är 147 462 kr/mån om anslutningen är 400 V och 134 266 kr/mån om anslutningen är 10 kV. Dessa utgifter adderas till priset och samtliga kostnader presenteras i figur 18.



Figur 18: Total månadskostnad för lastbilsbatterier, BESS och total elnätskostnad.

Genom att ta den månatliga besparingen i elnätsavgifter på grund av BESS minus den månatliga kostnaden för BESS erhålls nettobesparingen. I figur 19 redovisas endast nettobesparingen för scenario 2 och scenario 3 eftersom det ej finns BESS installerat i scenario 1.



Figur 19: Nettobesparingar per månad på grund av installerad BESS

Här syns alltså att i både scenario 2 och 3 är nettobesparingen större för en 400 V avslutning än för en 10 kV sådan.

4.9 Analys med nuvärdesmetoden och återbetalningstid

I tidigare sektioner bestäms månatliga besparingar i elnätsavgift på grund av BESS. Dessa omvandlas sedan till årlig besparing, även kallat årligt kassaflöde, K_t . Tidigare har även livslängd för investering samt inköpspris, vilket är K_0 , bestämts. Dessa värden kommer att användas i följande beräkningar. Ekvation (13) parametreras vilket ger

$$\text{Återbetalningstid} = \frac{K_0}{K_t} = \frac{1566400}{438540} = 3.6 \text{ år}$$

för 400 V anslutning av scenario 2. För samma scenario med 10 kV anslutning fås istället en återbetalningstid på 4.1 år. Ekvation (13) parametreras för scenario 3 vilket ger

$$\text{Återbetalningstid} = \frac{3000000}{900168} = 3.3 \text{ år}$$

för 400 V anslutning. Med 10 kV anslutning fås istället återbetalningstiden 3.9 år. Resultatet presenteras nedan enligt tabell 8.

Tabell 8: Resultat av beräknad återbetalningstid för BESS.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
400 V	-	3.6 år	3.3 år
10 kV	-	4.1 år	3.9 år

I scenario 2 med 400 V anslutning parametreras (11) och ger

$$NVM = \sum_{t=1}^9 \frac{438540}{(1+0.07)^t} - 1566400 = 1\,290\,730 \text{ kr.}$$

Med 10 kV anslutning fås NVM-värdet = 866 890 kr genom (11). För scenario 3 parametreras på samma sätt (11) vilket ger

$$NVM = \sum_{t=1}^{16} \frac{900168}{(1+0.07)^t} - 3000000 = 5\,503\,278 \text{ kr.}$$

För 10 kV blir NVM = 4 201 040 kr. Resultatet presenteras nedan enligt tabell 9.

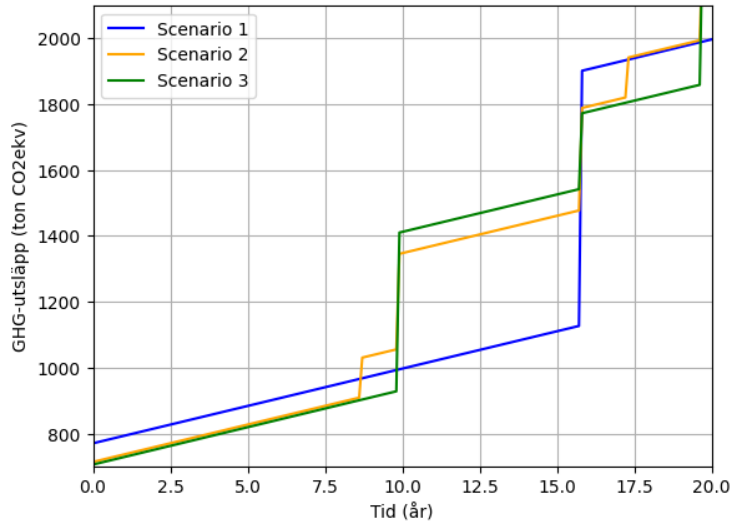
Tabell 9: Resultat av NVM-beräkningar.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
400 V	-	1 290 730 kr	5 503 278 kr
10 kV	-	866 890 kr	4 201 040 kr

Utifrån tabell 9 kan det nu konstateras att båda scenariorna är gynsamma oavsett nätanslutning. Däremot innebär 400 V anslutningen uteslutande ett högre NVM-värde.

4.10 Miljömässig analys

I denna rapport görs ingen LCA, men inspiration hämtas från LCA-typen vaggatillgrav. Tillverkning samt användning analyseras men återvinnings detaljerade inverkan beaktas inte vid analys av batteriernas påverkan på miljön. Batterier som anses vara förbrukade då 80% av originalkapacitet återstår antas säljas vidare och återanvänds. Detta innebär att all miljöpåverkan sker vid tillverkning av batteriet samt utsläpp från elmixen som förbrukas då de används. Tillverkningen innefattar allt från brytning av material fram till att produkten lämnar fabriken. Användningen innefattar var elektriciteten som används kommer från. All miljöpåverkan analyseras i denna rapport med hjälp av GHG-utsläpp. I figur 20 presenteras en jämförelse av miljöpåverkan från lastbilsbatterierna samt eventuell BESS för vardera scenario.



Figur 20: Jämförelse av GHG-utsläpp för tillverkning och användning av LFP-batterier för de tre olika scenarierna. Samtliga lastbilsbatterier och eventuell BESS är inkluderade i beräkningarna.

Startvärdet representerar utsläppen vid tillverkning, som alltså redan skett vid införskaffandet av batterierna och eventuell BESS. Beräkning av utsläpp från tillverkningen av ett batteri och även BESS görs med (9). Storleken, dvs S , på lastbilsbatterierna och BESS varierar men eftersom de alla är av typen LFP gäller $v = 60.79 \text{ kg CO}_{2ekv}/\text{kWh}$. Ett stort lastbilsbatteri beräknas till

$$U_t = Sv = 1269 \cdot 60.79 \text{ ton CO}_{2ekv} = 77.14 \text{ ton CO}_{2ekv}$$

och ett mindre beräknas på samma sätt till 47.90 ton CO_{2ekv} . BESS för scenario 2 och 3 beräknas på samma sätt till 119.03 respektive 227.96 ton CO_{2ekv} . För att få totala utsläppen från tillverkningen i vardera scenario multipliceras dessa siffror med antal lastbilsbatterier för vardera storlek samt addera eventuell BESS påverkan.

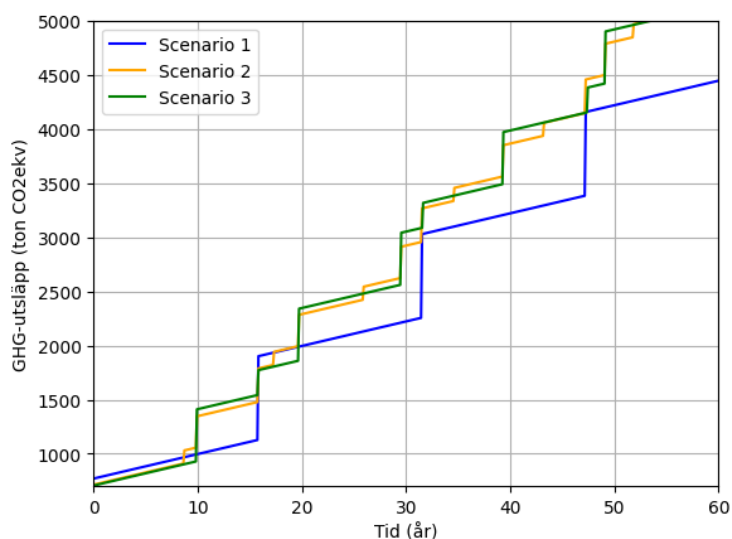
Lutningen representerar utsläppen vid användning och är samma för alla scenarier. Eftersom lastbilsbatterierna är de som förbrukar elektriciteten är de dessa som bidrar till utsläppen vid användning. Mängden utsläpp från användning görs med (10) och beräknas till

$$U_a = xakfwm = 10 \cdot 365 \cdot 600 \cdot 1.1 \cdot 0.94 \cdot 0.01 \text{ ton CO}_{2ekv}/\text{år} = 22.64 \text{ ton CO}_{2ekv}/\text{år}$$

och gäller för de tio batterierna som sitter i lastbilarna.

I figur 20 visar det sig att under de tio första åren skiljer sig miljöpåverkan från de tre scenarierna marginellt. Därefter börjar det ske vertikala hopp i grafen som representerar införskaffandet av nya lastbilsbatterier eller BESS. Därmed sker en direkt miljöpåverkan från tillverkning av dessa. Scenario 3 presterar marginellt bättre än scenario 1 och 2 i denna figur då dess graf under de tjugo första åren ligger underst största delen av perioden.

Figur 21 visar samma förlopp under en period på 60 år. Genom att avläsa denna figur kan ytterligare reflektioner göras angående den långsiktiga miljöpåverkan.



Figur 21: Utzoomad bild på jämförelse av GHG-utsläpp för tillverkning och användning av LFP-batterier för de tre olika scenarierna. Samtliga lastbilsbatterier och eventuell BESS är inkluderade i beräkningarna.

I figur 21 visar det sig att scenario 1 ligger underst, dvs har minst miljöpåverkan, under större delen av perioden. Den skiljer sig från scenario 2 och 3 vilka följer varandra under hela tidsperioden.

5 Diskussion

5.1 Jämförelse mellan batterier och väteceller

Ett intressant alternativ till batterier är väteceller. När denna rapport skriver vätecell så syftar det på både vätagaslagringen samt vätecellen som konverterar gasen till elektricitet. Ett av besluten som skulle tas var om man skulle använda sig av BESS eller väteceller. Beslutet om att använda batterier togs tidigt då det skulle vara mer lönsamt. På grund av att BESS har betydligt högre verkningsgrad och snabbare respons jämfört med ett vätagaslagringssystem. Batteriets verkningsgrad ligger på ca 99% [13] medans vätecellerna endast har en verkningsgrad på 30% enligt [30]. Det innebär att ett vätagasbaserat system skulle kräva större energitillförsel för att leverera samma mängd laddning på grund av förluster i omvandlingsstegen.

Även de ekonomiska aspekterna talar för batterier i den här tillämpningen. Litiumjonbatterier i synnerhet LFP-kemin har enligt [31] kraftigt gått ner i pris under de senaste åren och denna trend förväntas fortsätta. Kostnaden per kWh lagringskapacitet för batterier blir lägre samtidigt som både prestanda och livslängd förbättras. Väteceller är däremot fortfarande förhållandevis kostsamma både i investering och drift. En annan aspekt är att ur ett ekonomiperspektiv är att batterier är fördelaktiga mer då en högre energiförbrukning innebär en högre månadskostnad.

Ur ett miljöperspektiv finns både för- och nackdelar med båda alternativ men batterier verkar vara mer fördelaktiga här också. Tillverkning av batterier är energikrävande och medför utsläpp av växthusgaser vid utvinning och bearbetning av råmaterial. Däremot kräver även väteceller mycket råresurser vid tillverkning samt drift enligt [32]. Enligt [33] användes mycket platina för tillverkning av katalysatorn. Dessutom används en del kol och nafion. Det viktiga att notera är den sämre verkningsgraden. Den har en stor inverkan på både miljön och ekonomin. Då skillnaden i verkningsgrad är så stor, är energiförlusterna mycket större i väteceller jämfört med batterier. Dessa förluster kompenseras genom att energianvändningen av ett vätecell system blir större. Vilket leder till större koldioxidutsläpp då energimixen i Sverige inte är 100% förnybar. En fördel med väteceller är att de har längre energikostnad vid tillverkning jämfört med batterier. Denna skillnad gör att väteceller återlämnar 59 gånger tillverkningskostnaden i energi under sin livstid medans batterier endast gör det 35 gånger [34]. Även om bränsleceller har sina fördelar överväger nackdelarna fördelarna. Projektet har på grund av detta valt att använda batterier i BESS.

5.2 Utvärdering av anslutningsalternativen

En begränsning hos 400 V anslutningen är dess högsta tillåtna effekt och således maximalt antal lastbilar i depån. Uttrycket för aktiv trefaseffekt är $P_{trefas} = \sqrt{3}UI \cos \varphi$, där U är nätets huvudspänning, I representerar fasström och $\cos \varphi$ är den effektfaktor som nätet arbetar vid. GENAB erbjuder som största huvudsäkring 1500 A för 400 V anslutningar[35]. Depåmodellen med en energilagringlösning siktar mot att ha en helt jämn effektförbrukning alla tider på dygnet. En klok tumregel vid dimensionering av en elanläggning är att vid kontinuerlig drift, endast bruka 80% av huvudsäkringens märkström. Med detta i åtanke blir nätets högsta tillåtna effekt vid 400 V anslutning 831 kW. Givet scenario 1 då ingen av lastbilarna lunchladdar hade 18 varit maximalt antal lastbilar i depån. Motsvarande antal givet scenario 3 då alla lastbilar lunchladdar hade varit 28 lastbilar. För 10 kV anslutningen kan anläggningens högsta tillåtna effekt praktiskt taget anses vara obegränsad för denna tillämpning då det snarare blir en fråga om den lokala nätägaren kan förse anläggningen med nog effekt.

En begränsning hos 10 kV anslutningen är dess tillgänglighet. De lokala elnäten brukar delas upp i lågspänning som oftast är 400 V och högspänning som oftast är 10-20 kV. I Sverige består de lokala högspänningsnäten enligt [36] av 62 000 km luftledning, 150 000 km

jordkabel och har 8000 anslutna elanvändare. Motsvarande siffror för lågspänningsnätet är 45 000 km luftledning, 290 000 km jordkabel och 5.6 miljoner anslutna elanvändare. I det lokala högspänningsnätet är anslutningspunkterna koncentrerade i industriområden där tyngre industrier nyttjar den högre spänningsnivån medan anslutningspunkter till lågspänningsnätet finns utspridda överallt i samhället. I denna rapport undersöktes ej kostnaderna associerade med den transformator som krävs vid 10 kV anslutning för att uppnå 400 V matningsspänning till laddarna i depån. Det kan dock vara intressant att undersöka i vidare studier för att fördjupa den ekonomiska analysen.

5.3 Återförsäljning av BESS

I rapporten är ekonomiska faktorer någonting som väger tungt och för företag innebär det en stor satsning att investera i ett BESS. En viktig del att undersöka är därför återförsäljningen av ett BESS. Detta innebär att även när batterikapaciteten sjunkit till 80% och BESS inte längre bedöms som tillräckligt duglig finns det fortfarande en möjlighet att få tillbaka lite av den initiala investeringen.

Att estimera vad detta andrahandsvärde kommer vara vid försäljning är svårt, inte minst med tanke på att denna försäljning sker först om 10-15 år och hänsyn behöver tas till teknik- och samhällsutveckling. Det finns heller ingen källa att referera till då detta område är så pass nytt och under ständig utveckling. Uppskattningen av andrahandsvärdet bygger istället på förståelsen av hur batterier degraderas och hur kapitalvaror i allmänhet värderas.

Större tekniska system minskar i värde över tid på grund av ålder, slitage och att nyare, mer effektiva och billigare system lanseras. Ett begagnat system säljs också ofta vidare med få eller inga garantier för köparen vilket behöver kompenseras med ett lägre pris. Idag är det inte ovanligt med en värdeminskning på 20-30% på industriell utrustning under de första åren enligt [37]. En kvarvarande kapacitet på 80% för batterierna innebär att användningen för krävande applikationer såsom elfordon är kraftigt begränsad, även om det fortfarande kan hittas användning i andra applikationer. Den teknologiska utvecklingen kommer också leda till ett lägre andrahandsvärde. Enligt [31] visar marknaden att priserna för LFP-batterier har sjunkit under de senaste åren och det finns ingen anledning att tro att denna utveckling skulle upphöra.

Med allt detta i beaktning är projektets bedömning att andrahandsvärdet minskar med 40% jämfört med inköpspriset. Värdeminskningen är betydande men innebär fortfarande mycket pengar då inköpspriset är högt och bedöms vara en viktig faktor för systemets ekonomiska gynnsamhet.

5.4 Fler inkomstkanaler för BESS

I denna rapport har BESS utvärderats för sin funktion att reducera maxeffekt och tariffkostnader. Något som ökar värdet för BESS i en depå är om fler användningsområden tillämpas som kan skapa mervärde för ett företag. Ett exempel på detta är att företag kan optimera när BESS laddar och anpassa detta för kostnaden av elen. Alltså laddas BESS när elektriciteten är som billigast och kan använda den när det behövs vilket reducerar utgifter. Ett annat alternativ är att använda BESS som ett lokalt lager för egna solceller för att vidare minska kostnader för elektricitet.

Ett annat alternativ kan vara för företaget att bidra till det lokala elnätet när det råder effektbrist och stötta upp med lagrad el mot ersättning. I detta projekt är BESS optimerat för endast lastbilsladdning och därför är storleken på energilagret anpassat enbart för detta. En implementering av alternativa inkomstkällor med BESS skulle kräva en större storlek och kräva ytterligare bearbetning av resultaten denna rapporten producerat.

5.5 Second life batteries i BESS

I detta projekt är battericellerna i BESS nyproducerade men ett alternativ är att den baseras på så kallade second life batteries. Enligt [38] är detta ett batteri som har degraderat 20-30% och kan därmed inte fortsätta användas i exempelvis ett eldrivet fordon. Detta batteri kan då återanvändas i en annan applikation såsom ett BESS eller annan typ av energilagring. Denna typ av lösning ses som gynnsam i ett framtidsperspektiv eftersom allt fler eldrivna fordon tillverkas. Om BESS består av second life batteries skulle fler batterier krävas för att ge samma kapacitet. I denna rapport innebär detta inte ett problem då BESS är stationär och inte har några storleksbegränsningar.

5.6 Utvärdering av scenarion

I scenario 1 där ingen lunchladdning används behövs ett stort batteri på 1269 kWh i varje lastbil för att körsträckan på 600 km ska kunna köras. Laddningen sker endast under natten då all effekt dras från nätet. Detta gör att ett relativt jämnt effektuttag åstadkoms med en topp effekt av 460 kWh utan behovet av ett BESS. Enligt figur 18 är scenario 1 det dyraste men praktiskt är det enklast att genomföra då inget BESS används. En annan nackdel är det större batteriet som kommer att väga runt 9 ton enligt tabell 2. Normalt sett väger en lastbil med last inkluderad runt 40 ton. Att då avlägga nästan upp till en fjärdedel av hela den vikten på endast batteriet anses orimligt. Ur ett miljömässigt perspektiv visade det sig att scenario ett presterar sämre miljömässigt än scenario 2 och 3 under de första tio åren av depåns drift. Ur ett perspektiv på 60 år visade det sig däremot prestera bättre än scenario 2 och 3, men relevansen av ett så långt perspektiv kan ifrågasättas då en stor teknisk utveckling förväntas inom det tidsspannet.

Lösamheten för BESS i scenario 1 undersöktes också och dessa beräkningar finns i Appendix. Den skulle i sådana fall tillämpas som energireserv under natten eftersom inga lastbilar laddar under lunchen i detta scenario. Resultatet blev att nettobesparingen för BESS vid 400 V anslutning var 681 kr/mån, vilket ses som obetydlig i sammanhanget. Vid 10 kV anslutning har BESS en nettokostnad på 920 kr/mån. På grund av detta utesluts BESS från scenario 1 helt.

Scenario 2 är ett mellanting där både lastbilar med den större batteristorleken, 1269 kWh, och den mindre, 788 kWh, används. Frågan om hur rimligt det är att vissa lastbilar har det tyngre 9-tons batteriet kvarstår. Ekonomiskt har scenario 2 de lägsta kostnaderna per månad enligt figur 18. Genom att sex av tio lastbilar lunchladdar kan effektuttaget under natten minskas vilket håller nere kostnaderna jämfört med scenario 1.

I scenario 3 lunchladdar alla tio lastbilar och kan därför utrustas med mindre batteripaket. Ingen lastbil behöver bära det större 9-tons batteriet i detta scenario. Vilket är en fördel när det kommer till lastutrymme och potentiellt även energieffektivitet. Samtidigt har scenario 3 något högre månadskostnad än scenario 2 enligt figur 18 även om skillnaden är liten. Anledningen är bland annat att lastbilsbatterierna används mer intensivt med ungefär 0.93 ekvivalenta cykler per dygn. Detta sliter mer på batterierna vilket leder till tätare batteri-byten och högre kostnader över tid. En annan faktor som behövs ta hänsyn till om detta scenario ska fungera är ett stort BESS. Scenario 3 ger den största nettobesparingen 65 644 kr/mån vid 400 V på grund av BESS enligt figur 19.

Som nämnts tidigare i rapporten är batterier en teknik som har utvecklats mycket de senaste åren. Nya kemier utvecklas och produktionen blir billigare, en trend som sannolikt kommer fortsätta. I den miljömässiga analysen över 60 år i figur 21 ser det mer gynnsamt ut att inte använda BESS. Dock är det mest relevant att titta på de tio närmsta åren i och med den pådrivande utvecklingen som kommer ändra förutsättningarna. Med detta i åtanke ser det istället ut som att BESS är ett miljömässigt bra alternativ genom att titta på figur 20. I takt med den spridda elektrifieringen av samhället ställs ökade krav på elnätet, detta kommer

göra BESS ännu mer attraktivt som en åtgärd för att både jämna ut effektoppar och minska behovet av att ändra dagens elnäts-infrastruktur. BESS presenteras redan idag som en lovande investering men med ovan resonemang i beaktning är det en rimlig bedömning att tro att denna också kommer att öka i lönsamhet i framtiden.

Att investera i ett BESS bör då nästintill kunna betraktas som en icke-fråga utifrån rapportens resultat. Vad som blir desto mer intressant att fokusera på är återbetalningstiden och hur lönsam denna BESS-investering skulle vara. Här visar resultatet att ju mer BESS används, det vill säga ju större effektoppar BESS kompenserar för, desto bättre avkastning kommer investeringen att få.

6 Slutsats

Den miljömässiga analysen visar att scenario 2 och 3 är bättre än scenario 1, där scenario 3 är bäst med liten marginal. Detta beror på att de tio första åren är mest relevanta att titta på eftersom det kommer ny teknik som ger nya förutsättningar. Detta försvårar en analys med ett längre tidsperspektiv.

Ekonomisk analys ger att scenario 2 är det scenario med lägst månatliga kostnader. Skillnaden mellan de olika scenariorna i månatliga kostnader är dock liten. Den största prisskillnaden är mellan scenario 1 och 2 och summeras till 3856 kr/mån vilket bedöms förhållandevis litet i sammanhanget.

Användning av ett BESS visar sig vara fördelaktig för att jämna ut effekttoppar som annars skulle skapas av lunchladdningen. Utan ett energilager skulle laddningen skapa ett högt effektuttag från elnätet. I scenario 3 som har högst effekttopp når den högsta effekten tagen från nätet 1270 kW utan stöd av ett BESS vid lunchladdning. Med ett BESS kan denna topp effekt kapas drastiskt ned till 295 kW. Detta kräver en dimensionering på BESS-kapacitet på 3750 kWh.

Scenario 3 är det scenario som bedöms som mest rimligt att implementera på grund av lastbilsbatteriernas kapacitet i de andra scenarierna. Alla lastbilsbatterier i Scenario 3 har storleken 788 kWh, scenario 1 och 2 har båda lastbilar med batteristorleken 1269 kWh vilket bedöms orimligt.

Utifrån de anslutningsalternativ som finns tillgängliga för depån är bedömningen att en 10 kV anslutning är att föredra framför en 400 V anslutning på grund av lägre effekttariff- och elöverföringsavgifter. Samtidigt visade NVM-beräkningar att en investering i ett BESS får bäst avkastning och kortare återbetalningstid med en 400 V anslutning, just på grund av de högre effekttariffavgifterna som finns för 400 V anslutning.

Referenser

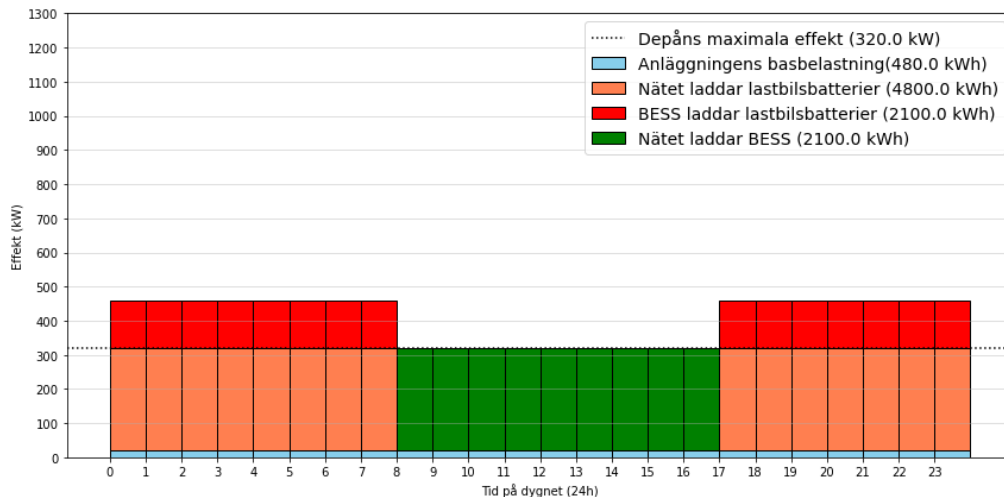
- [1] Europeiska unionens råd, “Klimatförändringarna: vad gör EU? - Consilium.” u.å. [Online]. Tillgänglig: [https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/climate-change/\(hämtad: 2025-03-27\)](https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/climate-change/(hämtad: 2025-03-27)).
- [2] K. Axelsson, och E. Nolinder, “Framtidens tunga lastbilsflotta-en omvärldsanalys.” WSP Sverige AB , Östersund, Sverige, Uppdragsnummer 10361276, 2024 [Online], Tillgänglig: <https://www.trafa.se/globalassets/pm/underlag/framtidens-lastbilsflotta.pdf>, Hämtad: 2025-03-25.
- [3] Vattenfall Eldistribution AB, “Batterilager Uppsala - Ett forsknings- och innovationsprojekt som utvärderar hur man kan möta ett ökat effektbehov i samhället med en batterianläggning.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.vattenfalleldistribution.se/varverksamhet/innovation/batterilager> (hämtad: 2025-03-26).
- [4] Beving, “Hur fungerar säker batterienergilagring, bess?.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://beving.se/vad-ar-bess/> (hämtad:2025-05-07).
- [5] Göteborg Energi Elnät, “Elnätsavgiften.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.gotborgenergi.se/foretag/elnat/elnatsavgiften> (hämtad: 2025-02-04).
- [6] Energimyndigheten, “Här sker elproduktion och elanvändning i sverige.” Tillgänglig: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.energimyndigheten.se/globalassets/om-oss/lagesrapporter/elmarknaden/2019/mars/har-sker-elproduktion-och-elanvandning-i-sverige.pdf> (hämtad:2025-05-13).
- [7] Energimarknadsinspektionen, “Så här är elnätet uppbyggt.” 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://ei.se/konsument/el/sa-har-ar-elnatet-uppbyggt?utm> (hämtad:2025-04-15).
- [8] Keysight, “How Does a Transformer Work?.” u.å. [Online]. Tillgänglig: [https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/guides/how-does-a-transformer-work#:~:text=Transformers%20operate%20using%20electromagnetic%20induction,windings%20determines%20the%20voltage%20conversion.\(hämtad:2025-04-17\)](https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/guides/how-does-a-transformer-work#:~:text=Transformers%20operate%20using%20electromagnetic%20induction,windings%20determines%20the%20voltage%20conversion.(hämtad:2025-04-17)).
- [9] A. Lejestrand, “Effekttariffer - varför då?.” *Energiföretagen*, [Online], 02. 03, 2025. Tillgänglig: <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/elnatet--distribution-av-el/effekttariffтарыffer/> (hämtad:2025-04-16).
- [10] Energicentrum Gotland, “Slutrapport tariff 1.0 – kapacitetsbaserade elnätstariffer.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://energicentrum.gotland.se/wp-content/uploads/2025/01/Slutrapport-Tariff-1.0-Energicentrum-Gotland.pdf> (hämtad: 2025-05-08).
- [11] US Department of Energy, “DOE Explains...Batteries.” u.å. [Online]. Tillgänglig: [https://www.energy.gov/science/doe-explainsbatteries#:~:text=To%20accept%20and%20release%20energy,through%20the%20circuit%20and%20electrolyte.\(hämtad:2025-04-08\)](https://www.energy.gov/science/doe-explainsbatteries#:~:text=To%20accept%20and%20release%20energy,through%20the%20circuit%20and%20electrolyte.(hämtad:2025-04-08)).
- [12] Y. Miao, P. Hynan, A. Von Jouanne, and A. Yokochi, “Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements.” *MDPI AG*, vol 12, nr 6, ss 2-10, 03. 2019, doi: 10.3390/en12061074.
- [13] Battery University, “Bu-808c: Coulombic and energy efficiency with the battery.” 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808c-coulombic-and-energy-efficiency-with-the-battery> (hämtad: 2025-03-01).
- [14] A. Ahmadian, M. Sedghi, A. Elkamel, M. Fowler, and M. Aliakbar Golkar, “Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assess-

- ment and conceptual framework.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, ss. 2611–2615, 01.2018, doi:10.1016/j.rser.2017.06.067.
- [15] Battery University, “BU-402: What Is C-rate?.” 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate> (hämtad:2025-04-10).
- [16] Stödtjänster.se, “Så beräknas c-tal.” 2024-01-16. [Online]. Tillgänglig: <https://stodtjanster.se/sa-beraknas-c-tal/> (hämtad:2025-05-07).
- [17] R. Kumar and S. Chavan, “Numerical and Experimental Investigation of Thermal Behaviour for Fast Charging and Discharging of Various 18650 Lithium Batteries of Electric Vehicles.” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 40, nr. 6, ss. 1492-1499, 12.2022, doi:10.18280/ijht.400618.
- [18] M. Qu, O. Abdelaziz, Z. Gao, and H. Yin, “Isothermal membrane-based air dehumidification: A comprehensive review.” *Elsevier Ltd*, vol 82, ss 4060-4069, 02.2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.067.
- [19] F. Todeschini, S. Onori, and G. Rizzoni, “An experimentally validated capacity degradation model for Li-ion batteries in PHEVs applications.” *IFAC Proceedings Volumes*, vol 45, nr 20, ss 456–461, 01.2012, doi:10.3182/20120829-3-MX-2028.00173.
- [20] X. Lai, Q. Chen, X. Tang, Y. Zhou, F. Gao, Y. Guo, R. Bhagat, and Y. Zheng, “Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective.” *eTransportation*, vol. 12, ss. 1-15, 05.2022, doi:10.1016/j.etrans.2022.100169.
- [21] Statistiska centralbyrån, “Elproduktion efter produktionslag 2024.” 2025-02-12. [Online]. Tillgänglig: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/manatlig-elstatistik-och-byten-av-elleverantor/pong/tabell-och-diagram/elproduktion-efter-produktionslag-2024/> (hämtad:2025-02-12).
- [22] M. Gazda-Grzywacz, D. Burchart-Korol, A. Smoliski, and K. Zarebska, “Environmental protection - greenhouse gas emissions from electricity production in Poland.” i III Alternative Fuels Forum, Gdansk, Polen, 2019, [Online]. Tillgänglig: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1398/1/012004/pdf>, Hämtad 2025-04-04.
- [23] Upphandlingsmyndigheten, “Olika typer av investeringskalkyler.” u.å. [Online]. Tillgänglig: <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/om-hallbar-upphandling/ekonomiskt-hallbar-upphandling/lcc-for-langsigtigt-hallbara-inkop/olika-typer-av-investeringskalkyler/> (hämtad 2025-05-05).
- [24] EY, “Regulatorisk kalkylränta en teoretisk översikt.” 2017. [Online]. Tillgänglig: <https://ei.se/download/18.5b0e2a2a176843ef8f584/1608542148549/EY-rapport-Regulatorisk-kalkylr%C3%A4nta-en-teoretisk-%C3%B6versikt.pdf> (hämtad 2025-05-07).
- [25] K. Mongird, V. Viswanathan, J. Alam, C. Vartanian, V. Sprenkle, and R. Baxter, “2020 Grid Energy Storage Technology Cost och Performance Assessment .” *U.S. Dept. of Energy*, Washington D.C, USA, DOE/PA-0204, 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>, Hämtad: 2025-04-22.
- [26] “Lithium ng 12,8v battery manual.” Amsterdam, Nederländerna: Victron Energy, 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.victronenergy.com/media/pg/Lithium_NG_battery_12%2C8_V/sv/technical-data.html, Hämtad: 2025-04-25.

- [27] S. Jenu, A. Hentunen, J. Haavisto, and M. Pihlatie, “State of health estimation of cycle aged large format lithium-ion cells based on partial charging.” *Journal of Energy Storage*, vol. 46, ss. n-n, 02.2022, doi:10.1016/j.est.2021.103855.
- [28] Battery University, “Bu-808: How to prolong lithium-based batteries.” 2023-10-11. [Online]. Tillgänglig: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries> (hämtad:2025-05-12).
- [29] Volvo Lastvagnar, “Volvos elektriska lastbilar i ett första oberoende test.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvotrucks.se/sv-se/news/press-releases/2022/jan/volvos-heavy-duty-electric-truck-is-put-to-the-test-excels-in-both-range-and-energy-efficiency.html> (hämtad: 2025-03-20).
- [30] Q. Lu, B. Zhang, S. Yang, and Z. Peng, “Life cycle assessment on energy efficiency of hydrogen fuel cell vehicle in China.” *Energy*, vol 257, ss 4-9, 10.2022, doi:10.1016/j.energy.2022.124731.
- [31] BloombergNEF, “Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017, falling to \$115 per kilowatt-hour.” 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/> (hämtad: 2025-05-09).
- [32] N. Gray, R. O’Shea, D. Wall, B. Smyth, P. N. Lens, and J. D. Murphy, “Batteries, fuel cells, or engines? a probabilistic economic and environmental assessment of electricity and electrofuels for heavy goods vehicles.” *Advances in Applied Energy*. vol. 8, ss. 18, dec. 2022, doi:10.1016/j.adapen.2022.100110.
- [33] M. A. Khan, “Multiphysics Modelling of PEM Fuel Cells - With Reacting Transport Phenomena at Micro and Macroscales,” 12 2011.
- [34] M. A. Pellow, C. J. Emmott, C. J. Barnhart, and S. M. Benson, “Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis.” *Energy and Environmental Science*, vol. 8, nr.7, ss 5-7, 2015, doi:10.1039/c4ee04041d.
- [35] Göteborg Energi Elnät, “Offertförfrågan - lågspänning.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.gotborgenergi.se/foretag/elnat/offertforfragan-lagspanning-for-foretag> (hämtad: 2025-05-06).
- [36] Energiföretagen, “Elnätets längd.” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/elnetet-distribution-av-el/elnetets-langd/> (hämtad: 2025-05-06).
- [37] C. Hexter, “Five Advantages Of Leasing Used Equipment.” *JLG DirectAccess Blog*, [Online], 12.11.2022.Tillgänglig:<https://www.jlg.com/en/technology-innovation/directaccess/5-advantages-of-leasing-used-equipment>(hämtad:2025-05-13).
- [38] Volvo Energy, “Innovating battery circularity: An interview with volvo energy’s elisabeth larsson.” 2024-04-23. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvoenergy.com/en/news-media/news/2024/apr/volvo-energys-second-life-and-battery-circularity-story-an-interview-with-elisabeth-larsson.html> (hämtad:2025-05-12).

7 Appendix

I figur 22 har ett BESS installerats i scenario 1.



Figur 22: Energibalans för scenario 1 med BESS. Depåns maximala effekt, det vill säga högsta timmedeleffekttoppen tagen från nätet blir 320 kW.

Skillnaden i depåns maximala effekt med och utan BESS är 140 kW. Enligt tabell 4 innebär det en besparing av 10 771 kr/mån vid 400 V anslutning och 9170 kr/mån vid 10 kV anslutning. Genom att parametrisera (8) fås

$$E_{\text{BESS,BOL},1} = \frac{u}{c(l_{\text{max}} - l_{\text{min}})} = \frac{2100}{0.8(0.8 - 0.15)} = 4038 \text{ kWh.}$$

BESS laddas med 2100 kWh och urladdas med 2100 kWh under ett dygn. Genom att ta det aritmetiska medelvärdet av BESS kapacitet uppskattas den genomsnittliga kapaciteten av energilagret. Denna beräknas till 90% vilket är 3634 kWh. Med parametrisering av (2) framtas

$$\#n = \frac{L + U}{2E} = \frac{2100 + 2100}{(2)(3634)} = 0.58$$

som antalet ekvivalenta cykler per dygn för BESS. Baserat på detta och att BESS når 80% av ursprunglig kapacitet efter 3330 ekvivalenta cykler blir BESS livslängd i depån 5763 dygn eller ≈ 192.1 månader.

Inköpspriset för ett BESS av typ LFP beräknas med hjälp av tabell 2. En växelkurs 1 USD = 10 SEK och en kapacitet på 4038 kWh ger en total kostnad på 3 230 400 kr. Vid försäljning uppskattas BESS värde till 40% av inköpspriset. Utslaget blir då den månatliga kostnaden för BESS 10 090 kr/mån. Alltså blir nettobesparingen endast 681 kr/mån vid 10 kV anslutning vilket ses som obetydlig i sammanhanget. Vid 400 V anslutning blir BESS en nettokostnad av 920 kr/mån.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS