



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 21012

Examensarbete 30 hp
Mars 2021

Nätanslutning av en framtida elväg

En kartläggning av anslutningsmöjligheter
för E4an mellan Gävle och Stockholm

Amelie Ekström
Jessica Wänlund



UPPSALA
UNIVERSITET

**Teknisk- naturvetenskaplig fakultet
UTH-enheten**

Besöksadress:
Ångströmlaboratoriet
Lägerhyddsvägen 1
Hus 4, Plan 0

Postadress:
Box 536
751 21 Uppsala

Telefon:
018 – 471 30 03

Telefax:
018 – 471 30 00

Hemsida:
<http://www.teknat.uu.se/student>

Abstract

Grid connection of a future electric road

Amelie Ekström

The transport sector accounts for a third of Sweden's total greenhouse gas emissions where cars and heavy trucks dominate the use of fossil fuels. The Swedish government is now intensifying the work for an electrified transport sector where electric roads could be an important part. Electric roads enable heavy vehicles to charge their batteries while driving, which is expected to contribute to environmentally friendly and time-efficient freight transports. To implement electric roads, availability of electric power along the electric roads will be required. This study presents a plan for connecting an electric road to the electricity grid in the electricity network area of Vattenfall Eldistribution. From the results, the idea was to present general conclusions from the experiences of the study, that could contribute in further implementation of electric roads.

The road that has been selected for the study was the E4 between Gävle and Stockholm. A model for calculating the power demand along the electric road has been modeled and connection possibilities to transformer stations has been investigated. The analysis was based on three scenarios where different degrees of strengthening of the existing electricity network were assumed. In addition, a forecast for 2030 and a cost estimation for each scenario has been carried out. The result of the study indicates that for road sections close to larger cities, there are a larger number of connection options in comparison to rural areas. Furthermore, the designed solution in the study required strengthening of the electricity grid and the investment cost was 362 million Swedish crowns.

Handledare: David Lundback
Ämnesgranskare: Karin Thomas
Examinator: Elisabet Andrésdóttir
ISSN: 1650-8319, UPTec STS 21012

Populärvetenskaplig sammanfattning

I Sverige utgör transportsektorn en tredjedel av de totala växthusgasutsläppen, där personbilar och tunga lastbilar dominerar användningen av fossila bränslen. För att minska de nationella utsläppen av växthusgaser, intensifierar den svenska regeringen arbetet för en elektrifierad transportsektor. En del av den framtida transportsektorn förväntas vara elvägar, ett system som dynamiskt laddar fordon under färd genom konduktiv eller induktiv teknik. Regeringen har gett Trafikverket i uppdrag att planera för införandet av ett storskaligt elvägssystem i Sverige där utgångspunkten är att 2 000 kilometer av det svenska vägnätet ska vara elektrifierat med elväg år 2030 och 3 000 kilometer år 2035. Trafikverket har gjort bedömningen att de fordon som förväntas ha störst nytta av elvägar är de godstransporter med ett stort effektbehov som avverkar långa sträckor utan att stanna. Ett elvägssystem möjliggör för dessa fordon att köra långa sträckor på el och kortare resor på batteridrift, vilket medför att elvägar kan bidra till mer miljövänliga och tidseffektiva godstransporter.

För att implementera ett storskaligt elvägssystem kommer det krävas kapacitet i elnätet och tillgänglighet av elkraft längs med elvägarna. Syftet med studien har varit att bidra med kunskap kring hur elnätets infrastruktur runt elvägar skulle kunna utformas, utifrån elnätsföretaget Vattenfall Eldistribution ABs perspektiv. I studien undersöktes E4an mellan Gävle och Stockholm, vilket är en sträcka som Trafikverket har pekat ut som aktuell för implementering av elväg år 2030. De fordonstyper som antagits nyttja elvägen har i studien varit tunga lastbilar med en elektrifieringsgrad på 100 procent. Inledningsvis har en modell för beräkning av effektbehovet längs sträckan modellerats i beräkningsprogrammet Matlab. Effektbehovet har modellerats genom en kombination av data för trafikflödet längs med sträckan och den beräknade framdrivningseffekten för tunga lastbilar. Framdrivningseffekten är den effekt som krävs för att driva fordonen framåt och har beräknats genom att summera de primära krafter som verkar på ett fordon. Vidare har anslutningsmöjligheter i form av transformatorstationer med lämplig placering och spänningsnivå tagits fram och analyserats utifrån tillgänglig kapacitet och krav på elkvalitet.

Analysen baserades på tre scenarion där olika grader av förstärkning av det befintliga elnätet antogs. För dessa scenarion har även en prognos för elanvändningen i transformatorstationerna för år 2030 samt en kostnadskalkyl för varje scenario tagits fram. I det första scenariot antogs elvägen ansluta till befintligt elnät vilket innebar fem lämpliga transformatorstationer längs med elvägen. För dessa transformatorstationer kunde kraven på tillgänglig kapacitet och elkvalitet inte uppfyllas utan bedömningen gjordes att det krävdes vidare åtgärder utifrån detta scenario. För det andra scenariot antogs en viss förstärkning av det befintliga elnätet vilket ledde till att ytterligare tre transformatorstationer matade elvägen. För det scenariot kunde de flesta kraven uppfyllas, med undantag för några av transformatorstationernas belastning år 2030. För scenario 3 anslöts ytterligare en transformatorstation med syfte att balansera ett område längs sträckan med högt effektbehov. Det resulterade i att alla krav på tillgänglig kapacitet och elkvalitet gick att uppfylla.

Resultaten visar på att det kommer krävas förstärkning av elnätet för att kunna förse den valda elvägssträckan med tillgänglig kapacitet och samtidigt upprätthålla kraven för elkvalitet.

Dessa åtgärder innefattade att utföra förstärkningar i fyra transformatorstationer, i form av nya transformatorer och andra nödvändiga komponenter. För vägar intill städer finns det ett större antal anslutningsmöjligheter men i dessa finns det även risk för en konkurrerande situation, som i samband med rådande kapacitetsbrist kring städer kan bli problematisk. I studien har ett färre antal anslutningsmöjligheter lokaliserats inom landsbygdsområden och inom dessa områden kan det bli mest aktuellt med förstärkning av elnätet.

Investeringskostnaderna för de olika scenarierna beräknades i studien till 251, 331 och 362 miljoner kronor beroende på vilket scenario som väljs. Den totala kostnaden för hela elvägen mellan Gävle och Stockholm förväntas vid en grov kostnadsuppskattning bli 1,7 till 3,4 miljarder kronor beroende på val av teknik. Det visar att anslutningen till elnätet utgör en mindre del av de totala investeringskostnaderna som krävs för ett elvägssystem.

Exekutiv sammanfattning

Examensarbetet har utförts på uppdrag av Vattenfall Eldistribution AB i syfte att bidra med kunskaper kring elmatningens utformning för ett framtida elvägssystem. Vattenfall Eldistribution kan inom en snar framtid ställas inför en förfrågan om att upprätthålla elnätsmatning till en elväg och examensarbetet ämnar därför till att vara ett underlag som kan användas om förfrågan ställs. Den elvägssträcka som har undersökts i examensarbetet är E4an mellan Gävle och Stockholm, där elvägens effektbehov och anslutning mot elnätet har analyserats. Sträckan som har valts är utpekad av Trafikverket som en del av ett storskaligt elvägssystem år 2030. I studien analyserades både befintliga och åtgärdade transformatorstationer för att hitta en robust lösning som tillgodoser elvägens förväntade effektbehov.

Effektbehovet för den aktuella sträckan var som störst mellan Uppsala och Stockholm, på grund av ett stort trafikflöde i närheten av Stockholm. I detta område är lämpliga transformatorstationer placerade tätare i jämförelse med området mellan Gävle och Uppsala där det i befintligt elnät endast lokaliserades en transformatorstation som upprätthöll kraven på redundans. Om hela sträckan mellan Gävle och Uppsala ska elektrifieras med elväg, bör det därför göras förstärkningar i detta område. För att hitta en lösning som tillgodoser hela elvägens effektbehov förstärktes tre transformatorstationer mellan Gävle och Uppsala och en transformatorstation mellan Uppsala och Stockholm. I studien presenteras en lösning med totalt nio transformatorstationer där hela elvägens effektbehov kan tillgodoses. Den totala investeringskostnaden för lösningen motsvarar 362 miljoner kronor.

Förord

Det här examensarbetet har utförts på Uppsala universitet i samarbete med Vattenfall Eldistribution AB. Omfattningen på arbetet har varit 30 högskolepoäng på avancerad nivå och utgjort en avslutande del av våra respektive civilingenjörsutbildningar.

Vi är oerhört tacksamma för möjligheten att genomföra det här examensarbetet för Vattenfall Eldistribution. Det har varit en lärorik och rolig tid, där vi har känt ett stort stöd från hjälpsamma och kompetenta kollegor. Vi vill rikta ett stort tack till David Lundback för kontinuerlig hjälp och vägledning längs vägen. Vi vill även tacka Gudmund Hjelmqvist för rådgivning under projektets gång. Från Uppsala universitet vill vi tacka vår ämnesgranskare Karin Thomas och handledare Johannes Hjalmarsson för att ni alltid har varit tillgängliga för handledning och stöd. Ett avslutat examensarbete innebär även slutet på många års studier i Uppsala. Vi vill därför ta tillfället i akt och tacka vänner och familj, det hade aldrig varit möjligt utan er.

Tack!

Amelie Ekström och Jessica Wänlund

Mars 2021

Ansvarsfördelning

Vi har utfört större delen av examensarbetet tillsammans men det är vissa delar som vi har varit mer eller mindre ansvariga för. Amelie har varit mer ansvarig för skapande och utveckling av modellen i Matlab och Jessica har varit mer ansvarig för hämtning och bearbetning av elnätsdata. Vi har båda varit närvarande på samtliga möten som har hållits med Vattenfall Eldistribution och övriga aktörer. Vid skrivande av rapportens bakgrundsavsnitt har Amelie ansvarat för information gällande transportsektorn och elvägar, medan Jessica har varit ansvarig för information om elnätet. Jessica har även lagt mer tid på metoden medan Amelie har lagt mer tid på sammanställande av resultatet. Trots att vi har haft olika ansvarsområden så har vi båda full insikt i examensarbetet och tar ansvar för allt som står i rapporten. Eftersom vi läser olika civilingenjörsprogram, så finns två identiska rapporter publicerade (Wänlund, 2021).

Innehållsförteckning

1.	Inledning	1
1.1	Syfte och frågeställning	2
1.2	Avgränsningar	2
2.	Bakgrund.....	3
2.1	Trafik och fordon	3
2.1.1	Den svenska transportsektorn	3
2.1.2	Transportsektorns utveckling	4
2.1.3	Olika typer av elfordon	4
2.2	Elvägar	5
2.2.1	Sveriges nationella elvägsplan.....	5
2.2.2	Aktuella elvägstekniker	6
2.2.3	Matning från elnätet	7
2.2.4	Aktuella elvägsprojekt	8
2.3	Elnätets uppbyggnad och marknad	9
2.3.1	Aktörer	9
2.3.2	Elanvändning i Sverige	10
2.3.3	Tillståndsprocessen för elverksamhet.....	10
2.3.4	Transmission och distribution.....	11
2.3.5	Kapacitet- och effektbrist i elnätet	12
3.	Metod.....	13
3.1	Sträckan Gävle till Stockholm	13
3.2	Elvägsmodellen.....	15
3.2.1	Formler för framdrivning	16
3.2.2	Koefficienter	17
3.2.3	Trafikflödet.....	17
3.2.4	Fordonsslag.....	18
3.2.5	Vinkel på väg.....	19
3.2.6	Hastighet	20
3.2.7	Laddningsmöjligheter under färd	20
3.3	Metod för analys av elnät.....	21
3.3.1	Val av transformatorstationer	21
3.3.2	Scenarion	22
3.3.3	Anslutning till elnätet	24
3.3.4	Val av kabel	24

3.3.5	Belastning på transformatorstationerna	26
3.3.6	Spänningsfall	26
3.3.7	Nätstyrkeförhållande	27
3.4	Effektprognos för transformatorstationer	27
3.5	Kostnadsberäkning	28
4.	Resultat	30
4.1	Elvägens effektbehov	30
4.2	Scenarion	31
4.2.1	Scenario 1	32
4.2.2	Scenario 2	35
4.2.3	Scenario 3	38
4.3	Kostnads kalkyl	41
5.	Diskussion	42
5.1	Resultat	42
5.2	Val och hantering av data	44
5.3	Utvärdering av metod	45
5.4	Implementering av en framtida elväg	46
5.5	Vidare studier	47
6.	Slutsatser	49
	Referenser	50
	Appendix A Uppdelning av sträckan för dygnsflöde	55

1. Inledning

Enligt Parisavtalet som i december 2015 förenade alla länder i ett nytt klimatavtal ska den globala uppvärmningen hållas långt under två grader jämfört med en förindustriell temperaturnivå (Proposition 2016/17:16). Det kan uppnås genom att öka andelen förnybar energi i energisystem, utveckla en hållbar mathantering och upprätthålla ett ansvarsfullt skogsbruk. Förbränningen av fossila bränslen står för större delen av de globala koldioxidutsläppen och sker framförallt inom transport, industri- och uppvärmningssektorn. De bränslen som används inom transportsektorn är övervägande fossila och i Sverige utgör transportsektorn en tredjedel av de nationella växthusgasutsläppen där den största andelen är från personbilar och tunga lastbilar (Naturvårdsverket, 2019). Att minska fossila bränslen inom transportsektorn anses vara en viktig åtgärd för att minska Sveriges totala koldioxidutsläpp, där en delvis elektrifierad transportsektor förväntas vara lösningen.

Elvägar är en form av elektrifiering som kan komma att vara en viktig del av en fossilfri transportsektor. Ett elvägssystem bygger på dynamisk laddning vilket innebär att elektrisk energi överförs till fordon under färd genom konduktiv eller induktiv teknik. Sverige har för avsikt att på sikt avveckla fossila bränslen, vilket skapar goda förutsättningar för införandet av alternativa drivmedel. Under hösten år 2020 tillsatte den svenska regeringen en elektrifieringskommission med avsikt att påskynda arbetet med att elektrifiera transportsektorn. Kommissionen ska även ta fram en nationell plan för utvecklingen mot en elektrifierad transportsektor i Sverige (Regeringen, 2020a). Ett regeringsuppdrag har även getts till Trafikverket med syfte att upprätthålla en långsiktig plan för implementeringen av elvägar. Uppdraget innebär att undersöka hur ett svenskt elvägssystem ska uppföras utifrån teknik, miljöeffekter, kraftförsörjning, drift, underhåll och regelverk. Undersökningen ska baseras på antagandet om att 2 000 kilometer av de mest trafikerade trafikstråken är elektrifierade med elväg till år 2030 respektive 3 000 kilometer till år 2035. Olika elvägstekniker testas på flertalet ställen i Sverige med ett gemensamt mål att tillföra kunskap och erfarenheter till den nationella elvägsutvecklingen (Regeringen, 2020b).

För att implementera ett storskaligt elvägssystem kommer det krävas kapacitet i elnätet och tillgänglighet av elkraft längs med elvägarna. Elnätsföretagen kommer därför att spela en viktig roll i att förse framtida elvägar med tillräcklig effekt. Vattenfall Eldistribution AB, som är ett av Sveriges största elnätsföretag, är ansvarig elnätsdistributör inom flera av de områden där elvägar förväntas implementeras enligt den nationella elvägssplanen. De har därför identifierat ett behov av att undersöka vad en framtida implementering av en elväg skulle innebära för elnätet. Examensarbete har således för avsikt att bidra med kunskap kring hur den elektriska infrastrukturen runt elvägar skulle kunna utformas inom Vattenfall Eldistributions elnätsområde. Genom att kartlägga och utvärdera effektbehovet för en framtida elväg och möjliga anslutningsmöjligheter kommer examensarbetet kunna vara ett verktyg i en framtida implementering av elvägar.

1.1 Syfte och frågeställning

Syftet med projektet är att studera effektbehovet för en elvässträcka mellan Gävle och Stockholm samt att utreda anslutningsmöjligheter i närliggande elnätsområde. Genom att kartlägga och utvärdera potentiella anslutningsmöjligheter avser projektet att vara ett verktyg i en framtida implementering av elvägar med avseende på matande elnät. Kostnaderna för att ansluta ett matande elnät till en elväg kommer även att utredas. Syftet har konkretiserats genom följande frågeställningar:

- Hur stort kan effektbehovet bli för en framtida elväg mellan Gävle och Stockholm?
- Vilka möjligheter för nätanslutning finns tillgängliga i närheten av elvägen?
- Vilka investeringskostnader innebär en nätanslutning till en framtida elväg?

1.2 Avgränsningar

Fokus för examensarbetet är att studera en utvald sträcka som i framtiden förväntas vara en aktuell del av ett utbyggt nationellt elvägssystem. Den valda sträckan är E4 mellan Gävle och Stockholm, en sträcka som Trafikverket har pekat ut som aktuell för det nationella elvägssystemet till år 2030. Det finns ett flertal olika elvägstekniker som grundar sig på induktiv eller konduktiv kraftöverföring och det har ännu inte tagits något beslut kring vilken teknik som kommer att implementeras. På grund av detta modelleras effektbehovet för sträckan utifrån ett teknikneutralt perspektiv.

Trafikverket konstaterade i februari år 2021 att elvägar kommer att lämpa sig bäst för godstransporter och framförallt fjärrtrafiken som dagligen kör långa sträckor (Nathanaelsson et al. 2021). Därför kommer modellering av effektbehov från den aktuella elvägen baseras på trafikflödet för tunga lastbilar av olika viktklasser. Utifrån den aktuella sträckan undersöks elnätsanslutning utifrån ett tekniskt perspektiv med ekonomiska inslag. År 2019 undersöktes eftersom år 2020 inte bedömdes representativ med hänvisning till covid-19-pandemin. År 2019 var även det senaste året med fullständig elnätsdata i förhållande till examensarbetets start. Framtagna modeller och slutsatser i arbetet bygger på svenska förutsättningar.

2. Bakgrund

I det här kapitlet tas relevant bakgrundsinformation upp i syfte att kunna följa och förstå studiens innehåll. Kapitlet inleds med avsnitt 2.1 som handlar om trafik och fordon och går sedan över till avsnitt 2.2 som presenterar och förklarar innebörden av elvägar. Kapitlet avslutas i avsnitt 2.3 som handlar om elnätets uppbyggnad och marknad.

2.1 Trafik och fordon

2.1.1 Den svenska transportsektorn

Transportsektorn står för runt 30 procent av Sveriges totala koldioxidutsläpp som år 2019 uppgick till cirka 16,5 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Vägtrafiken står för störst andel av de koldioxidutsläpp som sker från transportsektorn där personbilar utgör cirka 60 procent och tunga lastbilar cirka 20 procent. De senaste trettio åren har utsläppen från inrikes transporter haft en högsta nivå år 2007, för att sedan fram till år 2018 minska med cirka 22 procent. Mer energieffektiva fordon och ökad användning av biobränslen har bidragit till minskningen av utsläppen (Naturvårdsverket, 2019). Transportsektorns klimatmål är att till 2030 minska utsläppen med 70 procent jämfört med utsläppsnivån år 2010. En utvärdering av dagens styrmedel och åtgärder kring minskning av utsläppen visar på att fram till år 2030 kommer utsläppen ha minskat med 40 procent i jämförelse med år 2010. Det innebär att målet för en reducering av utsläppen på 70 procent för inrikes transporter inte skulle nås. För att nå målen krävs nya och tydliga styrmedel som driver på utvecklingen mot en transportsektor med lägre utsläpp av växthusgaser (Trafikverket, 2020a).

Antalet fordon har under de senaste åren ökat. I Sverige uppgick antalet personbilar år 2019 till 4,9 miljoner, lätta lastbilar till 585 000, tunga lastbilar till 84 000 och bussar till 15 000. Av drivmedel bland personbilar är bensin vanligast, vilket utgör 55 procent, och därefter diesel som utgör 36 procent (Trafikanalys, 2020a). I Sverige finns det cirka 146 000 elbilar och laddhybrider, vilket motsvarar 3 procent av den svenska personbilsflottan (Elbilsstatistik, 2020a). Antalet publika laddstationer uppgick under år 2020 till strax över 2 200 (Elbilsstatistik, 2020b). Det fordonsslag som har kommit längst i utvecklingen mot fossilfria drivmedel är bussar där 18 procent drivs på gas och 3 procent består av laddhybrider och elbussar (Trafikanalys, 2020a). Antalet lätta lastbilar på de svenska vägarna har de senaste tio åren ökat med 31 procent där det dominerande drivmedlet är diesel som utgör 90 procent och därefter bensin. Fossilfria alternativ som el, etanol och gas är fortfarande relativt sällsynt för fordonsslaget (Trafikanalys, 2020a). För tunga lastbilar är diesel det vanligaste drivmedlet där 97 procent av fordonsslaget är dieselfordon (Trafikanalys, 2020b).

2.1.2 Transportsektorns utveckling

Befolkningstillväxt, ekonomi, teknikutveckling och politiska styrmedel är viktiga faktorer för transportsektorns utveckling. En växande befolkning som kräver fortsatt hög tillgänglighet och goda transportmöjligheter har stor påverkan på antalet fordon i framtiden. I samma takt kommer kraven på minskade utsläpp och en utveckling mot fossilfrihet ha stor påverkan på hur den framtida transportsektorn kommer att se ut. Befolkningstillväxt är starkt korrelerat med antalet personbilar, medan ekonomisk utveckling är starkt kopplat till antalet lätta lastbilar på de svenska vägarna. Däremot finns det på kort sikt ingen korrelation mellan ekonomi- och befolkningsutveckling samt utvecklingen av antalet bussar och tunga lastbilar. Det kan till viss del förklaras i att fordonen har blivit större och kan utföra ett större trafikarbete med samma antal fordon (Trafikanalys, 2020c).

Under de senaste 10 åren har antalet lätta lastbilar ökat markant på de svenska vägarna, vilket kan förklaras av den kraftiga tillväxten av e-handel. Andelen lätta lastbilar i den svenska transportsektorn förväntas öka till 650 000 år 2030, vilket är en ökning på cirka 65 000 lastbilar från år 2019 (Trafikanalys, 2020c). En prognos fram till år 2030 visar att andelen elektrifierade lastbilar kommer att öka och utgöra cirka 4 procent av de lätta lastbilarna. Även elhybridlastbilar med diesel som drivmedel kommer att öka till cirka 10 procent. Vidare pekar prognosen på att lastbilar med diesel som drivmedel kommer att minska till cirka 83 procent vilket kan jämföras med dagens 90 procent (Mohseni et al. 2017).

Tunga lastbilar i trafik förväntas öka till 95 000 år 2030, jämfört med år 2019 då det fanns 84 000 tunga lastbilar på vägarna. Eftersom tunga lastbilar innebär en viktklass mellan 3,5 ton upp till 74 ton, är det svårt att göra en generell bedömning av framtiden då de olika viktklasserna har skilda användningsområden (Trafikanalys, 2020c). Prognosen för olika drivmedel för tunga lastbilar visar på att 88 procent kommer vara lastbilar med diesel som drivmedel och att endast en liten andel av tunga fordon kommer att ha en elektrisk drivlina år 2030. Utvecklingen av elvägar för tunga lastbilar är en möjlig lösning för att kunna elektrifiera en större del av sektorn, dock bedöms infrastrukturen för elvägar som relativt begränsad år 2030 (Mohseni et al. 2017). Enligt prognosen för år 2030 förväntas 50 procent av alla nyregistrerade bussar vara elbussar och 15 procent gasbussar (Trafikanalys, 2020b). Utvecklingen av andra drivmedel kommer sannolikt att påverka prognosen för elektrifierade fordon där en osäkerhetsfaktor är inblandningen av biodrivmedel i dieselfordon (Nathanaelsson et al. 2021).

2.1.3 Olika typer av elfordon

Det finns huvudsakligen fyra typer av elfordon vilka är batteridrivna elfordon, hybridfordon, laddhybridfordon och bränslecellsfordon. Det batteridrivna elfordonet omvandlar den kemiska energin i batteriet till mekanisk energi genom en elektrisk drivlina. Drivlinan hos ett batteridrivet fordon består av ett elektriskt drivsystem och ett

batteri som agerar buffert (Grunditz, 2016). Det elektriska drivsystemet i ett batteridrivet fordon omfattar en omriktare, elektrisk motor och ett kontrollsystem. Omriktaren i det elektriska drivsystemet omvandlar batteriets likström till elmotorns växelström. Verkningsgraden för de energiomvandlingar som sker i det elektriska drivsystemet hos ett batteridrivet fordon kan vara högt, men den totala räckvidden minskar oftast på grund av låg energitäthet i batteriet (Hayes och Goodarz, 2018).

Ett hybridfordon består av ett batteri kombinerat med en förbränningsmotor, vilket förbättrar vissa egenskaper i jämförelse med dagens fossildrivna fordon. Fördelen med ett hybridfordon är att den kan utnyttja regenerativ energi från bromsning som hos ett konventionellt fordon annars hade blivit energiförluster i form av värme. Dessutom kan storleken på förbränningsmotorn minska medan energieffektiviteten hos motorn ökar. En annan typ av hybridfordon är laddhybridfordonet som kan laddas genom anslutning till en extern strömkälla. Det sistnämnda elfordonet, bränslecellsfordon, använder bränsleceller som energikälla och vätgas som drivmedel. Bränslecellen förbrukar vätgas irreversibelt och därför används ett batteri. Batteriet tillgodogör sig även av den regenerativa energin och det transienta effektbehovet som uppstår vid till exempel kraftig acceleration (Hayes och Goodarz, 2018).

2.2 Elvägar

2.2.1 Sveriges nationella elvägsplan

Regeringen har gett Trafikverket i uppdrag att planera för införande av elvägar längs med det svenska vägnätet. Den grundläggande idén är att minska den tunga trafikens beroende av fossila bränslen och att säkerställa en god och fossilfri transportförsörjning i det framtida näringslivet (Pettersson et al. 2017). Trafikverket ska utarbeta en samhällsekonomiskt lönsam plan för elektrifiering av baserat på antagandet om att 2 000 kilometer av de mest trafikerade trafikstråken är elektrifierade med elväg till år 2030. För år 2035 är antagandet att 3 000 kilometer av de mest trafikerade trafikstråken ska vara elektrifierade med elväg (Regeringen, 2020b).

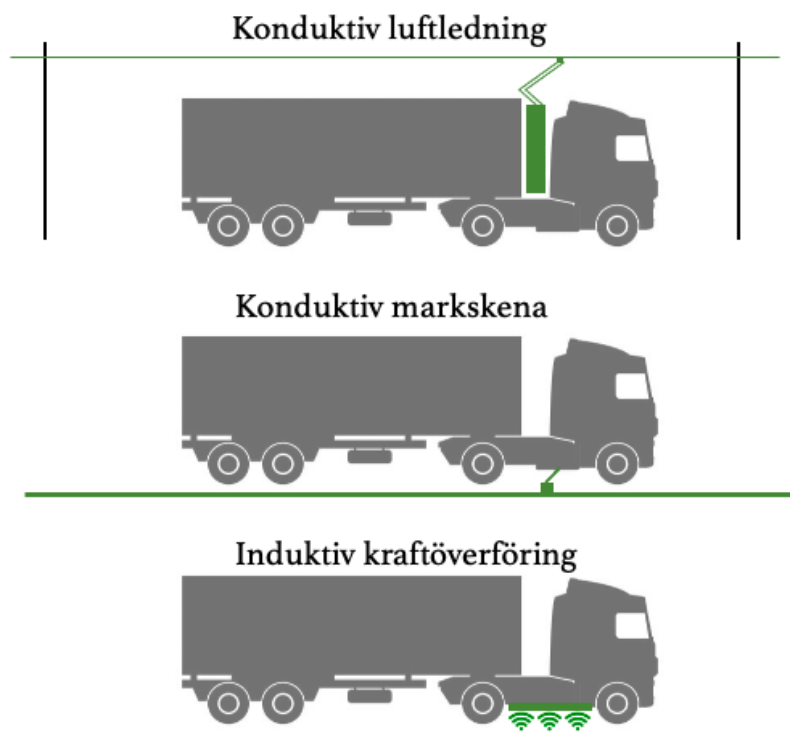
Fjärrtrafiken som har stora energibehov och som avverkar långa sträckor utan att stanna är de fordon som förväntas ha störst nytta av ett elvägssystem. Även bussar är en fordonstyp som kan komma att använda och öka nyttan av elvägar men de är inte inkluderade i Trafikverkets senaste analys. Personbilar är en fordonstyp som i dagsläget inte förväntas använda elvägar inom den närmsta framtiden. Andelen av de tunga lastbilarna som i Sveriges förväntas använda elvägen uppskattas till 25 procent år 2040 och de trafikstråk som Trafikverket har identifierat som aktuella i ett första stadie är Stockholm till Malmö som förbinds med bland annat E4an, E4an mellan Stockholm och Gävle samt Göteborg till Uddevalla som förbinds med E6an (Nathanaelsson et al. 2021). Trafikverket ska även undersöka vilka elnät som elvägar ska anslutas till med hänsyn till rådande kapacitetsbrister som finns i vissa delar av landet. Trafikverket ska vid dessa analyser anta att de elnät som ska förse elvägar med ström inte är

koncessionspliktiga (Regeringen, 2020b), vilket är det tillstånd som krävs för upprätthållande av starkströmsledningar (Energimarknadsinspektionen, 2019).

Som en del av den nationella färdplanen för elvägar ska det byggas en pilotsträcka i Sverige. Trafikverket gick i december år 2018 ut med en förfrågan om att få in förslag på lämpliga sträckor. Två sträckor, en del av E20 i Örebro län och Väg 73 i Stockholms län, gick vidare. Inom det kommande året ska beslut tas kring vilken sträcka det blir och vilken teknik som ska användas. Eventuell byggnation av pilotsträckan kan förväntas ske år 2022 till 2023 (Trafikverket, 2020b).

2.2.2 Aktuella elvägstekniker

De elvägstekniker som är aktuella för byggnation i Sverige är konduktiv och induktiv kraftöverföring, se figur 1. Gemensamt för de tre teknikerna är att det krävs anpassning och påbyggnad av fordonet för att kraft ska kunna överföras från elvägen.



Figur 1. En bild över de aktuella elvägsteknikerna som bygger på konduktiv teknik eller induktiv teknik. För den konduktiva tekniken kan kraft överföras antingen via luftledningar eller ledningar förlagda i skenor i vägbanan.

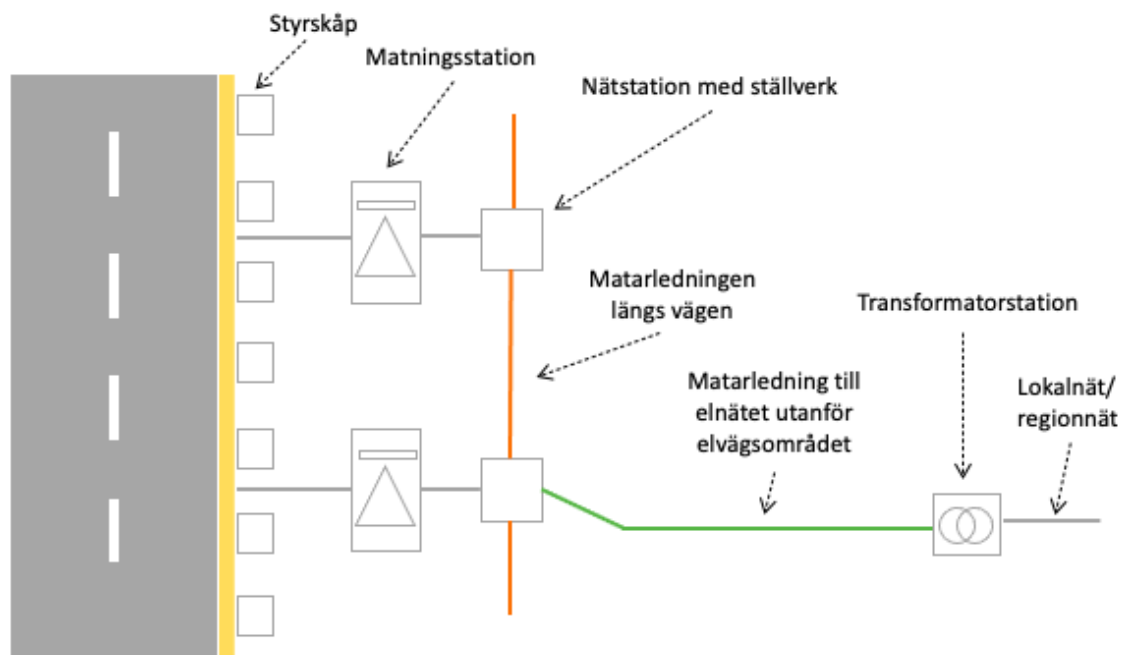
De konduktiva teknikerna innebär att ström överförs till fordonet genom luftburna ledningar eller via ledningar förlagda i skenor i vägbanan. Tekniken för kraftöverföring via luftledning fungerar på ett liknande sätt som för järnväg och spårvagn, vilket gör den till en av de mer etablerade elvägsteknikerna (Domingues-Olavarria et al. 2018). Ledningarna befinner sig cirka 5 meter ovanför vägen och består av parallella ledningar som hålls upp med hjälp av stolpar med 50 till 60 meters avstånd (Palo et al. 2020). Den

konduktiva tekniken med markförlagda skenor överför ström till fordonen genom en kontaktarm som är monterad under fordonet. Tekniken tillåter alla typer av fordon som är anpassade för att ta emot dynamisk laddning från elvägen. Således krävs ingen specifik höjd på fordonen för att nå upp till en viss höjd som är fallet för konduktiv luftledning (Domingues-Olavarria et al. 2018). Investeringskostnaderna för en elväg med konduktiva luftledningar i varje körriktning uppskattas till 12,4 miljoner kronor per kilometer år 2030 och den konduktiva tekniken med skena i vägen uppskattas till 10,5 miljoner kronor per kilometer (Nathanaelsson et al. 2021). I dessa kostnader ingår kostnader för vägplan och projektering samt byggnation där matning av el inom vägområdet, så kallad vägel, är inkluderad. Kostnaderna inkluderar inte anslutning till överliggande nät eller kostnaden för ett system som hanterar mätning och debitering för elvägen.

Induktiv laddning innebär trådlös kraftöverföring från elvägen till fordonen genom elektromagnetism. Under vägen byggs primärspolar in som överför kraft till mottagande sekundära poler i fordonen som passerar, vilket inducerar en spänning. Beroende på hur fordonet är uppbyggt kan kraften användas direkt som framdrivningseffekt eller lagras i fordonets batteri. Kraften som överförs från vägen levereras automatiskt till fordonet när det befinner sig ovanför laddsegmentet (Bateman et al. 2018). Den induktiva teknikens verkningsgrad för överföring av kraft beror bland annat på spolarnas egenskaper, kopplingsfaktor och lasten (Stamati och Bauer, 2013). Investeringskostnaderna för den induktiva tekniken år 2030 uppskattas vara 20,8 miljoner kronor per kilometer (Nathanaelsson et al. 2021).

2.2.3 Matning från elnätet

För att en elväg kontinuerligt ska kunna förse fordon med tillräckligt stor kapacitet krävs flertalet komponenter i elvägssystemet, se figur 2. Gemensamt för alla elvägstekniker är att matningen kommer att ske från det närliggande lokala eller regionala elnätet (Nathanaelsson et al. 2021). För att kunna transformera ner spänningen till en lämplig nivå krävs anslutning till transformatorstationer som matar elvägssystemet. Mellan elvägen och elnätet bör det finnas matarledningar som skapar en kontinuerlig överföring av el från det lokala eller regionala elnätet utanför vägområdet. Systemet kräver även nätstationer som innehåller ställverk som kopplar samman matarledningen med elvägen. Nätstationerna kopplas samman med en matande ledning som förväntas vara inom vägområdet vilken förser elvägen med så kallad vägel, se orange ledning i figur 2. Mellan nätstationerna och elvägen står matningsstationer med ett mellanrum på 1 till 3 kilometer längs elvägen, vilka kan innehålla bland annat transformatorer och strömriktare. Nätstationen och matningsstationen kan vara i samma eller i separata byggnader. För att kunna aktivera matning för fordon som befinner sig på vägen kräver vissa elvägssystem styrschåp. Avslutningsvis kommer en utmatningskabel krävas för att koppla samman matningsstationen med den elektrifierade elvägen (Bülund, 2020).



Figur 2. Bild över elvägssystemet. Illustration inspirerad av Bülund (2020).

Vid installation av elvägar till elnätet är det troligt att det är elnätsföretagen som kommer dra elnätet till nätstationerna (Gustavsson et al. 2015). I Trafikverkets senaste rapport kring uppbyggnad av elvägar förväntas spänningsnivån vara 600 till 750 V_{DC} för de konduktiva teknikerna och upp till 1 000 V_{AC} för den induktiva tekniken (Nathanaelsson et al. 2021).

2.2.4 Aktuella elvägsprojekt

Det finns flera projekt där olika elvägstekniker testas eller har testats nationellt och internationellt, se tabell 1. I Sandviken anlades år 2016 en elväg på två kilometer som trafikerades av två eldrivna lastbilar. Elvägen monterades ner år 2020 men projektet ansågs framgångsrikt (Sandviken Pure Power, 2020). Tekniken som användes var konduktiva luftledningar med lågspänd likström (Region Gävleborg, 2020). I Lund testkör Elonroad och LTH en elväg med konduktiva luftledningar som en eldriven buss trafikerar en vecka i månaden (Lund universitet, 2020). På Gotland testas en induktiv laddningsteknik av Electreon AB mellan Visby flygplats och Visby stad. Av sträckans totala längd på 4 kilometer består 1,6 kilometer av elväg och sträckan kommer att trafikeras av en eldriven lastbil och en eldriven buss (RISE, 2019). På uppdrag av Trafikverket testas tekniken med konduktiv markskena utanför Arlanda där främst en eldriven lastbil ska trafikera sträckan. Även eldrivna lastbilar från Postnord förväntas trafikera sträckan (Berglund et al. 2018).

Det finns flera internationella projekt som utvärderar elvägstekniker och system. I Tyskland finns implementerade teststräckor på allmänna vägar och flera länder, exempelvis Italien och Israel, har intentioner på att testa elvägar längs med allmänna vägar inom en snar framtid (Nathanaelsson et al. 2021).

Tabell 1. Pilotprojekt för elvägar (Gustavsson et al. 2020).

Namn	Plats	Teknik	Tidsperiod
E16 Elväg	Region Gävleborg, Sverige	Konduktiv luftledning	2016 - 2020
SCAQMD	Los Angeles, USA	Konduktiv luftledning	2017 - 2017
eRoadArlanda	Arlanda, Sverige	Konduktiv markledning	2018 - 2021
ELISA	A5, Tyskland	Konduktiv luftledning	2019 - 2022
FESH	A1, Tyskland	Konduktiv luftledning	2020 - 2022
Evolution Road	Lund, Sverige	Konduktiv markledning	2020 - 2022*
Smartroad Gotland	Visby, Sverige	Induktiv	2020 - 2022*
eWayBW	B462 Tyskland	Konduktiv luftledning	2021 - 2022*

*Preliminära slutdatum för projekten.

2.3 Elnätets uppbyggnad och marknad

2.3.1 Aktörer

Det svenska elnätet består av stam, region- och lokalnät där elen överförs genom ett trefasigt system. Stamnätet ägs, underhålls och utvecklas av Svenska kraftnät som är balans- och systemansvariga. Region- och lokalnät ägs av olika elnätsföretag som i Sverige är cirka 170 stycken, där Vattenfall Eldistribution, Ellevio AB och E.ON Elnät Sverige är de företag med flest nätkunder. Kommunala företag sköter vanligtvis eldistributionen i tätorter (Svenska kraftnät, 2014) medan stora elnätsföretag har en stark hållning på regionnäten (Nordling, 2016).

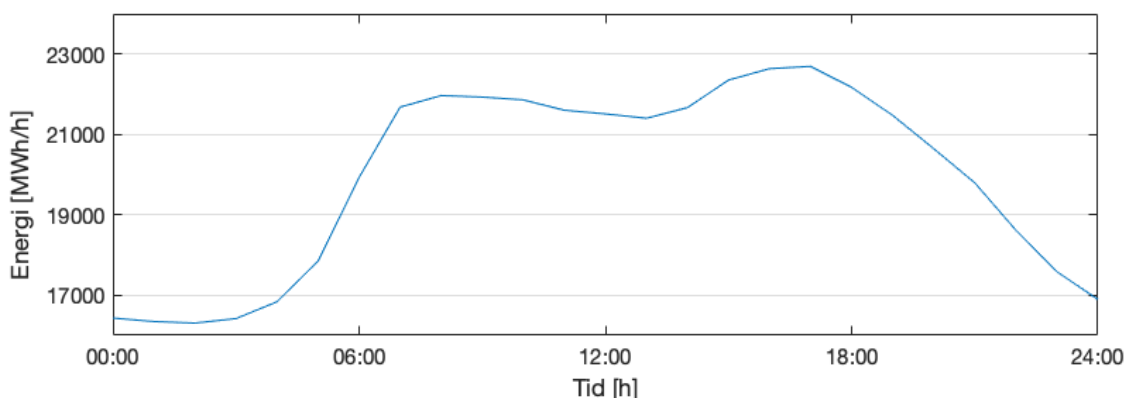
Utöver Svenska kraftnät och de svenska elnätsföretagen är elhandlare och elproducenter viktiga aktörer. Elhandlare köper el på den nordiska elbörsen Nord Pool Spot, alternativt direkt från elproducenten. Därefter säljer de vidare elen till slutanvändaren. Elpriset grundar sig på tillgång och efterfrågan, där marknaden består av hundratals aktörer. Det är många faktorer som påverkar elpriset och några av dem är mängden nederbörd, vind och produktion i de stora kärnkraft- och kraftvärmeverken (Vattenfall, 2020a).

Energimarknadsinspektionen är den reglerande myndighet som kontrollerar att aktörer på energimarknaden lever upp till sina skyldigheter enligt den svenska lagstiftningen som beskrivs genom ellagen, naturgaslagen och fjärrvärmelagen.

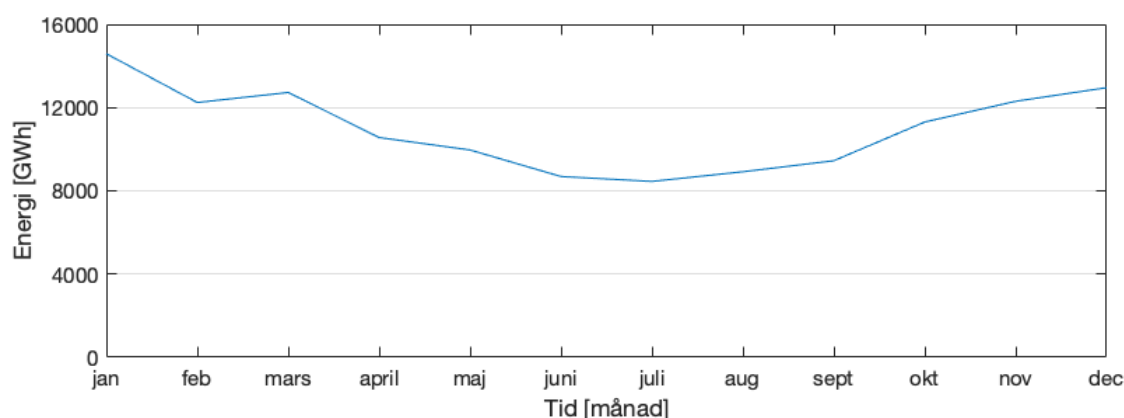
Energimarknadsinspektionen handlägger även ansökningar om tillstånd för elverksamhet och utfärdar nätkoncessioner (Energimarknadsinspektionen, 2021).

2.3.2 Elanvändning i Sverige

Under år 2019 var Sveriges totala elanvändning 138 TWh, där bostäder och industrier utgjorde cirka 90 procent av elanvändningen (Holmström, 2020). I Sverige resulterar det kalla vinterklimatet i att elförbrukningen ökar under vintermånaderna. Under vintern mellan år 2019 och 2020 inträffade topplasttimmen i Sverige den 10 december mellan klockan 17 till 18, se figur 3. Elförbrukningen i Sverige under år 2019 var mest belastad under januari, februari, mars och december, se figur 4.



Figur 3. Den totala elförbrukningen i Sverige den 10 december 2019 (Svenska kraftnät, 2020b).



Figur 4. Den totala elförbrukningen i Sverige år 2019 (Svenska kraftnät, 2020b).

2.3.3 Tillståndprocessen för elverksamhet

För att bygga en starkströmsledning som har en spänning, strömstyrka eller frekvens som kan vara farlig för personer eller egendom, krävs tillstånd enligt ellagen. Tillståndet kallas nätkoncession och söks hos Energimarknadsinspektionen (Energimarknadsinspektionen, 2019). Nätkoncession delas upp i två typer där den första är tillstånd för en bestämd sträckning vilket benämns som *nätkoncession för linje* och ofta tillämpas för stam- och regionnät. Den andra typen är ledningsnät i ett område vilket benämns som *nätkoncession för område*, vilket oftast tillämpas för lokalnät (SFS 1997:857). Det finns även elverksamheter där tillstånd för nätkoncession inte är ett

krav, som exempelvis ett område för järnvägs-, spårvägs-, tunnelbane- eller trådbussdrift och som används för att tillgodose trafikens behov (SFS 2007:215).

Tillståndsprövningen för nätkoncession är till för att säkerställa att företag är lämpliga att bedriva elnätsverksamhet och för att förhindra att människor och djur tar skada av elledningar som byggs (Energimarknadsinspektionen, 2019). Utöver tillstånd för nätkoncession behövs vanligtvis tillstånd från andra myndigheter som kan innehålla dispenser för naturreservat, artskydd och biotopskyddade områden. En nätkoncession ger inte heller tillstånd att använda marken som ledningen ska etableras på, utan nätföretagen behöver då ansöka om exempelvis avtalsservitut eller ledningsrätt som ger dem rätt att dra ledningar över annans mark (Energimarknadsinspektionen, 2019).

I det regeringsuppdrag, om planerandet av elvägar, som Trafikverket har fått har det förtydligats att "Trafikverket ska utgå från att elledning som hör till elvägar är undantagna från koncessionsplikt". Det finns ett behov av att klargöra och ta beslut kring hur ansvarsfördelningen mellan väghållare och nätägare ska se ut (Nathanaelsson et al. 2021).

2.3.4 Transmission och distribution

Stamnätet omfattar överföring av el med spänning på 220 till 400 kV och tillhörande ställverk, transformatorer och övriga komponenter. Det finns ett flertal utlandsförbindelser som knyter ihop det svenska elnätet med bland annat Finland, Litauen och Danmark. Regionnätet innefattar spänningar mellan 40 till 130 kV och transporterar ström från stamnät till lokalnät. Lokalnätet använder spänningar på 10 till 40 kV och försörjer hushåll, mindre industrier, skolor, vårdcentraler och övriga elanvändare. Innan spänningen levereras till större delen av dessa elanvändare transformeras den ner till 230/400 V. Stora elanvändare, som elintensiva industrier, kan kopplas direkt till regionnätet.

För stam- och regionnät används i regel luftledning medan nedgrävda markkablar används för stora delar av lokalnätet av praktiska skäl. Fördelen med markkabel är att de är mindre sårbara för yttre påverkan, som väderförhållanden och att de går att implementera i områden med begränsat markutrymme (Svenska kraftnät, 2014). Landsbygdens elnät kännetecknas av en hög andel oisolerade luftledningar, som ofta saknar redundans vilket innebär en ersättande komponent vid bortfall av en annan. Det leder till att elnätet på landsbygden är mer beroende av väderförhållanden och att det är en större risk för längre elavbrott än i tätorter. Tätorter har en stor andel markkabel och det finns en högre grad redundans jämfört med elnätet på landsbygden (Wallnerström et al. 2018).

Transformatorstationer i elnätet har den främsta uppgiften att omvandla spänningsnivån på den inkommande elen från en spänningsnivå till en annan. I Sveriges stamnät återfinns landets största transformatorstationer, vilka är belägna längs med 400 kV-ledningarna. Syftet med dessa stationer är att fördela ut elen till regionnätet med en

spänningsnivå på högst 140 kV. Regionnätens transformatorstationer omvandlar vanligtvis spänningen ner till 20 eller 10 kV och återfinns vid utkanten av städer runt om i landet. Dessa stationer innefattar två ställverk för inkommande samt utgående ledningar samt minst en transformator. Det är vanligt att en transformatorstation innehåller flera transformatorer för att öka redundansen i elnätet (ABB, 2021). Livslängden på en transformator beror bland annat på omgivande temperatur och hur den belastas. Om en transformator belastas volatilt och med höga laster så minskar den tekniska livslängden medan en låg och konstant belastning ökar den tekniska livslängden (Wik, 2012).

2.3.5 Kapacitet- och effektbrist i elnätet

En prognos från Svenska kraftnät (2019) visar att den totala elförbrukningen år 2040 kan komma att öka i Sverige till 165 TWh, jämfört med dagens 140 TWh. Den förväntade ökningen på cirka 15 TWh beror delvis på en ökning av elfordon och elintensiva industrier. Enligt Svenska kraftnät kommer det ökade elbehovet till följd av elektrifiering vara något som kräver tillväxt. De menar vidare att elektrifiering med mål om att minska klimatbelastningen inte får begränsas av kapacitetsbrist i nätet (Svenska kraftnät, 2019).

Kapacitetsbrist innebär att det inte finns tillräcklig med överföringskapacitet i transmission- och distributionsnäten, något som främst är ett problem i de regionala och lokala elnäten (Energimarknadsinspektionen, 2018). I samband med att mer förnybar energi byggs och kärnkraften avvecklas ställs ökade krav på överföringskapaciteten i transmissionsnätet (Kjellström, 2020). I storstäderna har en ökad elanvändning resulterat i att regionnätsägare saknat kapacitet i elnätet och tvingats efterfråga el från andra områden vilket ytterligare belastar stamnätet (Svenska kraftnät, 2019).

Svenska kraftnät har historiskt sett alltid lyckats upprätthålla den momentana effektbalansen genom resurser i form av elproduktion, import och förbrukningsreduktion (Svenska kraftnät, 2020a). Effektbrist i elnätet uppkommer vid extrema väderförhållanden, då elförbrukningen är så pass hög att elen som produceras i Sverige inte är tillräcklig för att täcka behovet (Energimarknadsinspektionen, 2018). Det vanligaste är att Sveriges momentana effektbehov kan täckas med import på dagen före marknaden. Vid ett eventuellt underskott av el vid extrema förhållanden, som en mycket kall vinterdag, har Svenska kraftnät avtal för effektreserver som på kort tid kan starta upp produktion av el. Om det inte är tillräckligt med elproduktion för att skapa effektbalans så kan Svenska kraftnät använda sig av förbrukningsreduktion. Det innebär att man kopplar bort stora laster, vilket minskar förbrukningen och man återfår effektbalans i nätet. Att koppla bort elförbrukning är något som Svenska kraftnät aldrig har behövt utnyttja (Svenska kraftnät, 2020a).

Det svenska elnätet upprätthåller en god leveranssäkerhet där strömavbrotten uppskattats vara 1 till 1,5 stycken per uttagpunkt och år. Det motsvarar strömavbrott på 1 till 2 timmar per kund under ett år utan avvikande väderhändelser. Av dessa

strömavbrott sker 90 procent i lokalnäten och 10 procent i regionnäten (Axberg et al. 2020). En del i upprätthållandet av leveranssäkerheten i elnätet är n-1 kriteriet vilket är ett kriterium som formulerats av Svenska kraftnät enligt krav från ellagen (Rupprecht Hjort och Åberg, 2016). Kriteriet innebär att vid förlust av en komponent i form av produktion- eller ledningsbortfall i elnätet, till följd av en oförutsedd händelse, ska normal drift kunna upprätthållas genom att komponenten ersätts av en annan (Axberg et al. 2020).

3. Metod

I det här avsnittet redovisas en mer ingående förklaring till genomförandet av studien. Inledningsvis så redogörs det för valet av sträckan i avsnitt 3.1 och vidare förklaras modellen för elvägens effektbehov översiktligt i avsnitt 3.2. I detta avsnitt presenteras även använda formler, koefficienter och data som används i modelleringen. I avsnitt 3.3 presenteras modellen för elnätet där det redogörs för valet av transformatorstationer, kabel och hur anslutningen till elnätet har utformats. I detta avsnitt förklaras även beräkningar för belastning på transformatorstationer och parametrar för elkvalitet. Avslutningsvis så redogörs det för beräkning av kostnader.

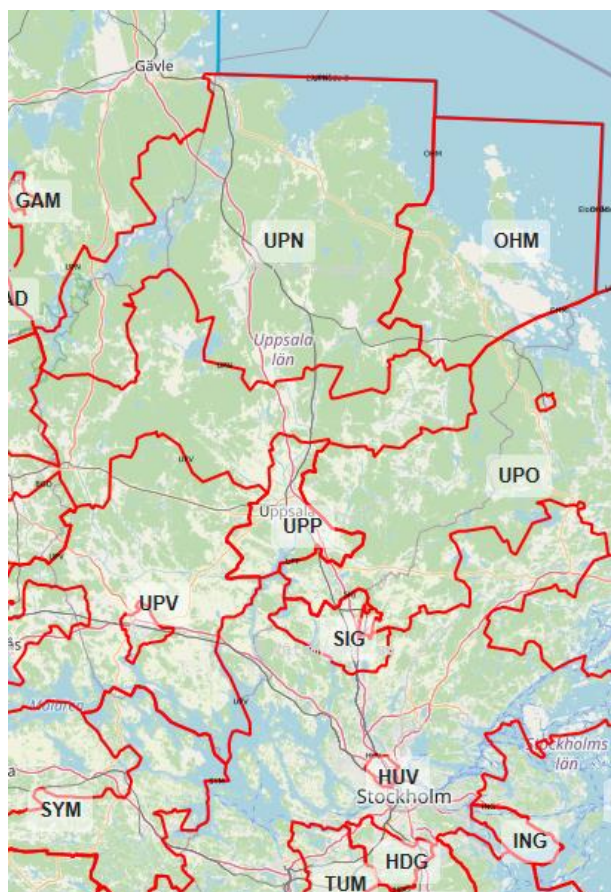
3.1 Sträckan Gävle till Stockholm

Studien har undersökt E4an mellan Gävle och Stockholm, se figur 5, en sträcka på 165,5 kilometer. Sträckan valdes då den har varierande omgivningar och trafikflöden, samt att det till stor del innefattar nätområden tillhörande Vattenfall Eldistribution. Sträckan har dessutom pekats ut som aktuell inom Trafikverkets nationella elvägsplan. Mellan Gävle och Uppsala karaktäriseras sträckan av landsbygd och enstaka tätorter och utanför Uppsala är det en tydlig ökning av trafikflöde. Mellan Uppsala och Stockholm återfinns stora logistikcenter, förorter till Stockholm och Arlanda flygplats. Närmare Stockholm ökar trafiken samtidigt som det är varierande hastighetsbegränsningar och ett större antal motorvägsavfarter.



Figur 5. Karta över den aktuella vägsträckan mellan Gävle och Stockholm (Map data ©2021 Google).

Elnätet längs med sträckan består av olika nätområden där det finns flera involverade elnätsföretag, se figur 6. Närmast Gävle är det Gävle Energi AB som är nätägare, vilket innebär att elnät inom det området ligger utanför rapportens avgränsningar. Sträckan mellan Gävle och Uppsala kännetecknas av landsbygd och skog, vilket innebär att det där finns få anslutningsmöjligheter. Mellan dessa städer återfinns det även ett nätområde som ägs av Upplands Energi Ekonomiska Förening, vars elnät inte heller inkluderats i studien. Elnätet utanför Uppsala har flera anslutningsmöjligheter och området kännetecknas av stadsmiljö med bebyggelse vilket kan vara problematiskt att dra elnät igenom. Från Uppsala halvvägs mot Stockholm är det Vattenfall Eldistribution som är nätägare och mellan Uppsala och Stockholm finns det generellt goda möjligheter till anslutningar då det är ett elnät som är väl utbyggt och har många transformatorstationer. Nätområdet närmast Stockholm ägs och förvaltas av flera olika elnätsföretag som E.ON Energidistribution, Ellevio AB och Vattenfall Eldistribution AB.



Figur 6. Karta över nätområden där Vattenfall Eldistributions nät-IDn är utmarkerade och där områden som saknar nät-IDn tillhör övriga nätägare (Nätområden, 2010).

3.2 Elvägsmodellen

Modellen har utformats i Matlab med syfte att beräkna framdrivningseffekten i varje meter längs med sträckan, där framdrivningseffekt är den effekt som krävs för att föra fordon framåt. Genom aktuella ekvationer, se avsnittet *Formler för framdrivning*, har trafikflöden, vinkel på vägen, dygnsvariationer, hastigheter samt fordonsslag används för att simulera effektbehovet över sträckan. För att kunna använda och kombinera all data har vektorer för parametrarna skapats med värden i varje meter längs med sträckan. För att kunna genomföra olika simuleringar av sträckan för olika fordonsslag, veckodagar och i vilken riktning man kör längs med sträckan, utformades modellen för att ta emot dessa parametrar.

Metoden fokuserade på tunga lastbilar med hänvisning till avgränsningen för examensarbetet. En elektrifieringsgrad på 100 procent har antagits vilket innebär att alla fordon inom det valda fordonsslaget som framförs på vägen beräknas ansluta till elvägen. Det är en elektrifieringsgrad som tidigare antagits i vetenskapliga studier om elvägar (Jelica et al. 2018). Tunga lastbilar delades in i 8 olika viktklasser, vilket baserades på vikter för registrerade tunga lastbilar. För att beräkna effektbehovet för varje fordon användes ett antal parametrar som exempelvis massa, frontarea och auxiliär effekt. Dessa och fler parametrar förklaras mer ingående under avsnittet *Koefficienter*.

Utifrån parametrar och ekvationer beräknades en vektor, *effektbehovet i varje meter*, med effektbehovet för varje enskilt fordon i varje meter. För att beräkna det totala effektbehovet för varje meter tillämpades trafikflöden med information om hur många fordon som passerade olika delar av sträckan samtidigt, vilket resulterade i vektorn *effektbehovet per meter*.

Vid simuleringen hade fordon vid vissa partier av vägen ett negativt effektbehov. Det berodde på att massan var tillräckligt stor och vinkeln på vägen tillräckligt negativ för att den resulterande framdrivande kraften av gravitationen blev större än luft- och rullmotståndskraften. Antagandet gjordes då att denna energi kunde återmatas till batteriet och användas senare för framdrivning, så kallad regenerativ energi. Vid användning av regenerativ energi skapas förluster i överföringen mellan motor och batteri, vilket justerades genom en verkningsgrad för elmotorn. Däremot tar inte modellen hänsyn till den aktiva bromsningen som fordon gör vid exempelvis köbildningar.

3.2.1 Formler för framdrivning

Den kraft som krävs per fordon vid hjulen för framdrivning beräknades i varje meter som en funktion av accelerationskraften F_{acc} [N], framdrivande kraften som gravitationen ger upphov till F_{grav} [N], luftmotståndet F_{luft} [N] och rullmotståndet F_{rull} på fordonet [N]. Om ett fordon färdas med konstant hastighet, blir accelerationskraften noll. För att erhålla framdrivningseffekten multiplicerades dessa krafter med hastigheten v [m/s], enligt ekvationen

$$P_{motor} = (F_{acc} + F_{grav} + F_{luft} + F_{rull}) \cdot v. \quad (1)$$

Den framdrivande kraften som gravitationen ger upphov till, luftmotståndet och rullmotståndet beräknades enligt ekvationerna

$$F_{grav} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (2)$$

$$F_{luft} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot v^2, \quad (3)$$

$$F_{rull} = m \cdot g \cdot C_R, \quad (4)$$

där m är massan [kg], g är tyngdaccelerationen [m/s^2], α är vinkeln på vägen mot det horisontella planet [rad], ρ är luftdensiteten [kg/m^3], A är frontarean på fordonet [m^2], C_D är luftmotståndskoefficienten och C_R är rullmotståndskoefficienten (Björnsson och Karlsson, 2016). Regenerering tas tillvara på när gravitationskraften blir så pass stor att den totala motorkraften i modellen blir negativ. Den regenerativa effekten $P_{regenerativ}$ [W] kan beskrivas enligt

$$P_{regenerativ} = -P_{motor} \cdot \eta_{regenerativ}, \text{ när } P_{motor} < 0, \quad (5)$$

där $\eta_{regenerativ}$ är verkningsgraden för regenerering av energi [%] (Taljegård et al. 2017). Den totala effekten P_{tot} [W], inklusive verkningsgrader för elmotor och kraftelektronik, beräknas enligt

$$P_{tot} = P_{motor} \cdot \frac{1}{\eta_{motor}} \cdot \frac{1}{\eta_{laddning}} + P_{auxiliär} + P_{regenerativ}, \quad (6)$$

där η_{motor} är verkningsgraden för elmotorn [%], $\eta_{laddning}$ är verkningsgraden för laddning av ett fordon's batteri [%] och $P_{auxiliär}$ är den auxiliära effekten [W].

3.2.2 Koefficienter

I tabell 2 redovisas de fasta koefficienterna i modellen, där koefficienterna för tunga lastbilar antas vara samma för samtliga viktclasser. Frontarean innebär den area som fronten av lastbilen utgör och den auxiliära effekten är den effekt som går åt för bland annat uppvärmning av kupén, lampor, radio och vindrutetorkare.

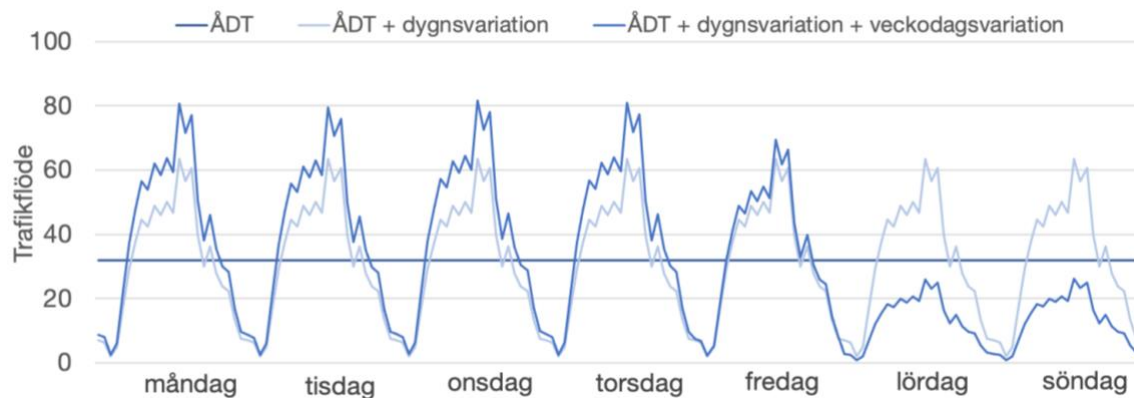
Tabell 2. Fasta koefficienter för tunga lastbilar i modellen (Taljegård et al. 2017).

Parameter	Enhet	Tung lastbil
Luftmotståndskoefficient	-	0,63
Rullmotståndskoefficient	-	0,007
Frontarea	m^2	9,7
Luftdensitet	kg/m^3	1,2754
Tyngdacceleration	m/s^2	9,82
Auxiliär effekt	W	3 000
Verkningsgrad, motor	procent	90
Verkningsgrad, laddning	procent	93
Verkningsgrad, regenerering	procent	64

3.2.3 Trafikflödet

Data för trafikflöden hämtades från Trafikverkets databas Tindra, där olika mätningar i form av stickprovsmätningar, årsmedeldygnstrafik och medelhastigheter fanns tillgängliga. Från trafikflödeskartan i Tindra kunde årsmedeldygnstrafik, ÅDT, manuellt antecknas vid varje på- och avfart längs med sträckan, vilket resulterade i 57 mätpunkter i vardera riktningen. För att erhålla dygnsvariationen över sträckan användes fem stickprovsmätningar längs med sträckan vilka antogs representera hur flödet varierade under ett dygn. Dessa stickprover fanns tillgängliga för ett antal dygn under år 2019 och

innehöll data om trafikflödet i varje timme. För att erhålla variationen av trafikflödet över en vecka användes den enda mätpunkten längs med sträckan som registrerade mätningar för ett helt år. Trafikens variation i varje dygn summerades och ett medel togs fram för varje veckodag. Figur 7 illustrerar hur trafikflödet varierar över en vecka och ett dygn för tunga lastbilar. Trafikflödets variation över veckodagarna visar att antalet fordon under helgen är cirka en fjärdedel av antalet fordon under en vardag.



Figur 7. Illustration över fördelningen av trafikflödet för tunga lastbilar i en mätpunkt baserat på årsmedeldygnstrafik, ÅDT, helårs- och stickprovsmätningar.

3.2.4 Fordonsslag

De fordonsslag som inkluderas i ÅDT är lätta respektive tunga fordon, där tunga fordon består av tunga lastbilar samt bussar. För att erhålla ett trafikflöde för tunga lastbilar exkluderades bussar ur datan över ÅDT för tunga fordon. Fördelningen mellan tunga lastbilar och bussar av det totala antalet tunga fordon redovisas i tabell 3.

Tabell 3. Uppdelningen av tunga fordon (Trafikanalys, 2020a).

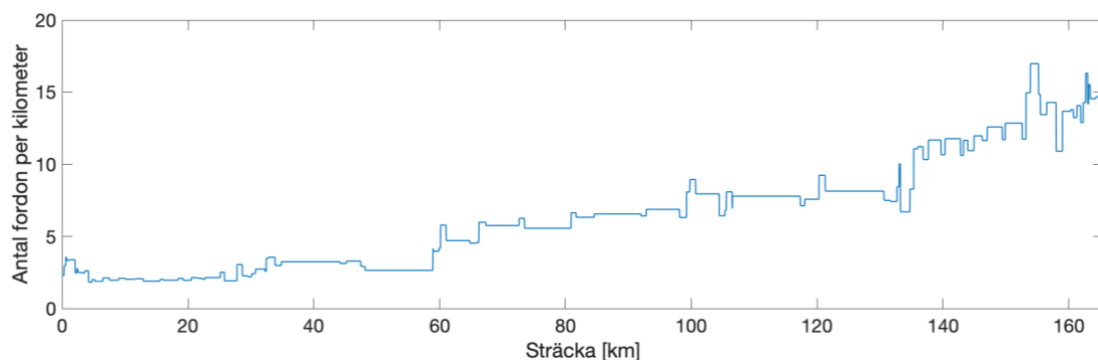
Fordonstyp	Andel av tunga fordon [%]
Tunga lastbilar	84,9
Bussar	15,1

I modellen delades tunga lastbilar upp i åtta olika viktklasser baserat på den fördelning som finns för svenskregistrerade lastbilar, se tabell 4. För tunga lastbilar är en femtedel utlandsregistrerade och även dessa räknades in. För varje lastbilstyp beräknades andelen av det totala antalet tunga lastbilar och andelarna tillämpades sedan för att beräkna det totala antalet av varje lastbilstyp, baserat på data från Trafikverkets databas.

Tabell 4. Uppskattad uppdelning av trafikarbetet för tunga lastbilar utifrån fordonsvikt (Yahya och Henriksson, 2018).

Tunga lastbilar, fordonsvikt [ton]	Antal lastbilar	Andel av totala antalet tunga lastbilar [procent]
5,5	6 627	8,4
9,75	8 872	11,2
13	1 551	2,0
17	13 199	16,7
23	12 690	16,0
27	21 301	26,9
30	8 904	11,3
53	5 956	7,5

Trafikflödet för tunga lastbilar per kilometer längs med sträckan redovisas i figur 8. Trafikflödet är lägre vid början av sträckan för att sedan öka närmare Stockholm. Vissa av topparna längs med kurvan beror på städer som ligger intill sträckan. Exempelvis ligger Uppsala 100 kilometer från startpunkten vilket resulterar i ett ökat trafikflöde vid den sträckan.

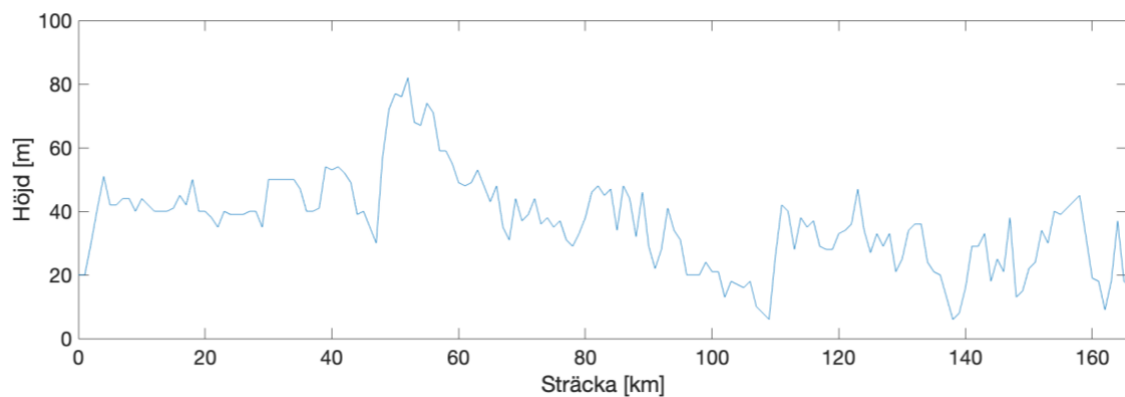


Figur 8. Trafikflödet för tunga lastbilar längs med sträckan med start i Gävle och slut i Stockholm.

3.2.5 Vinkel på väg

Höjdprofilen för sträckan togs fram i programmet Google Earth Pro och har använts för att beräkna vinkeln på vägen i förhållande till det horisontella planet. Eftersom höjdprofilen innehöll data per kilometer, har antagandet gjorts att vinkeln är samma för

varje meter i en kilometer. Baserat på det har en vektor skapats som innehåller höjddata i varje meter. Höjdprofilen startades i Gävle och avslutades i Stockholm, se figur 9.



Figur 9. Höjdprofil med start i Gävle och slut i Stockholm.

3.2.6 Hastighet

En hastighetsvektor skapades utifrån de hastighetsbegränsningar som gäller för tunga lastbilar längs med sträckan. Tunga lastbilar har en hastighetsbegränsning på 90 km/h på motorväg och motortrafikled. Om en tung lastbil har släp är den maximala hastigheten 80 km/h. I studien antogs lastbilar som väger 53 ton ha släp och för dessa sattes en hastighet på 80 km/h. De övriga tunga lastbilarna antogs ha en hastighet på 90 km/h (Transportstyrelsen, 2017). Hastighetsbegränsningar som gäller längs med sträckan är hämtade från Trafikverkets databas NVDB på Webb. Under stora delar har vägen hastighetsbegränsningar på 110 till 120 km/h medan det är lägre hastighetsbegränsningar på sträckan närmast Stockholm. Tunga lastbilar begränsas till stor del av de specifika hastighetsbegränsningarna för fordonstypen, förutom närmast Stockholm där hastighetsbegränsningen ibland är nere på 70 km/h.

3.2.7 Laddningsmöjligheter under färd

Fordonen förväntas kunna ladda upp sina batterier utöver framdrivningseffekten men det är inte bestämt till vilket grad som det kommer vara möjligt. I modellen har det gjorts ett antagande om att fordonen får ladda upp batterierna för ytterligare 50 kilometer körning efter att de har lämnat elvägen. Det bedömdes motsvara den genomsnittliga sträcka som krävs för att ta sig till närmaste laddstation, enligt Bülund¹. För att ta hänsyn till detta beräknades ett schablonvärde som 50 kilometer motsvarar av den totala effektförbrukningen, vilket fördelades jämnt över hela vägsträckan.

¹ Anders Bülund, Trafikverket, intervju den 7 januari 2020.

3.3 Metod för analys av elnät

Elvägens anslutning till elnätet baserades på lokala- och regionala förutsättningar hos omgivande elnät. Till en början valdes lämpliga transformatorstationer ut baserat på ett antal krav kring placering, kapacitet och antal transformatorer. Analysen av elnätet i förhållande till elvägens effektbehov baserades på tre scenarion där olika grader av förstärkning i transformatorstationerna tillämpades. För varje scenario undersöktes det om transformatorstationerna klarade av att tillgodose elvägens effektbehov. För att avgöra detta togs tillgänglig kapacitet i transformatorstationerna fram och spänningsfall på matande linjer samt nätstyrkeförhållandet beräknades. Spänningsfall och nätstyrkeförhållandet har kontrollerats mot gränsvärden för elkvalitet (Eng, 2018). Avslutningsvis genomfördes en kostnads kalkyl för de tre scenarierna som baserades på kostnader för nya markkablar som kommer att behöva förläggas och åtgärder i transformatorstationer.

3.3.1 Val av transformatorstationer

Information om befintliga transformatorstationer inom Vattenfall Eldistributions elnätsområde togs fram i Netbas, vilket är Vattenfall Eldistributions system för dokumentation av anläggningsdelar (Vattenfall, 2020b). Där erhöles information om spänningsnivåer, märkeffekter, kortslutningseffekter och antalet transformatorer för varje transformatorstation.

Den undersökta elvägssträckan antogs matas från transformatorstationer som hade sekundärspänning på 22 kV. Vid inledande diskussion med avdelningen Nätanalys på Vattenfall Eldistribution ansågs en sekundärspänning på 22 kV vara en lämplig spänningsnivå för att uppnå kraven på tillförsel av effekt till elvägen. Då transformatorstationerna förväntades kunna reservmata varandra var det viktigt med ett system av samma spänningsnivå, vilket var en anledning till att endast undersöka transformatorstationer med sekundärspänningen 22 kV. Med hänsyn till n-1 kriteriet sattes initialt kravet att varje transformatorstation skulle vara utrustad med minst två transformatorer, vilket innebar att varje transformator som drabbas av ett fel ska kunna ersättas av en annan transformator.

För att transformatorstationerna skulle anses lämpliga var kravet att de skulle befinna sig inom 10 kilometer från elvägen. Ett längre avstånd än så ansågs inte lämpligt då stora förluster skapas vid transmission av låg spänning över långa distanser. Transformatorstationer som befann sig i central stadsmiljö exkluderades då det är mer komplicerat och kostsamt att förlägga kabel i dessa områden. Slutligen exkluderades transformatorstationer som inte befann sig inom Vattenfall Eldistributions nätområde eller som hade en extern nätägare.

Den effekt som beräknades möjlig att utnyttja från respektive transformatorstation baserades på att transformatorstationerna skulle klara n-1 kriteriet. Således har dimensioneringen gjorts efter den transformator med lägst märkeffekt när det endast

funnits två tillgängliga transformatorer i en transformatorstation. Fanns det tre tillgängliga transformatorer var det möjligt att dimensionera utifrån märkeffekten på två transformatorer. Vidare antogs den maximala belastningen för en transformator vara 140 procent av märkeffekten, enligt Hjelmqvist².

3.3.2 Scenarion

I studien har tre scenarion ställts upp där samtliga scenarion har samma antaganden kring elektrifieringsgrad, fordonsslag och effektbehov. Det innebär att det som förändrades mellan de olika scenarierna var antalet transformatorstationer och således belastningen på stationerna. Sammanställningen för de olika scenarierna presenteras i tabell 5. För det första scenariot antogs befintligt elnät där ingen förstärkning av nuvarande transformatorstationer och anslutningsalternativ genomfördes. Kravet på scenario 1 var transformatorstationer med minst två transformatorer samt att dessa hade en befintlig sekundärspänning på 22 kV. Det resulterade i 5 transformatorstationer mellan Gävle och Stockholm.

I det andra scenariot antogs en viss förstärkning av transformatorstationerna, vilket möjliggjorde för anslutning till transformatorstationer som endast hade en transformator. En förstärkning av befintliga stationer i form av utbyggnation av extra transformatorer resulterade i att 3 stationer lades till i scenario 2 vilket innebar att totalt 8 transformatorstationer användes för anslutning av elvägen. I det sista scenariot gjordes åtgärder med syfte att ytterligare förbättra nätanslutningen för att se till att inga gränsvärden överstegs. Då antogs samma åtgärder som i scenario 2 men i scenario 3 kunde även större ombyggnationer göras i lämpliga transformatorstationer vid behov. Dessa åtgärder kunde innebära flera nya transformatorer i en transformatorstation eller helt nya transformatorstationer. Scenario 3 resulterade i två nya transformatorer i en transformatorstation längs med sträckan som tidigare inte uppfyllde kraven.

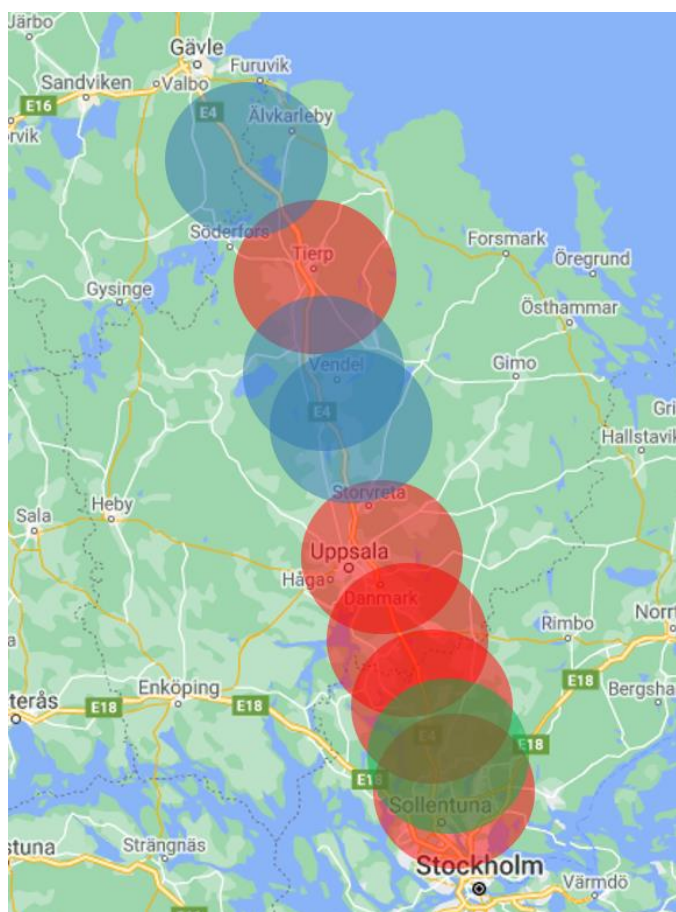
Tabell 5. Sammanställning av åtgärder för de olika scenarierna.

Scenario	Stationer	Krav	Kommentar
1	TS2, TS7, TS8, TS9, TS13	▪ Minst två transformatorer per station ▪ Högst 10 kilometer från elväg ▪ Befintlig transformering till 22 kV	Anslutning till elvägen med befintliga stationer

² Gudmund Hjelmqvist, Vattenfall, samtal den 11 december 2020.

2	TS1, TS2, TS3, TS4, TS7, TS8, TS9, TS13	▪ Minst en transformator per station ▪ Högst 10 kilometer från elväg ▪ Befintlig transformering till 22 kV	TS1, TS3 och TS4 tillkommer där extra transformatorer krävs i vardera station
3	TS1, TS2, TS3, TS4, TS7, TS8, TS9, TS14, TS13	▪ Inga krav på befintliga transformatorstationer ▪ Högst 10 kilometer från elväg ▪ Inget krav på befintlig transformering till 22 kV	TS14 tillkommer där två transformatorer krävs för att uppnå en sekundärspänning på 22 kV

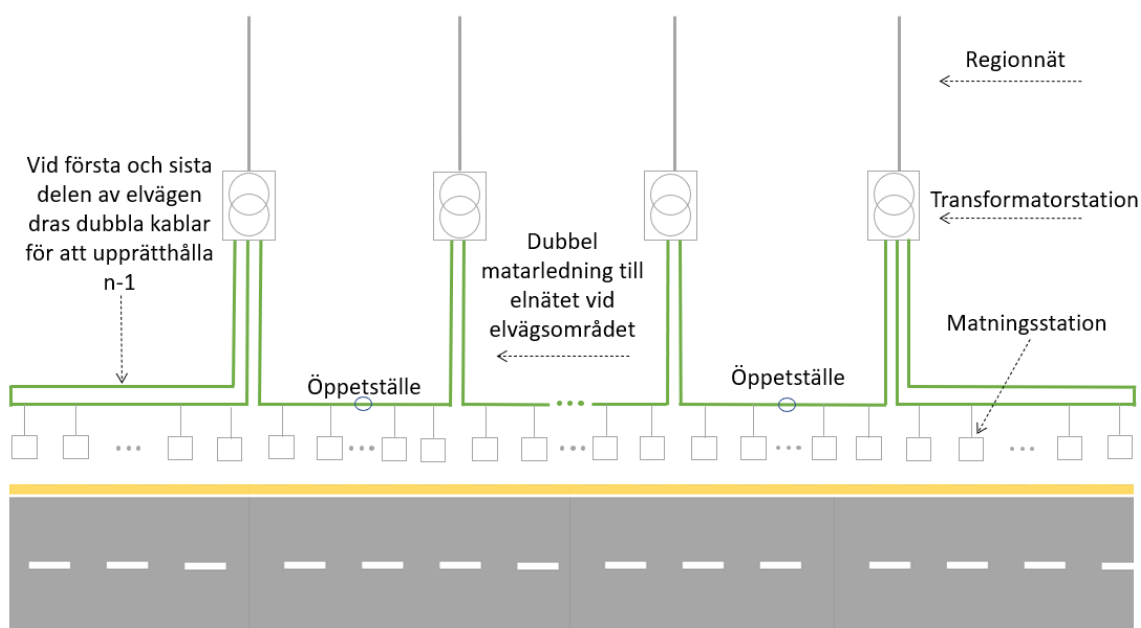
Placeringar för samtliga undersökta transformatorstationer illustreras i figur 10. Kartan visar de ungefärliga placeringarna för transformatorstationerna, där scenario 1 symboliseras av röda cirkclar i kartan. För scenario 2 och 3 tillkommer de blåa cirkklarna respektive de gröna cirkklarna.



Figur 10. Karta över transformatorstationernas ungefärliga placeringar längs med vägsträckan, där röda, blåa och gröna cirkclar markerar tillkommande transformatorstationer i scenario 1, 2 och 3 respektive (Map data ©2021 Google).

3.3.3 Anslutning till elnätet

Elvägen antogs matas från distributionsnätet där lämpliga transformatorstationer valdes ut. Från varje transformatorstation antogs en matning med dubbla kablar till elvägen där dessa kablar matade åt varsitt håll längs med elvägen, se figur 11. På mitten av elvägssträckan mellan två transformatorstationer antogs det finnas ett öppetställe vilket är en komponent som möjliggör för reservmatning mellan transformatorstationerna. De två stationerna längst norrut respektive söderut hade en extra kabel för reservmatning, vilket medförde att dessa transformatorstationer hade tre utgående kablar. Längs med hela elvägen antogs matningsstationer befinna sig med ett mellanrum om 1,5 kilometer.



Figur 11. Schematisk bild över elnätsanslutningen.

3.3.4 Val av kabel

För anslutning av elvägen antogs markkablar av aluminium läggas i plan med sluten skärmkrets och den maximala tillåtna temperaturen antogs vara 90 grader, vilket gäller vid reservdrift. Det ansågs vid förläggning av kablar förmånligt att standardisera kabeltyperna till ett mindre antal, vilket minskar inköpskostnaderna och skapar enklare underhåll samt hantering, enligt Hjelmqvist³. Två typer av kablar undersöktes, dels en PEX-isolerad 3-ledarkabel med en area på 240 mm^2 och en PEX-isolerad 1-ledarkabel med en area 630 mm^2 . Kabelarean på 630 mm^2 ansågs mest aktuell för matningen från transformatorstationerna till elvägens matningsstationer då den ansågs ha ett tillräckligt stort nominellt strömvärde i förhållande till elvägens effektbehov. Däremot så redovisas även information om kabelarean 240 mm^2 med syfte att valet mellan kablarna ska kunna diskuteras senare i studien. Vid beräkning av ledningsimpedansen för respektive kabel togs det hänsyn till ett resistivt och induktivt bidrag till ledningsimpedansen. Den

³ Gudmund Hjelmqvist, e-postkonversation den 22 februari 2021.

kapacitiva reaktansen bortsågs från då den antogs försumbar. För bedömning av hur mycket ström som utgående kablar kan belastas med har det nominella strömvärdet för varje kabeltyp används. Det nominella strömvärdet är det maximala värde på ström som en kabel kontinuerligt kan belastas med (NKT Cables, 2015). Data för båda kabeltyperna redovisas i tabell 6.

Tabell 6. AC-resistans, driftinduktans och nominellt strömvärde för kablarna 3x240 och 3x1x630 (NKT Cables, 2015).

Kabelarea [mm^2]	AC-resistans [ohm/km]	Driftinduktans [mH/km]	Nominellt strömvärde [A]
240	0,1258	0,30	400
630	0,0493	0,52	715

Vid beräkning av den induktiva reaktansens bidrag till ledningsimpedansen beräknades vinkelfrekvensen, enligt

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (7)$$

där ω är vinkelfrekvensen [rad/s] och f är frekvensen [Hz]. Vidare beräknades den induktiva reaktansen, X_L [ohm/km], enligt formeln

$$X_L = \omega \cdot L, \quad (8)$$

där L är driftinduktansen [mH/km]. Ledningsimpedansen, Z [ohm/km], för en kabel kan därefter beräknas enligt

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (9)$$

där R är AC-resistansen för en kabel [ohm/km]. Beräknade ledningsimpedanser för de två aktuella kabelstorlekarna redovisas i tabell 7.

Tabell 7. Ledningsimpedanser för kablarna 3x240 och 3x1x630.

Kabelarea [mm^2]	Impedans [ohm/km]
240	0,1572
630	0,1706

3.3.5 Belastning på transformatorstationerna

Belastningen som elvägen gav upphov till på respektive transformatorstation har tagits fram genom att beräkna en kvot mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten i transformatorstationerna. Den tillgängliga effekten, $P_{tillgänglig}$ [W], har beräknats enligt

$$P_{tillgänglig} = 1,4 \cdot P_{märkeffekt} - P_{övrig\ last}, \quad (10)$$

där $P_{märkeffekt}$ är transformatorstationens märkeffekt [W] och $P_{övrig\ last}$ är effektbehovet från övriga anslutningar på transformatorstationen [W]. Faktorn 1,4 multiplicerat med märkeffekten motsvarar den maximala belastningen för en transformator som får belastas till 140 procent. Elvägens belastning på respektive transformatorstation [%] analyserades genom att beräkna en kvot mellan elvägens effektbehov $P_{elväg}$ [W] och den tillgängliga effekten, vilket gav ett värde på elvägens procentuella belastning enligt

$$Elvägens\ belastning\ på\ transformatorstation = \frac{P_{elväg}}{P_{tillgänglig}} \cdot 100. \quad (11)$$

En procentuell belastning över 100 procent innebar att transformatorstationen blev överbelastad vid anslutning av elvägen.

3.3.6 Spänningsfall

Spänningsfall uppkommer som en konsekvens av den matande kabelns impedans. Spänningsfallet stiger med ökad längd på kabeln och minskar med ökad ledararea, vilket beror på ökad respektive minskad impedans i ledningen. Det är vid dimensionering av kablar viktigt att ta hänsyn till att spänningsfallet på linjen inte blir för högt (NKT Cables, 2015). Till en början beräknades spänningsfallet för ledningen mellan transformatorstationen och den första matningsstationen vid elvägen enligt

$$U = Z \cdot I, \quad (12)$$

där Z [ohm/km] är ledningsimpedansen och I är den utgående strömmen från transformatorstationen [A]. Därefter beräknades spänningsfallet i samtliga matningsstationer med avseende på avståndet mellan matningsstationerna och summerades för varje reservmatande linje. Spänningsfallet summerades sedan för ledningen mellan transformatorstationen och den första matningsstationen samt för alla matningsstationer på varje matande linje. Spänningsfallen kontrollerades så att de inte översteg rådande gränsvärden, vilket för normaldrift är 4,6 procent och för reservdrift 5,6 procent (Eng, 2018).

3.3.7 Nätstyrkeförhållande

Som en intern bedömning av förutsättningarna för god elkvalitet används bland annat begreppet nätstyrka, vilket beskriver elnätets förmåga att stå emot spänningsförändringar till följd av variation i last och produktion. Nätstyrkan kan beskrivas i relation till en ansluten last som nätstyrkeförhållandet, NSF, enligt

$$NSF = \frac{S_k}{P_{ansluten}} \quad (13)$$

där S_k är kortslutningseffekten [MVA] och $P_{ansluten}$ är den anslutna effekten [MW]. NSF påverkas av kortslutningsimpedansens resistiva och induktiva del samt den anslutande lastens aktiva och reaktiva förhållande (Eng, 2018). För att ta beslut huruvida kraven för nätstyrka upprätthölls så undersöktes NSF för det matande elnätet till elvägen. För varje sektion av elvägen togs kortslutningseffekten, $S_{k,ledning}$ [MVA], fram enligt ekvationen

$$S_{k,ledning} = \frac{U^2}{Z}, \quad (14)$$

där U är driftspänningen [kV] och Z är ledningsimpedansen [ohm/km] (Söder, 2015). Därefter beräknades den totala kortslutningseffekten för en anslutning enligt

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k,ledning}} + \frac{1}{S_{k,TS}}, \quad (15)$$

där $S_{k,TS}$ är kortslutningseffekten för transformatorstationerna [MVA]. Om nätstyrkeförhållandet för samtliga anslutningar är högre än 40, bedöms det matande elnätet uppfylla kraven för god nätstyrka (Eng, 2018).

3.4 Effektprognos för transformatorstationer

Lämpligheten hos de framtagna transformatorstationerna bedömdes utifrån deras respektive effektprognoser, vilket var data som erhöles från avdelningen Marknadsanalys på Vattenfall Eldistribution. Effektprognoser består av en faktor som beskriver hur effektuttaget för en specifik transformatorstation förväntas öka i framtiden. Den förväntade belastningen på respektive transformatorstation år 2030 beräknades genom att summera den nuvarande lasten med den förväntade ökningen, vilket påverkade den tillgängliga lasten.

I datan för effektprognoserna fanns tre kategorier som beskrev olika typer av prognoser, vilka var "högsta gissning", "bästa gissning" och en "lägsta gissning". Det tidsperspektiv som har använts i studien är år 2030 och den kategori som används för effektprognoserna är den "bästa gissningen". Vid år 2030 förväntas ett storskaligt elvägssystem vara implementerat och det bedömdes även vara ett tidsperspektiv inom en relativt nära framtid. Tabell 8 visar hur lasten på transformatorstationerna förväntas öka procentuellt fram till år 2030. För vissa av stationerna fanns det ingen effektprognos

framtagen och för dessa stationer antogs ett medelvärde beräknat på de övriga stationerna. För scenario 3 förstärks transformatorstation TS14 med två nya transformatorer som möjliggör för anslutning av elvägen. Eftersom de nya transformatorerna inte har någon befintlig last utöver elvägen gjordes antagandet att även lasten för år 2030 endast skulle vara elvägens effektbehov.

Tabell 8. Tabell över den förväntade procentuella ökningen av lasten på transformatorstationerna fram till år 2030.

Stationer	Förväntad ökning av last på transformatorstationer till 2030 [%]
TS1	25,0*
TS2	14,5
TS3	25,0*
TS4	48,6
TS7	52,8
TS8	36,2
TS9	21,4
TS13	7,2
TS14	0

*Beräknat medelvärde baserat på ett medelvärde av resterande värden på grund av avsaknad av information.

3.5 Kostnadsberäkning

För varje scenario beräknades kostnaderna för åtgärder i transformatorstationer och förläggning av nya kablar, vilket baserades på normpriser från Energimarknadsinspektionen och interna källor på Vattenfall Eldistribution. Vid uppskattning av kabelkostnader beräknades den totala längden nya kablar som behövdes dras från transformatorstationerna till matningsstationerna. De områdeskategorier i normprislistan som ansågs relevanta var jordkabel city, jordkabel tätort och jordkabel landsbygd normal för år 2018, med en spänningsnivå på 24 kV. Priser för kablar år 2020 erhöles genom reglering med konsumentprisindex, KPI, se tabell 9 (SCB, 2021).

Tabell 9. Kostnader för olika typer av markkablar (Energimarknadsinspektionen, 2015).

Kabeltyp	Område	Kostnad [MSEK/km] 2020
PEX 3x1x630 mm ²	Jordkabel City	1,6
PEX 3x1x630 mm ²	Jordkabel Tätort	1,3
PEX 3x1x630 mm ²	Jordkabel Landsbygd normal	0,9

Vid åtgärder i transformatorstationer användes normprisvärden, se tabell 10, som har valts i samråd med Brengdahl⁴. Vid insättning av nya transformatorer antogs spänningsnivåerna 145-123 kV/24-12 kV eftersom elnätsföretaget har för avsikt att spänningshöja regionnätet i det aktuella området till 130 kV. Varje ny transformator kompletterades med brytarfack, både för 145 kV respektive 24 kV, som innehåller strömbrytare, mätutrusning och reläskydd. Det sattes även in ett mätfack som på respektive skena mäter spänningen och i vissa fall behövdes en sammankopplingsbrytare som separerar olika delar av skenan. För samtliga transformatorstationer där det tillsattes nya transformatorer lades en kostnad på för en extra byggnad. För nya kablar behövdes ett nytt brytarfack på varje ny utgående kabel.

Tabell 10. Kostnader för komponenter i transformatorstationer, enligt Brengdahl⁵.

Komponenter	[MSEK/styck]
145-123/24-12 Transformer 40 kV	10,3
145 kV Brytarfack transformator	2,2
24 kV Brytarfack transformator	0,5
24 kV Mätfack	0,4
24 kV Brytarfack ledning	0,4
123-145 kV Grundkostnad liten station total, <6 fack	7,5
Byggnad 50 m ² totalt	2,2
145 kV Brytarfack ledning	2,8
145 kV Sammankopplingsbrytare	0,8

⁴ Daniel Brengdahl, Vattenfall Eldistribution, samtal den 8 februari 2021.

⁵ Ibid

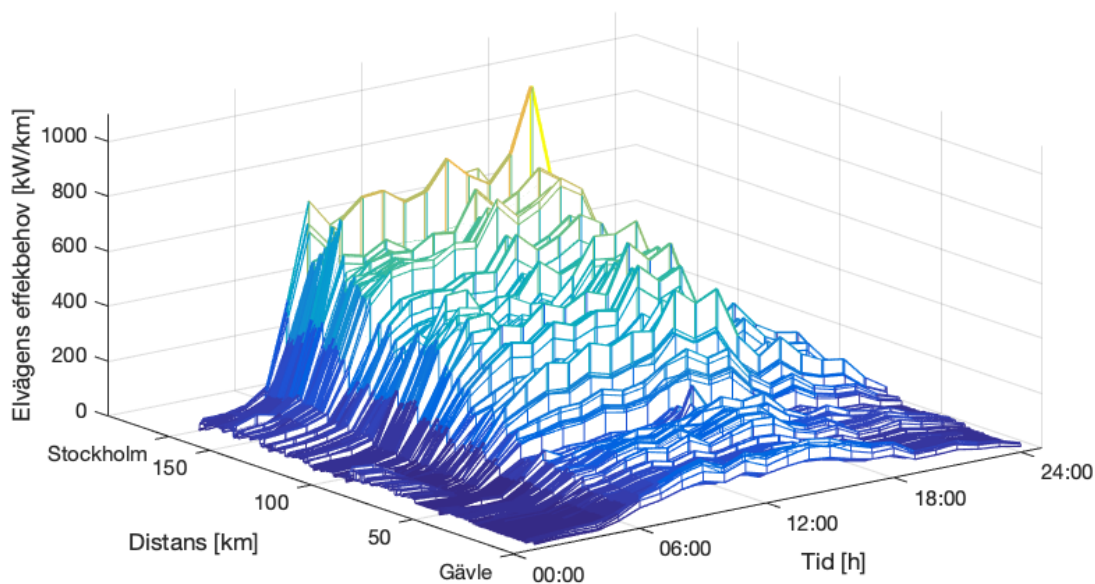
Byggnad 100 m ² totalt	3,3
170-123 kV FeAl 593 mm ² Träportal	1,4
170-52 kV Topplina FeAl 1x241 mm ²	0,2

4. Resultat

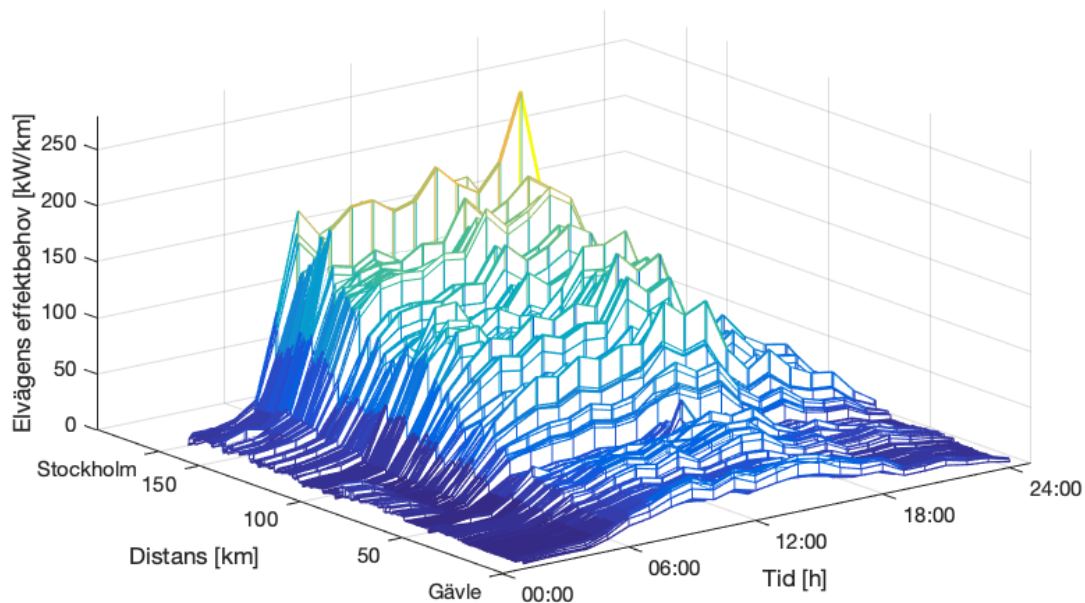
I det här kapitlet kommer studiens resultat att redovisas. Inledningsvis presenteras resultatet för elvägens effektbehov i avsnitt 4.1. Därefter redogörs resultatet för de olika scenarierna i avsnitt 4.2. Kapitlet avslutas med avsnitt 4.3 där en kostnads kalkyl för respektive scenario presenteras.

4.1 Elvägens effektbehov

Från modellen över elvägen i Matlab erhöles effektbehovet per timme under år 2019, vilket ligger till grund för resultatet av elnätsanslutningen. Figur 12 visualiserar det totala effektbehovet från elvägen med en elektrifieringsgrad på 100 procent mellan Gävle och Stockholm. Elvägens effektbehov varierar över dygnet och är som störst under dagtid med effekttoppar mellan klockan 17 och 18. Det är även en tydlig ökning av effektbehovet närmare Stockholm och den högsta toppen i grafen visar en situation där trafikflödet är högt under en belastad timme på dygnet. För att visa en simulering med en lägre elektrifieringsgrad antogs en elektrifieringsgrad på 25 procent, där resultatet kan ses i figur 13. För denna elektrifieringsgrad blev elvägens effektbehov betydligt lägre till följd av en minskad andel elektrifierade fordon. I studien kommer fortsättningsvis en elektrifieringsgrad på 100 procent antas.



Figur 12. Elvägens effektbehov över dygnet längs med sträckan mellan Gävle och Stockholm vid en elektrifieringsgrad på 100 procent.



Figur 13. Elvägens effektbehov över dygnet längs med sträckan mellan Gävle och Stockholm vid en elektrifieringsgrad på 25 procent.

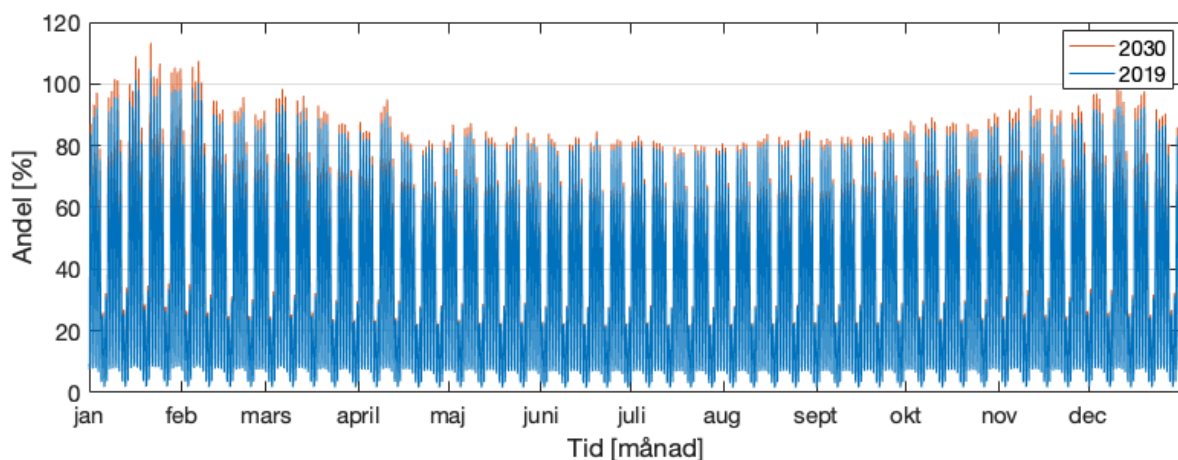
4.2 Scenarion

Resultatet för varje scenario kommer att redovisas nedan, där olika åtgärder har antagits baserat på resultatet av tidigare scenarion. För varje transformatorstation har en kvot mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten tagits fram. Även effektbehovet i respektive transformatorstation kommer att redovisas nedan. Slutligen redogörs det för spänningsfall, maximal ström på utgående kabel och nätstyrkeförhållandet, NSF, för respektive scenario. Gränsvärdet för spänningsfall är

maximalt 5,6 procent, strömmen för varje utgående kabel ska vara under 715 A och nätstyrkeförhållandet ska ha ett värde över 40.

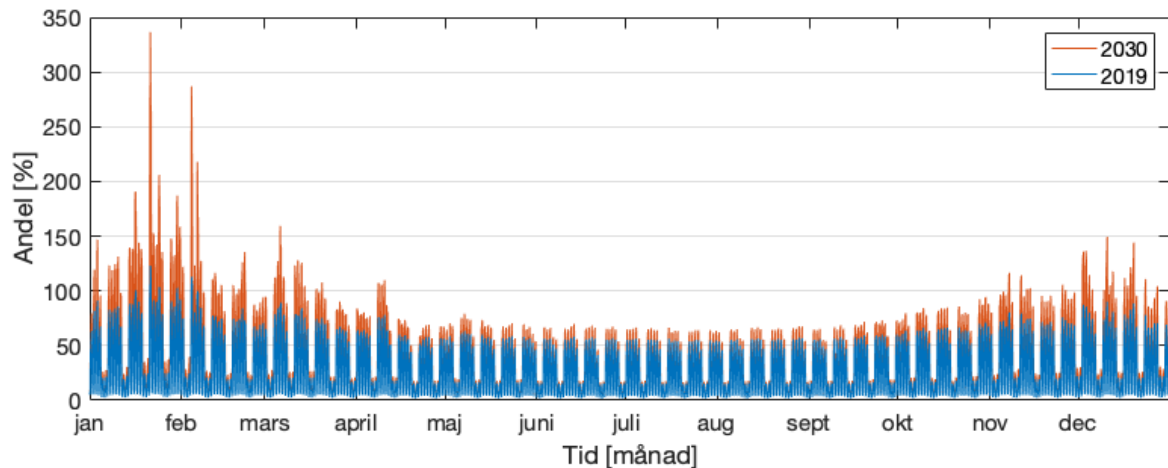
4.2.1 Scenario 1

I det första scenariot överbelastar två transformatorstationer, TS2 och TS9, år 2019. Resultatet för TS2 presenteras i figur 14, där förhållandet mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten i transformatorstationen illustreras. Ur figuren kan det utläsas att stationen belastas över 100 procent vid ett tillfälle år 2019, blå kurva, och att den största belastningen sker i januari och februari. För år 2030, röd kurva, är det flera timmar i januari och februari där elvägen belastar transformatorstationen med över 100 procent.



Figur 14. Förhållandet mellan effektbehovet från elvägen och den tillgängliga effekten i station TS2 för scenario 1. Den blåa kurvan visar belastningen år 2019 och den röda underliggande kurvan visar den förväntade belastningen år 2030.

I figur 15 visas förhållandet mellan elvägens effektbehov och tillgängliga effekten för station TS9. För den blåa grafen som visar förhållandet för år 2019 är det ett fåtal timmar kring januari och februari som överstiger 100 procent. Utöver dessa timmar är det en relativt jämn kvot där elvägen utgör cirka 71 procent av den tillgängliga effekten. Effektprognosen för TS9, den röda grafen, visar toppar på över 100 procent mellan januari och april. Även under timmar i november och december överbelastas transformatorstationen. Under ett dygn är det några timmar med höga belastningar som korrelerar med elvägens belastning. Det resulterar i flera höga effekttoppar där den högsta ligger på cirka 337 procent.



Figur 15. Förhållandet mellan effektbehovet från elvägen och den tillgängliga effekten i station TS9 för scenario 1. Den blåa kurvan visar belastningen år 2019 och den röda underliggande kurvan visar den förväntade belastningen år 2030.

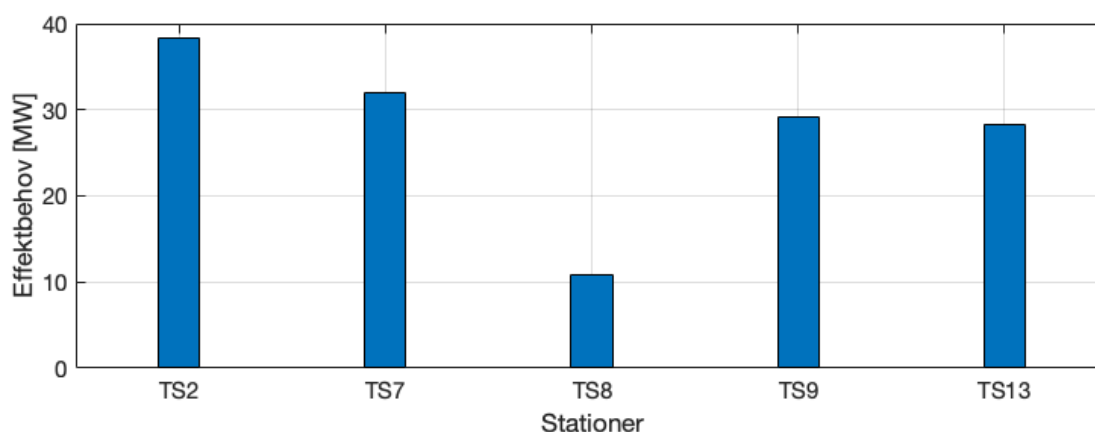
Resultatet för varje transformatorstation har sammanställts genom ett medelvärde med standardavvikelse samt ett maximalt värde för varje vecka under året, se tabell 11. Den maximala belastningen från elvägen på TS2 motsvarar cirka 105 procent vid 2019 års belastning på transformatorstationerna, vilket innebär att stationen under vissa timmar av året blir överbelastad. Däremot utgör elvägens effektbehov ett medelvärde på 86 procent, med standardavvikelsen 6 procent, av den tillgängliga effekten vilket innebär att transformatorstationen under större delen av året klarar av att tillgodose elvägens effektbehov. Medelvärdet ökar i effektprognosen och det maximala värdet uppgår då till 113 procent år 2030.

För TS9 är den maximala kvoten för belastningen år 2019 på transformatorstationen 123 procent, vilket innebär att stationen är överbelastad under vissa tidpunkter på året. År 2030 är både medelvärdet och det maximala värdet för TS9 för högt. För medelvärdet är det även värt att notera att standardavvikelsen är 53 procent, vilket tyder på att det är en last på stationen som varierar mycket mellan olika timmar på dygnet, vilket även var uppenbart i figur 15. Det är därför lämpligt att genomföra åtgärder för det området. För de resterande transformatorstationerna är samtliga värden inom gränsvärdet för belastningen år 2019. Däremot kommer station TS7 att överbelastas år 2030 då det maximala värdet kan komma att uppgå till 122 procent.

Tabell 11. Beräknat medelvärde och maxvärde för förhållandet mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten i stationerna för scenario 1. Standardavvikelsen för medelvärdet visas i parentesen.

Stationer	Medelvärde 2019 [%]	Maximalt värde 2019 [%]	Medelvärde 2030 [%]	Maximalt värde 2030 [%]
TS2	86 (6)	104	90 (8)	113
TS7	77 (5)	91	89 (11)	122
TS8	16 (1)	19	18 (2)	24
TS9	71 (16)	123	103 (53)	336
TS13	25 (1)	27	26 (2)	29

Det maximala effektbehovet för respektive transformatorstation har beräknats vid en situation då reservmatning krävs. För scenario 1 redovisas respektive stations maximala effektbehov vid reservmatning i figur 16. Den transformatorstation som belastas med det största effektbehovet från elvägen är TS2, som behöver tillföra cirka 38 MW. Även station TS7 behöver tillföra cirka 32 MW. Resultatet pekar på att det krävs fler anslutningsmöjligheter längs med sträckan för att minska den maximala belastningen på vissa transformatorstationer.



Figur 16. Effektbehovet för respektive station vid reservmatning för scenario 1.

Resultatet för spänningsfall, högsta ström på kabel ut från stationerna samt nätstyrkeförhållandet, NSF, redovisas i tabell 12 för scenario 1. För varje station är matningen uppdelad i nordlig och sydlig riktning, vilket beror på att dubbla kablar matar ut från transformatorstationerna i olika riktningar längs elvägen. För samtliga transformatorstationer kan man utläsa att NSF ligger inom marginalen för gränsvärdet på minst 40.

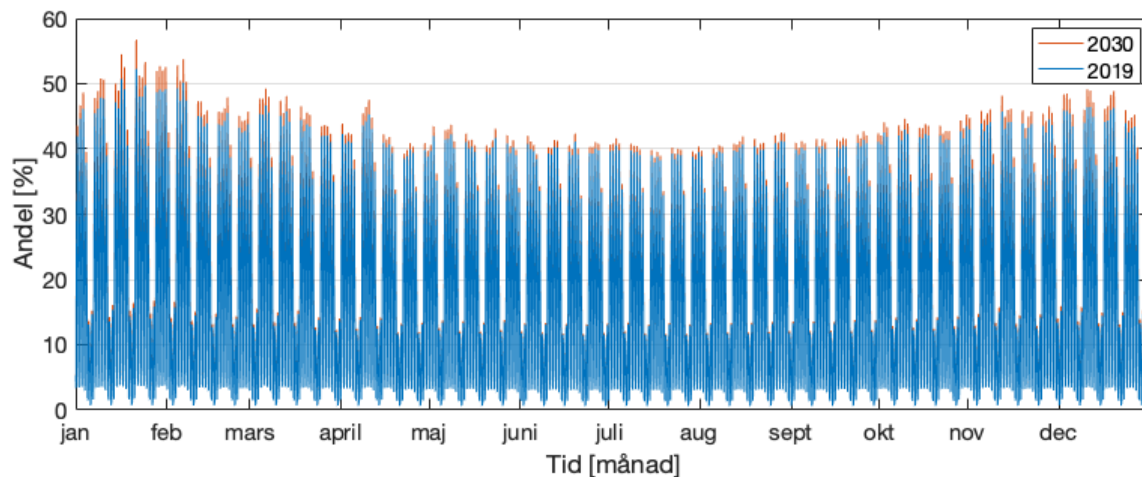
Spänningsfallet ut från station TS2 i nordlig riktning är för högt, med ett värde på 10,5 procent. Strömmen över denna kabel norrut är inom ramen för vad kabeln klarar vilket beror på den relativt låga effekten som elvägen kräver längs med den delen av sträckan. Strömmen mellan station TS2 och TS7 ligger på 790 ampere, vilket överstiger kabelns nominella ström värde och därmed även dess termiska begränsningar. Detta beror på att det är ett långt avstånd mellan TS2 och TS7, vilket resulterar i ett stort effektbehov från elvägen för transformatorstationerna. Spänningsfallet för TS7 är inom gränsvärdet för reservmatning och för TS8, TS9 och TS13 är spänningsfallet och strömmen på kabel inom gränsvärdet.

Tabell 12. Spänningsfall, ström på kabel och NSF för scenario 1. Gränsvärden för spänningsfall, ström och NSF är 5,6 procent, 715 A och 40 respektive.

Stationer	Spänningsfall vid reservmatning [%] norr/söder		Ström på kabel vid reservmatning [A] norr/söder		NSF norr/söder	
TS2	10,5	3,1	250	790	173	104
TS7	4,2	0,8	790	163	117	182
TS8	0,7	0,8	163	211	180	172
TS9	0,7	2,9	211	680	198	70
TS13	3,2	0,3	680	89	51	111

4.2.2 Scenario 2

För scenario 2 har tre nya transformatorstationer anslutits till elvägen, vilka krävde åtgärder för att klara av kravet på redundans. Transformatorstationen TS1 hade tidigare en transformator med sekundärspänning 22 kV och denna åtgärdades därför med ytterligare en transformator eftersom det fanns ett behov att stärka nätanslutningen norr om TS2. Även transformatorstationen TS3 tillkom och åtgärdades med en transformator samt en till överliggande matning eftersom den överliggande matningen från elnätet sedan tidigare inte upprätthöll n-1 kriteriet. Dessutom tillkom transformatorstationen TS4 som åtgärdades med en till transformator. Resultatet för TS2 presenteras i figur 17.



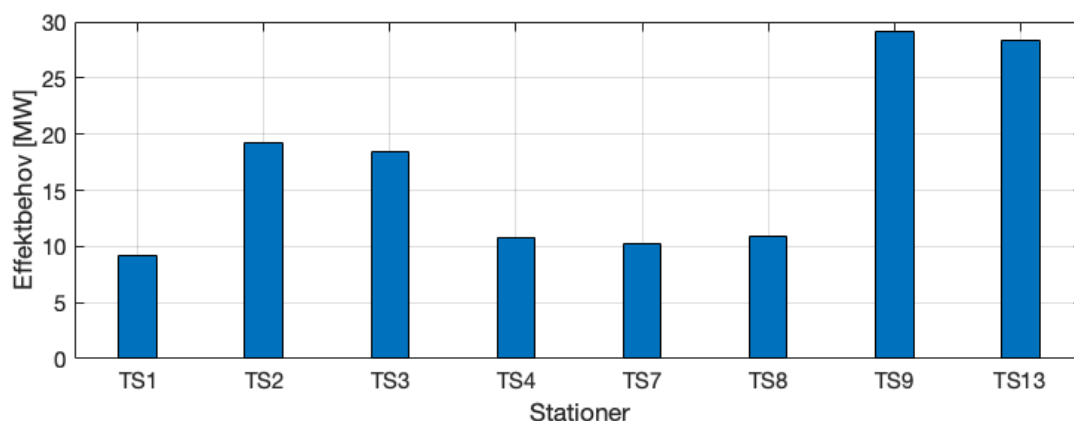
Figur 17. Förhållandet mellan effektbehovet från elvägen och den tillgängliga effekten i station TS2 för scenario 2. Den blåa kurvan visar belastningen år 2019 och den röda underliggande kurvan visar den förväntade belastningen år 2030.

Mer ingående resultat för samtliga transformatorstationer för scenario 2 redovisas i tabell 13. I tabellen kan det utläsas att det maximala värdet för TS2 inte längre överstiger 100 procent, med ett medelvärde på 43 procent och en maximal belastning på 52 procent för år 2019. Prognosen för år 2030 visar en belastning på omkring 45 procent med en maximal belastning på cirka 57 procent. Det innebär att de nya transformatorstationerna, TS1 och TS3, kan anses lämpliga att ansluta till med avseende på effektbehovet. För TS3 är det maximala värdet för år 2019 78 procent men däremot är det maximala värdet 124 procent för år 2030. Utöver dessa stationer är det fortsatt TS9 som är överbelastad för både år 2019 och den förväntade belastningen år 2030. Det är dock ett förväntat resultat eftersom det inte har tillkommit några stationer i det området för scenario 2.

Tabell 13. Beräknat medelvärde och maxvärde för förhållandet mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten på stationerna för scenario 2. Standardavvikelsen för medelvärdet visas i parentesen.

Stationer	Medelvärde 2019 [%]	Maximalt värde 2019 [%]	Medelvärde 2030 [%]	Maximalt värde 2030 [%]
TS1	18 (1)	19	18 (1)	20
TS2	43 (3)	52	45 (4)	57
TS3	47 (10)	78	56 (19)	124
TS4	30 (2)	36	34 (4)	45
TS7	25 (2)	30	29 (4)	41
TS8	16 (1)	19	18 (2)	24
TS9	71 (16)	123	103 (53)	336
TS13	25 (1)	27	26 (2)	29

Det maximala effektbehovet för respektive transformatorstation för scenario 2 visas i figur 18. Jämfört med figur 15 som visar motsvarande graf för scenario 1, är det tydligt hur det maximala effektbehovet blir lägre för området kring TS2 och TS7 när transformatorstationerna TS1, TS3 och TS4 tillkommer. För området kring TS9 har det inte lagts till några stationer mellan scenario 1 och 2. Däremot kan det utläsas att det är relativt höga effektbehov i dessa transformatorstationer med 29 MW respektive 28 MW.



Figur 18. Effektbehovet för respektive station vid reservmatning för scenario 2.

För samtliga transformatorstationer kan man i tabell 14 utläsa att NSF ligger inom god marginal och att spänningsfallet inte översteg gränsvärdet för några transformatorstationer i scenario 2. Även strömmarna är inom gränsvärdet för vad en kabel med den tilltänkta dimensionen klarar av. Däremot kan man observera de relativt

höga strömmarna i sydlig riktning ut från TS9 och i nordlig riktning från TS13, även om de ligger inom gränsvärdet för det nominella strömvärdet. Inför scenario 3 är det inte nödvändigt att lägga till transformatorstationer med avseende på spänningsfall, strömmar i kablar eller NSF. Däremot är belastningen på transformatorstation TS9 för hög vilket är en anledning till att genomföra en förstärkning kring det området i scenario 3.

Tabell 14. Spänningsfall, ström på kabel och NSF för scenario 2. Gränsvärden för spänningsfall, ström och NSF är 5,6 procent, 715 A och 40 respektive.

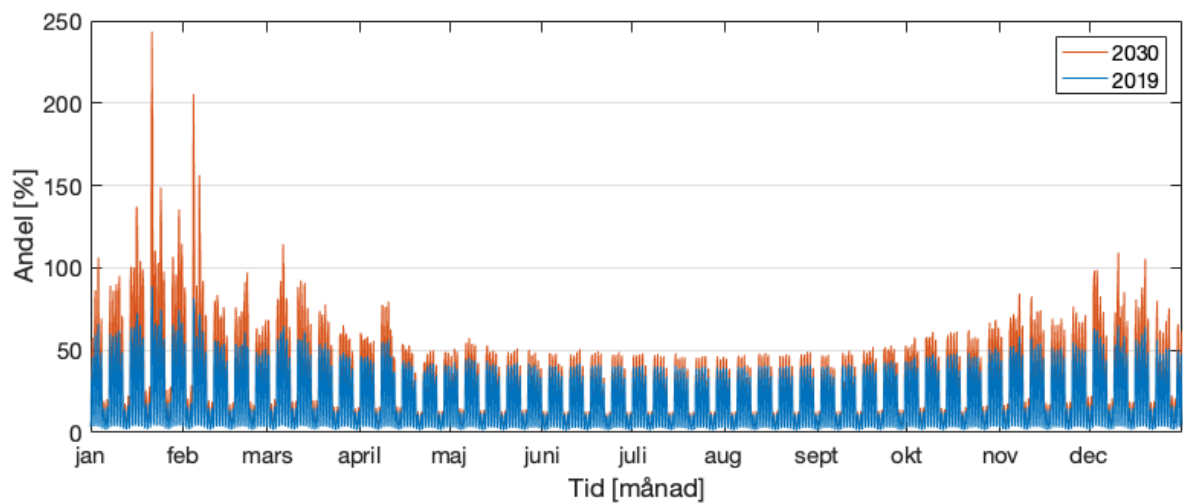
Stationer	Spänningsfall vid reservmatning [%] norr/söder	Ström på kabel vid reservmatning [A] norr/söder	NSF norr/söder
TS1	1,9 2,0	76 174	277 290
TS2	0,7 1,6	174 417	365 150
TS3	3,8 1,4	417 171	125 193
TS4	0,6 0,7	171 203	336 183
TS7	1,0 0,8	203 163	189 196
TS8	0,7 0,8	163 211	194 198
TS9	0,7 2,9	211 680	233 70
TS13	3,2 0,3	680 89	51 111

4.2.3 Scenario 3

I scenario 2 konstaterades det att elvägens effektbehov överstiger den tillgängliga effekten i TS9 med 23 procentenheter för år 2019. För att klara av den belastningen lades ytterligare en transformatorstation, TS14, till i scenario 3. Stationen innehåller i dagsläget en transformator med en primärspänning på 77 kV och en sekundärspänning på 6 kV. Därför gjordes antagandet att två nya transformatorer med sekundärspänning på 22 kV och märkeffekten 40 MVA sattes in i TS14. Eftersom dessa två transformatorer installeras med avseende på att förse elvägen med effekt antogs den övriga lasten vara noll.

Resultatet för transformatorstation TS9 visas i figur 19. Jämfört med tidigare resultat för stationen kan man se att det är en betydligt lägre belastning för år 2019, blå kurva. För år 2019 ligger lasten på omkring 51 procent i medel under året, med ett högsta värde på strax under 90 procent. Den röda kurvan, som visar belastningen för år 2030, är fortsatt

över 100 procent för många timmar under årets vintermånader. Däremot är det en tydlig minskning jämfört med scenario 1 och 2.



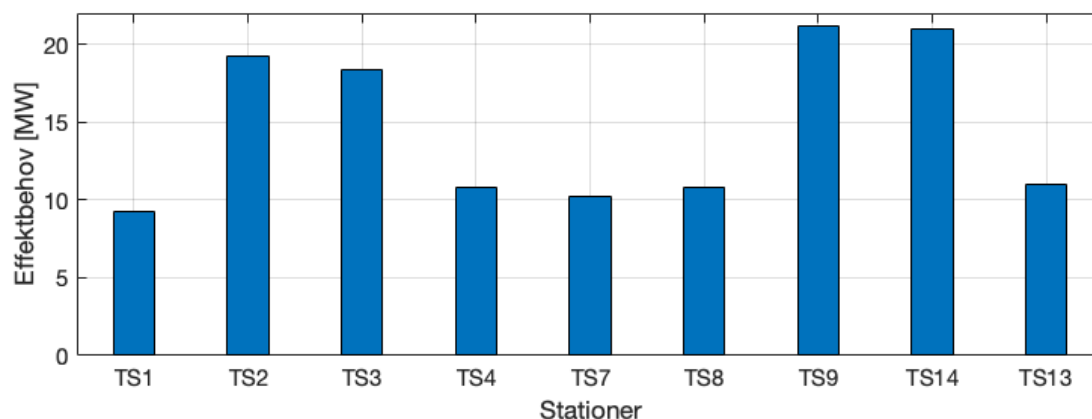
Figur 19. Förhållandet mellan effektbehovet från elvägen och den tillgängliga lasten i station TS9 för scenario 3. Den blåa kurvan visar belastningen år 2019 och den röda underliggande kurvan visar den förväntade belastningen år 2030.

I tabell 15 redovisas medelvärde och det maximala värdet för förhållandet mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga lasten i alla transformatorstationer. Det är värt att notera att samtliga stationer ligger under 100 procent för maximalt värde för år 2019. För år 2030 överstiger elvägens effektbehov den tillgängliga effekten i TS3 och TS9, vilket även kunde ses i figur 18 för TS9. Det tyder på att TS14 var en relativt bra station att lägga till för att kunna avlasta TS9 utifrån effektbehovet.

Tabell 15. Beräknat medelvärde och maxvärde för förhållandet mellan elvägens effektbehov och den tillgängliga effekten för transformatorstationerna för scenario 3. Standardavvikelsen för medelvärdet visas i parentes.

Stationer	Medelvärde 2019 [%]	Maximalt värde 2019 [%]	Medelvärde 2030 [%]	Maximalt värde 2030 [%]
TS1	18 (1)	19	18 (1)	20
TS2	43 (3)	52	45 (4)	57
TS3	4 (10)	78	56 (19)	124
TS4	30 (2)	36	34 (4)	45
TS7	25 (2)	30	29 (4)	41
TS8	16 (1)	19	18 (2)	24
TS9	51 (12)	89	74 (38)	243
TS14	37 (0)	38	37 (0)	38
TS13	10 (1)	11	10 (1)	11

Det maximala effektbehovet för respektive transformatorstation för scenario 3 visas i figur 20. Jämfört med figur 15 och figur 17 som visar motsvarande grafer för scenario 1 och 2, är det tydligt hur det maximala effektbehovet blir mer jämnt fördelat över samtliga transformatorstationer. Det största effektbehovet vid reservmatning är på cirka 21 MW, vilket är för stationerna TS9 och TS14. För resterande stationer är de maximala effektbehoven omkring 9 till 19 MW.



Figur 20. Effektbehovet för respektive station vid reservmatning för scenario 3.

Värden för spänningsfall, ström på kabel och NSF håller sig fortsatt under gränsvärdena, se tabell 16. Strömmen i sydlig riktning ut från TS9 och nordlig riktning ut från TS14 är fortsatt hög men det är en lägre ström på kabeln jämfört med scenario 1, där strömmen i TS9 söderut och TS13 norrut låg på 680 ampere. Resultatet från scenario 3 kan tolkas som att det var lämpligt att sätta in station TS14 för att fördela effektbehovet från elvägen på ytterligare en station i det belastade området kring TS9. I TS9 minskade både effektbehovet och storleken på strömmarna. Effektprognosen för TS9 är således den enda punkten som överstiger ett gränsvärde för scenario 3.

Tabell 16. Resultatet för spänningsfall, ström på kabel och NSF för scenario 3. Gränsvärden för spänningsfall, ström och NSF är 5,6 procent, 715 A och 40 respektive.

Stationer	Spänningsfall vid reservmatning [%] norr/söder	Ström på kabel vid reservmatning [A] norr/söder	NSF norr/söder
TS1	1,9 2,0	76 174	277 290
TS2	0,7 1,6	174 417	365 150
TS3	3,8 1,4	417 171	125 193
TS4	0,6 0,7	171 203	336 183
TS7	1,0 0,8	203 163	189 196
TS8	0,7 0,8	163 211	194 198
TS9	0,7 2,0	211 470	233 107
TS14	1,7 0,7	470 209	77 116
TS13	0,8 0,3	209 89	108 111

4.3 Kostnadskalkyl

De totala kostnaderna för ledningar och åtgärder i transformatorstationer för samtliga scenarier redovisas i tabell 17. Nya markkablar består till en stor del av de totala kostnaderna för varje scenario men det är tydligt att förändringarna i kostnaderna mellan de olika scenarier beror på åtgärder av transformatorstationerna.

I scenario 1 bestod de totala kostnaderna av nya ledningar och brytarfack för ledning i de befintliga transformatorstationer, där nya brytarfack för ledningar endast utgjorde att par procent av de totala kostnaderna. Den största skillnaden i de totala kostnaderna sker mellan scenario 1 och 2 då det utifrån scenario 1 behövde göras flera åtgärder. I scenario 2 lades tre transformatorstationer till som alla behövde en ny transformator och

andra åtgärder i stationerna som nya linjefack, mätfack och byggnader. En av transformatorstationerna, TS3, kompletterades även med en ny ledning på 77 kV från matande transformatorstation samt en sammankopplingsbrytare. De totala kostnaderna från scenario 1 till scenario 2 ökade därför med cirka 80 miljoner kronor. I scenario 3 visades det sig vara tillräckligt med en till transformatorstation för att åtgärda den höga belastningen för TS9 i scenario 2. Det resulterade i att TS14 förstärktes med två nya transformatorer för att kunna ansluta elvägen.

Tabell 17. Kostnader för åtgärder i transformatorstationer, kabelkostnader och de totala kostnaderna för varje scenario.

Scenario	Transformatorstation [MSEK]	Ledningar [MSEK]	Totalt [MSEK]
1	5	246	251
2	84	248	331
3	114	248	362

5. Diskussion

Följande kapitel inleds i avsnitt 5.1 med en diskussion kring de erhållna resultaten i studien och hur man kan tolka dessa. I avsnitt 5.2 redogörs det för hur man valt och hanterat data samt hur detta kan påverka resultatet. Vidare utvärderas metoden och tillhörande osäkerheter i avsnitt 5.3. Avslutningsvis så redogörs det för rekommendationer vid implementering av elväg och vidare studier på ämnet i avsnitt 5.4.

5.1 Resultat

Effektbehovet för en framtida elväg mellan Gävle och Stockholm var som störst närmast Stockholm, vilket kan förklaras i det stora trafikflödet som skapas i områden kring storstäder. Det innebär att kravet på tillgänglig kapacitet i närliggande transformatorstationer i storstadsområdena blir större vilket kan skapa problem då det idag är kapacitetsbrist i städer som Stockholm, Uppsala och Malmö. Mellan Gävle och Stockholm är det flera sträckor som karaktäriseras av landsbygd där det låga trafikflödet resulterar i ett lägre effektbehov. För sektioner av elvägen närmast Uppsala och Stockholm varierar effektbehovet tydligt över dygnet med distinkta effektoppar vid rusningstider. Det kan ha sin förklaring i att tunga transporter i storstadsområden har flera korta körningar under en dag mellan logistikcenter och kunder. Samtidigt har tunga transporter som kör längre sträckor på Sveriges vägar ett mer jämnt körmönster över dygnets alla timmar, vilket kunde utläsas för sträckan närmast Gävle. Vid en

jämförelse mellan elförbrukningen och elvägens effektbehov över en godtycklig dag korrelerar effekttoppar under både förmiddag och eftermiddag. Det innebär att effektbehovet från en elväg med stor sannolikhet kommer att vara högre under de timmar som elnätet är som mest belastat. Förutom variation över dygnet har trafikflödet även visat sig variera mycket mellan vardagar och helgdagar.

Vid kartläggning av möjliga transformatorstationer är det tydligt att det finns fler stationer i anslutning till städer medan det finns färre anslutningsmöjligheter på landsbygden. Transformatorstationer nära städerna kommer sannolikt att förstärkas i framtiden i takt med ökad efterfrågan på energi, något som förbättrar möjligheterna att förse en elväg med effekt från dessa transformatorstationer. I städerna finns det däremot en större efterfrågan på effekt och det är möjligt att det kan uppstå en konkurrenssituation med övriga parter som vill ansluta. På landsbygden resulterar det låga antalet lämpliga transformatorstationer i att långa sträckor av elvägen blir utan anslutningsmöjligheter. Där får istället enstaka transformatorstationer mata långa sträckor, vilket ökar risken för icke-önskvärda spänningsfall.

I studien har det tagits fram tre scenarion där transformatorstationerna har krävt olika grader av åtgärder för att bli lämpliga anslutningspunkter för en framtida elväg. Det första scenariot, vilket skulle innebära en kostnad på 251 miljoner kronor, uppfyllde inte de uppställda kraven på kapacitet och elkvalitet. I detta scenario blev transformatorstationerna TS2 och TS9 överbelastade år 2019, där vintermånaderna var mest ansträngda. För TS2 upprätthölls inte heller kraven på spänningsfall och varken TS2 eller TS9 klarade av kraven på termisk belastning. Det skedde även en överbelastning i både TS2 och TS9 år 2030.

I scenario 2 görs flera åtgärder, något som ökar kostnaden med 80 miljoner kronor från scenario 1. Flera transformatorstationer tillkommer längs med elvägen i närheten av Gävle och avlastar transformatorstationerna från scenario 1 i detta område. Belastningen för TS2 och TS7 blir lägre och med dessa åtgärder uppfylls kraven på spänningsfall och termisk belastning för samtliga transformatorstationer. För TS9 uppstår fortfarande effekttoppar år 2019 och år 2030 som överbelastar transformatorstationen. Bedömningen gjordes att TS9 behövde avlastas, framförallt på grund av överbelastningen som sker år 2019.

I scenario 3 åtgärdades överbelastningen i TS9 med en ny spänningsnivå på den tillkommande transformatorstationen TS14, vilket motsvarade en kostnad på 30 miljoner kronor. Efter åtgärden så upprätthöll samtliga transformatorstationer kraven på kapacitet år 2019. Inga åtgärder valdes att göras åt att transformatorstationerna TS3 och TS9 överbelastas år 2030 i scenario 3. Detta berodde på att medelvärdet för dessa transformatorstationer år 2030 låg inom rimliga gränsvärden och att förstärkningar förväntas genomföras i flera transformatorstationer i framtiden oberoende av elvägen.

För de olika scenarierna kan andra typer av åtgärder än förstärkningar implementeras för att effektbehovet från elvägen ska kunna tillgodoses. Ett alternativ är att styra eller

begränsa lasten för de överbelastade transformatorstationerna eller att använda batterilager på dessa sträckor under kritiska tidpunkter under året och dygnet. Det är även viktigt att ha i åtanke att matningen från elnätet är dimensionerad för en elektrifieringsgrad på 100 procent av tunga lastbilar. Det är möjligt att effekttopparna för vissa av de överbelastade transformatorstationerna i scenariot inte uppstår.

De utgående strömmarna från transformatorstationerna har minskat i takt med att åtgärder har gjorts. Det kan därför vara lämpligt att överväga ett byte av kabelarea till 240 mm^2 som är en av den vanligaste kabelarean för lokalnät. Det nominella strömvärdet för en kabelarea på 240 mm^2 är 400 A, vilket de flesta transformatorstationer i scenario 3 uppfyller. Transformatorstationerna TS2, TS9 och TS14 har däremot utgående strömmar på över 400 A i scenario 3, men man bör vid en förfrågan om en elväg kartlägga effektbehovet mer detaljerat utifrån de givna förutsättningarna. I studien har en elektrifieringsgrad på 100 procent för tunga lastbilar antagits och även om detta effektbehov kan antas behövas till annan typ av laddinfrastruktur är chanserna stora att de utmatande strömmarna på över 400 A är överdimensionerade. Ledningsimpedansen för kabelarean 240 mm^2 är dessutom lägre än för 630 mm^2 , vilket är ett resultat av att kabel med arean 240 mm^2 förläggs som 3-ledare vilket har lägre impedans än 3 stycken 1-ledare. Vid byte från 1-ledare till 3-ledare av dessa kabeltyper skulle därför 240 mm^2 fortfarande upprätthålla kraven på spänningsfall.

De totala kostnaderna för byggnation av elnätet i de olika scenarierna varierade mellan 251 till 362 miljoner kronor. Beroende på val av teknik kan investeringskostnaderna för elvägen bli mellan 1,7 till 3,4 miljarder kronor. I investeringskostnaderna för elvägen är det viktigt att poängtera att vägelen var inkluderad, vilken även är inkluderad i studiens resultat. Hur stor andel av de totala kostnaderna för utbyggnation av elväg som nätanslutningen kommer att utgöra beror delvis på vilken elvägsteknik man väljer men det är tydligt att kostnaderna för byggnation av elvägen är större än byggnation av elnätet för den aktuella sträckan.

5.2 Val och hantering av data

I studien användes trafikdata i form av ÅDT. Eftersom ÅDT är ett medelvärde över året så uppstår risken att vissa tidpunkter som har ett avvikande trafikflöde inte noteras. Eftersom trafikflödet för tunga lastbilar är relativt jämnt under året, vid jämförelse med personbilar, togs beslutet att ÅDT för tunga lastbilar kan ge en representativ bild av hur godstrafiken varierar. Alternativet hade varit att använda helårsmätningar vilket representerar det faktiska trafikflödet i en viss punkt i varje timme under ett år men eftersom det endast fanns en helårsmätning längs sträckan så ansågs det inte aktuellt. Den data som samlades in för att få en variation av trafikflödet i varje timma över ett dygn baserades på stickprovspunkter från olika delar av sträckan. Stickprovspunkterna samlades in för både vardagar och helgdagar men eftersom endast vissa dygn på året fanns tillgängliga var dessa inte representativa för årsvariationer. Stickprovspunkterna

kan ha påverkat effekttopparnas amplituder både genom ett högre och lägre effektbehov.

En viktig parameter för beräkning av framdrivningseffekten för fordonen var vinkeln på vägen. Vinkeln beräknades genom att ta fram höjddata från Google Earth Pro, vilket är baserat på satellitbilder över området. Det medför att viss data från vägens höjdprofil kan frånga vägens exakta position i höjdriktning, exempelvis kan höjden avvika från det verkliga värdet över vattendrag, under broar och i tunnlar. Datan som användes för effekttuttaget i varje transformatorstation togs från år 2019 med anledning av att elanvändningen för år 2020 inte bedömdes som representativ med hänsyn till covid-19-pandemin. Det är viktigt att notera att den totala elanvändningen för år 2019 var lägre än för år 2018 vilket kan förklaras med att år 2019 var ett milt år med en relativt varm vinter. Det är något som kan ha resulterat i något högre tillgänglig last i transformatorstationerna.

5.3 Utvärdering av metod

Den lediga kapaciteten i transformatorstationerna har analyserats och ställts mot effektbehovet från elvägen. Vid anslutning av en betydande last till elnätet är det viktigt att undersöka hur det bakomliggande elnätet påverkas för att kunna dra slutsatser kring hur stor last som kan kopplas på den specifika anslutningspunkten. En elväg kräver flera olika anslutningar till elnätet vilket resulterar i en komplex analys av hur elnätet påverkas av lasten. I transformatorstationer där det har funnits en stor andel tillgänglig last kan det finnas bakomliggande orsaker till att en last inte kan anslutas. En analys av bakomliggande elnät skulle kunna resultera i ett annorlunda resultat men det är något som har varit utanför avgränsningarna för studien. Den tillgängliga effekten i transformatorstationerna har antagits varit aktiv vilket innebär att den reaktiva effekten har försumrats. Eftersom den reaktiva effekten tar upp utrymme i elnätet kan mindre aktiv effekt överföras. För studien resulterar det i att transformatorstationernas tillgängliga effekt är något mindre än vad som har antagits.

Affärsmodell och regleringar kring exempelvis betalning, laddning och användning kommer att behövas utformas vid en implementation av en elväg. Det är i dagsläget svårt att dra slutsatser kring vilka tjänster en framtida elväg kommer att erbjuda. Vid utformandet av modellen för effektbehovet har det antagits att varje fordon får förbruka den mängd effekt som krävs för framdrivning. Utöver detta har det även antagits en laddning av fordonen motsvarande 50 kilometer extra för att nå den planerade destinationen, alternativt nästa laddstation. Studien antar dessutom en kontinuerlig laddning längs hela elvägen men en elvägsteknik som innebär uppdelade laddningssegment är en mer trolig lösning.

Det är tänkbart att effekttuttaget längs sträckan kan komma att regleras och att det kommer finnas en gräns för det maximala uttaget längs vägen. Detta är inget som har tagits hänsyn till i modellen vilket i vissa tidpunkter har resulterat i höga effekttuttag från transformatorstationerna. Vid simulering av det förväntade effektbehovet till

elvägen har det antagits att 100 procent av alla tunga lastbilar ska bruka elvägen, vilket är en väl tilltagen elektrifiering. Det är inom den närmsta tiden osannolikt att 100 procent av den tunga lastbilsflottan kommer att elektrifieras, framförallt då andra drivmedel, som bibränslen, förväntas utgöra en stor del av den framtida bränslemixen. Det är dock möjligt att vid implementation av en elväg så kommer även annan typ av laddinfrastruktur att anslutas i nära anslutning till elvägen. Det innebär att trots fordonens elektrifieringsgrad är väl tilltaget så kan effektbehovet på närliggande elnät motsvara ett framtida behov för att klara av att elektrifiera transportsektorn.

Vid anslutning av ett matande elnät till elvägen kan olika lösningar utformas och det erhållna resultatet i studien är baserat på en typ av anslutning. Exempelvis kan andra krav på kabeldimensioner och leveranssäkerhet påverka valet av anslutning, vilket även påverkar resultatet. Kostnadsanalysen som har genomförts har till stor del baserats på hur långa ledningar som de olika scenarierna kräver för att ansluta till elvägen. Det innebär att valet av anslutningsmetod i hög grad kommer påverka kostnaden för anslutningen. En annan del av kostnaderna avser nya brytarfack för transformatorstationerna. Vid en faktisk installation av nya brytarfack på ledningar görs en anpassad kostnads kalkyl för respektive station genom ett fysiskt besök på platsen. Det kan exempelvis krävas utbyggnad av stationsbyggnader och utökade marktillstånd för dessa byggnader. I studien har en generell kostnad för nya brytarfack på ledningarna antagits vilket skapar en viss osäkerhet för kostnadsanalysen.

Som tidigare nämnt användes data för ÅDT i kombination med en helårsmätning och stickprover för att få fram trafikflödet över året. Det resulterar i ett effektbehov för elvägen som har olika mönster för veckodagarna men som inte skiljer sig över året. För en elväg i mellersta Sverige kommer temperatur och underlag variera över årets olika säsonger vilket kommer att påverka effektförbrukningen för användarna av elvägen. Under sommartid har fordonen större behov av kylning och under vintern så försämrar batterikapaciteten. Dessutom så kan snö och is på vägbanan skapa högre rullmotstånd. I studien tas det inte hänsyn till olika säsongsvariationer då det finns lite dokumentation kring hur effektbehovet förändras för tunga fordon vid olika årstider. Det kan leda till att effektbehovet under vintertid är högre än det effektbehov som har presenterats i studien. Däremot kan det antas att sträckan som är en viktig förbindelse från Stockholm och vidare norrut är frekvent underhållet och att extrema väglag längs sträckan är sällsynt. Vid situationer av dåligt väglag till följd av snö och kyla kan det dock antas att elnätet redan är väl belastat av övriga konsumenter i nätet, vilket är värt att ha i åtanke vid utformandet av ett matande elnät till elvägar.

5.4 Implementering av en framtida elväg

Vid implementering av elvägar bör det ställas krav på robusthet och leveranssäkerhet. Om redundansen för elvägssystemet inte upprätthålls riskerar stora delar av elvägen att drabbas av strömavbrott om det sker ett bortfall av transformatorstationer eller andra komponenter. På landsbygden är det en ökad risk för att långa sträckor blir strömlösa,

då det oftast är ett färre antal transformatorstationer som matar långa sträckor. Det kommer även vara viktigt med hög leveranssäkerhet till elvägar ur ett marknadsperspektiv. Elvägar bör vara ett säkert alternativ där kunder känner förtroende för att köpa elvägsanpassade fordon. Fordonsföretag bör även känna att elvägssystemet kan tillgodose kundernas laddningsbehov vilket skapar incitament för att tillverka elvägsanpassade fordon.

Flera länder planerar idag att uppföra elvägar på allmänna vägar och framtidens elvägssystem förväntas integreras internationellt. Det ställer krav på ett samarbete över landsgränser vad gäller systemets prestanda och egenskaper. Eftersom en stor del av de transporter som sker med tunga fordon i Sverige består av utlandsregistrerade fordon, är det viktigt med ett integrerat system där man kan färdas fritt över nationella gränser. Därför bör ett gemensamt beslut tas på internationell nivå kring val av egenskaper, såsom elvägsteknik. Det är något som bidrar till att implementation av ett elvägssystem är en komplex fråga som ställer höga krav på samarbeten över lång tid. Det går även att jämföra med andra liknande infrastrukturer som har visat sig problematiska att internationalisera. För järnväg i Europa är det problem med spårvidd, elsystem och signalsäkerhetssystem som skiljer sig mellan olika länder, vilket försvårar för ett system som binder samman stora delar av Europa (Andersson och Berglund, 2020). Järnvägar är ett infrastruktursystem som det bör kunna dras lärdomar av för att implementera ett elvägssystem som redan från början är kompatibelt över de nationella gränserna. Däremot skulle förmodligen ett internationellt elvägssystem innebära att byggnation och utveckling skulle fördröjas och det skulle ta lång tid innan ett sådant system kan bli verklighet.

Det som skiljer en elväg från andra laster är den kontinuerliga kraftöverföringen som behövs över långa sträckor, något som ställer nya utmaningar på samarbete mellan elnätsföretagen. Vid undersökning av anslutningsmöjligheter har fördelaktiga transformatorstationer ibland valts bort eftersom de inte har legat inom Vattenfall Eldistributions elnätsområde, något som i längden har hämmat arbetet i att utforma en optimal elnätsanslutning. Det är därför viktigt att ett samarbete upprätthålls mellan de distribuerade aktörerna för att matningen av el till elvägar ska bli resurs- och kostnadseffektiv. Eftersom ett elvägssystem förväntas sträcka sig över flera områdeskoncessioner med olika elnätsägare, skapas utmaningar i regleringen av elverksamheten. I regeringsuppdraget ska Trafikverket utgå från undantag från koncessionsplikten, vilket tyder på att syftet med uppdraget är att planera för en optimal implementering av elväg, oavsett juridiska förutsättningar.

5.5 Vidare studier

Elvägar är ett system som sedan flera år tillbaka har undersökts och där det finns en rad olika pilotsträckor runt om i världen. Många studier har publicerats angående olika tekniker för laddinfrastruktur, vilka vägar som är mest aktuella och de sociala samt ekonomiska följderna en elväg skulle innebära. Trots tidigare studier finns det ett gap i

information kring anslutningen mellan elvägen och närliggande elnät, vilket är ett ämne där det finns mycket kvar att undersöka innan en implementering av ett storskaligt elvägssystem.

Som vidare studier på ämnet bör en mer ingående analys av bakomliggande elnät genomföras i syfte att få en förståelse för hur en stor last med många anslutningspunkter längs en sträcka påverkar elnätet. Det hade även varit av intresse att undersöka hur effektoppar från elvägen kan förhindras genom användning av batterier och andra lagringsalternativ i anslutning till elvägen. Det i kombination med att analysera topplaster i det övriga elnätssystemet hade varit intressant inom en vidare studie. Vidare finns det utrymme för att mer ingående studera användarnas förmåga att bidra till effekthalansen genom att mata tillbaka energi till elnätet vid behov genom så kallad Vehicle-to-grid. Även olika storlekar på batterier och hur effektbehovet påverkas vid olika väglag är av intresse att undersöka i vidare studier.

6. Slutsatser

Effektbehovet för att tillgodose den framtida elvägen förväntas variera mellan 300 och 900 kW per kilometer för de mest belastade tidpunkterna under dygnet. Effektbehovet är lägre mellan Gävle och Uppsala och högre mellan Uppsala och Stockholm, vilket främst beror på variationer i trafikflödet. Dessutom korrelerar effektbehovet från elvägen med den övriga elförbrukningen, något som riskerar att förstärka befintliga effekttoppar.

För elvägen kommer anslutningsmöjligheterna relativt tätt mellan Uppsala och Stockholm medan det endast finns enstaka lämpliga transformatorstationer mellan Gävle och Uppsala. Studien har därför visat att det kan bli kritiskt att mata elvägar som går genom landsbygd och där avståndet mellan städer är långt. Studien bedömer att det finns god kapacitet i transformatorstationer i närhet till den aktuella elvägen men att det kommer att krävas förstärkningar för att kraven på tillgänglig effekt och elkvalitet ska uppfyllas. Av de tre scenarierna som har studerats är det scenario 3 som uppfyller studiens uppställda krav, där det krävs en förstärkning i fyra transformatorstationer. När dessa åtgärder har implementerats blir effektbehovet för transformatorstationerna mellan 9 och 21 MW, vilket är en mer balanserad fördelning än för tidigare scenarion. Nätanslutningen till elvägen enligt scenario 3 resulterar i en totalkostnad på 362 miljoner kronor vilket kan jämföras med elvägens totala investeringskostnad på mellan 1,7 och 3,4 miljarder kronor beroende på val av elvägsteknik.

Referenser

- ABB. 2021. *Transformatorstationen, en effektiv knutpunkt i elnätet*. Tillgänglig: <https://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/transformatorstationer> [Hämtad: 2021-02-12]
- Andersson, B., Berglund, L. 2020. *Nattågstrafik till Europa*. Trafikverket. Tillgänglig: <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1385352/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad: 2021-03-12]
- Axberg, E., Alkefjård, T., Grahn, P., Jigvall, C., Karlsson, J., Karlsson, T., Pandur, S., Sidén, J., Vandel Nylander, C., Wallnerström, C.J. 2020. *Kapacitetsutmaningen i elnäten*. Energimarknadsinspektionen. Tillgänglig: https://ei.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm/Rapporter%202020/EiR2020_06_Kapacitetsutmaningen%20i%20elnäten.pdf [Hämtad: 2021-01-08]
- Bateman, D., Leal, D., Reeves, S., Emre, M., Stark, L., Ognissanto, F., Myers, R., Lamb, M., 2018. *Electric Road Systems: A Solution for the Future?*. World Road Association (PIARC).
- Berglund, B., Hörnfeldt, S., Granzel, N., Asplund, G., Dahlström, H., Wrede, F., Hellgren, M., Honeth, N. 2018. *Sammanfattning av erfarenheter hittills*. Tillgänglig: https://www.trafikverket.se/globalassets/dokument/elvagsdokument/eroads-arlanda_rapport.pdf [Hämtad: 2020-12-02]
- Björnsson, L. H., Karlsson S. 2016. The potential for brake energy regeneration under Swedish conditions. *Applied Energy*. Volume 168. Pages 75-84.
- Bülund, A. 2020. *Matande Elnät för Elvägar - en översikt tekniskt och juridiskt*. Trafikverket. Tillgänglig: <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1469722/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad: 2020-11-04]
- Domingues-Olavarria, G., Márquez-Fernández, F.J., Fyhr, P., Reinap, A., Alaküla, M. 2018. Electric Roads: Analyzing the Societal Cost of Electrifying All Danish Road Transport. *World Electric Vehicle Journal*. 2018, 9, 9.
- Elbilsstatistik. 2020a. *Elbilsstatistik*. Tillgänglig: <https://www.elbilsstatistik.se/elbilsstatistik> [Hämtad: 2020-11-03]
- Elbilsstatistik. 2020b. *Laddinfrastrukturstatistik*. Tillgänglig: <https://www.elbilsstatistik.se/laddinfrastrukturstatistik> [Hämtad: 2020-11-03]
- Energimarknadsinspektionen. 2015. *Uppdaterad normprislista*. Tillgänglig: <https://www.ei.se/sv/Projekt/Gamla-projekt/Forhandsreglering-av-elnatstariffer/-senaste-nytt/uppdaterad-normprislista/> [Hämtad: 2021-02-17]
- Energimarknadsinspektionen. 2018. *Kapacitetsbrist och effektbrist - vad är vad?*. Tillgänglig: <https://www.ei.se/sv/nyhetsrum/nyheter/nyhetsarkiv/nyheter-2018/kapacitetsbrist-och-effektbrist-vad-ar-vad/> [Hämtad: 2020-11-24]

- Energimarknadsinspektionen. 2019. Mer om nätkoncessioner. Tillgänglig:
<https://www.ei.se/sv/for-energiforetag/el/Natkoncession/mer-om-natkoncessioner/>
 [Hämtad: 2020-11-24]
- Energimarknadsinspektionen. 2021. *Ei:s uppdrag och styrning*. Tillgänglig:
<https://www.ei.se/sv/ei-s-verksamhet/Eis-uppdrag-och-styrning/> [Hämtad: 2021-03-01]
- Eng, T. 2018. *Instruktion för elkvalitet* [internt material]. Vattenfall Eldistribution.
- Grunditz, A.E. 2016. *Design and Assessment of Battery Electric Vehicle Powertrain, with Respect to Performance, Energy Consumption and Electric Motor Thermal Capability*. Chalmers tekniska högskola. Avdelning för energi och miljö. Tillgänglig:
http://www.chalmers.se/SiteCollectionDocuments/Energi%20och%20miljö/Elteknik/EmmaGrunditz_PhDthesis_lowrez.pdf [Hämtad: 2020-11-25]
- Gustavsson, M.G.H., Börjesson, C., Kenani Dahlgren, H., Moberg, L., Petersson, J. 2015. *Förstudie om betalsystem för elvägar*. Viktoria Swedish ICT.
- Gustavsson, M. G. H. Lindgren, M. Helms, H. Mottschall, M. 2020. *Real-world experiences of ERS. Best practises from demonstration projects in Sweden and Germany*. Tillgänglig: <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1470510/FULLTEXT02.pdf> [Hämtad: 2020-11-24]
- Hayes, J. G., och Goodarzi, G. A. 2018. *Electric Powertrain : Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. John Wiley and Sons. Incorporated. ProQuest Ebook Central
- Holmström, C. 2020. *Elanvändning*. Ekonomifakta. Tillgänglig:
<https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/elanvandning/>
 [Hämtad: 2020-07-01]
- Jelica, D., Taljegard, M., Thorson, L., Johnsson, F. 2018. Hourly electricity demand from an electric road system – A Swedish case study. *Applied energy*. vol. 228, pp. 141-148
- Kjellström, J. 2020. *Kartläggning och analys av elförsörjningssituationen i Stockholms län*. Regeringskansliet. Infrastrukturdepartementet. Länsstyrelsen Stockholm. Tillgänglig:
<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.61dfa31172a239705f281f0/1599461074920/Trygg%20elforsorjning%20Stockholm%20-%20rapport%207%20sept%202020.pdf> [Hämtad: 2021-02-23]
- Lund universitet. 2020. *Elväg i Lund invigd*. Tillgänglig:
<https://www.lu.se/artikel/elvag-i-lund-invigd> [Hämtad: 2020-10-30]
- Mohseni, F., Larsson, M., Gåverud, H., Hillblom, P., 2017. *Omvärldsanalys och bedömning av den svenska vägfordonsflottans utveckling*. Sweco.
- Nathanaelsson, K., Lindgren, M., Rydén, E., Palo, K., Hasselgren, B., Grudemo, S. 2021. *Regeringsuppdrag - Analysera förutsättningarna och planera för en*

- utbyggnad av elvägar*. Trafikverket. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1524344/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad: 2021-02-02]
- Naturvårdsverket. 2019. *Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/> [Hämtad: 2020-11-23]
- NKT Cables AB. *Kabelhandboken*. 2015. Tillgänglig: https://nkt.widen.net/content/khrkgzaf7t/pdf/NKT_kraftkabelhandboken.pdf?u=gj0n1y [Hämtad: 2021-01-04]
- Nordling, A. 2016. *Sveriges framtida elnät - en delrapport*. Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA). Tillgänglig: <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-energi/vagvael-sveriges-framtida-elnat-b.pdf>. [Hämtad: 2021-02-12]
- Nätområden. 2010. *Svenska Kraftnät*. Tillgänglig: <https://www.natomraden.se>. [Hämtad: 2021-01-04]
- Palo, K., Eriksson, D., Söderberg, U., Starkbeck, A. 2020. *Vägunderhåll och kostnader för olika typer av elvägar*. Trafikverket. Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/contentassets/e65ff31b80fd4d3bbfc37de7660896c3/vagunderhall-och-kostnader-for-olika-typer-av-elvagar---rapport.docx.pdf> [Hämtad: 2020-11-23]
- Pettersson, J., Lindgren, M., Berndtsson, A., Viklund, V., Andersson, M., Öhrnberg, Å., Söderberg, U., Eriksson, D., Grudemo, S., Hasselgren, B., Andersson, L., Bülund, A., Grönvold Andersson, A-K. 2017. *Nationell färdplan för Trafikverket*. Trafikverket. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1424924/FULLTEXT01.pdf>. [Hämtad: 2020-11-25]
- Proposition 2016/17:16. *Godkännande av klimatavtalet från Paris*.
- Regeringen. 2020a. *Elektrifieringskommissionen*. Infrastrukturdepartementet. Regeringsbeslut I2020/02592. Tillgänglig: <https://www.regeringen.se/4a944c/contentassets/8a54d1f3a61b4f078460f775f9b4ffe6/elektrifieringskommissionens-uppdrag.pdf> [Hämtad: 2021-02-23]
- Regeringen. 2020b. *Uppdrag att planera för en utbyggnad av elvägar*. Infrastrukturdepartementet. Regeringsbeslut I2020/02590. Tillgänglig: <https://www.regeringen.se/4a9609/contentassets/4435e943080e42b68fe468b74cd98901/uppdrag-att-planera-for-en-utbyggnad-av-elvagar.pdf> [Hämtad: 2020-11-24]
- Region Gävleborg. 2020. *Världens första elväg på E16*. Tillgänglig: <https://www.regiongavleborg.se/regional-utveckling/samhallsplanering-och-infrastruktur/elvag/> [Hämtad: 2020-10-30]
- RISE. 2019. *Världens första trådlösa elväg för bussar och tunga lastbilar byggs i Sverige*. Tillgänglig: <https://www.ri.se/sv/press/varldens-forsta-tradlosa-elvag-bussar-och-tunga-lastbilar-byggs-i-sverige>. [Hämtad: 2020-11-20]

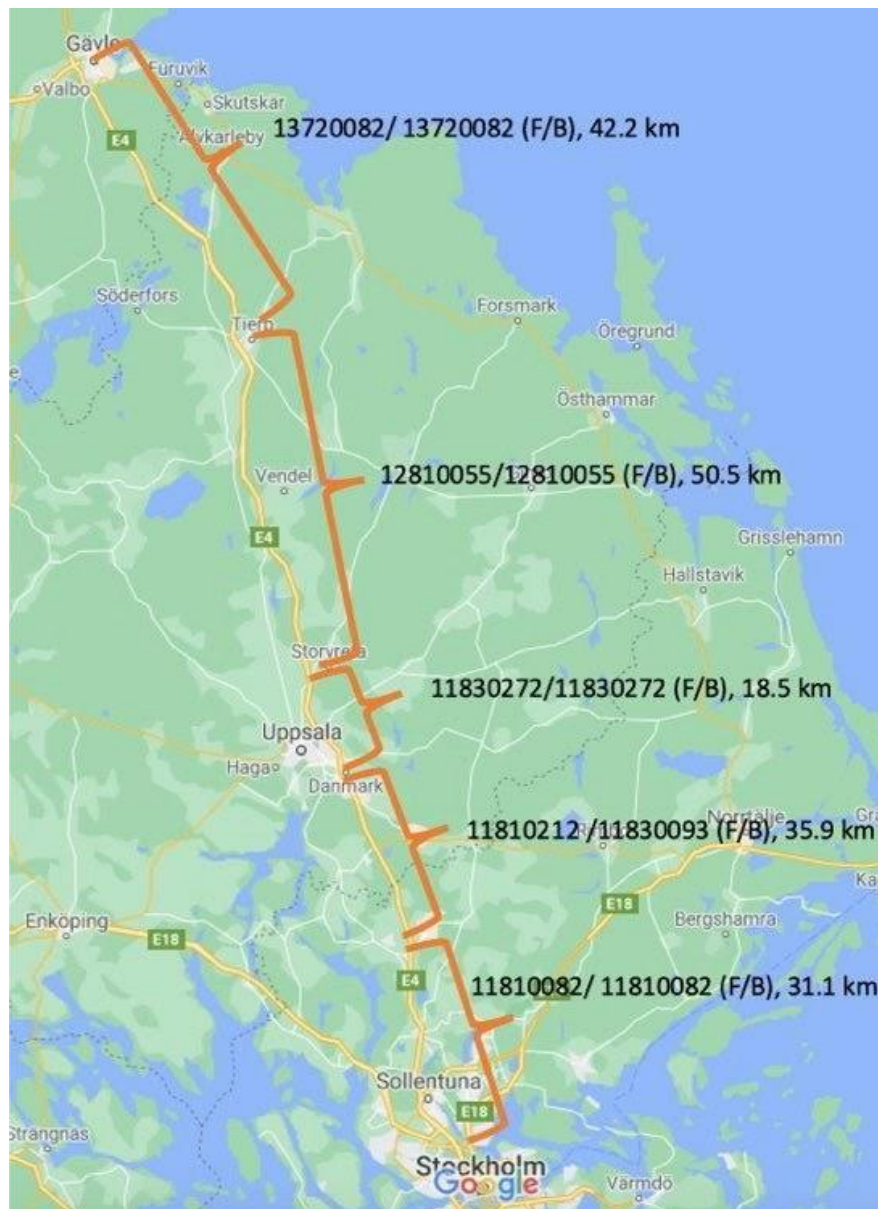
- Rupprecht Hjort, M. Åberg, M. 2016. *Förutsättningar för en säker kraftöverföring*. Riksrevisionen. Tillgänglig: <https://data.riksdagen.se/fil/1F14B606-4BB9-4E2C-8F48-FE4C2CD17632> [Hämtad: 2021-01-14]
- Sandviken Pure Power. 2020. *Världens första elväg*. Tillgänglig: <https://sandvikenpurepower.se/elvag.html> [Hämtad: 2020-10-30]
- SCB. 2021. *Levnadskostnadsindex/KPI (juli 1914=100), historiska tal, 1830-*. Tillgänglig: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/priser-och-konsumtion/konsumentprisindex/konsumentprisindex-kpi/pong/tabell-och-diagram/konsumentprisindex-kpi/kpi-historiska-tal-1830/> [Hämtad: 2021-01-15]
- SFS 1997:857. *Ellagen*. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/ellag-1997857_sfs-1997-857 [Hämtad: 2020-11-04]
- SFS 2007:215. *Förordning (2007:215) om undantag från kravet på nätkoncession enligt ellagen (1997:857)*. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2007215-om-undantag-fran-kravet-pa_sfs-2007-215 [Hämtad: 2020-11-04]
- Stamati, T. och Bauer, P. 2013. On-road charging of electric vehicles. *IEEE*. pp. 1.
- Svenska kraftnät. 2014. *Elnät i fysisk planering*. Behandling av ledningar och stationer i fysisk planering och i tillståndsärenden. Tillgänglig: <https://www.svk.se/siteassets/aktorsportalen/samhallsplanering/dokument/elnat-i-fysisk-planering.pdf> [Hämtad: 2020-11-04]
- Svenska kraftnät. 2019. *En statusuppdatering om läget i kraftsystemet*. Systemutvecklingsplan 2020 - 2029. Tillgänglig: <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2019/systemutvecklingsplan2020-2029.pdf>
- Svenska kraftnät. 2020a. *Kraftbalansen på den svenska elmarknaden, rapport 2020*.
- Svenska kraftnät. 2020b. *Elstatistik*. Tillgänglig: <https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/kraftsystemdata/elstatistik/>. [Hämtad: 2021-01-04].
- Söder, L. 2015. *Elsystemanalys*. Tillgänglig: <https://www.kth.se/social/files/56a8cfc9f276543f496debee/Kompendium-elsystem-vt15-150416.pdf> [Hämtad: 2021-03-02]
- Trafikanalys. 2020a. *Fordon 2019*.
- Trafikanalys. 2020b. *Fordon i län och kommuner 2019*.
- Trafikanalys. 2020c. *Vägfordonsflottans utveckling till år 2030*.
- Trafikverket. 2020a. *Biodrivmedel och energieffektiva fordon minskade utsläppen 2019 - men takten behöver öka för att nå 2030-målet*.

- Trafikverket. 2020b. *Planläggningsbeskrivning*. Tillgänglig:
<https://www.trafikverket.se/contentassets/c628820009804badb7347ac9a43daa34/planlaggningsbeskrivning-e20-elvag-hallsberg-orebro.pdf> [Hämtad: 2020-11-24]
- Transportstyrelsen. 2017. *Hastighetstabla*. Tillgänglig:
<https://www.transportstyrelsen.se/globalassets/global/vag/trafikregler/hastighetstabla-20171201.pdf>
- Taljegård, M., Göransson, L., Odenberger, M. och Johnsson, F. 2017, Spacial and dynamic energy demand of the E39 highway – Implications on electrification options, *Applied energy*, vol. 195, pp. 681-692.
- Vattenfall. 2020a. *Så sätts ditt elpris*. Tillgänglig:
<https://www.vattenfall.se/elavtal/elmarknaden/sa-satts-ditt-elpris/> [Hämtad: 2020-10-30]
- Vattenfall. 2020b. *Netbas Portalen*. [internt material] [Hämtad: 2021-03-01]
- Wallnerström, P., Wigenborg, G., Seratelius, M., 2018. *Leveranssäkerhet i Sveriges elnät 2017 - Statistik och analys av elavbrott*. Energimarknadsinspektionen.
- Wik, J. 2012. *Planering av transformatorstation och eldistributionsnät för bostadsområde*. Tillgänglig:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43472/Wik_Johnny.pdf?sequence=1&isAllow%20ed=y [Hämtad: 2021-01-06]
- Wänlund, J., 2021. *Nätanslutning av en framtida elväg – En kartläggning av anslutningsmöjligheter för E4an mellan Gävle och Stockholm*. Uppsala universitet.
- Yahya, R, M. Henriksson, P. 2018. VTI. *Svenskregistrerade tunga lastbilers trafikarbete i Sverige - Revidering av indata till avgasmodellen HBEFA avseende trafikarbetets fördelning inom segment*. Tillgänglig: <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1191745/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad: 2020-11-11]

Databaser

- Kartor med trafikflöden. Trafikverket. Tillgänglig:
<https://www.trafikverket.se/tjanster/trafiktjanster/Vagtrafik--och-hastighetsdata/Kartor-med-trafikfloden/> [Hämtad: 2020-10-29]
- NVDB på Webb. Trafikverket. Tillgänglig: <https://nvdb2012.trafikverket.se> [Hämtad: 2020-11-10]

Appendix A Uppdelning av sträckan för dygnsflöde



Figur 1. Bild över uppdelning av dygnsflöde längs med sträckan (Map data ©2021 Google).