



EXAMENSARBETE INOM ENERGI OCH MILJÖ,
AVANCERAD NIVÅ, 30 HP
STOCKHOLM, SVERIGE 2021

Elektrifieringen av personbilsflottan

En prognos över hur det ökade elbehovet
påverkar Stockholms regionnät år 2030

CHARLOTTE EKSTRAND



Elektrifieringen av personbilsflottan

En prognos över hur det ökade elbehovet påverkar Stockholms regionnät år 2030

CHARLOTTE EKSTRAND

Supervisor

HAMPUS BERG MÅRTENSSON

Examiner

MATTIAS HÖJER

Supervisor at Naturvårdsverket

NIKLAS BRÄNNLUND

Degree Project in Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure

KTH Royal Institute of Technology

School of Architecture and Built Environment

Department of Sustainable Development, Environmental Science and Engineering

SE-100 44 Stockholm, Sweden

TRITA-ABE-MBT-21413

Abstract

The transport sector currently accounts for about a third of all greenhouse gas emissions in Sweden. To work in line with the Paris Agreement, it has thus been decided that these emissions should be reduced by 70 percent by 2030, relative to the levels measured in 2010. To achieve this goal and cope with climate change, the Swedish parliament is, among other things, currently working towards accelerating the electrification of transports. This, in turn, could result in major challenges for the Swedish electricity grid, as power lines have not been expanded at the same rate as the need for electricity has increased. In Stockholm, it has become a problem with a lack of capacity, which means that it is not possible to satisfy the region with electricity at all times of the year. Meanwhile, it will not be possible to expand new power lines to Stockholm until we reach around the year 2030.

The purpose of this study is to investigate how the electrification of the passenger car fleet could affect the regional network in Stockholm when we reach the year 2030. The method that has been used is based on scenario methodology where both quantitative and qualitative data has been used to construct two different main scenarios. Firstly, a low scenario was constructed, where the passenger car fleet is electrified slowly, and secondly, a high scenario was constructed where the passenger car fleet is electrified rapidly. By examining how the electricity demand could develop until the year 2030 on an hourly basis for these two scenarios, an estimate is made of how many hours a year there could be a lack of capacity and how large the power shortage would be on these occasions if all the electricity demand is to be satisfied. Furthermore, it is also investigated whether flexible resources in the home-charging of electric vehicles can affect how many hours there could be a lack of capacity and what the correlation looks like between the number of electric vehicles and lack of capacity.

The result from the study shows that the electrification of the passenger car fleet can lead to a congested electricity grid if users charge their cars uncontrolled. This, as the charge is likely to coincide with times of the day when the electricity demand already is great. Furthermore, the number of hours with a lack of capacity increases in proportion to the number of passenger cars that are electrified. When flexible resources are integrated into the home-charging, the effort on the power grid is significantly reduced. Increasing the incentives for people to change their behaviours about charging can thus have positive effects on the electricity grid. However, even if flexible resources are integrated into the home charging system, the way it is assumed to be implemented here, the result shows that there may still be a lack of capacity. There is thus still a risk that the electrification of the passenger car fleet will be delayed.

Keywords: Capacity shortage, Controlled charging, Vehicle-to-grid, Uncontrolled charging, Load curve, Electric vehicles, Stockholm

Sammanfattning

Transportsektorn står i dagsläget för cirka en tredjedel av alla växthusgasutsläpp inom Sverige. För att arbeta i linje med Parisavtalet har Sveriges riksdag därmed beslutat att dessa utsläpp ska minska med 70 procent fram till år 2030, relativt de nivåer som uppmättes år 2010. För att uppnå målet och klara klimatmätningen, arbetar man bland annat med att påskynda elektrifieringen av transporter. Detta skulle kunna innebära stora utmaningar för det svenska elnätet, eftersom man inte byggt ut ledningar i samma takt som elbehovet har ökat. I Stockholm har det därför uppstått kapacitetsbrist, som innebär att man inte kan tillgodose regionen med el vid alla tidpunkter under året. Samtidigt kommer man inte kunna bygga ut nya ledningar till Stockholm förrän vi når cirka år 2030.

Syftet med denna studie, är att undersöka hur elektrifieringen av personbilsflottan kan komma att påverka regionnätet i Stockholm år 2030, där det redan idag råder kapacitetsbrist. Metoden som används är baserad på scenariometodik där både kvantitativa och kvalitativa data används för att konstruera två olika huvudscenarion, ett lågscenarion där personbilsflottan elektrifieras långsamt och ett högscenarion där personbilsflottan elektrifieras snabbt. Genom att utforska hur elbehovet skulle kunna utvecklas fram till år 2030 på timbasis för dessa scenarion, görs en uppskattning över hur många timmar om året som det skulle kunna råda kapacitetsbrist, samt hur stor effektbristen blir vid dessa tillfällen, om allt elbehov ska kunna tillgodoses. Vidare undersöks om även flexibilitetsresurser i hemmaladdningen, kan påverka hur många timmar det råder kapacitetsbrist och hur korrelation ser ut mellan antalet laddbara bilar och kapacitetsbrist.

Resultatet från studien visar att elektrifieringen av personbilsflottan kan leda till stora ansträngningar på elnätet om användare laddar utifrån egna preferenser och därmed okontrollerat, eftersom laddningen sannolikt sammanfaller med tider på dygnet när elbehovet redan är som störst. Vidare ökar antalet timmar med kapacitetsbrist proportionellt mot hur många personbilar som elektrifieras. När flexibilitetsresurser integreras i hemmaladdningen, minskar ansträngningen på elnätet dock betydligt. Att öka incitamenten för att människor ska ändra sina beteenden gällande laddning, kan därmed positiva effekter på elnätet. Men även om flexibilitetsresurser integreras i hemmaladdningen, på det sätt som har antagits genomföras i denna studie, visar resultatet att det fortfarande kan uppstå kapacitetsbrist. Det finns därmed fortfarande en risk för att elektrifieringen av personbilsflottan skulle kunna försenas.

Nyckelord

Kapacitetsbrist, Kontrollerad laddning, Okontrollerad laddning, Lastkurva, Laddbara fordon, Stockholm

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och har utförts på uppdrag av Naturvårdsverket under vårterminen 2021. Arbetet är det avslutande momentet på Civilingenjörsprogrammet Energi och miljö med masterinriktning Miljöteknik och hållbar infrastruktur vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm.

Jag vill först och främst rikta ett stort tack till mina handledare under arbetets gång, Hampus Berg Mårtensson från KTH och Niklas Brännlund från Naturvårdsverket. Jag uppskattar att ni alltid ifrågasatt mina påståenden och kommit med nya infallsvinklar - vilket höjt kvalitén på arbetet. Stort tack för ert engagemang och för att ni möjliggjort detta projekt! Vidare vill jag rikta ett stort tack till enheten Klimatklivet på Naturvårdsverket som varit otroligt välkomnande, trots dessa pandemi-tider. Även om vi inte kunnat träffas fysiskt har ni alltid bjudit in till inspirerande möten och roliga fikastunder över Skype. Jag tar med mig mycket inspiration härifrån inför mitt kommande arbetsliv.

Jag vill också tacka Power Circle och Stockholms stad som försett mig med både data och värdefulla insikter om elbehovet och laddinfrastruktur i Stockholm. Detta har främjat min studie och stärkt mina resonemang.

Till sist vill jag tacka min familj för all er support under arbetets gång och för att ni alltid tror på mig; mina föräldrar, Benjamin, Johan, Alice och Timmy. Ni är ovärderliga!

Charlotte Ekstrand

Charlotte Ekstrand
Stockholm, Maj 2021

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Syfte, mål och frågeställningar	2
1.2 Uppsatsens disposition	2
2 Bakgrund	3
2.1 Elnätets uppbyggnad	3
2.1.1 Kapacitet	3
2.1.2 Kapacitetsbrist	4
2.1.3 Anslutningsplikt	5
2.1.4 Projekt för ökad kapacitet och flexibilitet	5
2.1.5 Lokal elproduktion	6
2.2 Laddbara fordon	6
2.2.1 Laddinfrastruktur	6
2.2.2 Elbehovet för laddbara bilar	7
2.2.3 Laddningsstrategier	7
2.2.4 Smarta elnät	8
3 Metod	9
3.1 Avgränsningar	12
3.2 Konstruktion av scenarion	13
3.3 Antaganden	13
3.4 Steg 1 – Nutida elbehovet i Stockholm	15
3.5 Steg 2 – Tillkommen elanvändning utan laddbara bilar	16
3.6 Steg 3 – Tillkommen elanvändning från laddbara bilar	18
3.6.1 Publik laddning	19
3.6.2 Icke-publik laddning	22
4 Resultat	25
4.1 Högscenario	25
4.2 Lågscenario	27
4.3 Korrelationen mellan kapacitetsbrist och antalet laddbara bilar	28
5 Känslighetsanalyser	31
5.1 Supply metric	31
5.1.1 All laddning sker vid publika laddpunkter	34
5.2 Offentlig sektor och service	35
6 Diskussion	38
6.1 Elbehovet för laddbara bilar och kapacitetsgränser	38
6.2 Metod och data	39
6.2.1 Stockholms elförbrukning	39
6.2.2 Övriga sektorer	40

6.2.3 Laddbara bilar	40
6.2.4 Liknande studier	40
6.3 Transportsektorns utveckling	41
6.4 Framtida studier	41
7 Slutsatser	42
Källhänvisning.....	43
Appendix A	48
A1. Supply metric	48
A.1.1 Beräkning av totala laddade energin	48
A.1.2 Beräkning av den totala möjliga levererade energin	49
A.1.3 Beräkning av antalet laddpunkter	50

Förkortningar

CPEV - Charging Points per Electrical Vehicle.

BEV - Battery Electric Vehicle, ren elbil.

PHEV - Plug-In Hybrid Electric Vehicle, laddhybrid.

Svk - Svenska kraftnät.

V2G - Vehicle-to-grid.

Ordlista

Battery Electric Vehicle (BEV, rena elbilar) - En ren elbil framförs enbart med hjälp av el som bränsle. Batteriet kan dessutom laddas upp från ett externt elnät.

Kapacitetsbrist - Kapacitetsbrist uppstår när elnätets förmåga att leverera el vid en viss tidpunkt till en viss plats, dvs effekt, inte räcker till. I detta arbete definieras kapacitetsbrist med avseende på uttag från nätet.

Kontrollerad laddning - Extern kontroll för att skapa incitament till att förlägga laddningen till tider på dygnet då elsystemet är mindre belastat.

Laddbara fordon - Används i detta arbete för att hänvisa till PHEV och BEV. Laddbara fordon innefattar med andra ord de bilar som kan laddas från ett externt elnät.

Laddinfrastruktur - Infrastrukturen som behövs för att batterierna i de laddbara fordonen ska kunna laddas upp. Här avses både publik och icke-publik laddning.

Laddsession - Perioden från det att batteriet i det laddbara fordonet börjar laddas tills det att kabeln kopplas ur.

Lastkurva - Visar hur elanvändningen (lasten) fördelar sig under den undersökta tidsperioden. Detta ger upphov till en lastkurva.

Normalladdning - Laddning av laddbara fordon med växelström och med effekter under 50 kW.

Okontrollerad laddning - Laddningen sker utifrån användarens egna behov och preferenser. Det finns alltså ingen extern reglering eller incitament att flytta laddningen.

Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV, laddhybrid) - Batteriet kan laddas upp från ett externt elnät. Laddhybrider har även en förbränningsmotor som kan användas för alternativa drivmedel när batteriet är urladdat.

Snabbladdning - Laddning av laddbara fordon med likström samt effekter som är större eller lika med 50 kW.

Topplast - Högsta momentana effektuttaget under den undersökta tidsperioden.

Vehicle-to-grid (V2G) - Ett koncept som bygger på att bilar både kan laddas upp via elnätet, men även skicka tillbaka energi ut på elnätet, vid de tidpunkter när det exempelvis råder kapacitetsbrist.

1 Inledning

Transporter har haft en central roll i hur samhällen har organiserats, och bilen har i sin tur varit en viktig förutsättning för urban tillväxt och suburbanisering (Tarr, 2005). Trots detta, har bilen också haft många negativa effekter både på lokal, regional, nationell och global nivå. Inom EU står transportsektorn för cirka 30 procent av alla koldioxidutsläpp som sker idag (Europaparlamentet, 2019) och inom Sverige står sektorn för en tredjedel av växthusgasutsläppen. För att arbeta i linje med Parisavtalet och de 16 svenska miljö kvalitetsmålen måste det därför ske en markant reduktion av dessa utsläpp fram till år 2030. Ett av etappmålen inom miljö kvalitetsmålet *Begränsad klimatpåverkan* handlar om att man från år 2010 fram till år 2030 ska minska växthusgasutsläppen inom transportsektorn med minst 70 procent (Sveriges miljömål, u.å.)

För att kunna minska dessa utsläpp har man inom många länder bestämt sig för att fordonssektorn ska elektrifieras. I Sverige subventionerar man exempelvis bilar med låga utsläpp och investeringsstöd betalas ut till laddinfrastruktur. Detta innebär i sin tur att efterfrågan på elbilar och utbyggnad av laddinfrastruktur troligtvis kommer att accelerera i en hög takt fram till år 2030 (Proposition 2019/20:65). Att elektrifiera fordonssektorn och därmed också tillgodose det kommande elbehovet är dock inte helt problemfritt. Sveriges transmissionsnät är idag ett av de äldsta i världen och många av ledningarna och stationerna behöver därmed bytas ut, vilket innebär en stor utbyggnad av transmissionsnätet för att kunna trygga den framtida elförsörjningen. Detta tar i sin tur både lång tid att göra men är även dyrt (Svenska kraftnät, 2020a). Samtidigt förväntas också elbehovet bli större inom andra sektorer, eftersom elektrifieringen bedöms vara en viktig lösning på samhällets klimatomställning när man övergår till fossilfria bränslen. Stålindustrin, bergmaterialindustrin samt gruv- och mineralbranschen är bara några exempel på branscher som jobbar mot att elektrifiera sina processer och förväntas därmed göra ett ökat anspråk på elanvändning i Sverige i framtiden. Etablering av mer elintensiv industri, såsom datahallar, förväntas också leda till ett omfattande elbehov (Fossilfritt Sverige, 2020).

Problematiken innebär att det i flera regioner runt om i Sverige redan har uppstått eller är på väg att uppstå kapacitetsbrist. Kapacitetsbrist uppstår när elnätets förmåga att leverera el, vid en viss tidpunkt, till en viss plats inte räcker till. Detta innebär att elsystemet är begränsat, när det kommer till hur mycket el som kan användas vid samma tidpunkt. Den främsta orsaken till att det idag råder kapacitetsbrist är den ökade elanvändningen, i kombination med att man brustit i planering och prognos kring elnätets utbyggnad (Sweco, 2020).

I Stockholm anses elnätet vara särskilt ansträngt och med fortsatt elektrifiering av flera sektorer samtidigt som befolkningstillväxten ökar, kommer efterfrågan på el att öka. Eftersom utbyggnad av nya kraftledningarna innebär en lång handläggningstid, kommer man inte kunna tillgodose Stockholm med nya kraftledningarna förrän omkring år 2030. Enligt Stockholms handelskammare finns risken för ett ekonomiskt produktionsbortfall på mellan 200 och 900 miljarder kronor under åren 2022–2031 till följd av detta (Stockholms handelskammare, 2020a). Det ökade elbehovet är framförallt kopplat till elektrifieringen av transportsektorn (Sweco, 2020) och beroende på hur snabbt personbilsflottan elektrifieras skulle därmed utfallet kunna bli olika. Eftersom transportsektorn är ett sociotekniskt system med ett okontrollerbart flöde är det svårt att exakt förutsäga hur sektorn kommer att utvecklas och påverka elbehovet, eftersom även sociala faktorer spelar in (Graham & Marvin, 2001).

Hur användare väljer att ladda sina bilar och vilka regleringar som finns kan ha stor inverkan på hur elanvändningen ser ut i framtiden. Här spelar flera komponenter in såsom: tillgänglig infrastruktur, individuella preferenser, laddningsbehov samt hur mycket och när man använder bilen. Den befintliga lastkurvan och topplasten i elnätet (högsta effektuttaget) skulle exempelvis kunna öka om alla väljer att ladda sitt fordon samtidigt, vilket framför allt sker när man har okontrollerad laddning. Med okontrollerad laddning avses att användaren laddar sin bil enligt egna preferenser och ansluter bilen till

elnätet om ett uttag finns tillgängligt samt om det finns ett behov av laddning. Det finns alltså ingen extern kontroll för att skapa incitament till att förlägga laddningen till tider på dygnet då elsystemet är mindre belastat (kontrollerad laddning) (Grahn, 2014). Vehicle-to-grid (v2g) kan även användas för att skapa en bättre balans mellan utbud och efterfrågan på elektrisk effekt. Konceptet v2g innebär att elbilar kan laddas ur på nätet, med andra ord skicka tillbaka energi ut på nätet, vid de tidpunkter då det exempelvis råder kapacitetsbrist (PowerCircle, 2020).

1.1 Syfte, mål och frågeställningar

Syftet med studien är att identifiera hur den ökade elanvändningen för laddbara fordon kan påverka effektuttaget i Stockholms regionnät år 2030 om man tillåter laddning att ske okontrollerat. Detta för att sedan kunna uppskatta hur omfattande problemet med kapacitetsbrist kan bli, som en konsekvens av den tillkomna lasten, ifall allt elbehov ska kunna tillgodoses. Vidare syftar studien till att undersöka om flexibilitetsresurser kan minska risken för kapacitetsbrist, genom kontrollerad laddning och v2g.

Frågeställningarna för studien är därför:

- 1) Hur många timmar om året kan det råda kapacitetsbrist i region Stockholm år 2030, om elektrifieringen av personbilsflottan sker snabbt respektive långsamt, samtidigt som Stockholms totala elbehov ska kunna tillgodoses?
- 2) Hur stor skulle effektbristen kunna bli vid de tillfällena som kapacitetsbrist infinner sig?

För att besvara frågeställningarna har två olika mål formulerats.

- Det första målet är, att ta fram lastkurvor på timbasis över hur elbehovet kan komma att se ut år 2030 i Stockholm, ifall personbilsflottan elektrifieras snabbt respektive långsamt, samt om bilarna laddas okontrollerat. Detta för att sedan kunna uppskatta hur många timmar om året det kan uppstå kapacitetsbrist i Stockholms regionnät, ifall allt elbehov tillgodoses.
- Det andra målet är, att ta fram lastkurvor på timbasis om kontrollerad laddning och v2g integreras i hemmaladdning. Detta för att identifiera om ändringen i laddning, kan påverka hur många timmar om året, som det råder kapacitetsbrist år 2030.

1.2 Uppsatsens disposition

Den genomförda studien är strukturerad utifrån IMRAD+C-modellen (Inledning, Metod, Resultat, Analys, Diskussion och Slutsatser). Inledningsvis ges en bakgrundsbeskrivning för att ge läsaren en förståelse för, i vilket sammanhang som studien genomförs. Avsnittet följs upp av en bakgrund, där centrala begrepp förklaras.

Därefter presenteras den metod som kommer tillämpas för att uppfylla syfte och mål. Metoden består av en litteraturstudie, semi-strukturerade intervjuer samt en kvantitativ framräkning av hur elbehovet kan komma att utvecklas. Här motiveras val av metod samt hur urvalet har gått till. Avgränsningar med arbetet presenteras i samband med detta. Därefter beskrivs hur scenarion konstruerats mer ingående inom metoden för att ge läsaren en förståelse för hur scenariometadodik har tillämpats.

Resultatet som därefter redogörs är utfallet från de scenarion som konstruerats. Detta följs upp av en känslighetsanalys, för att testa antaganden som har gjorts i studien. Därefter diskuteras implikationerna av resultatet i ett större sammanhang och hur man bör förhålla sig till dessa. Avslutningsvis sammanfattas de slutsatser som kan dras från studien.

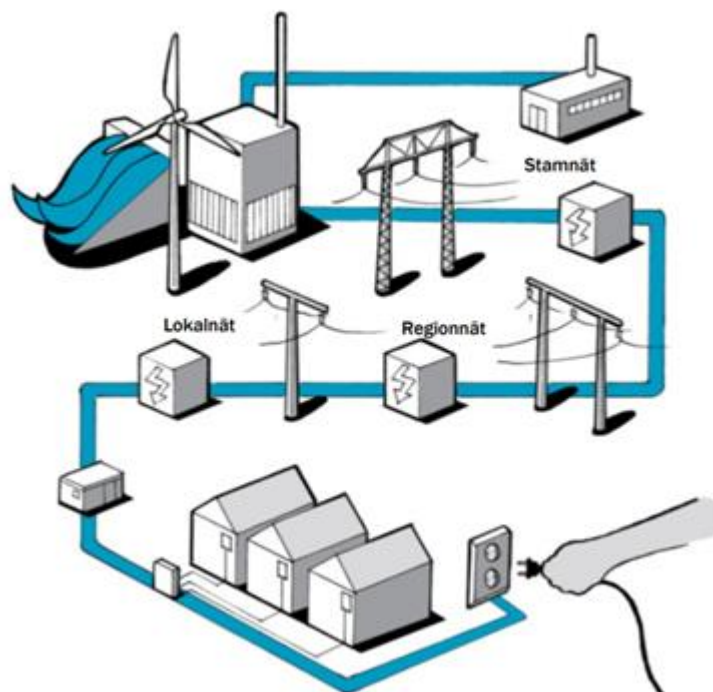
2 Bakgrund

Avsnittet börjar med en bakgrundsbeskrivning av hur Sveriges elnät är uppbyggt och hur situationen med kapacitetsbrist ser ut i region Stockholm. Här återges även de åtgärder som man idag bedriver i Stockholm för att mildra effekterna av kapacitetsbrist. Detta följs upp av en introduktion till hur laddbara bilar definieras och hur de laddas. I samband med detta förklaras även konceptet med laddningsstrategier.

Syftet med avsnittet är att ge läsaren en djupare förståelse för problematiken som uppstått med kapacitetsbrist i Stockholm och vilka utmaningar som uppstår när även personbilsflottan ska elektrifieras.

2.1 Elnätets uppbyggnad

Det svenska elnätet är uppbyggt av tre olika sammankopplade nät med olika spänningsnivåer, se Figur 1. Stamnätet som även kallas transmissionsnät, ägs av Svenska kraftnät (Svk) och sträcker sig genom hela Sverige. Stamnätets kraftledningar är anslutna till olika kraftstationer såsom vindkraft, vågkraft och kärnkraft, vilket genererar elektricitet på en högre spänningsnivå, som sedan transporteras ned till regionnäten. Regionnäten ägs i sin tur av regionnätsägare och fungerar som en förbindelse när el transporteras mellan stam- och lokalnäten (Svenska kraftnät, 2014). På regionnivå är det enbart Vattenfall och Ellevio som är ägare och har ett abonnemang gentemot Svk:s stamnät. Med abonnemang avses att regionnäten kan utnyttja en avtalad effekt (Edfast, 2021).



Figur 1. Det svenska elnätet uppbyggnad med spänningsnivåer (Energimarknadsinspektionen, 2018)

2.1.1 Kapacitet

Att det efterfrågade energibehovet kan överföras från elnätet till konsumenten vid en viss tidpunkt kallas kapacitet. När man talar om kapacitet i elnätet syftar man alltså på överföringskapaciteten (effekt) (Sweco, 2020). Kapacitetsbrist uppstår när de fysikaliska egenskaperna i elnätet påverkar överföringskapaciteten. I Sverige och Stockholm handlar det om att man inte hunnit bygga ut elledningar i samma takt som det elbehovet har ökat. Om den efterfrågade effekten då är större än den

mängd el som kan överföras i nätet, kan det alltså bli för trångt i de befintliga ledningarna (Energikontoret Storsthlm, 2020).

Effekt = Energi/tid [Watt, W]

Eftersom effekt mäts momentant, innebär detta att den kan variera över både timmarna på dygnet och under månaderna på året. De högsta effekttopparna sker under kalla vintermånader, när elbehovet är som störst för att värma upp våra bostäder, samt under de timmar på dygnet då många använder el till att exempelvis tvätta, laga mat eller koka kaffe (Energikontoret Storsthlm, 2020). Exempelvis kan det finnas kapacitet för att 1000 elbilar ska kunna ladda upp det totala energibehovet om 50 kWh utspritt över en dag. Om däremot alla elbilsägare plötsligt skulle välja att ladda sina bilar vid en och samma tidpunkt, skulle det momentana effektbehovet kunna uppgå i 50 MW. Detta skulle leda till stora och oförutsägbara påfrestningar på elnätet (Trivektor, u.å.). Elbehovet påverkas i sin tur av flera externa faktorer, där priset skulle kunna påverka hur stort elbehovet faktiskt är. Den totala kostnaden som en kund betalar för sin el består både av en elhandelskostnad samt en elnätskostnad (Fortum, u.å.a).

Gällande elhandelskostnaden, är det elbörsen Nord Pool, marknaden för inköp och försäljning av el på den nordiska marknaden, som skapar prisbildningen och lägger grunden för vilka priser som faktiskt kan erbjudas till de slutgiltiga kunderna. Som kund kan man påverka priset på sin elhandelskostnad genom att använda mindre el samt aktivt välja det elavtal som lämpar sig bäst, eftersom det råder fri konkurrens bland elhandelsbolagen. Elhandelspriset påverkas bland annat av hur utbud och efterfrågan ser ut på el i det område som man bor i. Exempelvis använder vi mer el under vintern, och då går priset upp. Vidare påverkas elpriset av hur stående valutor ser ut, vilka ekonomiska stöd som finns (bland annat utsläppsrätter och elcertifikat) samt priset på andra energislag (Fortum, u.å.a). Världsmarknadspriset på konkurrerande energislag, såsom olja, kol och naturgas påverkar nämligen hur mycket förnyelsebara energi vi använder. Andra faktorer som påverkar elpriset är hur mycket el som produceras. Om vattenståndet exempelvis är lågt, produceras mindre el via vattenkraft och därmed blir det högre priser (Fortum, u.å.b).

Elnätskostnaden kan man däremot inte påverka som kund, eftersom elnätsägarna har monopol på sina områden. Istället kontrolleras de av en tillståndsmyndighet som ser till att elnätsföretagen inte tar ut för höga priser relativt den kvalitet på el som levereras. Här tas också faktorer som avstånd mellan kunder i beaktande samt i vilken terräng som elledningarna dras, eftersom detta påverkar priset (Fortum, u.å.b). Eftersom det är en tillståndsmyndighet, skulle man kunna tänka sig att politisk inriktning skulle kunna påverka hur högt elpriset faktiskt blir, och på så vis skulle man kunna reglera ner elbehovet genom höga elpriser, så att det inte råder kapacitetsbrist. Kapacitetsbrist är alltså en dynamisk fråga kring samspelet mellan utbud och efterfrågan på el, där många faktorer spelar in och kan påverka det faktiska utfallet. I denna uppsats används dock termen kapacitetsbrist i ett mer statiskt perspektiv för att analysera hur elbehovet kommer öka, givet att inga oförutsägbara förändringar sker i politisk inriktning, väder, ekonomi eller om en allvarlig pandemi sprider sig, som skulle kunna påverka elbehovet.

2.1.2 Kapacitetsbrist

I Stockholmsregionen råder det redan idag kapacitetsbrist i elnätet, vilket beror på att elnätsägare i det regionala elnätet inte kan utöka sitt abonnemang gentemot Svk. Detta eftersom transmissionsnätet först måste förstärkas och byggas ut, vilket beräknas vara klart någon gång runt år 2030. Det är först då man kommer kunna förse Stockholmsregionen med ytterligare två nya 400-kV ledningar. När samtliga delar inom program Stockholm är klart kommer man ha en kapacitet på minst 6950 MW. Dock beror kapaciteten i Stockholm till stor del på var ökningen i eluttaget hamnar, eftersom den tillkomna effekten inte är jämnt spridd över hela regionen (Edfast, 2021). Vidare finns det även en risk för att utbyggnaden försenas, ifall handläggningstiden drar ut på tiden (Sweco, 2020).

Kapacitetsbrist anses därmed vara ett akut problem i Stockholm, eftersom man inte kan tillgodose dagens behov alla timmar på året (ibid.). I centrala delarna av Stockholm är Ellevio den dominerande elnätsägaren som för närvarande har ett abonnemang, det vill säga kontrakt, mot Svk om att kunna utnyttja 1525 MW alla dagar om året. Dessutom har Vattenfall ett abonnemang i Stockholms län gentemot Svk på totalt 2325 MW. Detta ger ett totalt abonnemang i regionnäten på 3850 MW för Stor-Stockholm, vilket även går i linje med dagens behov (Edfast, 2021).

2.1.3 Anslutningsplikt

Elnätsbolag har anslutningsplikt vilket innebär att de måste ansluta nya kunder eftersom de har monopol på elnätet. Om det däremot skulle uppstå risker för befintliga kunder i form av kapacitetsbrist, innebär detta att lokal- och regionnäten kan neka nya anslutningar. Detta innebär att kapacitetsbrist skulle kunna förhindra utbyggnaden av laddinfrastruktur och andra nu fossildrivna sektorer, som behöver ställa om för att kunna nå Sveriges klimat- och miljömål. Att verksamheter inte kan etablera sig i Stockholm utan måste söka sig till andra län på grund av avslag kan få stora konsekvenser i omställningen till fossiloberoende transporter. I dagsläget förs bland annat en dialog med de kunder som vill ansluta sig med en effekt som överstiger 1 MW i Stockholms stads lokalnät (Länsstyrelsen Stockholm, 2020).

Dessutom finns det i dagsläget ingen prioriteringsordning över vilka verksamheter och aktörer som bör prioriteras vid nya anslutningar till elnätet, när det råder kapacitetsbrist. Detta innebär att det är först till kvarn som gäller, och framåt ser energimarknadsinspektionen inget syfte med att inrätta något prioriteringssystem. Detta eftersom det kan vara svårt att avgöra vilka verksamheter som har högst samhällsekonomiskt värde, speciellt om de även ingår i samma verksamhetskategori. Det är också svårt att avgöra vem som ska ansvara för prioriteringen vid anslutningar och på vilken nätnivå det ska göras. Energimarknadsinspektionen menar därmed att nätkoncessionshavaren har rätt att neka anslutning motiverat av kapacitetsbrist. Samtidigt säger man också att ellagen bör tydliggöra att nya anslutningar inte får nekas om det finns andra samhällsekonomiska lösningar som kan avhjälpa kapacitetsbrist, exempelvis genom flexibilitetsresurser (Energimarknadsinspektionen, 2020).

2.1.4 Projekt för ökad kapacitet och flexibilitet

För att förbättra kapaciteten inom Stockholm finns det idag två strukturprogram: Stockholm Ström och Storstockholm Väst. Programmet Stockholm Ström syftar till att bygga om befintliga ledningar inom regionen för att kunna förbättra överföringskapaciteten både i region- och transmissionsnätet. Programmet Storstockholm Väst tillkom senare, när man insåg att transmissionsnätet in till Stockholm i väst behövde förstärkas. I detta program jobbar man med högre spänningsnivåer för att förstärka elnätet in till Stockholm (Sweco, 2020). Vidare har även Svk tillsammans med regionnätsägarna Ellevio och Vattenfall ingått ett samarbete i forskningsprojektet SthlmFlex, där en flexibilitetsmarknad ska testas. Samarbetet baseras på ett ökat samarbete mellan producenter och konsumenter, där elnätsägare kan köpa flexibilitetsresurser av olika aktörer för att på så vis motverka kapacitetsbrist (Svenska kraftnät, 2020b). De tre parterna har också slutit ett avtal om att kunna samordna deras effektuttag under de tidpunkter på året det råder kapacitetsbrist för att kunna avhjälpa varandra och mildra effekterna (Energimarknadsinspektionen, 2020).

Det görs således flera åtgärder i dagsläget för att kunna möta det ökade effektbehovet i Stockholm och för att avhjälpa kapacitetsbrist. Bland annat är det planerat, att man år 2023 kommer kunna bistå Stockholm med ytterligare 300–500 MW genom ett mindre antal åtgärder i transmissionsnätet som ökar överföringskapaciteten. Vidare har Ellevio slutit ett kontrakt med Stockholm Exergi om att under ett visst antal ansträngande timmar om året, kunna utnyttja en elproduktion från kraftvärmeproduktion om 320 MW fram till år 2032. Lokal elproduktion skulle då kunna skjutas till när det råder kapacitetsbrist in till Stockholm via regionnätet (Sweco, 2020).

2.1.5 Lokal elproduktion

Överlag har Stockholmsområdet en relativt låg andel lokal elproduktion. Av den totala elkonsumtionen år 2017 var enbart 2,2 TWh producerad inom regionen varav 2 TWh kom från kraftvärmeproduktion (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). Den 1 augusti 2019 infördes även en höjning av skatten på fossila bränslen som används i kraftvärmeproduktionen i Sverige. Enligt Stockholm Exergi kan detta leda till att deras elproduktion kommer att minska med ungefär 500 GWh per år. Baserat på tidigare siffror innebär det att den lokala elproduktionen i Stockholm skulle minska till cirka 1,7 TWh per år (2,2–0,5 GWh) (Stockholm Exergi, 2019). Detta hotar både Stockholms elförsörjning och tillväxt, eftersom anledningen till att man klarat elförsörjningen fram till idag mångt och mycket beror på den lokala elproduktionen (Svenskt näringsliv, 2019). Kapacitetsbrist beror alltså både på att det regionala effektbehovet är stort och på grund av att lokal elproduktion läggs ned. När lokal elproduktion läggs ned, blir det större efterfrågan på elen som förs in via transmissionsnätet in till Stockholm (Sweco, 2020).

2.2 Laddbara fordon

Elektrifieringen av transportsektorn kan delas upp i flera olika underkategorier. För vägtransporter ingår personbilar, bussar, lätta lastbilar och tunga lastbilar. Utöver detta förväntas det även ske ett ökat uttag från tunnelbana, järnväg, elfärjor, elvägar, bantrafik, luftfart samt fläktar i vägtunnlar. För vägtrafik är det främst personbilar och lätta lastbilar som kommer att öka uttaget fram till år 2030. Elektrifiering av tung trafik bedöms få sitt genombrott först efter år 2030 (Energimyndigheten, 2020).

När man talar om elektrifieringen av personbilssektorn syftar man på flera olika varianter av elektriska personbilar. Det finns elhybridfordon, elbilar, elbilar med bränsleceller samt plug-in elhybridfordon. Laddbara bilar av typen 'Plug-in' brukar i sin tur, delas upp i de två underkategorierna laddhybrider (PHEV) och rena elbilar (BEV). Gemensamt för dessa två underkategorier är att de kan laddas från ett externt elnät. Dessutom har båda varianterna både elmotorer och batterier. De skiljer sig dock såtillvida att laddhybrider även har en förbränningsmotor. Laddhybrider kan därmed också tankas med ett alternativt drivmedel, vilket oftast brukar vara bensin (Vti, 2014). I denna uppsats används samlingsnamnet *laddbara bilar* för att hänvisa till både PHEV och BEV.

2.2.1 Laddinfrastruktur

Laddinfrastruktur kan antingen vara publik, och därmed tillgänglig för allmänheten, eller icke-publik. Forskning visar på att majoriteten av all överförd energi till laddbara fordon, cirka 80–90 procent, sker vid icke-publika laddpunkter. Resterande laddningen sker vid publika laddpunkter i Sverige (Energimyndigheten, 2019). Även om enbart cirka 15 procent av den totala överförda energin sker vid publika laddpunkter har dessa stationer en viktig roll då de bidrar till ökad rörlighet. Publik laddning är därmed ett bra komplement till den icke-publika laddningen (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). He et al. (2013) menar bland annat att den publika laddinfrastrukturen är avgörande för att laddbara bilar ska öka på marknaden. Här måste många faktorer tas i beaktande såsom lokalisering, hur många laddstationer som ska implementeras och vilken kapacitet som finns tillgänglig (He et al., 2013). Det finns dock ekonomiska begränsningar i hur stor andel av laddningen som faktiskt kan ske vid publika laddpunkter. Från en undersökning i Norge kunde man bland annat konstatera att priset per kWh var 4 gånger så dyrt om man laddar sin elbil vid en snabbladdningsstation jämfört med när man laddade vid sin bostad (Figenbaum, 2019).

Laddning av de laddbara bilarna kan ske genom olika typer av uttag beroende på den överförda effekten. Uttag utrustade för högre effekter kan i regel ladda upp den laddbara bilen snabbare, medan en lägre effekt resulterar i långsammare laddning (Naturvårdsverket, 2021). Laddning av laddbara fordon med växelström och med effekter under 50 kW definieras som normalladdning i detta arbete. Snabbaddning definieras som laddning av laddbara fordon med likström samt effekter som är större eller lika med 50 kW (ibid.).

2.2.2 Elbehovet för laddbara bilar

Jämsides med de rådande utmaningarna med kapacitetsbrist, pågår även ett paradigmskifte i elektrifiering av transportsektorn samtidigt som befolkningmängden i Stockholmsregionen fortsätter växa. Detta leder till en kraftigt ökad efterfrågan på el. Bland annat har Ellevio gått ut med att effektbehovet i deras elnät kommer att ha ökat med 500–600 MW fram till år 2030. Svk har även gjort en helhetsbedömning att elbehovet kommer stiga uppemot 5600 MW i region Stockholm till år 2030. Efter år 2025 bedömer man också att regionnätägare måste förlita sig på flexibla lösningar för att tillgodose elbehovet i Stockholm (Sweco, 2020).

Flera studier på lokalnätetsnivå har också visat att det finns begränsningar i elsystemet när personbilsflottan elektrifieras. Sonerud (2018) visar i sin studie att det finns begränsningar i hur många publika laddgator man kan ha per nätstation i Stockholm, eftersom effekttopparna sammanfaller med övriga laster i nätet (Sonerud, 2018). Även Grundius & Topel (2020) visar i sin fallstudie på stadsdelen Hammarby Sjöstad att det kan uppstå problem med kapacitetsbrist redan år 2025 om man tillåter att fordon laddas okontrollerat (Grundius & Topel, 2020). Ellevio menar i sin tur att även om uttagen sker i lokalnäten kommer behovet kopplat till laddning av elbilar återspeglas i regionnätet. Detta eftersom kapacitetsbrist i Stockholm inte beror på uppbokad kapacitet, utan på utnyttjad kapacitet (Sweco, 2020).

2.2.3 Laddningsstrategier

Elektrifieringen av transportsektorn i Sverige medför således stora utmaningar. När 29 elnätbolag i Sverige tillfrågades i vilken omfattning elektrifieringen påverkar elnätskapaciteten svarade 20 procent att det får stora eller betydande utmaningar på kort sikt. På längre sikt, det vill säga inom en 10-årsperiod, steg denna siffra till 50 procent. Utmaningarna är främst kopplade till vägtrafiken, och mer specifikt personbilarnas ökade elanvändning (Nepp, 2020). En stor del av laddningen av laddbara bilar sker vid hemmet, vilket innebär att elnätsföretagen inte har samma kontroll över hur bilarna laddas och hur elbehovet ökar (Länstyrelsen Stockholm, 2020). Samtidigt finns det förhållandevis störst möjligheter för personbilar att styra sin elbils-laddning genom att ladda smart. Yrkestrafik är till exempel mer tidsbunden och har därmed svårare att vara flexibel när det kommer till laddning (Nepp, 2020)

I dagsläget saknas regelverk för hur bilar ska laddas, trots att okontrollerad laddning kan leda till oförutsägbara belastningar i elsystemet. I en enkätstudie av Wänéus & Östergren (2019) kunde man konstatera att nästan inga elnätbolag förbereder sig med flexibilitetsresurser för elbils-laddning fram till år 2030 (Wänéus & Östergren, 2019). Detta kan medföra begränsningar när transportsektorn ska elektrifieras, eftersom utbyggnad av laddinfrastruktur för både lätt och tung trafik, tunnelbana och elvägar riskerar att expandera långsammare (Stockholms handelskammare, 2020a). Det är därför av stor vikt att utreda vilka konsekvenser elektrifieringen av fordonssektorn skulle kunna leda till, om man inte ställer högre krav på att introducera mer flexibel laddning. Hur de laddbara bilarna laddas kan ha stort inflytande på resterande utveckling inom regionen.

Det finns flera olika metoder och tillvägagångssätt för att hantera effekttoppar, men i dagsläget finns det relativt svaga ekonomiska incitament för att människor ska välja att styra om sin laddning, till mindre belastade timmar. Istället styrs laddningen oftast av vanemässiga beteenden. Kombinationen av att det tar lång tid att bygga ut stamnätet till Stockholm samtidigt som det i dagsläget finns så få incitament till att använda smart laddning, ökar risken för att elektrifieringen av transportsektorn försenas (Nepp, 2020). Beroende på hur användare väljer att ladda sina personbilar och vilka regleringar som finns, kan man få olika typer av lastkurvor för elanvändningen (Grahn, 2014).

Med okontrollerad laddning avses att användaren laddar enligt egna preferenser och ansluter till elnätet om ett uttag finns tillgängligt samt om det finns ett behov av laddning. Med kontrollerad laddning avses istället att laddningen av fordonet på ett eller annat vis är kontrollerad av en extern aktör. Laddningen

baseras på information kring kraftsystemet samt elbehovet så att laddningen kan förläggas till tider på dygnet då elnätet inte är lika belastat. Kontrollerad laddning kräver ofta att det finns ekonomiska incitament för att användaren ska vilja skifta sin laddning i tid och för att användaren ska vilja lämna ut information kring sin elanvändning (ibid.).

2.2.4 Smarta elnät

Smarta elnät är ett sätt att beskriva hur samhället i framtiden kommer ha större och bättre möjligheter till kommunikation- och informationsteknik när det kommer till energiflödet i elnätet. Smarta elnät bidrar också till en kontinuerlig och dubbelriktad kommunikation mellan elproducenter och elkonsumenter. Detta medför att elanvändare i framtiden, kommer att kunna bli mer flexibla i sin elanvändning och ta mer kostnadseffektiva beslut, genom kontrollerad laddning. På så vis kan man också få en effektivare elanvändning samt minska stora effektoppar (Regeringens proposition, 2011).

Ett exempel på flexibel elanvändning är energilager. Genom att lagra energi när elpriset är lågt och produktionen är högre än konsumtionen, kan man spara energi när effektopparna är som störst. Batteriet kan alltså laddas upp när effektuttaget är litet i det befintliga elsystemet och laddas ur när effektuttaget är stort (PowerCircle, 2020). Bland annat har man kunnat se, i ett samarbete mellan Northvolt och Mälarenergi, att batterilager med en effekt om 220 kW och energikapacitet på 320 kW kan minska effektopparna med 80 procent vid elbilsaddning (Mälarenergi, 2020).

En smart teknik som börjar växa inom detta område är vehicle-to-grid (v2g), som möjliggör smart elbilsaddning där energin även kan skickas tillbaka ut på elnätet, när det råder kapacitetsbrist. Hittills finns det däremot ingen teknik som stödjer den europeiska laddstandarden och dessutom är en laddbox med v2g dubbelt så dyr som en laddbox utan. Vidare saknas det idag även ekonomiska incitament för att kunder skulle kunna använda sig av v2g, eftersom elnätsavgifterna inte nödvändigtvis påverkas av att man flyttar lasten i tid. Tanken är dock att man på sikt ska kunna erhålla en intäkt till följd av att man matar ut el på nätet. Då måste denna nytta även spegla det slitage av batteriet som medföljer. Det genomförs i Sverige redan idag pilotprojekt med v2g, men det kommer dröja ett par år innan standarden för tillverkning är klar och kan bli mer kommersiell (PowerCircle, 2020).

3 Metod

Den metod som har tillämpats i denna studie för att uppfylla syfte och mål har baserats på scenariometodik för att utforska potentiella framtider. Framtidsstudier är ett brett fält och det finns en mängd olika tillvägagångssätt för att utforska framtiden. Studieområdet har därför beskrivits som diffust eftersom det inte finns någon konsensus över hur metodologin ska se ut. Dessutom kan flera olika scenariotyper användas i samma studie. Börjeson et al. (2006) har därför i sin artikel jobbat med syftet att ta fram ett första steg till en guide för hur man kan utveckla och använda sig av olika scenarion. I studien skiljer man på tre olika typer av scenariostudier: "Vad kommer ske?", "Vad kan ske? Samt "Hur kan ett specifikt mål uppnås"? Vidare bistår de med information kring hur man kan strukturera frågor kring framtiden och de föreslår även vägledning över vilka tekniker man kan använda sig av. Guiden är avsedd för både de som tar fram scenarier, använder befintliga scenarier samt de till de som scenarion är riktade mot (Börjeson et al., 2006).

Eftersom det inte finns någon konsensus över hur metodologin ska se ut när det kommer till framtidsstudier, har en egen metod utformats i detta arbete, vilket innebär att kategoriseringen av Börjeson et al. (2006) inte har tillämpats. Däremot användes artikeln när redan framtagna scenarion integrerades i arbetet, för att få en bättre förståelse för hur dessa scenarion hade utvecklats, vilket rekommenderas av Börjeson et al. (2006). I denna studie bestod metoden i sin tur av både kvalitativa och kvantitativa tekniker för att förutspå framtiden. Den kvalitativa delen bestod av en litteraturstudie och semistrukturerade intervjuer medan den kvantitativa delen bestod av en framräkning där kvantitativa data användes för att prognostisera ett låg och ett högt referensintervall. När det framtida scenariot byggdes upp i detta arbete, antogs detta bland annat göras inom ett system, där utvecklingen av övriga faktorer som inte analyserades, förblev likadana under den undersökta tidsperioden. På så vis kunde externa faktorer utelämnas, såsom politisk inriktning, ekonomi, en pandemi och väder eftersom detta rent statistiskt inte går att kartlägga. Bland annat skulle det kunna ske en prishöjning på el som medför att människor väljer att använda mindre el, det vill säga elbehovet minskar. I så fall skulle problematiken med kapacitetsbrist kunna lösas med prisreglering. Detta tas alltså inte i hänsyn, eftersom syftet med studien även har varit att undersöka vad som skulle hända om allt elbehovet som man i dagsläget förväntar sig finnas år 2030 tillgodoses. Det är alltså inte säkert att elbehovet blir så här stort, ifall det exempelvis sker en prishöjning på el.

För att ta fram scenarier inleddes arbetet med en litteraturstudie för att kartlägga hur elektrifieringen av personbilsflottan kan komma att påverka elbehovet år 2030. Till detta användes databaserna KTH Primo och Google Scholar med sökorden "Electric vehicles charging", "Optimized charging electric vehicles" och "Electric vehicle charging modelling". Tusentals publikationer inom området hittades och därför gjordes mer specifika sökningar där sökorden kombinerades med "Stockholm, Sweden" samt "cars". I Google Scholar erhöles fortfarande uppemot 20000 resultat för respektive sökordskombination, och därmed gjordes villkoret att artikeln även skulle innehålla "charging behavior" eller "electric demand. Sökningarna i KTH Primo och Google Scholar genererade därmed tillsammans totalt 1613 sökträffar, se Tabell 1. Flera av artiklarna dök upp upprepande gånger för de olika sökorden och det var alltså inte 1613 unika träffar.

Tabell 1. Visar hur många sökträffar som erhöles för respektive sökord i KTH Primo och Google Scholar.

Sökord	Sökträffar, KTH Primo	Sökord och villkor	Sökträffar, Google Scholar
Electric vehicles charging, Stockholm Sweden cars	367	Electric vehicles charging, Stockholm Sweden cars Artikeln ska innehålla "charging behavior" eller "electric demand"	350
Optimized charging electric vehicles, Stockholm Sweden cars	86	Optimized charging electric vehicles, Stockholm Sweden cars Artikeln ska innehålla "charging behavior" eller "electric demand"	308
Electric vehicle charging modelling, Stockholm Sweden cars	183	Electric vehicle charging modelling, Stockholm Sweden cars Artikeln ska innehålla "charging behavior" eller "electric demand"	319

Första urvalet av artiklarna gjordes genom att bedöma relevansen av rubrikerna. Kriteriet för att bedöma relevansen, var att rubriken indikerade att man hade undersökt elbehov och laddningsbeteenden. Andra urvalet gjordes genom att läsa abstracts för att bedöma om artikeln fokuserade på att modellera elbehov och laddningsbeteenden kvantitativt. Här togs geografiska systemgränser också i beaktande. Om dataunderlaget i modelleringarna härstammade från Sverige, prioriterades källan. Rapporter baserade på dataunderlag utanför Europa, exkluderades i detta arbete, eftersom transportsektorn är ett sociotekniskt system, och därmed kan påverkas av geografiska förutsättningar (Graham & Marvin, 2001). Utifrån denna metod erhöles sju vetenskapliga artiklar som användes som underlag för att kvantitativt kunna framräkna hur de laddbara bilarna skulle kunna påverka elbehovet när vi når omkring år 2030. Se avsnitt 3.3–3.6.

Då studien är inriktad på Stockholm, användes även rapporter publicerade av myndigheter och länsstyrelser samt statistik från SCB. Detta för att kunna göra specifika prognoser för regionen, vilket inte kunde återfinnas inom vetenskapliga artiklar. Majoriteten av dessa rapporter är publicerade mellan åren 2019 och 2021. Publiceringsåret är viktigt att ha i beaktande, eftersom prognoser ständigt revideras och ändras med tiden. Rapporterna kopplade till det ökade elbehovet i Stockholm återfanns genom att använda Stockholm handelskammare (2020a) som huvudreferens. Genom att identifiera vilka rapporter de hänvisat till i sin referenslista, återfanns ytterligare rapporter som kunde användas.

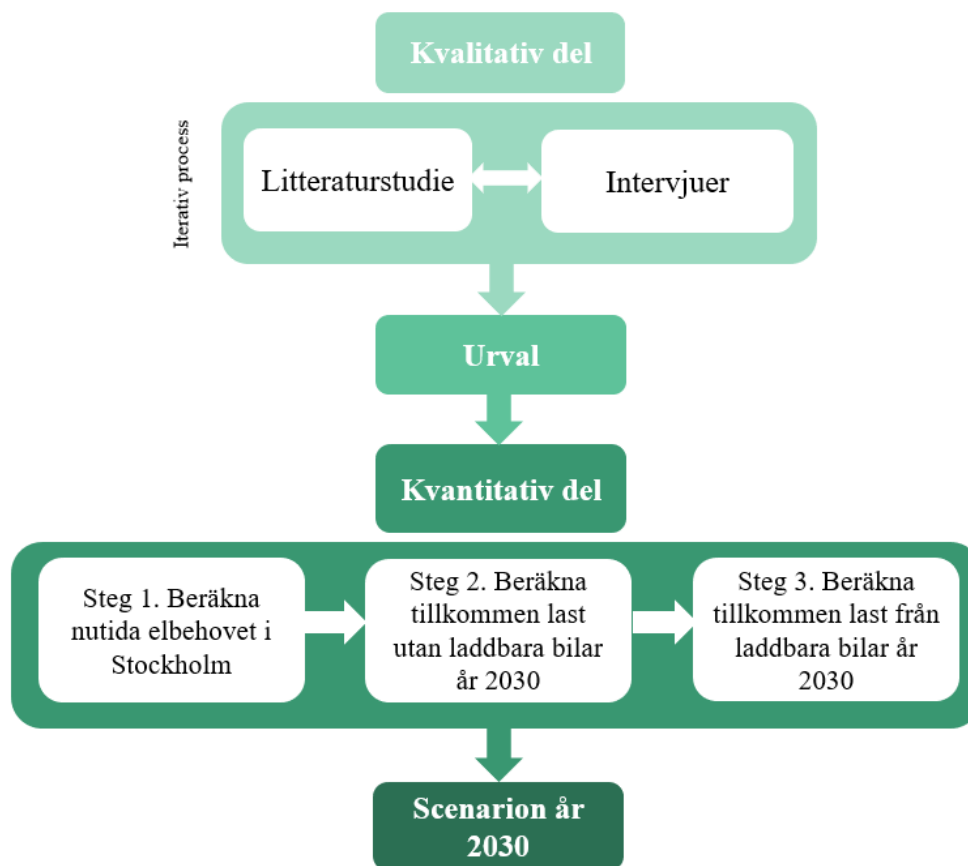
I tillägg gjordes semi-strukturerade intervjuer med relevanta aktörer. Semi-strukturerade intervjuer kännetecknas framför allt av att de är kvalitativa och fokuserar på respondenternas ståndpunkter med fokus på de specifika teman som behandlas. På så vis är kvalitativa intervjuer mer flexibla än de av kvantitativ form, där fokus istället ligger på att frambringa svar som på ett snabbt sätt ska kunna bearbetas (Bryman, 2018). I detta arbete intervjuades Stockholms stad och Power Circle, för att identifiera möjliga utfall över hur elanvändningen kan utvecklas i Stockholm fram till år 2030. Anledningen till att Power Circle valdes ut för intervju kom sig av att de har gjort en del studier kring

utbyggnad av laddinfrastruktur och besitter data över hur laddinfrastrukturen ser ut i Stockholm. Stockholms stad valdes ut, eftersom de gjort analyser kring elförbrukning i Stockholms stads bostäder i sin databas ELDA. Båda aktörerna bedömdes därmed kunna ge värdefulla insikter kring hur metoden skulle kunna utformas och hur de såg på situationen i Stockholm. På grund av den rådande pandemin skedde båda intervjuerna digitalt över Zoom. Intervjuperson för Stockholms stad var Joachim Eriksson som är avtalsförvaltare för Stockholms stads elinköp. Intervjun ägde rum den 23 februari år 2021. Intervjuperson för Power Circle var Simon Lundqvist, som arbetar som projektledare inom e-mobilitet och smart laddning. Intervjun ägde rum den 18 mars år 2021.

Respondenterna för intervjuerna förklarade utifrån eget material, såsom elförbrukningskurvor och egna sammanställningar. Därför transkriberades inte intervjuerna. Under intervjuernas gång visade det sig även att aktörerna kunde delge vissa rådata, som senare kom till att användas i känslighetsanalyserna, se avsnitt 5.1 och avsnitt 5.2. Här bör läsaren vara informerad om att Power Circle är en intresseorganisation som verkar för att inspirera till nya innovationer mot framtidens elsystem. Bland annat förespråkar de smart laddning som en viktig lösning när transportsektorn ska elektrifieras. Initialt var tanken att flera intervjuer skulle ha utförts, men på grund av att flertalet aktörer har sekretess över data och information gällande elanvändningen i Stockholm begränsades samtalen till dessa två aktörer. Tre centrala teman som berördes i intervjuerna var:

- Användning av publik laddinfrastruktur
- Kopplingen mellan kapacitetsbrist och elektrifieringen av transportsektorn
- Elanvändningen inom olika sektorer

När all information hade sammanställts inleddes arbetet att skapa kvantitativa scenarion föreställandes hur elbehovet kan komma att se ut i Stockholm år 2030 på timbasis. Till detta användes kalkylprogrammet Excel. Steg 1 var att först beräkna hur elbehovet ser ut i Stockholm idag. Steg 2 var att beräkna hur tillkommen last ser ut i övriga sektorer bortsett från laddbara bilar år 2030. Steg 3 var att beräkna den tillkomna lasten från laddbara bilar på timbasis. I Figur 2 har metodens utformning visualiserats.



Figur 2. Visualisering över den metod som har använts.

3.1 Avgränsningar

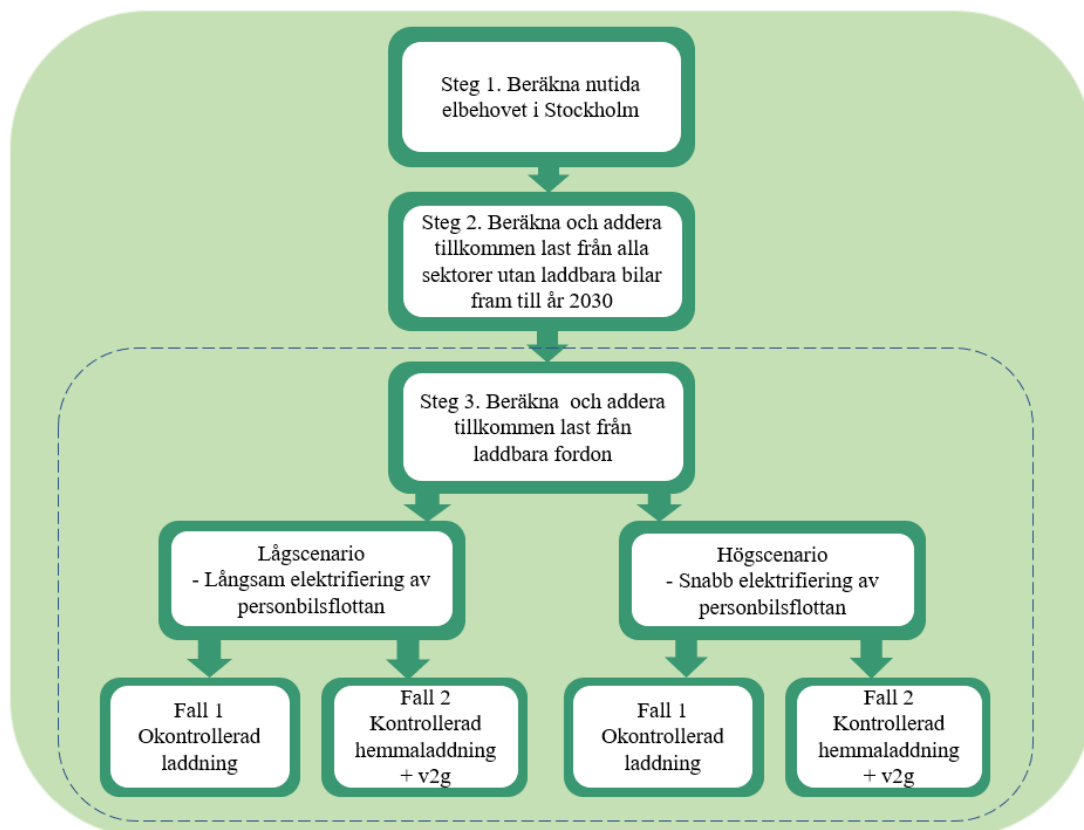
I detta arbete kommer kapacitetsbrist att analyseras med avseende på regionnätet i Stockholm för att få en helhetsbild över situationen. Detta innebär inte att det är kapacitetsbrist överallt i Stockholm vid samma tidpunkt, utan troligtvis i vissa överbelastade lokalnät. Omvänt, kan det på samma vis uppstå kapacitetsbrist i lokalnäten utan att detta ger utslag när man analyserar hela regionen. Dessa lokala variationer kommer alltså inte att tas i beaktande i denna studie på grund av att det hade varit ett mycket omfattande arbete att analysera alla nätstationer. Det saknades också tillgång till sådan data i detta arbete. Vidare avgränsas arbetet också till att enbart identifiera hur elanvändningen inom de lokala elnäten utvecklas. Detta på grund av att direkta effektuttag från regionnäten är sekretessbelagda i Stockholm och det därmed råder osäkerheter kring hur stora dessa uttag är.

Arbetet avgränsas också till att enbart studera personbilar, eftersom elektrifieringen av den tyngre trafiken inte förväntas få något genombrott förrän efter år 2030. Dessutom avgränsas studien till att enbart undersöka kontrollerad laddning och v2g för den icke-publika laddning. Detta på grund av att det finns tidsbegränsningar över hur länge man får ladda vid en publik laddpunkt på gatuplan i Stockholms stad. För snabbaddare finns det en begränsning på 30 minuter under hela dygnet medan det för normalladdare finns en begränsning på 3 timmar. Föreskriften för normalladdare gäller dock enbart mellan kl. 07:00-19:00 och leder till böter om tiden överskrids (Stockholms stad, 2020). Anledningen till att tidsbegränsningar används är bland annat för att det leder till mer effektivt nyttjande av parkeringsplatser (Trivector, 2019). Tidsbegränsningarna medför att det är svårare att förskjuta laddningen i tiden på timbasis. Dessutom står den publika laddningen enbart för cirka 15 procent av all överförd energi, vilket indikerar att man har störst möjlighet att styra laddningen i tid för den icke-publika laddningen.

Till sist avgränsas arbetet också till att enbart identifiera kapacitetsbrist på timbasis och därmed analyseras inte de minuter eller sekunder som det också kan uppstå kapacitetsbrist. Detta återigen på grund av att det inte finns någon mätdata att tillgå. Här avgränsas arbetet till att analysera hur den aktiva effekten (den förbrukade effekten) påverkas och ändras. Effekten på andra systemtjänster tas inte heller i hänsyn, såsom nätstörningar eller om det exempelvis slutar blåsa så att vindkraften minskar (Uniper, u.å.).

3.2 Konstruktion av scenarion

Arbetet att kvantitativt utforska potentiella framtider över hur elbehovet kan komma att se ut i Stockholm år 2030 på timbasis bestod av tre steg. Steg 1 var att först beräkna hur elbehovet ser ut i Stockholm idag på timbasis. Steg 2 var att beräkna hur tillkommen last ser ut i övriga sektorer bortsett från laddbara bilar år 2030 på timbasis. Steg 3 var att beräkna den tillkomna lasten från laddbara bilar på timbasis. Inom Steg 3 gjordes två olika scenarion: ett högscenarion där elektrifieringen av personbilsflottan sker snabbt och ett lågscenarion där personbilsflottan elektrifieras långsamt. Inom dessa scenarion testades även olika typer av laddning. Ett fall där all laddning skedde okontrollerad och ett fall där hemmaladdningen kontrollerades och v2g tillämpades. Hur scenarion konstruerades har visualiserats i Figur 3.



Figur 3. Detaljerat processschema över vilka scenarion som ställdes upp.

3.3 Antaganden

När elanvändningen kopplat till de laddbara bilarna beräknades i steg 2 och steg 3, gjordes ett antal antaganden. Dessa har sammanställts i Tabell 2. Eftersom elektrifieringen av den tunga trafiken inte förväntas få något genombrott i Stockholm förrän efter år 2030 har dessa inte räknats med i studien (Energimyndigheten, 2020). Det är alltså enbart personbilar som har undersökts.

Tabell 2. Sammanställning av de antaganden som används för att beräkna elanvändning kopplat till laddbara fordon.

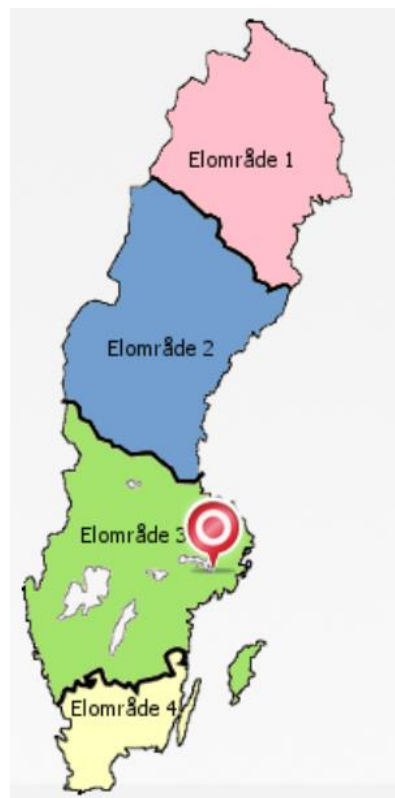
Antagande	Motivering/källa
(1) En laddbar bil drar i genomsnitt 1,5 kWh per mil.	Hur mycket energi en laddbar bil drar beror på faktorer som batteristorlek, väderförhållanden och vägförhållanden (InCharge, 2020). Från litteraturstudien kunde det konstateras att en laddbar bil drar i genomsnitt mellan 1–2 kWh per mil. Några exempel ges nedan. 1,5 kWh/mil (Göransson et al., 2019) 2 kWh/mil (Grahn, 2014) 1,6 kWh/mil (Transport & Environment, 2020) Siffran 1,5 kWh används av Klimatklivet för att beräkna utsläppsminskningar från publika laddstationer och grundar sig i en klimatvärdering av energimyndigheten baserat på svenska förhållanden (Naturvårdsverket, 2021).
(2) En laddbar bil färdas i genomsnitt 1257 mil/år i Stockholm.	Hur lång sträcka en laddbar bil kör per år baseras på att den genomsnittliga körsträckan i Stockholm för åren 2018–2019 (Trafikanalys, 2018) (Trafikanalys, 2019). I en studie från Norge där 1721 elbilar analyserades kunde man konstatera att elbilsägare kör i genomsnitt lika många kilometer om året som en konventionell bil. Därmed kan det konstateras att körmönstret för elbilsägare med stor sannolikhet inte kommer ändras när fordonsflottan elektrifieras (TØI, 2014). Det antas att så även kommer vara fallet i Stockholm.
(3) Laddbara personbilar använder följande mängd energi per dag: $\frac{1257 \text{ mil/år} * 1,5 \text{ kWh/mil}}{365 \text{ dagar}} = 5,17 \text{ kWh/dag}$	Baserad på antagande (1) och (2).
(4) År 2030 är 66,7 procent av de laddbara bilarna rena elbilar och 33,3 procent hybridbilar.	Grundar sig i en utgiven prognos av Power Circle (Länsstyrelsen Stockholm, 2020).
(5) För PHEV kan 53 procent av sträckan täckas av elbilsbatteriet medan resterande energi kommer från en förbränningsmotor.	Antagandet baseras på en rapport där man studerat verklig användning av 100000 laddhybrider i Kina, Europa och Nordamerika. I genomsnitt täcks bara 37 procent av sträckan av elbilsbatteriet men i Norge ligger siffran på 53 procent, vilket antas även vara fallet i Sverige (ICCT, 2020).
(6) Det sker energiförluster om 5 procent när ett bilbatteri laddas upp respektive laddas ur till och från elnätet.	(Göransson et al., 2019) (Transport & Environment, 2020)
(7) 15 procent av all överförd energi sker vid publika ladduttag och 85 procent vid icke-publika ladduttag.	Baserat på svenska förhållanden (Energimyndigheten, 2019).
(8) En publik snabbladdningspunkt används två gånger om dagen medan en normalladdningspunkt enbart används en gång.	Antagandet används av Klimatklivet för att beräkna utsläppsminskningar från publika laddstationer och grundar sig i en klimatvärdering av energimyndigheten baserat på svenska förhållanden (Naturvårdsverket, 2021). Från en studie av Stockholms stad (2020) där man studerat rådata från 717 laddpunkter i Stockholm återfinns samma mönster (Stockholms stad, 2020).
(9) För publik laddning finns det 3000 snabbladdningspunkter år 2030. Resterande laddare är normalladdare.	Fram till år 2030 har länsstyrelsen i Stockholm bedömt att behovet av fler snabbladdningspunkter förväntas vara minst 3000 i regionen (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). Det finns ingen tydlig korrelation mellan antalet laddbara fordon och snabbladdningspunkter, dock finns det indikationer på att efterfrågan på snabbladdare, framför allt längst motorvägar, är högre i länder som Sverige, eftersom man har längre körsträckor (Funke et al., 2019).
(10) Det finns en publik laddpunkt per 10 laddbara bilar.	Det finns rekommendationer att det ska finnas en publik laddpunkt per tio elbilar i EU:s medlemsländer, något som mäts i CPEV-talet (Charging Points per Electric Vehicle). CPEV-talet ska alltså enligt rekommendationer från den Europeiska kommissionen minst vara $1/10 = 0,1$ (Europeiska kommissionen, 2014).

(11) PHEV och BEV antas ladda på samma sätt.	I litteraturstudien har ingen särskiljning mellan hur PHEV och BEV laddas kunnat identifieras. Man skulle dock kunna tänka sig att PHEV laddas något annorlunda eftersom PHEV även kan drivas fram på andra bränslen.
--	---

3.4 Steg 1–Nutida elbehovet i Stockholm

Eftersom en stor andel av Stockholms elförbrukning är sekretessbelagd (och därmed inte kunde åtkommas under arbetet), användes förbrukningsdata från elområde 3 för att uppskatta lastprofiler i regionen. Sverige är sedan den 1 november 2011 uppdelad i fyra olika elområden: SE1, SE2, SE3 och SE4. Detta för att enklare kunna upptäcka var i landet som det krävs ökad elproduktion samt var elnätet skulle kunna tänkas behöva byggas ut. Även elpriset varierar beroende på vilket elområde man tillhör (Konsumenternas energimarknadsbyrå, 2020). Stockholms län tillhör elområde 3 (SE3) tillsammans med flera andra regioner, och står för cirka en fjärdedel av den totala elförbrukningen som konsumeras här (Stockholms handelskammare, 2020a) Se Figur 4.

Data över elförbrukningen i elområde 3 hämtades från Nord Pool, där förbrukningen för varje timme på årsbasis fanns tillgänglig i Excel-format (Nord Pool, u.å.).



Figur 4. Sverige uppdelat i fyra olika elområden (elområden, u.å.).

För att anpassa dataunderlaget från elområde 3 till situationen i Stockholm beräknades den procentuella fördelningen av elanvändningen under årets alla timmar för elområde 3. Därefter fördelades den årliga elanvändningen i Stockholm utifrån denna timfördelning. Det antogs att Stockholms elförbrukning följer samma mönster som elområde 3, alla timmar om året.

Den årliga elanvändningen i region Stockholm som fanns tillgänglig på SCB var den totala elförbrukningen i både i region- och lokalnäten (SCB, u.å.). Statistiken innehöll även den lokala elproduktionen som konsumerats för respektive år (Englund, 2021). Eftersom studien syftade till att

identifiera kapacitetsbrist in till Stockholm, subtraherades den lokala elproduktionen från den totala elanvändningen.

Eftersom många siffror i SCB:s energistatistik är sekretessmarkerade, bland annat lokal elproduktion från solceller, vindkraft och värmekraft, användes kompletterande statistik från WSP. De har även lagt till distributionsförluster för el, som beräknats vara en schablon på 8 procent av elanvändningen. Det är således ingen verklig förlust som är uppmätt utan siffran är baserad på statistik över genomsnittlig elanvändning (Englund, 2021). Statistik har kompletterats av WSP för åren 2013, 2015 och 2017. Därmed användes elförbrukningsdata i Stockholm från dessa år för att uppskatta hur stor mängd av elförbrukningen som kommer från regionnätet. I Tabell 3 har data från de tre olika åren sammanställts. Tillförd el beräknas genom att addera total elanvändning och distributionsförluster och sedan subtrahera lokal elproduktion enligt Ekvation 1.

$$\text{Tillförd el} = \text{Total elanvändning} + \text{Distributionsförluster} - \text{Lokal elproduktion} \quad (\text{Ekvation 1})$$

Tabell 3. Sammanställning av elproduktion och elkonsumention (MWh) för åren 2013, 2015 och 2017 i region Stockholm (LEKS, u.å.)

År	Total elanvändning	Distributionsförluster	Lokal elproduktion	Tillförd el
2017	20 648 094	1 712 996	2 220 494	20 140 596
2015	21 576 431	1 639 571	1 769 947	21 446 055
2013	21 095 146	1 622 884	1 821 856	20 896 174

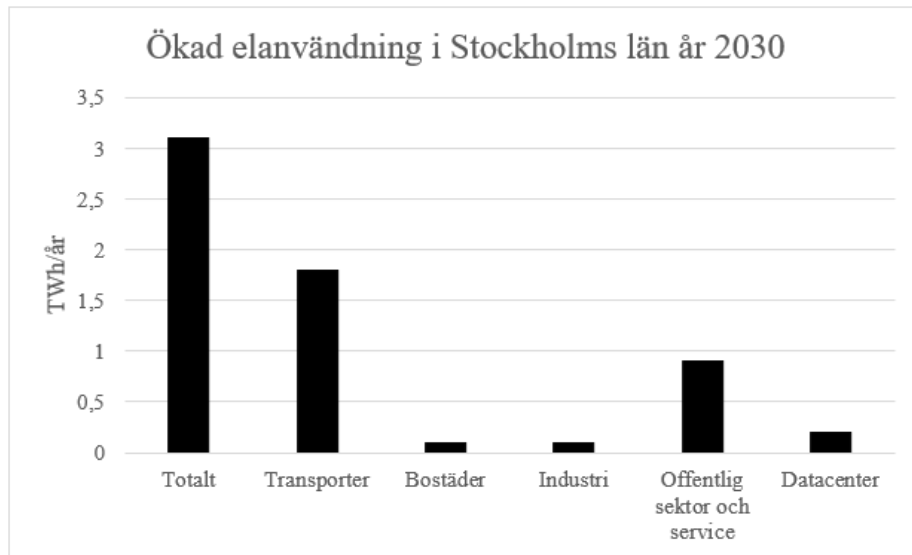
Förbrukningen kopplat till tillförd el från åren 2013, 2015 och 2017 i Stockholm fördelades över den procentuella fördelningen av elanvändningen i elområde 3, för korresponderande år. På så vis erhöles 3 olika tänkbara lastkurvor för hur elförbrukningen ser ut i dagsläget, vilket gav en viss inblick i potentiella variationer mellan åren.

3.5 Steg 2 – Tillkommen elanvändning utan laddbara bilar

När en lastkurva över uppskattad elförbrukning i Stockholms län hade tagits fram, gjordes en framräkning över den tillkomna lasten fram till år 2030 på timbasis utan laddbara bilar. För att räkna ut hur elbehovet kan komma att utvecklas på timbasis inom sektorer utan laddbara personbilar fram till år 2030 i Stockholm användes en rapport från Länsstyrelsen Stockholm. Detta var den enda prognosen som tagits fram specifikt för region Stockholm gällande hur man förväntar sig att elbehovet kommer att utvecklas fram till år 2030. Utvecklingen baserades på demografiska data; där man förväntar sig en befolkningstillväxt på 15 procent. Liknande metod har även använts i en studie där man prognostiserat elbehovet i Hammarby Sjöstad fram till år 2030 (Grundius & Topel, 2020).

I rapporten har flera aktörer samarbetat; olika länsstyrelser, Region Stockholm, Energimarknadsinspektionen, Stockholm stad och Energikontoret Storsthlm. Underlaget för rapporten bygger på statistik och rapporter från myndigheter, organisationer och företag. Det har också förts dialoger mellan elbolag, elnätbolag, näringsliv och akademi (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). Därmed bedömdes rapporten vara ett lämpligt underlag för studien.

I rapporten konstaterar man att den ökade elanvändningen främst är kopplad till elektrifieringen av transportsektorn med en total ökning på 1,8 TWh fram till år 2030. Vidare kommer bostäder, offentlig sektor samt datacenter och effektkrävande anläggningar att öka med en total elanvändning om 1,3 TWh. Som syns i Figur 5 ökar elbehovet främst inom offentlig sektorn (0,9 TWh) eftersom det bland annat ska ske kapacitetsförstärkningar av de befintliga reningsverken (ibid.).



Figur 5. Prognos över tillkommen elanvändning i Stockholm fram till år 2030 framtagen av (Länsstyrelsen Stockholm, 2020) med egen bearbetning.

Transportsektorn innefattar i detta sammanhang all typ av transport såsom järnvägar, tunnelbana, biltrafik och båttrafik. Data över hur stor uppdelningen är på de olika användningsområdena fanns dock inte att tillgå. Däremot framgick det att i det tillkomna elbehovet på 1,8 TWh år 2030 har man räknat med att det kommer finnas 325000 elbilar och 153000 laddhybrider, baserat på en prognos från Power Circle (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). Eftersom syftet med detta arbete var att ta fram två olika scenarion för när personbilssektorn elektrifieras snabbt respektive långsamt, subtraherades detta tillkomna elbehov (baserat på Power Circles siffror) ut ur det totala tillkomna elbehovet på 1,8 TWh. Först beräknades hur stor andel elförbrukning (A) de laddbara bilarna använder av den totala energiförbrukningen. Alla 153000 PHEV (Lb_{PHEV}) använder 53 procent el av sin totala bränsleförbrukning, medan alla 325000 BEV (Lb_{BEV}) använder 100 procent el. Se Ekvation 2.

$$A = (Lb_{PHEV} * 0,53) + Lb_{BEV} \quad (\text{Ekvation 2})$$

Därefter beräknades hur stor mängd el alla laddbara bilar förbrukar per år (El). Detta genom att multiplicera den årliga körsträckan per bil ($x=1257$ mil per år) med förbrukningen per mil ($k=1,5$ kWh/mil) och med den totala andelen elförbrukning kopplat till PHEV och BEV (A). Det sker energiförluster om 5 procent när ett bilbatteri laddas upp från elnätet, vilket togs i beaktande genom att dividera med 0,95. Se Ekvation 3.

$$El = \frac{x * k * A}{0,95} = 0,806 \quad (\text{Ekvation 3})$$

Efter att ha beräknat hur stor mängd energi de laddbara bilarna förbrukar per år (El) subtraherades denna energi från det totala tillkomna elbehovet från transporter på 1,8 TWh. På så vis erhöles hur mycket el övriga transporter (Et) (laddbara bilar exkluderat) förbrukar. Se Ekvation 4.

$$Et = 1,8 - El = 0,994 \text{ TWh} \quad (\text{Ekvation 4})$$

Den totala tillkomna elförbrukningen (T), bortsett från laddbara bilar, kunde därmed beräknas genom att addera energibehovet från bostäder (Eb), offentlig sektor och service (Eos), datacenter (Ed) på 1,3 TWh med övriga transporter (Et) på 0,994 TWh. Se Ekvation 5.

$$T = Eb + Eos + Ed + Et = (1,3 + 0,994) = 2,3 \text{ TWh} \quad (\text{Ekvation 5})$$

Den totala tillkomna elförbrukningen, T, som räknades fram i Ekvation 5, adderades sedan till den ursprungliga elförbrukningen för åren 2013, 2015, och 2017 som presenterades i avsnitt 3.4. Därefter fördelades den nya totala elförbrukningen, återigen utifrån den procentuella fördelningen av elanvändningen under årets alla timmar för elområde 3, för korresponderande år. Med andra ord antogs den tillkomna elförbrukningen år 2030 följa samma förbrukningsmönster som ursprungslasten för år 2013, 2015 och 2017 i elområde 3.

3.6 Steg 3 –Tillkommen elanvändning från laddbara bilar

För att kunna bedöma hur stort effektuttag personbilsflottan kommer kräva, gjordes två olika scenarion för hur stor andel av personbilsflottan som är elektrifierad år 2030. I högscenariot gjordes antagandet att det kommer finnas ytterligare 633980 laddbara bilar och i lågscenariot 257390 laddbara bilar. Siffrorna är baserade på Stockholms handelskammarens prognoser (Stockholms handelskammare, 2020b). Utifrån dessa scenarion beräknades hur stort elbehov de laddbara bilarna skulle ha år 2030 och var elförbrukningen överförs. Antaganden som ligger till grund för beräkningarna återfinns i Tabell 2.

Först beräknades den årliga energiförbrukningen som alla laddbara bilar i Stockholm förväntas ha ($\dot{A}E$). Detta beräknades genom att multiplicera den genomsnittliga körsträckan för en bil ($x=1257$ mil per år) med energiförbrukning för en bil ($k=1,5$ kWh/mil) och förväntat antal laddbara bilar (Lb). Som tidigare nämnt, görs ett högscenario och ett lågscenario. $Lb(\text{högscenario})= 633980$ bilar och $Lb(\text{lågscenario})= 257390$ bilar. Se Ekvation 6.

$$\dot{A}E = x \times k \times Lb \quad (\text{Ekvation 6})$$

Eftersom laddhybrider (PHEV) även använder andra bränslen än el, behövde detta räknas bort från den årliga energiförbrukningen. År 2030 förväntas 67 procent av alla laddbara bilar vara BEV och 33 procent PHEV. Av alla PHEV:s totala energiförbrukning är 53 procent av bränslet el medan 47 procent är andra bränslen. För att ta reda på den årliga elförbrukningen ($\dot{A}E_l$) för alla laddbara bilarna, subtraherades därmed 47 procent av energiförbrukningen för PHEV. Se Ekvation 7.

$$\dot{A}E_l = (\dot{A}E) - (0,33 * 0,47 * \dot{A}E) \quad (\text{Ekvation 7})$$

Därefter beräknades hur stor andel av denna elförbrukning som överförs vid publika laddpunkter (ÖP) respektive icke-publika laddpunkter (ÖIP) under ett år. Det antogs att 15 procent av all energiöverföring sker vid publika laddpunkter och 85 procent vid icke-publika laddpunkter. Det sker också energiförluster om 5 procent när ett bilbatteri laddas upp från elnätet och därför divideras elförbrukningen med 0,95. Se Ekvationer 8–9.

$$\dot{O}P = \frac{0,15 * \dot{A}E_l}{0,95} \quad (\text{Ekvation 8})$$

$$\dot{O}IP = \frac{0,85 * \dot{A}E_l}{0,95} \quad (\text{Ekvation 9})$$

Utfallet från Ekvationer 8–9 för både hög- och lågscenario har sammanställts i Tabell 4.

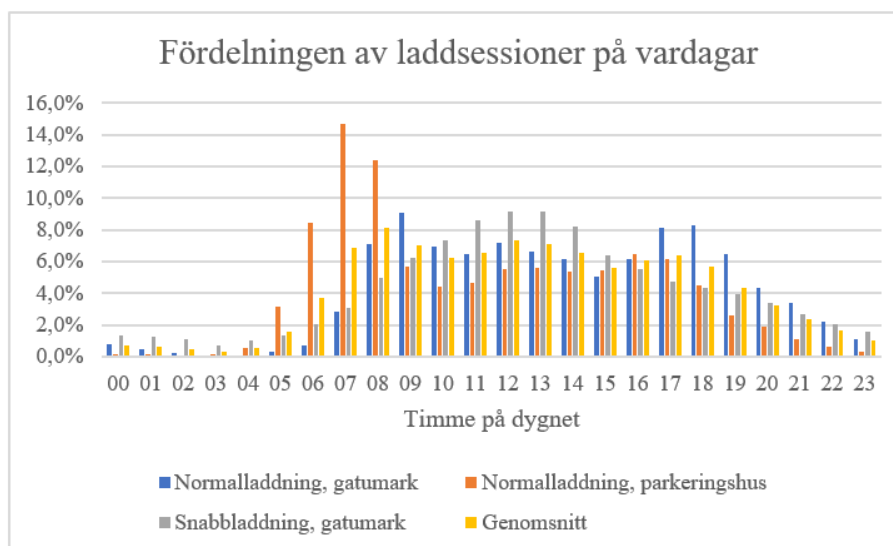
Tabell 4. Visar hur mycket energi som överförs vid publika respektive icke-publika laddpunkter, i högscenariot respektive lågscenariot.

Lokalisering	Lågscenariot Överförd energi (GWh)	Högscenariot Överförd energi (GWh)
Publik laddpunkt (ÖP)	65	159
Icke-publik laddpunkt (ÖIP)	366	902
Totalt	431	1061

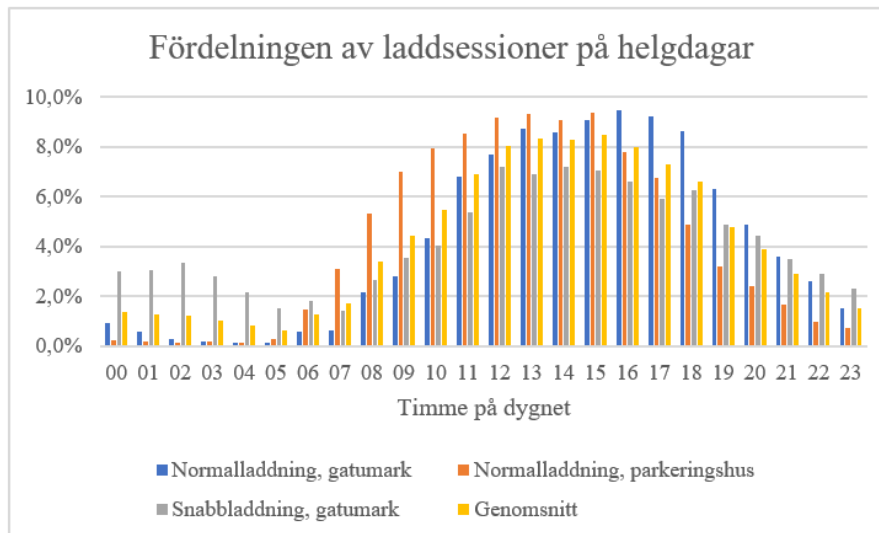
3.6.1 Publik laddning

För att ta fram lastkurvor för publik laddning på timbasis år 2030 användes data från en analys gjord av Stockholms stad (2020). I studien har man studerat vid vilka tidpunkter som publika laddstationer används, baserat på rådata från elnätsägarna E.ON, Fortum och Vattenfalls områden i Stockholm. Dessutom användes även data från de laddstationer som ägs av Stockholm Parkering. Totalt har 717 laddpunkter analyserats för snabbaddning vid gatumark, normalladdning gatumark samt normalladdning parkeringshus.

Baserat på data från år 2017–2019 har man kunnat konstatera att antalet laddsessioner (varje gång en laddbar bil laddar via elnätet) varierar över månaderna på året. Flest laddsessioner äger rum under vinterhalvåret medan lägst antal laddsessioner äger rum under sommarmånaderna. Lastkurvorna skiljer sig även mellan veckodag och helgdag, vilket framgår i Figur 6–7 (Stockholms stad, 2020).



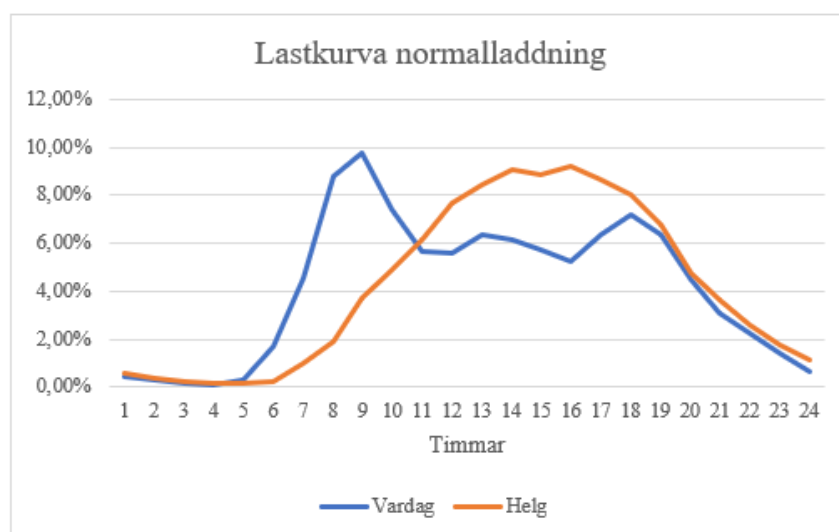
Figur 6. Fördelningen av laddsessioner under en genomsnittlig vardag i Stockholm år 2019. Data hämtad från Stockholms stad med egen bearbetning (Stockholm stad, 2020).



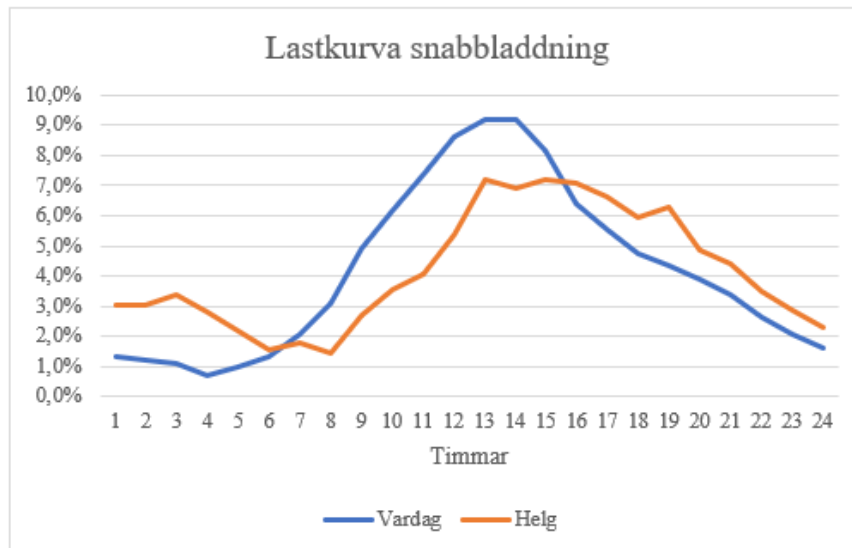
Figur 7. Fördelningen av laddsessioner under en genomsnittlig helgdag i Stockholm år 2019. Data hämtad från Stockholms stad med egen bearbetning (Stockholm stad, 2020).

Stockholms stads data användes för att i Excel räkna fram hur användningen av respektive ladduttag fördelade sig procentuellt varje timme under ett genomsnittligt år. På så vis erhöles lastkurvor som visade hur elanvändningen fördelade sig procentuellt över respektive timme under ett år för normal- respektive snabbladdare. Eftersom det fanns två olika lastkurvor för normalladdning togs ett genomsnitt över de som var placerade i parkeringshus och på gatumark. Se lastkurva för normal- respektive snabbladdning i Figur 8–9.

Det visar sig också att laddstolparna används mest under vardagar och att laddningen i parkeringshus är koncentrerat till förmiddag, se Figur 8. Enligt Stockholms stad beror detta med stor sannolikhet av att normalladdning i parkeringstid används under arbetstid. Detta på grund av att samma mönster inte kan identifieras under helgdagar. Då är laddsessionerna mer koncentrerade till eftermiddagen (Stockholms stad, 2020).



Figur 8. Visar lastkurva för normalladdning både vardag och helg.



Figur 9. Visar lastkurva för snabbladdning både vardag och helg.

När lastkurvor tagits fram för publika uttag för snabbladdning respektive normalladdning, beräknades hur stor andel av all laddning som följer respektive lastkurva. Här antogs det att 3000 av laddpunkterna är snabbladdare år 2030, baserat på en bedömning från länsstyrelsen Stockholm (Länsstyrelsen Stockholm, 2020). Vidare finns det även rekommendationer att det ska finnas en publik laddpunkt per tio elbilar i EU:s medlemsländer, något som mäts i CPEV-talet (Charging Points per Electric Vehicle). CPEV-talet ska alltså enligt rekommendationer från den Europeiska kommissionen minst vara $1/10 = 0,1$ enligt Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID) (Europeiska kommissionen, 2014). För att beräkna hur många normalladdningspunkter (N) som finns år 2030 beräknades först hur många laddpunkter som behövs, givet att CPEV = 0,1, genom att dividera antalet laddbara bilar (Lb) med 10 och därefter subtraherades de 3000 snabbladdningspunkterna (S). Se Ekvation 10.

$$N = \frac{Lb}{10} - S \quad (\text{Ekvation 10})$$

Givet att en publik snabbladdningspunkt används två gånger om dagen medan en normalladdningspunkt enbart används en gång beräknades hur stor andel av den publika laddningen som överförs vid snabbladdningspunkter respektive normalladdningspunkter. Först beräknades överförd energi vid snabbladdningspunkter (E_s) (se Ekvation 12) och därefter vid normalladdningspunkter (E_n) (se Ekvation 13).

$$E_s = \frac{S \times 2}{(S \times 2) + N} \quad (\text{Ekvation 12})$$

$$E_n = \frac{N}{(S \times 2) + N} \quad (\text{Ekvation 13})$$

Den överförda energin vid publika laddpunkter (se Tabell 4) fördelades på lastkurvorna (Figur 8–9), med hjälp av andelarna som de uppskattades utgöra. Resultatet blev som följande:

- 1) I lågsenario sker 21 procent av all publik överförd energi vid snabbladdningspunkter (E_s) och 79 procent vid normalladdningspunkter (E_n) varje dag.
- 2) I högscenariot sker 9 procent av all publik överförd energi vid snabbladdningspunkter (E_s) och 91 procent vid normalladdningspunkter (E_n) varje dag.

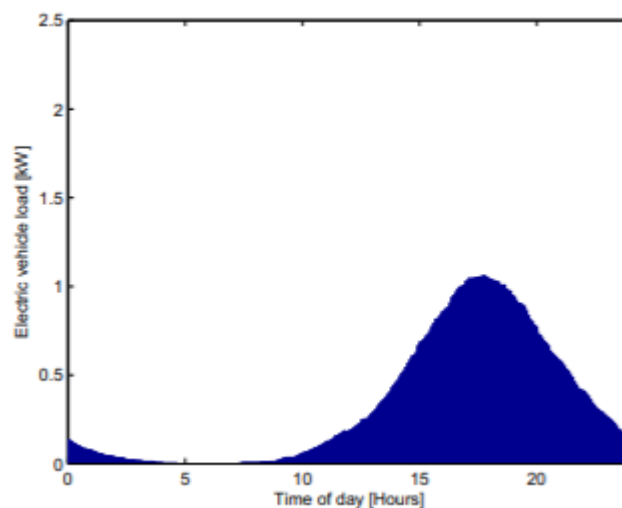
Eftersom arbetet analyserar elanvändning på timnivå, antogs överförd effekt under laddning ske utspritt under timmen. I samband med detta antogs därmed också att den totala energiöverföringen vid en snabb- respektive normalladdningssession vara lika stor. Detta eftersom det antas att stockholmarna i genomsnitt använder 5,17 kWh per dag, se antagande i Tabell 2. Samtidigt har en genomsnittlig publik laddpunkt idag en överföringseffekt på 13 kW om det är en AC-laddare (normalladdare) och cirka 70 kW om det är en DC-laddare (snabbladdare) (PowerCircle, 2018). Detta medför att energiöverföringen kan ske under en timme, även om batterierna enbart laddas upp varannan dag.

3.6.2 Icke-publik laddning

Majoriteten av all överförd energi, cirka 85 procent, överförs vid icke-publika laddpunkter (Energimyndigheten, 2019). Det antogs därför att 85 procent av all överförd energi sker vid icke-publika laddpunkter och att resterande laddning är publik år 2030. För att framräkna lasten från den icke-publika laddningen undersöktes först 1) Okontrollerad laddning och sedan 2) Kontrollerad laddning och v2g. Som nämntes i avgränsningar undersöktes kontrollerad laddning och v2g enbart för den icke-publika laddningen.

Okontrollerad laddning

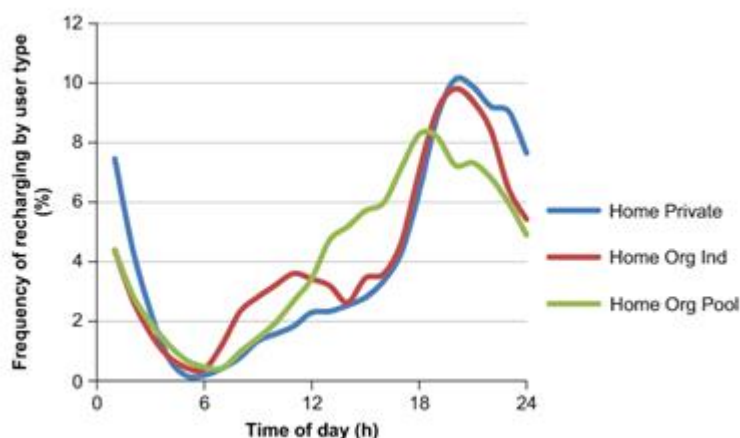
I en avhandling av Grahn (2014) har flera olika modeller för elbilsaddning tagits fram, baserade på både rese- och körmönster samt laddningsbehov i Sverige. I Figur 10 presenteras den lastprofil som uppkommer när laddbara bilar laddas okontrollerat, det vill säga enligt egna preferenser, vid bostaden. Modellen är baserad på en Monte-Carlo simulering, vilket genererar medelvärden för elförbrukningen baserat på sannolikhetsfördelning. Som man kan se i Figur 10 sker en största effekttopp runt 17:00-18:00-tiden vilket sammanfaller med tiden då människor kommer hem från jobbet. Modellen representerar alltså okontrollerad laddning på vardagar med en laddning på 2,3 kW för en laddbar bil, givet att en bil drar 2 kWh/mil (Grahn, 2014).



Figur 10. Visar okontrollerad laddning vid hemmet (Grahn, 2014).

Det finns flera andra studier som styrker lastprofilen som Grahn (2014) tagit fram. I en artikel skriven av Robinson et al. (2013) har man undersökt hur olika användargrupper laddar sina elbilar i England. Detta genom att analysera realtidsdata över 7704 laddsessioner under en sexmånadersperiod. Utifrån deras studie visade det sig att privata elbilsägare laddade sina elbilar i hemmet främst under kvällen. Totalt sett sammanfaller också majoriteten av laddningen med andra höglaster i elförbrukning över dygnet. Författarna menar därmed på att om man vill styra bort från detta kommer man behöva

använda sig av smarta elmätare och finansiella incitament. I Figur 11 visas hur laddning vid hemmet såg ut i studien. Denna laddning har en liknande procentuell fördelning som lastprofilen framtagen av Grahn (2014), vilket även flera andra studier indikerat på.



Figur 11. Visar hur laddningen ser ut i hemmet beroende på om man har en privatbil, ingår i en bilpool eller kör en bil som ägs av en organisation (Robinson et al., 2013).

Den okontrollerade laddningen baseras därmed på lastkurvan från Grahn (2014), som är en lastkurva för en dag under ett genomsnittligt år. Den överförda energin från den icke-publika laddningen (se Tabell 4) fördelades enligt samma procentuella fördelning som kurvan från Grahn (2014). Man skulle kunna tänka sig att det även sker elanvändning på morgonen när laddbara bilar kopplas på till elnätet då människor anländer till sin arbetsplats. På grund av osäkerheten kring hur stor andel av den icke-publika laddningen som sker vid arbetsplatser i Stockholm antogs dock att all icke-publik laddning sker vid hemmet. I stället antas den laddning som sker vid arbetsplatser ingå i den publika laddningen, vilket presenterades i avsnitt 3.6.1. Detta motiveras också av att de studier som modellerat körbeteenden för att beräkna sannolikheten för när elbilar laddas, visar att den största lasten sker på runt klockan 18:00. Bland annat visar Grundius & Topel (2020) i sin fallstudie på Hammarby Sjöstad i Stockholm att lasten på morgonen är minimal relativt den lasten som sker på eftermiddagen år 2030. Även i en studie av Göransson et al. (2010) och i en studie av (Gustafsson & Nordström, 2017) görs antagandet att den största andelen av laddning sker när människor kommer hem från jobbet.

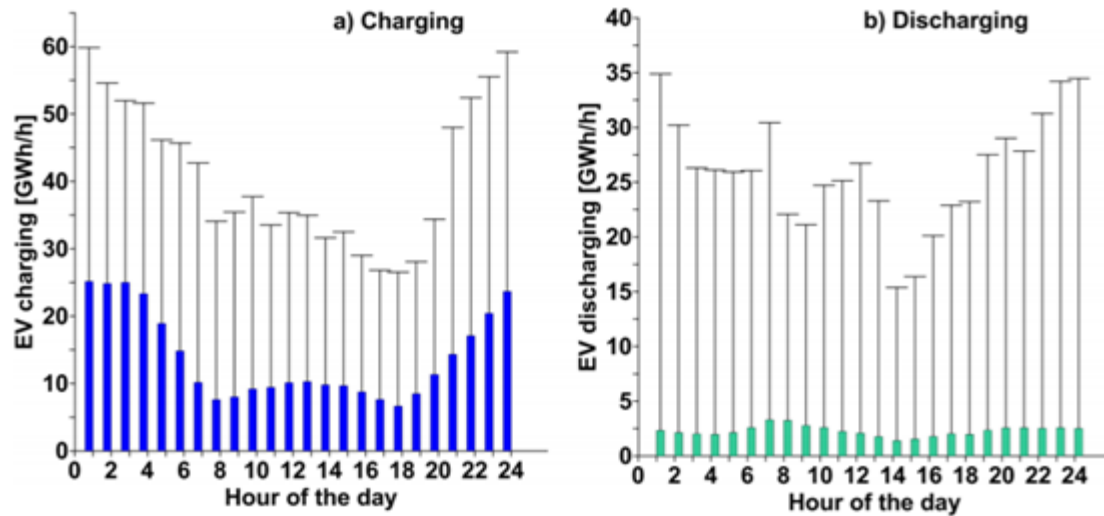
Kontrollerad laddning och v2g

Om den icke-publika laddningen i stället skulle kontrolleras genom att laddningen förskjuts till de tider när elsystemet är mindre belastat, skulle man kunna få en helt annat lastkurva år 2030. I en studie av Göransson et al. (2019) har man undersökt hur elsystemet i Sverige, Danmark, Norge och Tyskland i aggregerad form påverkas av att fordonssektorn elektrifieras till år 2030. Bland annat modelleras optimerad laddning, vilket innebär att de laddbara fordonen laddas på ett sätt så att elsystemets kostnader minimeras - samtidigt som elbehovet tillgodoses för alla regioner och alla tidpunkter om året. Vidare tillämpas även v2g i modelleringen, vilket innebär att bilarna fungerar som ett energilager och kan ladda ur el på nätet, se avsnitt 2.2.4. Detta ger upphov till olika lastprofiler.

I modelleringen antas det att 60 procent av personbilsflottan är elektrifierad fram till år 2030, och därmed modelleras 38 miljoner laddbara bilar i de studerade länderna. Antagandena om laddning baseras på GPS-data från 429 olika bensin- och dieslbilar i Västra Götaland från år 2010 och år 2012. Körmönstren visar på att de flesta parkerar sin bil runt 18-tiden.

Resultatet från studien visar att en stor andel av laddningen sker under natten om laddningen optimeras utifrån kostnadsoptimering, se Figur 12a. Utmatning på nätet (v2g) sammanfaller i sin tur med de timmar då elbehovet är som störst, det vill säga på morgonen och kvällen, se Figur 12b (Göransson et al., 2019).

Resultatet från denna studie används för att identifiera hur olika laddningsstrategier för de laddbara bilarna skulle kunna påverka hur många timmar om året som det råder kapacitetsbrist i Stockholm. Detta genom att procentuellt fördela energin som konsumeras vid icke-publika laddpunkter (se Tabell 4) utifrån dessa lastkurvor.



Figur 12. Visar hur a) laddning och b) urladdning kan se ut på aggregerad form för länderna Sverige, Danmark, Norge och Tyskland år 2030 när kostoptimering och v2g tillämpas (Göransson et al., 2019).

4 Resultat

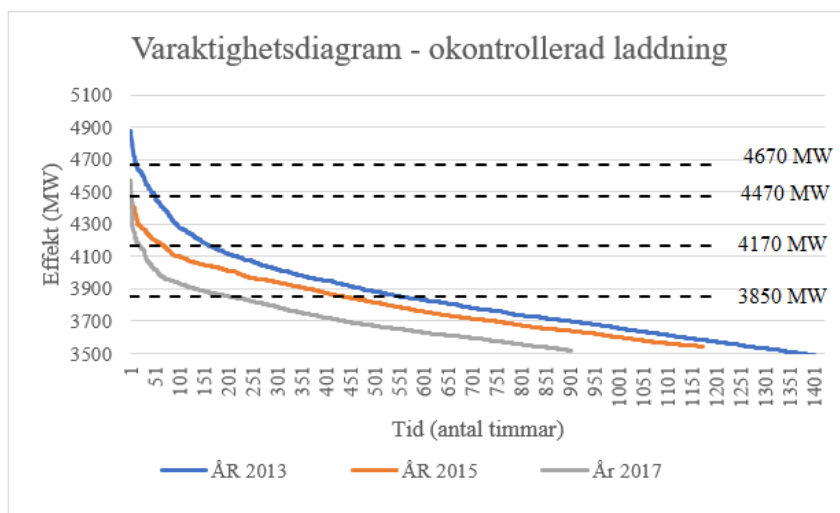
I detta avsnitt presenteras resultatet för hur effektuttaget kan komma att se ut i Stockholm år 2030 beroende på hur snabbt personbilsflottan elektrifieras och hur laddningen går till. Först presenteras resultaten från högscenariot och därefter lågscenariot. I båda scenarierna presenteras även de resultat som erhöles när kontrollerad laddning och v2g integrerades i hemmaladdningen och hur detta påverkar hur många timmar det då råder kapacitetsbrist. Observera att de olika scenarion som har tagits fram visar olika tänkbara utgångar och inte nödvändigtvis behöver visa den troliga utvecklingen för hur effekttopparna kommer att se ut år 2030. Vidare är resultaten baserade på lastkurvor från åren 2013, 2015 och 2017 där tillkommen elförbrukning från övriga sektorer och de laddbara bilarna har adderats (se avsnitt 3.4–3.6). När det står år 2013, 2015 och 2017 i resultaten som presenteras i detta avsnitt avses alltså inte enbart elförbrukningen från det specifika året, utan även det tillkomna elbehovet fram till år 2030. Anledningen till att åren benämns är för att ge läsaren inblick i hur elbehovet kan variera när vi når år 2030, beroende på vilket år ursprungslasten baseras på.

Det finns fyra effektgränser att ha i beaktande när man analyserar kapacitetsbrist i Stockholm fram till år 2030. Detta eftersom omfattningen med problematiken beror på i vilken utsträckning man lyckas frigöra mer effekt. Som nämndes i bakgrunden är det planerat att man ska kunna öka överföringskapaciteten med 300–500 MW in till Stockholm år 2023. Det finns dock osäkerheter kring var effekten kommer hamna och vem som kommer kunna nyttja den. Bland annat är flera aktörer involverade, där flera av de projekt som bedrivs för att frigöra mer kapacitet är beroende av varandra. Detta innebär i sin tur att ifall bara vissa insatser sker, är det osäkert hur mycket kapacitet som man faktiskt kan frigöra (Sweco, 2020). Här spelar nätstrukturer in, vilket är sekretessbelagd information som därmed inte kunde åtkommas i detta arbete (Energikontoret Storsthlm, 2020). Ifall utbyggnaden försenas eller inte blir av, måste man dessutom förlita sig helt på dagens abonnemang. Därför undersöks även vad som händer om man måste förlita sig på dagens abonnemang år 2030. Ellevio har även slutit ett kontrakt med Stockholm Exergi för att under ett visst antal ansträngande timmar om året, kunna nyttja en lokal kraftvärmeproduktion på 320 MW fram till år 2032 (Sweco, 2020). De fyra effektgränserna som analyserats i resultatet är:

- 1) Dagens abonnemang gentemot Svk: 3850 MW
- 2) Dagens abonnemang + lokal kraftvärmeproduktion: 4170 MW
- 3) Dagens abonnemang + lokal kraftvärmeproduktion + åtgärder om 300 MW: 4470 MW
- 4) Dagens abonnemang + lokal kraftvärmeproduktion + åtgärder om 500 MW: 4670 MW

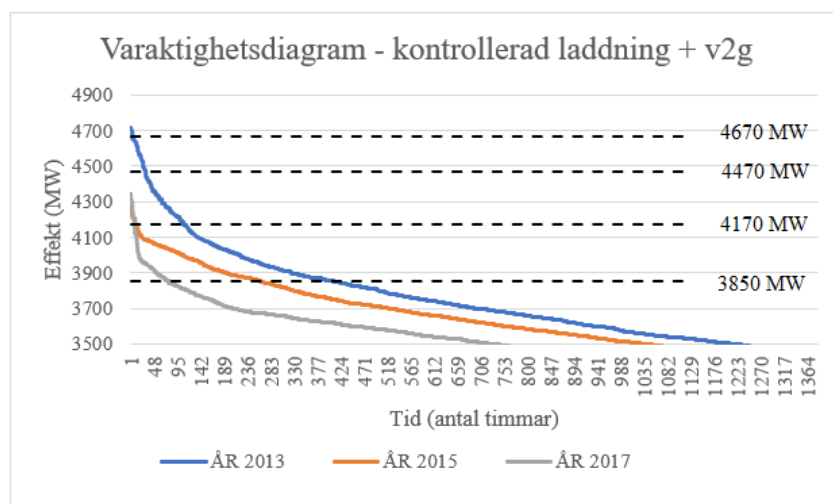
4.1 Högscenario

Nedan presenteras de resultat som erhöles om personbilsflottan elektrifieras enligt högscenariot och att det därmed finns 633980 laddbara bilar som laddas okontrollerad år 2030. I Figur 13 har ett varaktighetsdiagram tagits fram för alla de timmar där effektbehovet överstiger 3500 MW. Resterande timmar understiger alltså 3500 MW och har inte visualiserats. De högsta effekttopparna baserat på lastkurvor från åren 2013, 2015 och 2017 när tillkommen last fram till år 2030 adderats, blir uppemot 4900 MW ett fåtal timmar om året. Som syns i figuren överstigs samtliga effektgränser, baserat på lastkurvan från år 2013.



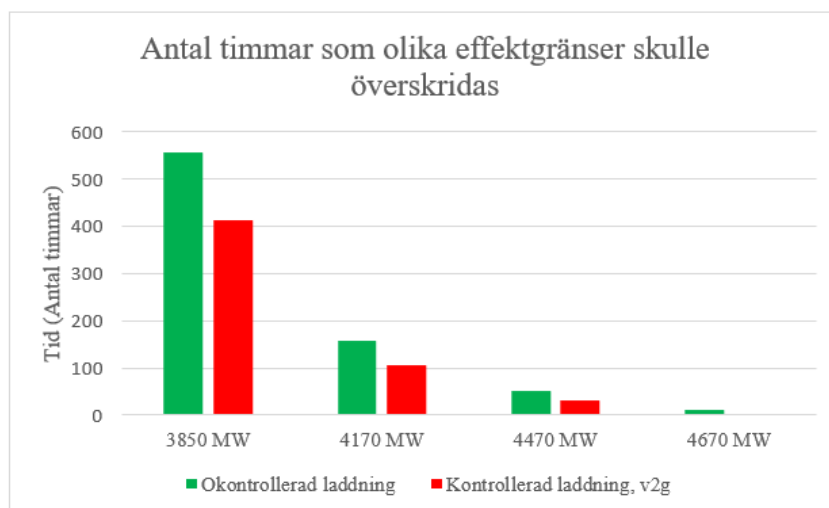
Figur 13. Visar ett varaktighetsdiagram för när effektuttaget överstiger 3500 MW. Okontrollerad laddning.

Ett varaktighetsdiagram har även tagits fram för hur effektbehovet ser ut om kontrollerad laddning och v2g integreras på det sätt som motsvarar fördelningen som tagits fram av Göransson et al. (2019), se Figur 14. Jämfört med den okontrollerad laddningen blir de högsta effekttopparna cirka 200 MW lägre. Fortfarande överstigs alla effektgränser baserat på lastkurvan från år 2013, fast ett färre antal timmar om året.



Figur 14. Visar ett varaktighetsdiagram för när effektuttaget överstiger 3500 MW. Kontrollerad laddning och v2g.

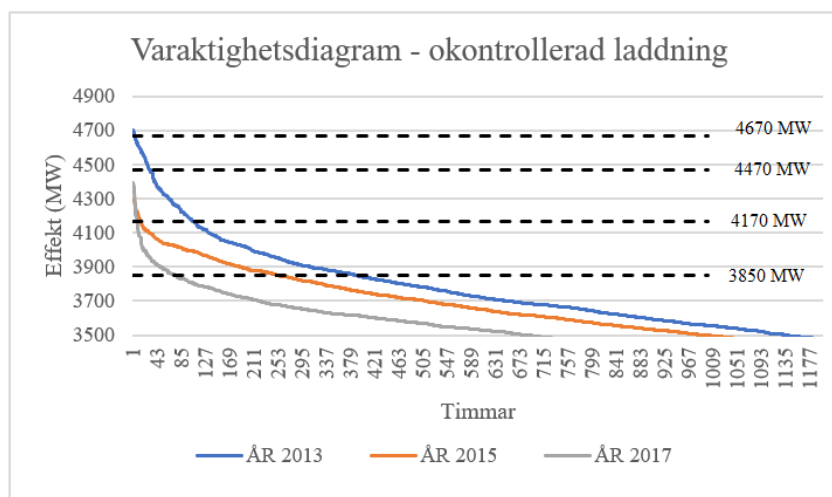
En sammanställning över antalet timmar med maximal kapacitetsbrist för respektive effektgräns visas i Figur 15. Som mest skulle man kunna överskrida det nuvarande abonnemanget på 3850 MW med 556 timmar om året. Om man däremot lyckas tillgängliggöra mer el så att man kan tillgodose Stockholm med 4670 MW så råder det enbart kapacitetsbrist som mest 12 timmar om året om laddningen sker okontrollerat. Resultatet visade också på att antalet timmar med kapacitetsbrist minskade om man hade kontrollerad laddning och v2g.



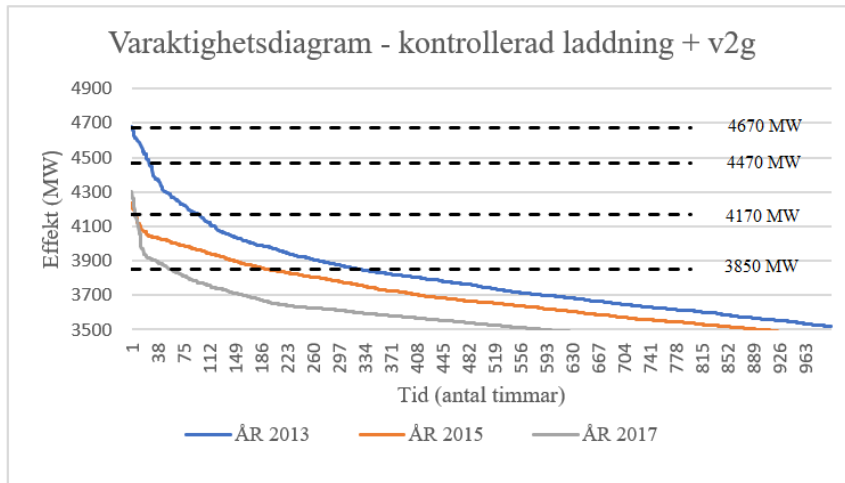
Figur 15. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids, beroende på om man har kontrollerad laddning med v2g eller okontrollerad laddning.

4.2 Lågsenario

Nedan presenteras de resultat som erhöles om personbilsflottan elektrifieras enligt lågsenariot, och att det därmed finns 257390 laddbara bilar som laddas okontrollerad år 2030. I Figur 16–17 har återigen två varaktighetsdiagram tagits fram för alla de timmar effektbehovet överstiger 3500 MW för kontrollerad laddning med v2g respektive okontrollerad laddning. De högsta effekttopparna baserat på lastkurvor från åren 2013, 2015 och 2017 när tillkommen last fram till år 2030 adderats, blir uppemot 4700 MW ett fåtal timmar om året, för både den kontrollerade laddningen med v2g och den okontrollerade laddningen. Fortfarande överskrider man även samtliga effektgränser baserat på lastkurvan från år 2013, däremot blir antalet timmar med kapacitetsbrist lägre jämfört med högscenariot.

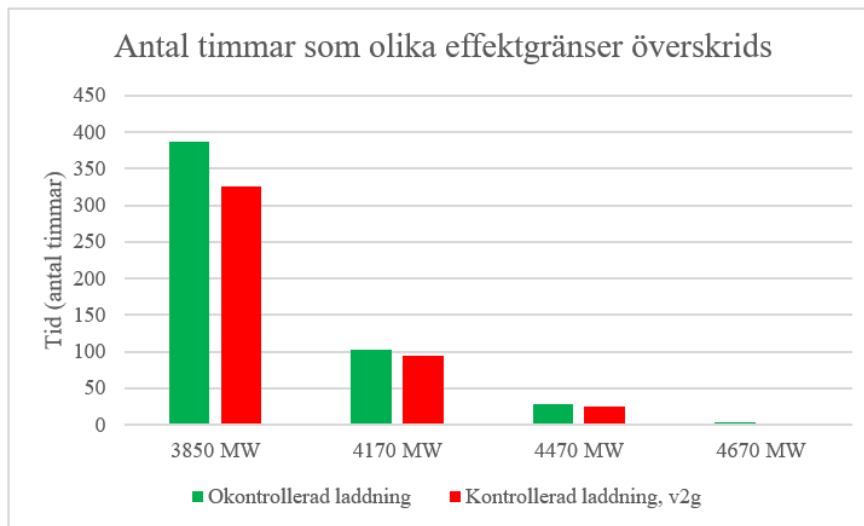


Figur 16. Visar ett varaktighetsdiagram för när effektuttaget överstiger 3500 MW. Okontrollerad laddning.



Figur 17. Visar ett varaktighetsdiagram för när effektuttaget överstiger 3500 MW. Kontrollerad laddning och v2g.

Som mest skulle man överskrida det nuvarande abonnemanget på 3850 MW med 387 timmar om året. Om man däremot lyckas tillgängliggöra mer el så att man kan tillgodose Stockholm med 4670 MW råder det enbart kapacitetsbrist som mest 3 timmar om året om man har okontrollerad laddning. Resultatet visade precis som i högscenariot att antalet timmar med kapacitetsbrist minskade om man hade kontrollerad hemmaladdning med v2g, se Figur 18.

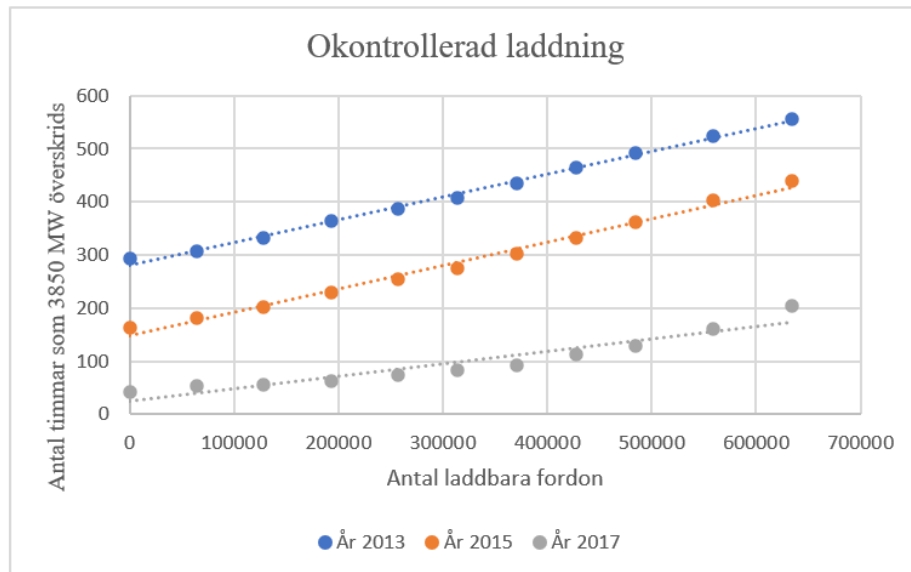


Figur 18. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids, beroende på om man har kontrollerad laddning med v2g eller okontrollerad laddning.

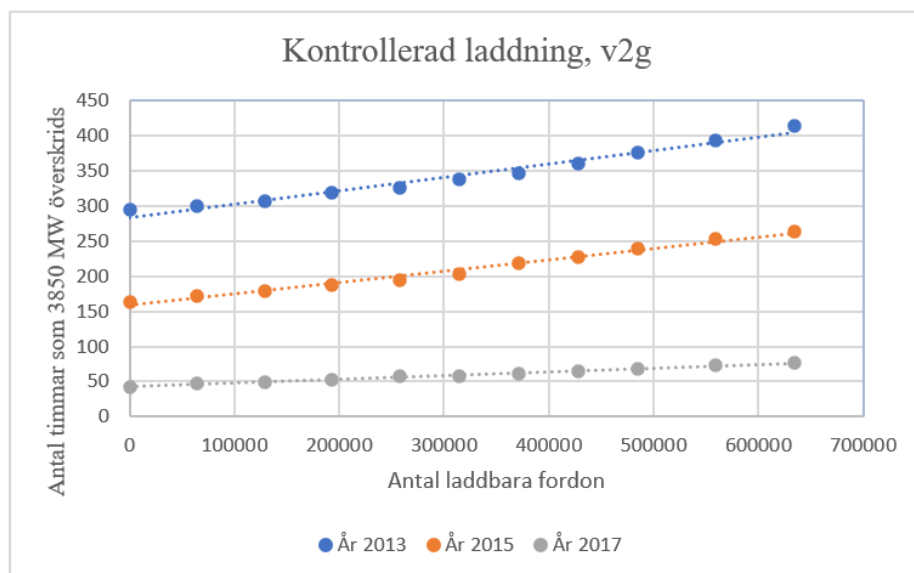
4.3 Korrelationen mellan kapacitetsbrist och antalet laddbara bilar

Korrelationen mellan antalet laddbara bilar och antalet timmar som det nuvarande abonnemanget på 3850 MW överskrids testades även genom linjär regressionsanalys, där elva olika punkter för antalet laddbara fordon inkluderades. Alla linjära regressioner implicerar ett linjärt samband mellan antalet timmar med kapacitetsbrist och antalet bilar. Ju fler personbilar som elektrifieras desto fler timmar uppstår således kapacitetsbrist, se Figur 19–20. Resultatet från regressionsanalysen visar att okontrollerad laddning leder till fler timmar med kapacitetsbrist än då laddningen i hemmet laddas kontrollerat och med v2g, för samtliga punkter som testats. Som syns i Tabell 5 är riktningskoefficienten dubbelt så hög för alla år som testats om laddningen sker okontrollerat, jämfört med de värden som erhålls när hemmaladdningen kontrolleras och v2g integreras. Vidare kan man även konstatera att för

alla tre åren som har använts för att lägga på tillkommen last fram till år 2030 (år 2013, år 2015, år 2017) överskrider det nuvarande abonnemanget på 3850 MW även utan laddbara bilar. Detta beror på att figuren speglar både ursprungslasten från de tre åren, men även tillkommen last från offentlig sektor och service, bostäder, datacenter och övriga transporter (som beräknades och adderades till ursprungslasten i avsnitt 3.5). Detta innebär att om övriga sektorer elektrifieras mer eller mindre än vad som antagits i denna studie så förskjuts kurvan troligtvis vertikalt.



Figur 19. Visar det linjära sambandet mellan antalet timmar som det nuvarande abonnemanget överskrids och antalet laddbara bilar. Okontrollerad laddning.



Figur 20. Visar det linjära sambandet mellan antalet timmar som det nuvarande abonnemanget överskrids och antalet laddbara bilar. Kontrollerad laddning med v2g.

Tabell 5. Visar ekvationer och r-värde för sambandet mellan antal laddbara fordon och timmar som abonnemanget på 3850 MW överskrids. I tabellen redovisas både fallet med kontrollerad laddning med v2g samt okontrollerad laddning.

Baserat på lastkurva från år	Kontrollerad laddning, v2g	Okontrollerad laddning
2013	$y = 0,0002x + 283,63$ $R^2 = 0,9741$	$y = 0,0004x + 281,59$ $R^2 = 0,9955$
2015	$y = 0,0002x + 158,24$ $R^2 = 0,9879$	$y = 0,0004x + 147,8$ $R^2 = 0,9899$
2017	$y = 5E-05x + 42,608$ $R^2 = 0,9937$	$y = 0,0002x + 24,825$ $R^2 = 0,9$

5 Känslighetsanalyser

I detta avsnitt analyseras resultaten i en känslighetsanalys för att undersöka hur huvudresultatet ändras om förändringar görs i några av antagandena. Dataunderlaget för känslighetsanalysen är baserad på år 2013, som gav flest timmar med kapacitetsbrist. Först testas antagandet om att det ska finnas en laddpunkt per tio bilar. Därefter testas antagandet om hur mycket energi som överförs vid publika respektive icke-publika laddpunkter. Till sist testas även antagandet om att offentlig sektor följer samma lastkurva som elområde 3.

5.1 Supply metric

Det första antagandet som testas gäller hur många publika laddpunkter det finns per laddbara bilar år 2030. Rekommendationen om en laddpunkt per tio bilar är den nuvarande rekommendationen som den Europeiska kommissionen ger i direktivet AFID. Detta antagande har alltså använts i arbetet för att beräkna lasten från de publika laddpunkterna. I praktiken är det dock inte säkert att det behövs så många laddpunkter, eftersom olika effekter på ladduttagen påverkar mängden effekt som är tillgänglig för de laddbara fordonen. Högre effekt gör att färre laddpunkter är nödvändigt, eftersom bilarna snabbare kan laddas upp (Transport&Environment, 2020). Dessutom ligger man redan idag efter med målet om 1 laddpunkt per tio bilar i Stockholm. Det verkliga utfallet är i dagsläget 1 laddpunkt per tjugo bilar (Lundqvist, 2021).

Hur många laddpunkter som behövs skiljer sig därmed från land till land inom EU och därför har Transport & Environment (T&E) tagit fram en metod för att bedöma hur stor mängd publik laddinfrastruktur som är tillräcklig i ett land. Metoden bygger på en viktningsmetod av de olika effekterna på laddarna, baserat på faktiska ladd-data och bransch-intervjuer (Transport&Environment, 2020). Att man kan använda sig av metoden Supply metric, framgick under intervjun med Power Circle. Power Circle har bland annat tagit fram en beräkningsmodell i excel för att kunna utvärdera hur många laddpunkter det skulle behövas i Sverige utifrån Supply metric. Detta excel-dokument delgavs under intervjun och användes som underlag för att kunna beräkna antalet laddpunkter för Stockholm. Metoden har alltså tillämpats i känslighetsanalysen för att utvärdera hur många publika snabbladdningspunkter respektive normalladdningspunkter som behövs för hög- och lågsceariot om man värderar antalet laddpunkter utifrån effekt. Viktningen, resulterat i ett mått som kallas Supply metric baseras på att 31 procent av all laddning sker vid publika laddpunkter år 2030, i stället för 15 procent som använts vid beräkningar av huvudresultatet.

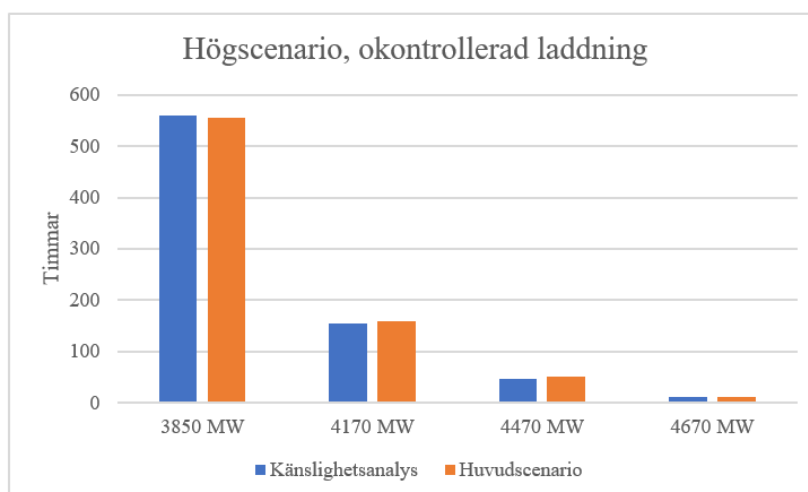
Resultatet om man använder denna metod visar på att 15 procent av all överförd energi sker vid snabbladdningspunkter och att resterande 85 procent av all energi överförs vid normalladdningspunkter. För fullständiga beräkningar och antaganden, se Appendix A. I huvudscenariot konstaterades det att 9 procent av all överförd energi sker vid snabbladdningspunkter i högscenariot och 23 procent av all överförd energi sker vid snabbladdningspunkter i lågsceariot (se avsnitt 3.6.1). För överskådliga skillnader mellan huvudscenariot och känslighetsanalysen, se Tabell 6.

Tabell 6. Visar skillnaden mellan antagandena i känslighetsanalysen och huvudscenarierna.

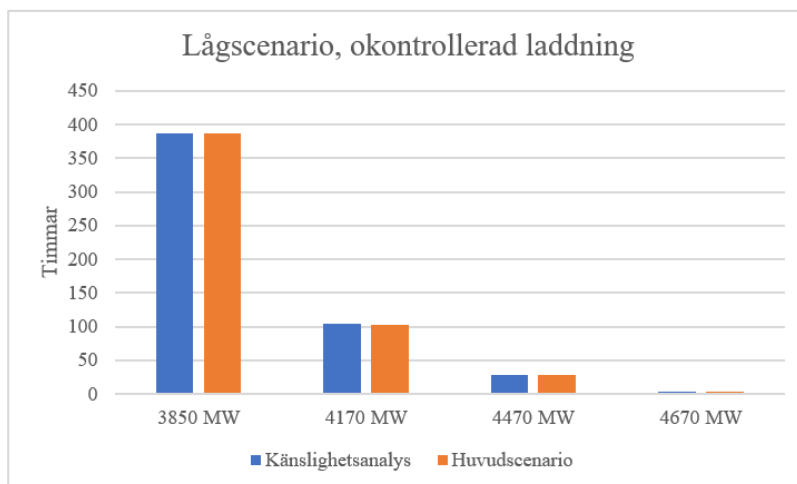
Publik laddning Överförd energi	Lågsenario	Högscenario
Känslighetsanalys		
Snabbladdare	15 procent	15 procent
Normalladdare	85 procent	85 procent
Huvudscenario		
Snabbladdare	23 procent	9 procent
Normalladdare	77 procent	91 procent

Om man räknar utifrån Supply metric antas det alltså att 31 procent av all överförd energi sker vid publika laddpunkter och att 15 procent av denna överförda energi sker vid snabbladdningspunkter. Då sker enbart 69 procent av all laddning vid icke-publika laddpunkter jämfört med 85 procent som användes vid beräkningar i huvudscenariot.

När resultatet från känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet kan man konstatera att antalet timmar som det råder kapacitetsbrist enbart ändras med några fåtal timmar, om man har okontrollerad laddning. Detta gäller för både lågsenario och högscenario, se Figur 21–22. En trolig förklaring till detta är att både publik och icke-publik laddning sammanfaller med befintliga toppeffekter och skapar därmed kapacitetsbrist.

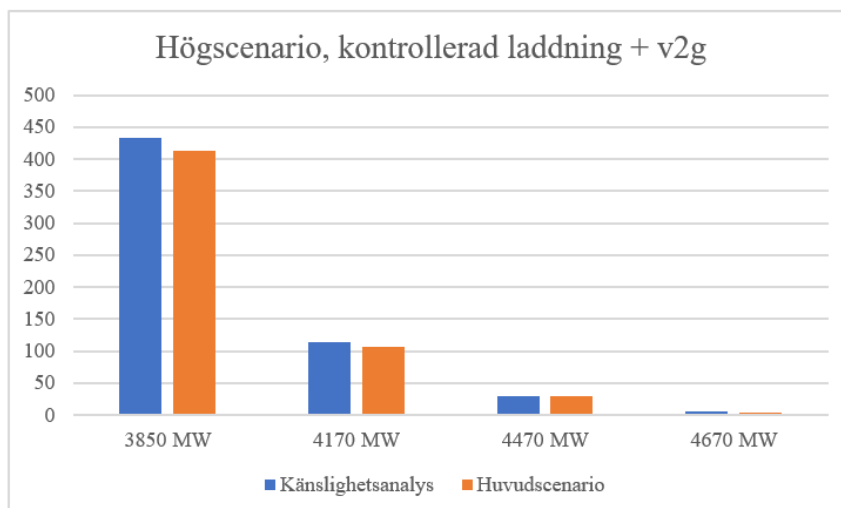


Figur 21. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i högscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Okontrollerad laddning.

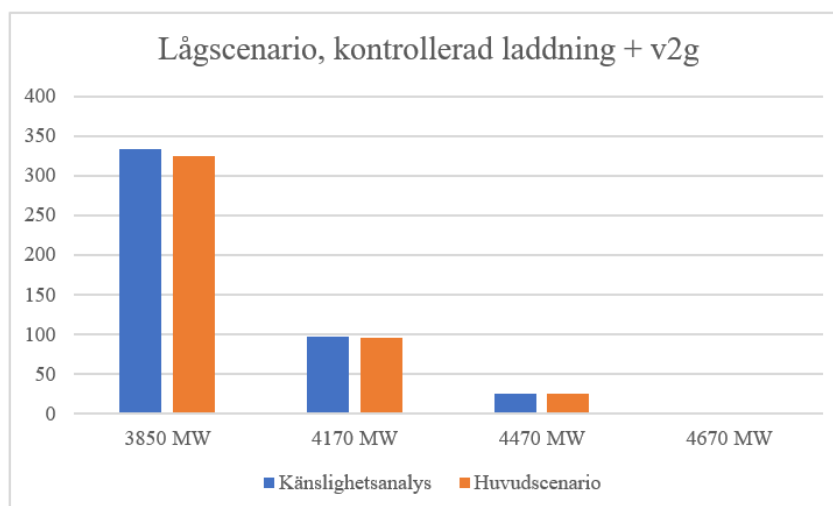


Figur 22. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågsenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Okontrollerad laddning.

Om man har kontrollerad laddning och v2g ändras resultatet lite mer i känslighetsanalysen jämfört med huvudscenariot, men fortfarande med enbart ett fåtal timmar. Det blir alltså fler timmar som man överstiger de olika effektgränser, i både hög- och lågsenariot (se Figur 23–24). Detta beror troligtvis på att en större andel av laddningen (31 procent) sker vid publika laddpunkter i känslighetsanalysen jämfört med huvudscenariot (15 procent). Eftersom det bara är den icke-publika laddningen som kontrolleras samt använder v2g blir det alltså en mindre andel laddning som kan kontrolleras och använda v2g, och därmed blir det fler timmar med effektbrist.



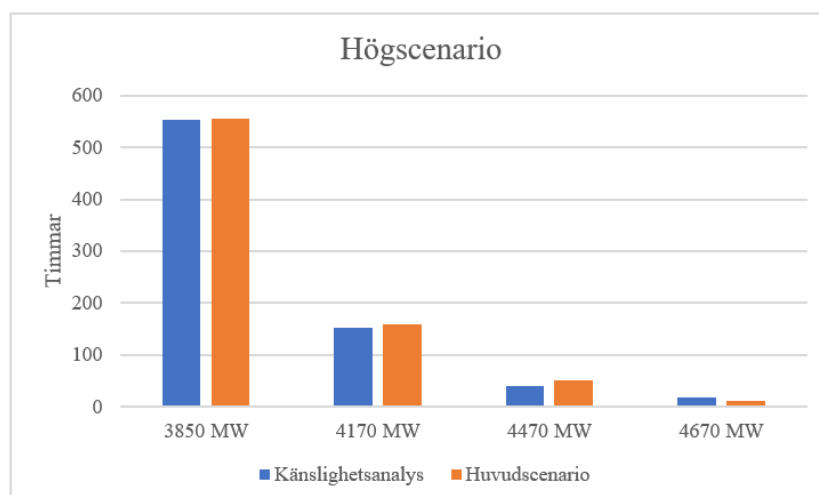
Figur 23. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i högscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet.



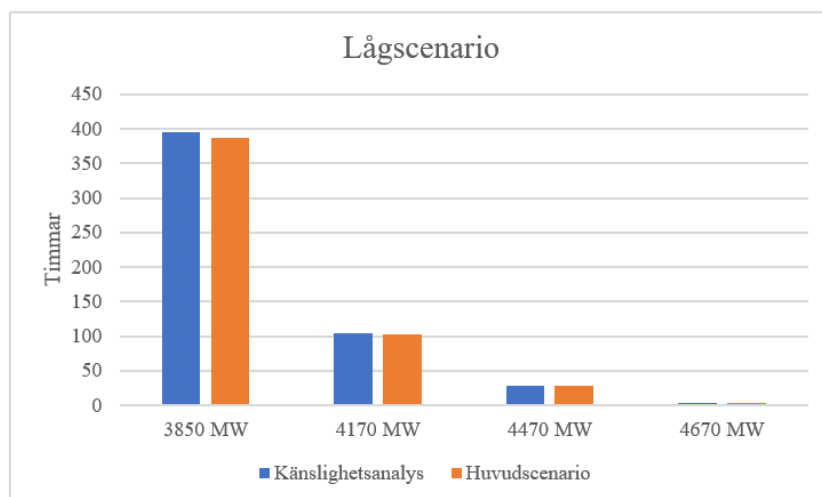
Figur 24. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet.

5.1.1 All laddning sker vid publika laddpunkter

När man räknade utifrån Supply metric visade det sig att resultaten inte ändrade sig märkbart när man ändrade så att publika laddningen gick från att överföra 85 procent av energin till 69 procent av energin, samtidigt som antalet laddpunkter beräknades utifrån effekt. För att kunna dra ytterligare slutsatser från detta gjordes en ny känslighetsanalys där den publika laddningen antogs stå för 100 procent av den överförda energin till laddbara bilar. Resultatet visade att timmar med kapacitetsbrist blev ungefär densamma, se Figur 25–26. Därmed kan man dra slutsatsen att både den publika och icke-publika laddningen sammanfaller med befintliga topplaster och ger därmed ungefär lika många timmar med kapacitetsbrist. Detta indikerar även att antagandet om att laddning vid arbetsplatser enbart ingår i den publika laddningen, inte bör påverka slutresultatet med hur många timmar som det råder kapacitetsbrist.



Figur 25. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i högscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet.



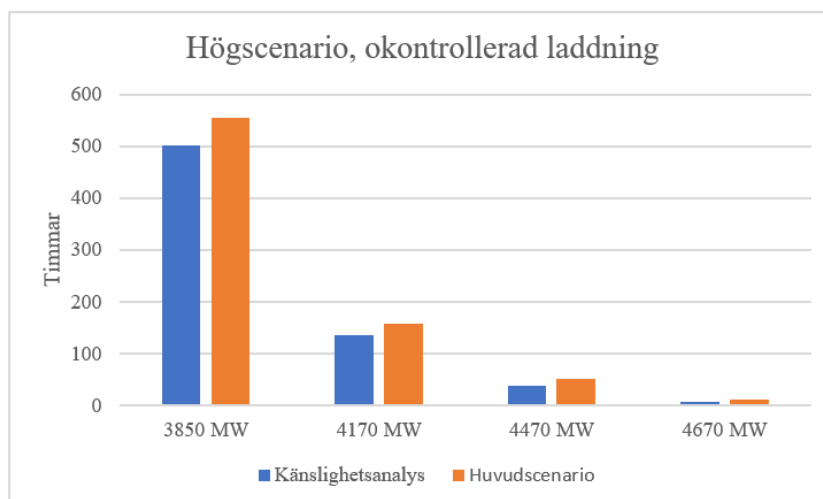
Figur 26. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågsценariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet.

5.2 Offentlig sektor och service

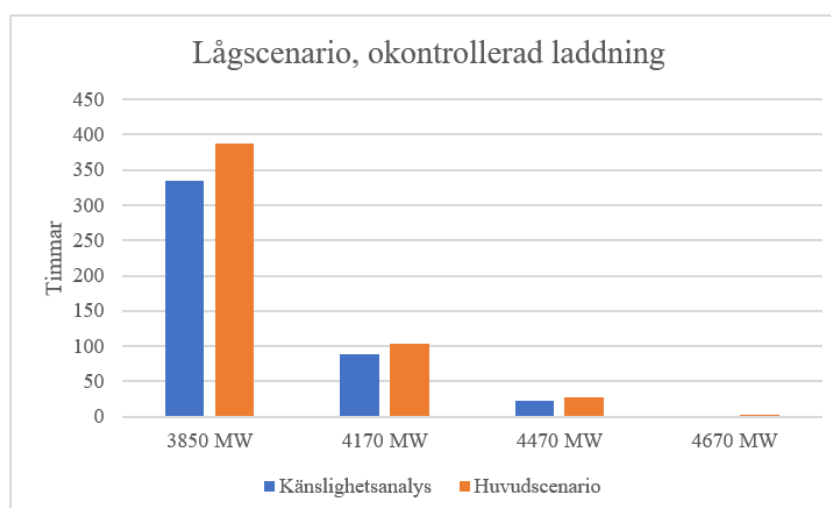
Det sista antagandet som testas är tillkommen last från andra sektorer än laddbara personbilar. Bland annat gjordes antagandet om att tillkommen last för offentlig sektor, bostäder, datacenter och övriga transporter följer samma förbrukningsmönster som den befintliga lasten gör idag. Det antogs alltså att elförbrukningen ökade proportionellt mot befintlig last, när scenarion ställdes upp i arbetet. Eftersom offentlig sektor och service är en av de sektorer som förväntas öka näst mest (0,9 TWh) efter transportsektorn, testas detta antagande. Länsstyrelsen Stockholm (2020) hänvisar framför allt till att förstärkningar inom vatten och avfall kommer leda till ökad elförbrukning när det kommer till offentlig sektor och service. På grund av osäkerheter hur stor andel av de 0,9 TWh som kan kopplas just till vatten och avfall, antas 100 procent vara vatten och avfall i känslighetsanalysen. För att kvantitativt framräkna hur många timmar det råder kapacitetsbrist, används elförbrukningsdata över Stockholm Vatten på timbasis, som erhöles under intervjun med Stockholms stad. De övriga sektorerna Energi bostäder (Eb), Energi datacenter (Ed) och Energi övriga transporter (Et) antas fortfarande följa samma förbrukningsmönster som den befintliga lasten gör idag, men nu en lägre andel, 1,394 TWh i stället för 2,294 TWh, när offentlig sektorn och service (Eos) subtraheras bort. Se Ekvation 14.

$$Eb + Ed + Et + Eos - Eos = 2,294 - 0,9 = 1,394 \text{ TWh} \quad (\text{Ekvation 14})$$

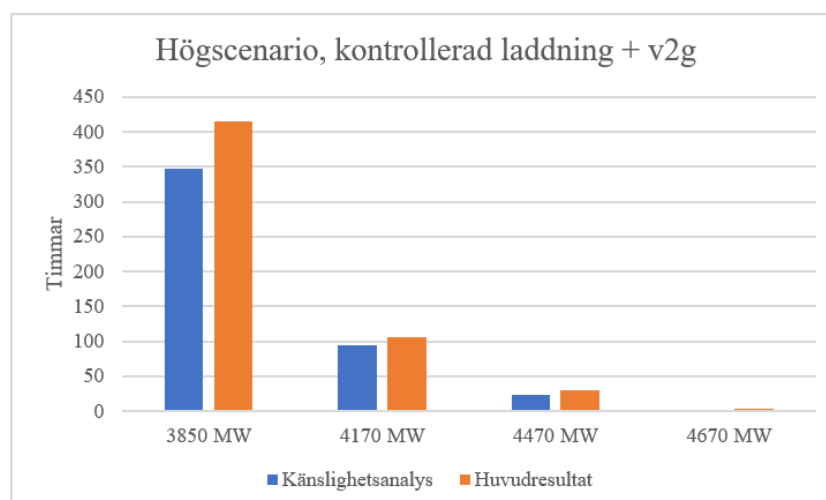
Resultatet från känslighetsanalysen visar att antalet timmar med kapacitetsbrist minskar om man antar att all elförbrukning inom offentlig sektor och service är kopplad till vatten och avfall, i jämförelse med huvudscenariot. Detta gäller både för den okontrollerade och kontrollerad laddningen med v2g, se Figur 27–30. Eftersom elförbrukningen för bostäder och övriga transporter (tunnelbana, vägfläckar och båttrafik) möjligtvis sammanfaller med övriga topplaster i elförbrukningen (mer än vad förbrukningsdata hämtad från elområde 3 gör) skulle man kunna tänka sig att det totala resultatet skulle kunna överensstämna någorlunda väl med de resultat som erhöles i huvudresultatet. Det är dock inte helt självklart att så är fallet i framtiden, eftersom det finns osäkerheter kring hur ökningen i elanvändning kommer att se ut. Det saknas därmed tillräckligt med dataunderlag i denna studie för att kunna göra en träffsäker prognos över hur dessa sektorer kommer att utvecklas.



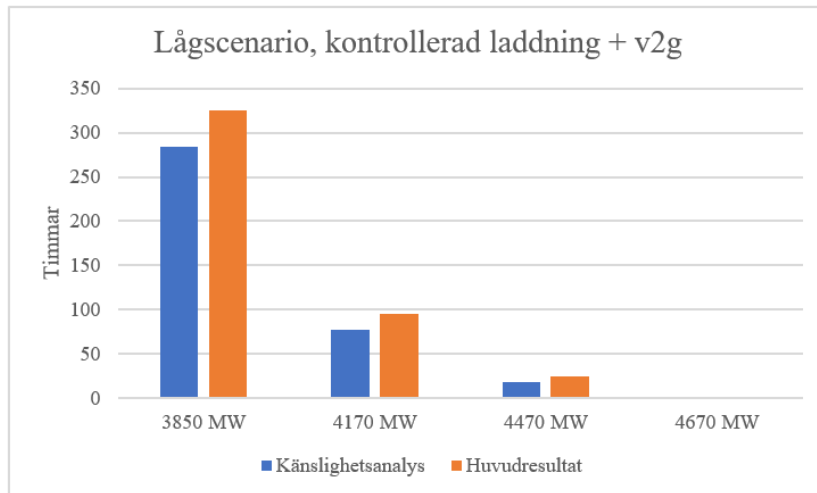
Figur 27. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i högscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Okontrollerad laddning.



Figur 28. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Okontrollerad laddning.



Figur 29. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Kontrollerad laddning och v2g.



Figur 30. Visar antalet timmar som olika effektgränser överskrids i lågscenariot, när känslighetsanalysen jämförs med huvudresultatet. Kontrollerad laddning och v2g.

6 Diskussion

Först diskuteras implikationerna av resultatet i ett större sammanhang. Därefter diskuteras de metoder och data som används för att bygga upp scenariot ur ett kritiskt perspektiv. Detta följs upp av en diskussion kring elbilar ur ett hållbarhetsperspektiv och hur man bör förhålla sig till resultaten. Avslutningsvis ges rekommendationer för framtida studier, utifrån de resultat som erhållits i denna studie.

6.1 Elbehovet för laddbara bilar och kapacitetsgränser

Resultatet från denna studie har visat att den ökade elbehovet för de laddbara personbilarna kommer att leda till ett ökat effektuttag och därmed också kapacitetsbrist i Stockholms regionnät år 2030. Utfallet från studien visar också att omfattningen med kapacitetsbrist beror på hur många laddbara bilar det finns år 2030. I lågsceariot blev antalet timmar med kapacitetsbrist betydligt lägre jämfört med om personbilsflottan kommer elektrifieras snabbt, som i högsceariot. Omfattningen med kapacitetsbrist beror också på i vilken utsträckning man lyckas frigöra mer effekt inom nätet. Högre effektgränser leder till mindre kapacitetsbrist. Dessutom påverkar nätstrukturer vilka områden som kommer bli mest ansträngda, vilket är sekretessbelagd information (Energikontoret Storsthlm, 2020). Det kommer alltså inte råda kapacitetsbrist överallt i Stockholm samtidigt, utan troligtvis inom vissa överbelastade lokalnät. Alternativt kommer de direkta effektuttagen på regionnätetsnivå att regleras ned och därmed behöver det nödvändigtvis inte uppstå några flaskhalsar på lokalnivå.

Studien har också visat att omfattningen av problemet med kapacitetsbrist beror på hur användare väljer att ladda sina bilar. Om exempelvis hemladdningen kontrolleras och v2g används, får detta betydande effekter för hur många timmar det råder kapacitetsbrist. Detta på grund av att okontrollerad laddning sammanfaller med de redan befintliga effekttopparna, medan kontrollerad laddning sker under mindre belastade timmar och v2g används för att ladda ur bilarna vid belastade timmar. Resultatet från regressionsanalysen indikerade bland annat att riktningskoefficienten för sambandet mellan timmar med kapacitetsbrist och antalet laddbara fordon blev dubbelt så hög om man hade okontrollerad laddning jämfört med kontrollerad laddning och v2g. Detta innebär att antalet timmar med kapacitetsbrist ökar dubbelt så mycket för de tillkomna laddbara bilarna, om man har okontrollerad laddning jämfört med kontrollerad laddning och v2g. Resultaten visade emellertid även att det kommer ske kapacitetsbrist oavsett om man har kontrollerad eller okontrollerad laddning. Det är alltså enbart omfattningen av problematiken med kapacitetsbrist som påverkas av hur man laddar sin bil.

En tolkning av resultatet är alltså att det finns stora skäl till att subventionera mer flexibel laddning i hemmet. Detta eftersom elnätet redan idag är ansträngt och att kapacitetsbrist enligt Stockholms handelskammare riskerar att hindra och senarelägga elektrifieringen av transportsektorn. Bland annat nekas redan idag flera större företag som vill elektrifiera sina transporter fram till år 2030 (Stockholms handelskammare, 2020a). Att investera i mer flexibel laddning har alltså både många direkta och indirekta positiva klimateffekter, eftersom flera aktiviteter som idag är dåliga för miljön skulle kunna elektrifieras under samma abonnemang (Energikontoret Storsthlm, 2020). Om mer flexibel laddning integreras, skulle man kunna möjliggöra fler anslutningar och minska de negativa effekterna av kapacitetsbrist. Man har alltså större chans att bedriva arbetet om att nå Sveriges klimat- och miljömål. Om ingenting görs, ökar risken för att man inte kommer kunna bygga ut laddinfrastruktur och påskynda elektrifieringen av transporter i den takt man har tänkt sig. Detta eftersom elnätsägare har rätten att neka nya anslutningar om det inte finns kapacitet, och som ju syntes i resultatet, överskrider abonnemanget på 3850 MW redan utan laddbara fordon.

Effekterna av att personbilsflottan ska elektrifieras kan också få konsekvenser i andra regioner i Sverige. Bland annat förväntas kapacitetsbrist bli ett problem i områdena Luleå, Skellefteå, Gotland, Södermanland/Östergötland, Uppsala och Gotland fram till år 2030 (Sweco, 2020). Att öka den

ekonomiska incitamenten för att investera i flexibilitetsresurser, som ofta är dyra, kan alltså ha stor nytta även i övriga delar av Sverige och sannolikt utanför Sverige, vilket ger insikterna för den här studien ett värde även i ett bredare sammanhang. Speciellt när elbehovet även ökar inom flera sektorer utöver personbilsflottan.

6.2 Metod och data

När man analyserar prognoser över hur elbehovet i Stockholms län kan komma att utvecklas måste man ha i åtanke att många planerade projekt där effektuttag kommer att öka är sekretessbelagda. Hit hör bland annat etablering av nya företag samt utbyggnad av olika typer av verksamheter i regionnätet. Det finns också osäkerheter i hur styrmedel kan komma att påverka effektuttaget fram till år 2030 samt hur omvärldsfaktorer skulle kunna komma att påverka (TRF, 2019). När det framtida scenariot konstruerades, antogs också externa faktorer förbli likadana under den undersökta tidsperioden. Detta innebär i sin tur, att i det verkliga utfallet, skulle det till exempel kunna införas en prishöjning på elanvändning. Det skulle också kunna bli mildra vinstrar de kommande åren, som innebär att elbehovet inte blir lika stort. Politisk inriktning skulle också kunna bli avgörande för om det finns incitament för olika sektorer att elektrifieras. En ytterligare pandemi skulle också kunna medföra att vårt elbehov inte följer de typiska lastkurvorna med effekttoppar under morgon och eftermiddag. Eftersom dessa faktorer inte rent statistisk går att kartlägga, har de inte analyserats. Däremot skulle samtliga faktorer kunna medföra att det inte råder kapacitetsbrist, eftersom den efterfrågade effekten möjligtvis skulle kunna minska, och att man därmed skulle kunna leverera el vid alla tidpunkter.

6.2.1 Stockholms elförbrukning

I denna studie har flera antaganden behövt göras för att kunna uppskatta hur elbehovet kan komma att utvecklas fram till år 2030. Det var bland annat svårt att få tag i data över hur elbehovet ser ut på timbasis i dagsläget samt hur olika sektorer kan tänkas utvecklas fram till år 2030. Eftersom det saknades tillgång till sådan data, var det svårt att göra en träffsäker prognos utifrån den data som fanns tillgänglig. I stället användes elområde 3 från åren 2013, 2015 och 2017 för att kvantifiera lastprofiler för Stockholm, vilket kan avvika något från verkligheten, eftersom Stockholm endast står för cirka 25 procent av elanvändningen i SE3. Antalet timmar med kapacitetsbrist år 2030 kan därmed avvika från de resultat som erhållits i denna studie, och är troligtvis fler än vad denna studie visat. I Stockholms län står nämligen den tunga industrin för en relativt låg andel av den totala elförbrukningen, jämfört med elområde 3. Industrin i elområde 3 stod för 34 procent av den totala elförbrukningen år 2019, medan den enbart stod för 15 procent av totala elförbrukningen i Stockholm (Regionfakta, 2020). Industrin är en av de sektorer där elförbrukningen är relativt oberoende av utomhustemperaturen och följer en jämn förbrukning både över dygnet och året (Energimyndigheten, 2020). Detta medför att man kan anta att en större andel av totala förbrukningen troligtvis är temperaturkänslig i Stockholm, än i elområde 3. Detta medför att elbehovet inte är lika stabilt utan kan ge oförutsägbara effekttoppar vid kallare timmar än vad denna studie visat (Stockholms handelskammare, 2020a).

De lastkurvor som ändå togs fram utifrån elområde 3 för att uppskatta dagens elförbrukning i Stockholm följer samma typ av förbrukningsmönster som Energikontoret Storsthlm (2020) presenterar i en rapport. I deras rapport har rådata över hur toppeffekten sett ut det mest belastade dygnet i region Stockholm sammanställts på timbasis för år 2010, 2012, 2013, 2016 och 2018, baserat på data från nätstationer i lokalnäten. De högsta lastkurvorna varierar runt 3000 MW för att sedan ett fåtal timmar uppgå i toppeffekten på 4000 MW (och därmed för vissa år överstiga abonnemangsgränsen) (Energikontoret Storsthlm, 2020). Detta överensstämmer med de lastkurvor som togs fram utifrån elområde 3 i denna studie, som följer ett liknande mönster för de mest belastade dygnet. Dessutom genererar den framräknade lastkurvan ett högre effektuttag på morgonen och sena eftermiddagen, precis som Energikontoret Storsthlm (2020) redovisar. Eftersom Energikontoret Storsthlm (2020) enbart redovisar dataset för de mest belastade dygnet för respektive år, går det dock inte att säga något

om resterande dagar. Dessutom presenterar de enbart elförbrukningen i lokalnäten (Energikontoret Storsthlm, 2020).

6.2.2 Övriga sektorer

Då det saknas data kring hur olika sektorer kommer utvecklas fram till år 2030, antogs det att den tillkomna lasten från datacenter, offentlig sektor och bostäder ökar proportionellt mot lastprofilerna som hämtades från elområde 3. Om flexibla resurser även skulle integreras inom dessa sektorer, skulle effekttopparna kunna minska mer än vad denna studie visat. SthlmFlex är ett forskningsprojekt som skulle kunna få stort genomslag, där ekonomiska incitament kan göra att fler vill styra sin elanvändning till mindre belastade timmar (Svenska kraftnät, 2020b). Energieffektivisering inom olika sektorer skulle också kunna påverka hur den tillkomna lastkurvan från de olika sektorerna ser ut år 2030.

6.2.3 Laddbara bilar

När scenariot byggdes upp för hur de laddbara bilarna laddas antogs det att laddningen följer samma typ av förbrukningsmönster år 2030, som idag. För både publik och icke-publik laddning användes därmed genomsnittlig elanvändning för respektive timme under ett år, vilket innebär att det kan förekomma avvikelser från genomsnittet i verkligheten, som både genererar högre och lägre effekttoppar. Vidare användes även lastkurvor för kontrollerad laddning och v2g där elsystemets kostnader minimeras för länderna Sverige, Norge och Tyskland samtidigt - vilket innebär att den förskjutna lasten inte är perfekt anpassat till Stockholmsregionen eller Sverige. Om ett sådant här system skulle baseras på realtidsdata skulle det ge en väsentligt bättre följsamhet mellan utbud och efterfrågan på eleffekt, och därmed troligtvis minska effekttopparna ytterligare. Trots detta minskade timmarna med kapacitetsbrist markant när kurvan applicerades på Stockholm och man skulle därmed kunna tänka sig att elsystemets kostnader inte skiljer sig så mycket mellan regionerna. Dessutom är det inte säkert att alla användare vill använda sig av dessa flexibla laddningsalternativ i framtiden, utan vill kunna ladda enligt egna preferenser okontrollerat, vilket innebär att resultaten ändå visar ett tänkbart utfall.

Det antogs även att 15 procent av all överförd energi sker vid publika ladduttag och 85 procent vid icke-publika ladduttag. Detta antagande påverkade inte resultatet i någon större omfattning. Från känslighetsanalysen visade det sig att om man ökade den publika laddningen från 15 till 30 procent och viktade antalet laddpunkter utifrån effekter i stället för CPEV=0,1, erhöles nästan exakt samma antal timmar med kapacitetsbrist som i huvudresultatet, för den okontrollerade laddningen. Detta gällde även om den publika laddningen stod för 100 procent av all överförd energi, vilket implicerar att både publik och icke-publik laddning sammanfaller med befintliga toppar i elnätet, när det kommer till okontrollerad laddning.

I studien har enbart kontrollerad laddning och v2g undersökts för den icke-publika laddning, vilket redogjordes för i avgränsningarna. Detta på grund av att det finns tidsbegränsningar över hur länge man får ladda vid en publik laddpunkt i Stockholms stad. Eftersom den publika laddningen dessutom enbart står för 15 procent av den totala överförda energin, indikerar detta också att man har störst möjlighet att styra om laddningen i tid för den icke-publika laddningen. Däremot kan man tänka sig att publika energilager som laddas upp under mindre belastade timmar och utnyttjas under hårt belastade timmar, skulle kunna minska effekttopparna ytterligare, för den publika laddningen, och därmed ha en viktig roll vid de tidpunkter då kapacitetsbrist infinner sig. Speciellt om inte alla vill använda sig av kontrollerad laddning och v2g i hemmet.

6.2.4 Liknande studier

Med denna metod uppgick den högsta effektbehovet till 4900 MW i högscenariot. Samtidigt har SvK gått ut med helhetsbedömningen att det kan råda effekttoppar uppemot 5600 MW år 2030 i Stockholm.

Det skulle alltså kunna råda kapacitetsbrist många fler timmar om året än vad denna studie visat. En förklaring till skillnaden i resultaten skulle kunna vara att enbart timmar analyserats i denna studie. De minuterna och sekunderna det råder kapacitetsbrist har alltså inte tagit i beaktande, vilket troligtvis ger högre toppar, speciellt när det kommer till laddning av laddbara bilar. Bland annat kan en laddbar bil laddas upp på cirka en halvtimme med en snabbaddare - vilket ger en betydligt högre effekt än om man sprider ut energin över en timme, som i denna studie.

En annan förklaring till att resultatet skiljer sig är att många framtida planerade projekt med större effektuttag är sekretessbelagda i Stockholm - vilket innebär att det råder osäkerheter kring hur det totala elbehovet faktiskt ser ut år 2030 (Energikontoret Storsthlm, 2020). Detta innebär att kapacitetsbrist troligtvis kan bli ett ännu mer omfattande problem år 2030 än vad denna studie visat.

6.3 Transportsektorns utveckling

Resultaten som har presenterats är alltså tänkbara utfall av framtiden och inte nödvändigtvis den troliga utvecklingen. Eftersom transportsektorn även är ett sociotekniskt system som beror på en mängd olika faktorer finns det också osäkerheter i hur transportsektorn utvecklar sig (Graham & Marvin, 2001). Det finns alltså anledningar att ifrågasätta om elektrifieringen av all personbilstransport fram till år 2030 kommer öka på det vis som har antagits i denna studie. Bland annat förväntas brytningen av jordartsmetallerna öka i djupa havsbottnar de kommande åren, för att kunna tillgodose den ökade efterfrågan på elbilar. Att bryta mineraler och metaller i dessa områden är dock mycket skadligt för de befintliga ekosystemen och kan förstöra havens balans vars ekosystemtjänster många människor idag är beroende av. WWF menar på att man istället måste fokusera på att övergå till en mer cirkulär ekonomi med mer innovativa lösningar på transportfrågan (WWF, 2021).

6.4 Framtida studier

Det finns flera tänkbara framtida scenarier över hur elbehovet skulle kunna utvecklas fram till år 2030. I denna studie har utvecklingen inom elbehovet studerats för Stockholmsområdet på timbasis, som visar att elektrifieringen av personbilsflottan kan få stora effekter på elnätet fram till år 2030. Studien har också visat att kontrollerad laddning och v2g i hemmet skulle kunna mildra effekterna. Det är dock osäkert hur många elbilsanvändare som hade kunnat tänkas sig att skjuta sin elanvändning i tid till de tidpunkter då elsystemet är mindre belastat. För framtida studier hade därmed varit av stort intresse att ur ett användarperspektiv analysera hur många elbilsägare som skulle kunna tänka sig att använda kontrollerad hemmaladdning och v2g för att minska ansträngningar på nätet i Stockholm, och vidare undersöka vilka incitament som då skulle behövas.

7 Slutsatser

Resultaten från studien har visat att kapacitetsbrist kan komma att bli ett omfattande problem fram till år 2030 till följd av att personbilsflottan ska elektrifieras. Tre viktiga faktorer har identifierats för utfallet:

- 1) Hur snabbt elektrifieringen av personbilsflottan sker
- 2) I vilken utsträckning man använder sig av kontrollerad laddning och v2g.
- 3) Hur väl man lyckas frigöra mer effekt så att regionnätet inte blir lika påfrestat

Antalet timmar som det uppstår kapacitetsbrist, ifall allt elbehov ska kunna tillgodoses år 2030, påverkas i stor utsträckning av hur snabbt elektrifieringen av personbilsflottan sker. Resultatet från studien visar att det nuvarande abonnemanget på 3850 MW överstigs maximalt med 556 timmar om året ifall personbilsflottan elektrifieras enligt högscenariot och 387 timmar om året ifall personbilsflottan elektrifieras enligt lågscenariot. Lyckas man förbättra överföringskapaciteten i transmissionsnätet år 2023 med 300–500 MW blir antalet timmar med kapacitetsbrist dock betydligt lägre. Dessutom är situationen främst ansträngd de kommande tio åren, eftersom kapacitetsbrist förväntas vara avhjälpd år 2030, när transmissionsnätet har byggts ut till Stockholm.

Studien har också visat att antalet timmar med kapacitetsbrist ökar relativt linjärt med antalet personbilar som elektrifieras, oavsett typ av laddning. Antalet timmar med kapacitetsbrist ökar dock dubbelt så snabbt om laddningen sker okontrollerat, jämfört med om hemmaladdningen kontrolleras och man använder v2g. Om laddningen styrs till tider då effektuttaget är lägre skulle man alltså kunna mildra konsekvenserna av det ökade elbehovet kopplat till personbilssektorn. Eftersom det redan idag råder kapacitetsbrist i region Stockholm finns det därmed stora skäl till att integrera mer kontrollerad laddning. När v2g blir mer kommersiellt kan detta också vara en viktig lösning i att styra ned höga effekttoppar.

Eftersom resultaten har visat att man kommer överskrida dagens abonnemang på 3850 MW under flera av årets timmar, oavsett om man har kontrollerad laddning med v2g eller okontrollerad laddning, finns risken att framtida nyanslutningar för laddinfrastruktur kommer att nekas. Det finns alltså en risk att elektrifieringen av personbilsflottan försenas i Stockholm och att den först kommer kunna ta ordentlig fart efter år 2030 på grund av kapacitetsbrist, om inga åtgärder införs. Om kapacitetsbrist även uppstår i andra delar av Sverige, kan detta innebära att elektrifieringen och övergången till en fossilfri fordonsflotta försenas även på nationell nivå. Om så blir utfallet, medför detta att det skulle kunna bli svårt att uppnå målet om att minska utsläppen inom transportsektorn med 70 procent relativt de nivåer som uppmättes år 2010, om man inte hittar några alternativa lösningar.

Källhänvisning

Bryman, Alan. (2018). *Samhällsvetenskapliga metoder*. Malmö: Liber.

Börjeson, Lena., Höjer, Mattias., Dreborg, Karl-Henrik., Ekvall, Tomas., Finnveden, Göran. (2006). *Scenario types and techniques: Towards a user's guide*. *Futures* 38: 723-739.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>

Edfast, Tobias. (2021). Svenska kraftnät. Mejlkontakt. [2021-02-10]

Ellevio. (u.å.). *Om elmarknaden*. <https://www.ellevio.se/om-oss/om-elmarknaden/> [Hämtad: 2021-02-07]

Elområden. (u.å.). *Hämta elområde från din position*. <https://elomraden.se/> [Hämtad: 2021-04-16]

Energikontoret Storsthlm. (2020). *Eleffektiva kommuner - Regional samverkan mot kapacitetsbrist*.
https://www.nepp.se/pdf/Eleffektiva_kommuner_Rapport.pdf

Energimarknadsinspektionen. (2018). *Konsument på elmarknaden*. Ei R2018:07. Eskilstuna: Energimarknadsinspektionen.
<https://www.ei.se/download/18.5b0e2a2a176843ef8f56ca86/1611642562457/Konsument-p%C3%A5-elmarknaden-Klagom%C3%A5sstatistik-2014-2017-Ei-R2018-07.pdf>

Energimarknadsinspektionen. (2020). *Kapacitetsutmaningen i elnäten*. Ei R2020:06.
<https://www.ei.se/download/18.5b0e2a2a176843ef8f56cbo0a/1611643287162/Kapacitetsutmaningen-i-eln%C3%A4ten-Ei-R2020-06.pdf>

Energimyndigheten. (2019). *Laddinfrastruktur*. <http://www.energimyndigheten.se/laddinfrastruktur> [Hämtad: 2021-03-22]

Energimyndigheten. (2020). *En studie av elanvändningens utveckling per län till år 2030*. Eskilstuna: Sweco.
<https://www.energimyndigheten.se/contentassets/ad60a337c1a74547b0a9438c50dccc4c/en-studie-av-elanvandningens-utveckling-per-lan-till-ar-2030.pdf> [Hämtad: 2021-03-19]

Englund Beijer, Ronja. (2021). Mejlkontakt. [2021-03-17]

Europaparlamentet. (2019). *Koldioxidutsläpp från bilar i siffror*.
<https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/society/20190313STO31218/koldioxidutslapp-fran-bilar-i-siffror-nyhetsgrafik> [Hämtad: 2021-05-11]

Europeiska kommissionen. (2014). *Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure*. Official Journal of the European Union L 307/2. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d414289b-5e6b-11e4-9cbe-01aa75ed71a1>

Figenbaum, Erik. (2019). *Charging into the future: Analysis of fast charger usage*. ISSN: 2535-5104.
<https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=49751>

Fortum. (u.å.a). *Elpris - aktuella och historiska elpriser*.
<https://www.fortum.se/privat/elavtal/elpriser> [Hämtad: 2021-06-16]

Fortum. (u.å.b). *Så sätts elpriset*. <https://www.fortum.se/privat/elavtal/elpriser/sa-satts-elpriset> [Hämtad: 2021-06-16]

Fossilfritt Sverige. (2020). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft*.
<https://fossilfritt Sverige.se/fardplaner/>

Funke Árpád, Simon., Sprei, Frances, Gnann, Till., Plötz, Patrick. (2019). *How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison*. Transportation research part D: transport and environment, 2019, Vol.77 :224-242.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.024>

Graham, Steve., Marvin, Simon. (2001). *Splintering Urbanism: Networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition*. London: Routledge.

Grahn, Pia. (2014). *Electric Vehicle Charging Modeling*. Diss, Kungliga Tekniska Högskolan. ISSN: 1653-5146. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:749480/FULLTEXT02.pdf>

Grundius, Josefine., Topel, Monika. (2020). *Load Management Strategies to Increase Electric Vehicle Penetration—Case Study on a Local Distribution Network in Stockholm*. Energies 13:4809.
<https://doi.org/10.3390/en13184809>

Gustafsson, Emil., Nordström, Fredrik. (2017). *Impact of electric vehicle charging on the distribution grid in Uppsala 2030*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1130512/FULLTEXT01.pdf>

Göransson, L. Lisa., Karlsson, Sten., Johnsson, Filip. (2010). *Integration of plug-in hybrid electric vehicles in a regional wind-thermal power system*. Energy Policy, 2010, Vol.38: 5482-5492.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.001>

Göransson, L., Johnsson, F., Odenberger, M., Taljegard, M. (2019). *Impacts of electric vehicles on the electricity generation portfolio – A Scandinavian-German case study*. Applied Energy, 2019, Vol. 235: 1637-1650. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.133>

He, Fang., Wu, Di., Yin, Yafeng., Guan Yongpei. (2013). *Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles*. Transportation Research Part B: Methodological. Vol 47, p.87-101. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.09.007>

ICCT (The International Council on Clean Transport). (2020). *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles - Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions*. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/PHEV_ICCT_Fraunhofer_ISI_white_paper.pdf [Hämtad: 2021-03-29]

InCharge. (2020). *Räckvidd elbil*. <https://incharge.vattenfall.se/kunskapshubb/artiklar/raeckvidd-elbil/> [2021-03-06]

Konsumenternas energimarknadsbyrå. (2020). *Elområden*. <https://www.enerгимarknadsbyran.se/el/elmarknaden/elomraden/> [Hämtad: 2021-04-20]

LEKS (Länsstyrelserna Energi- och klimatsamordning). (u.å). *Energistatistik*. <https://www.leks.se/energistatistik/> [Hämtad:2021-03-21]

Lundqvist, Simon. (2021). *Mejlkontakt*. [2021-03-29]

Länsstyrelsen Stockholm. (2020). *Kartläggning och analys av elförsörjningssituationen i Stockholms län Redovisning av regeringsuppdraget Trygg elförsörjning*. Rapport 2020:12. Stockholm: Länsstyrelsen Stockholm.
<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.61dfa31172a239705f2b2a8/1599748744841/R2020-12-Kartl%C3%A4ggning-elf%C3%B6rs%C3%B6rjning-Sthlms-1%C3%A4n.pdf>

Mälarenergi. (2020). *Batterilager - en del av en hållbar framtid*. <https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/samarbete-med-northvolt/> [Hämtad: 2021-03-19]

Naturvårdsverket. (2021). *Klimatklivet - beräkna utsläppsminskning för publika laddningsstationer*. https://www.naturvardsverket.se/upload/amnessidor/Plast/210416_klimatvardering_av_publica_laddningsstationer.pdf [Hämtad: 2021-05-18]

Nepp (North European Energy Perspectives Project). (2020). *Elektrifiering av Sveriges transportsektor*. http://www.nepp.se/pdf/elektrifiering_Sveriges_transportsektor.pdf

Nord Pool. (u.å.) *Power system data, consumption*. <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Power-system-data/Consumption1/Consumption/SE/Hourly1111/?view=table> [Hämtad: 2021-02-15]

PowerCircle. (2018). *Elbilsläget 2018*. <https://infogram.com/elbilslaget-2018-1h1749rjvkrq4zj?live> [Hämtad: 2021-02-09]

PowerCircle. (2020). *Vad är V2G - Vehicle to Grid? Faktablad från PowerCircle*. <https://www.powercircle.org/v2g.pdf> [Hämtad: 2021-03-18]

Proposition 2019/20:65. *En samlad politik för klimatet – klimatpolitisk handlingsplan*.

Regeringens proposition. (2011). *Stärkt konsumentroll för utvecklad elmarknad och uthålligt energisystem*. Prop. 2010/11:153. <https://www.regeringen.se/49bbbf/contentassets/2719b943b3874db49e62ee5e9e4c28b8/prop.-201011153-starkt-konsumentroll-for-utvecklad-elmarknad-och-uthalligt-energisystem>

Regionfakta. (2020). *Elförbrukning, slutlig användare*. <https://www.regionfakta.com/gotlandslan/energi/elforbrukning-slutlig-anvandare/> [Hämtad: 2021-02-17]

Robinson, A.P., Blythe, Bell, P.T., Hübner, Y., Hil, G.A.. (2013). *Analysis of electric vehicle driver recharging demand profiles and subsequent impacts on the carbon content of electric vehicle trips*. Energy policy, 2013, Vol.61:337–348. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.074>

SCB (Statistiska centralbyrån). (u.å.) *Kommunal och regional energistatistik*. <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/energibalanser/kommunal-och-regional-energistatistik/> [Hämtad: 2021-04-20]

Sonerud, Sigge. (2018). *Publika laddstationer i Stockholms innerstad - När inträffar effekttoppar och hur sammanfaller dom med andra laster i nätet*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1251025/FULLTEXT01.pdf>

Stockholm Exergi. (2019). *Utsläpp av koldioxid till följd av höjd skatt på kraftvärme: Minskade eller ökade utsläpp av koldioxid?* <https://www.stockholmsexergi.se/nyheter/utslapp-av-koldioxid-till-foljd-av-hojd-skatt-pa-kraftvarme/> [Hämtad:2021-03-15]

Stockholms handelskammare. (2020a). *Elbrist kortsluter Sverige*. Stockholm: Stockholms handelskammare. <https://www.chamber.se/rapporter/elbristen-koertsluter-sverige.htm>

Stockholms handelskammare. (2020b). *Elbilar på frammarsch*. Stockholm: Stockholms handelskammare. <https://www.chamber.se/rapporter/elbilar-pa-frammarsch.htm>

- Stockholms stad. (2020). *Utvärdering av publik laddning för elbilar i Stockholms stad, april 2020*. Stockholm: Miljöförvaltningen Stockholms stad. <https://start.stockholm/globalassets/start/om-stockholms-stad/organisation/fackforvaltningar/miljoforvaltningen/miljobilar-i-stockholm/rapporter/utvardering-av-publik-laddning-for-elbilar-i-stockholms-stad.pdf>
- Svenska kraftnät. (2014). *Elnät i fysisk planering: Behandling av ledningar och stationer i fysisk planering och i tillståndsärenden*. Stockholm: Svenska kraftnät, svensk energi. <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/elnat-i-fysisk-planering-webb.pdf>
- Svenska kraftnät. (2020a). *Drivkrafter bakom utvecklingen av transmissionsnätet*. <https://www.svk.se/natutveckling/drivkrafter/?id=838> [Hämtad: 2021-01-20]
- Svenska kraftnät. (2020b). *Sthlmflex*. <https://www.svk.se/sthlmflex> [Hämtad: 2021-03-16]
- Svenskt näringsliv. (2019). *Skatter hotar elförsörjningen i storstadsregioner*. Online: https://www.svensktnaringsliv.se/sakomraden/hallbarhet-miljo-och-energi/skatter-hotar-elforsorjningen-i-storstadsregioner_1134561.html [Hämtad: 2021-03-12]
- Sveriges miljömål. (u.å.). *Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter*. <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-fran-inrikes-transporter/> [Hämtad: 2021-04-22]
- Sweco. (2020). *Kartläggning av hur planerade nätinvesteringar avhjälper kapacitetsbrist i elnätet. En rapport till Energimarknadsinspektionen*. <https://www.ei.se/download/18.5f8cc396177db5159bd9cf8/1615306149359/SWECO-Kartl%C3%A4ggning-av-hur-planerade-n%C3%A4tinvesteringar-avhj%C3%A4lper-kapacitetsbrist.pdf>
- Tarr, Joel A. (2005). *The City and Technology. A Companion to American Technology*. New York: Blackwell Publishing, 97–112
- Tillväxt- och regionplaneförvaltningen (TRF). (2019). *Kraftförsörjning inom östra Mellansverige*. Stockholm: Sweco. https://www.regiongavleborg.se/globalassets/regional-utveckling/rapporter-och-publikationer/samhallsplanering_och_infrastruktur/oms---kraftforsorjning-inom-ostra-mellansverige---rapport.pdf
- TØI. (2014) *Electric vehicles – environmental, economic, and practical aspects – As seen by current and potential users*. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=37250>
- Trafikanalys. (2018). *Körsträckor 2018*. https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/korstrackor/2019/korstrackor_2018_blad.pdf
- Trafikanalys. (2019). *Körsträckor 2019*. https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/korstrackor/2020/korstrackor_2019_statistikblad_sept.pdf?
- Transport&Environment. (2020). *Recharge EU: how many charge points will Europe and its Member States need in the 2020s*. <https://www.transportenvironment.org/publications/recharge-eu-how-many-charge-points-will-eu-countries-need-2030>
- Trivector. (2019). *Underlag till regional plan för laddinfrastruktur och förnybara drivmedel*. <https://alfresco-offentlig.vgregion.se/alfresco/service/vgr/storage/node/content/workspace/SpacesStore/8e28746e->

of92-4e77-8de1-e4cf6d8e9b83/Rapport%20Underlag%20till%20regional%20plan%20of%c3%b6r%20laddinfra%20och%20of%c3%b6rnybara%20drivmedel__ver1.0.pdf?a=false&guest=true

Trivector. (u.å.). *Effekter av storskalig elektrifiering och stadens roll*. Stockholm: Trafikkontoret Stockholms stad. <https://insynsverige.se/documentHandler.ashx?did=1963756>

Uniper. (u.å.). *Systemstabilitet – vad är det?* <https://www.uniper.energy/sverige/systemstabilitet> [2021-05-16]

Vti (Statens väg- och transportforskningsinstitut). (2014) *Kunskapssammanställning över introduktionen av elbilar*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:734241/FULLTEXT02.pdf>

WWF. (2021). *Ny WWF-rapport: Enorm risker med mineralbrytning på havsbotten*. <https://www.wwf.se/pressmeddelande/ny-wwf-rapport-enorma-risker-med-mineralbrytning-pa-havsbotten-3886743/> [Hämtad: 2021-03-30]

Wänéus, Sara., & Östergren, Catherine. (2019). *Elnätets beredskap inför en mycket storskalig utbyggnad av laddinfrastruktur i Sverige*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1325665/FULLTEXT01.pdf>

Appendix A

A1. Supply metric

För att beräkna antalet laddpunkter som behövs utifrån Supply metric, beräknas först det totala energibehovet för de laddbara bilarna. Därefter beräknas hur mycket energi som laddpunkterna har möjlighet att leverera om de används varje timme på dygnet. Utifrån detta kan man sedan beräkna hur många laddpunkter som behövs genom att dividera värden i energibehovet för de laddbara bilarna med den totala möjliga levererade energin.

Transport & Environment (2020) har tagit fram en fördelning över var den publika laddningen sker i genomsnitt i Europa år 2030. Se Tabell A1. 31 procent av all överförd energi antas ske vid publika laddpunkter, medan resterande överförd energi sker vid icke-publika laddpunkter.

Tabell A1. Fördelningen mellan var laddningen sker i genomsnitt i Europa år 2030 (Transport&Environment, 2020).

Ladduttag	BEV 2030	PHEV 2030
Publikt: 3–7 kW	4 procent	9 procent
Publikt: 11–22 kW	16 procent	19 procent
Publikt: 50 kW	3 procent	3 procent
Publikt: 150 kW	8 procent	0 procent
Totalt	31 procent	31 procent

A.1.1 Beräkning av totala laddade energin

För att beräkna den totala laddade energin år 2030 (\AA E), multipliceras antalet bilar (L_b) med genomsnittlig körsträcka i mil per år ($x=1257$ mil/år) och energi som förbrukas per mil ($k=1,5$ kWh/mil). Beräkningarna gjordes både för hög- och lågsceariot, $L_b(\text{högscenariot}) = 633980$ bilar och $L_b(\text{lågsceariot}) = 257390$ bilar. Se Ekvation A1.

$$\text{\AA E} = x \times k \times L_b \quad (\text{Ekvation A1})$$

Eftersom laddhybrider (PHEV) även använder andra bränslen än el, behövde detta räknas bort från den årliga energiförbrukningen. År 2030 förväntas 67 procent av alla laddbara bilar vara BEV och 33 procent är PHEV. Av alla PHEV:s totala energiförbrukning, är 53 procent av bränslet el. Se Ekvation A2 och Ekvation A3.

$$PHEV: 0,333 * 0,53 * \text{\AA E} \quad (\text{Ekvation A2})$$

$$BEV: 0,677 * \text{\AA E} \quad (\text{Ekvation A3})$$

Energiförbrukningen för PHEV och BEV som erhöles i Ekvation A2-A3, multipliceras sedan med procentandelarna i Tabell A1 för att veta hur stor total energiöverföring (TE) som sker vid respektive destination (laddeffekt) för högscenariot respektive lågsceariot. Resultaten för högscenariot redovisas i Tabell A2 och resultaten för lågsceariot redovisas i Tabell A3.

Tabell A2. Energiöverföring vid respektive destination i högscenariot.

Högscenario	BEV	PHEV	Totalt
Publikt: 3–7 kW	31 909 244	18 967 341	50 876 586
Publikt: 11–22 kW	127 636 977	40 042 165	167 679 142
Publikt: 50 kW	23 931 933	6 322 447	30 254 380
Publikt: 150 kW	63 818 489	0	63 818 489

Tabell A3. Energiöverföring vid respektive destination i lågscenariot.

Lågscenario	BEV	PHEV	Totalt
Publikt: 3–7 kW	12 954 857	7 700 565	20 655 422
Publikt: 11–22 kW	51 819 429	16 256 748	68 076 177
Publikt: 50 kW	9 716 143	2 566 855	12 282 998
Publikt: 150 kW	25 909 714	0	25 909 714

A.1.2 Beräkning av den totala möjliga levererade energin

För att beräkna hur stor den totala möjliga levererade energin (MLE) som kan överföras vid respektive publik laddeffekt multipliceras den genomsnittliga effekten för respektive stolpe (GE) med antalet timmar per dygn och antalet dagar per år.

$$MLE = GE * 24 \text{ timmar} * 365 \text{ dagar} \quad (\text{Ekvation A4})$$

Resultatet från Ekvation E4, presenteras i Tabell A4.

Tabell A4. Totala möjliga levererade energin för respektive ladduttag (Transport&Environment, 2020).

Totala möjliga energi levererad	kWh
Publikt: 3–7 kW (5 kWh i genomsnitt)	5 kWh* 24 h* 365 dagar = 43 800 kWh
Publikt: 11–22 kW (16,5 kWh i genomsnitt)	16,5 kWh* 24 h* 365 dagar = 144 540 kWh
Publikt: 50 kW	50 kWh* 24 h* 365 dagar = 438 000 kWh
Publikt: 150 kW	150 kWh* 24 h* 365 dagar = 1 314 000 kWh

Därefter beräknades den faktiskt levererade energin (FLE), där man tagit hänsyn till hur mycket respektive laddpunkt utnyttjas (utnyttjandegrad=U) om det råder 99 procent tillgänglighet (Tillgänglighet=T) till laddpunkterna och det sker 5 procent energiförluster till batteriet (Förluster=F). Se Ekvation A5. Siffror är återigen baserade på Transport & Environment (2020) och resultatet har sammanställts i Tabell A5.

$$FLE = MLE * U * T * Fi \quad (\text{Ekvation A5})$$

Tabell A5. Antaganden kring utnyttjandegrad, tillgänglighet och förluster till batteri år 2030 (Transport&Environment, 2020).

Totala möjliga energi levererad	Utnyttjandegrad	Tillgänglighet	Förluster till batteri
Publikt: 3–7 kW (5 kWh i genomsnitt)	14 procent	99 procent	95 procent
Publikt: 11–22 kW (16,5 kWh i genomsnitt)	8 procent	99 procent	95 procent
Publikt: 50 kW	7 procent	99 procent	95 procent
Publikt: 150 kW	5 procent	99 procent	95 procent

A.1.3 Beräkning av antalet laddpunkter

Högscenari

Antal laddpunkter (AL) i högscenariot räknas fram genom att dividera den totala energiöverföringen (TE) i Tabell A2, kolumn 4, för respektive laddeffekt, med den faktiska levererade energin vid respektive laddeffekt (FLE). Se Ekvation A6.

Lågscenari

Antal laddpunkter i lågscenariot räknas fram genom att dividera den totala energiöverföringen (TE) i Tabell A3, kolumn 4, för respektive laddeffekt med den faktiska levererade energin vid respektive laddeffekt (FLE). Se Ekvation A6.

$$AL = \frac{TE}{FLE} \quad (\text{Ekvation A6})$$

I Tabell A5 presenteras resultatet för antal laddpunkter fram till år 2030 för respektive laddeffekt.

Tabell A5. Antal laddpunkter år 2030 i högscenariot respektive lågscenariot om man räknar med supply metric.

Laddeffekt	Antal laddpunkter Lågscenari	Antal laddpunkter Högscenari
Publikt: 3–7 kW (5 kWh i genomsnitt)	3582	8822
Publikt: 11–22 kW (16,5 kWh i genomsnitt)	6260	15 419
Totalt normalladdare	9842	24 241
Publikt: 50 kW	426	1049
Publikt: 150 kW	419	1033
Totalt snabbaddare	845	2082

Givet att en publik snabbladdningspunkt används två gånger om dagen medan en normalladdningspunkt enbart används en gång beräknas hur stor andel av den publika laddningen som överförs vid snabbladdningspunkter respektive normalladdningspunkter. Först beräknades överförd energi vid snabbladdningspunkter (E_s) i Ekvation A7 och därefter vid normalladdningspunkter (E_n), i Ekvation A8.

$$E_s = \frac{S \times 2}{(S \times 2) + N} \quad (\text{Ekvation A7})$$

$$E_n = \frac{N}{(S \times 2) + N} \quad (\text{Ekvation A8})$$

Se sammanställning av resultatet från Ekvation A7 och A8, för både hög- och lågscenario i Tabell A6.

Tabell A6. Procentuell andel av den överförda energin som sker vid normalladdare respektive snabbladdare, för låg- och högscenariot.

Typ av laddare	Lågscenario - fördelning av överförd energi beroende på typ av laddare.	Högscenario - överförd energi beroende på typ av laddare.
Normalladdare	85,3 procent	85,3 procent
Snabbladdare	14,7 procent	14,7 procent
Totalt	100 procent	100 procent

TRITA TRITA-ABE-MBT-21413