

Joakim Gotheim Lønset

Muligheter og utfordringer med elektriske veier i Norge

Masteroppgave i Electric Power Engineering

Veileder: Eilif Hugo Hansen

Juni 2019

Joakim Gotheim Lønset

Muligheter og utfordringer med elektriske veier i Norge

Masteroppgave i Electric Power Engineering
Veileder: Eilif Hugo Hansen
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elkraftteknikk

Forord

Denne rapporten markerer avslutningen på min toårige utdanning på studieprogrammet Master of Science in Electric Power Engineering ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Rapporten er utarbeidet for Statens vegvesen, som selv har bidratt med veiledning i forbindelse med arbeidet. Veileder fra NTNU har vært førsteamanuensis Eilif Hugo Hansen ved Institutt for elkraftteknikk.

Arbeidet med denne rapporten har vært både utfordrende og omfattende, men framfor alt veldig lærerikt. Det er merkelig å se tilbake på det som er gjort. Jeg husker nemlig godt at jeg avfeide det hele, da Eilif først foreslo at oppgaven kunne handle om å forsyne kjøretøy med elektrisitet på veien. Derav vil jeg påpeke at dette arbeidet har hatt stor betydning for min egen utvikling, ikke minst med tanke på å beherske nye kunnskapsområder.

Det er nokså overordnet at masteroppgaven skal være en selvstendig arbeidsprosess, og på det området synes jeg å ha klart meg bra. Erfaringene blir med meg inn i yrkeslivet, og jeg ønsker å bidra til økt fokus omkring nye anvendelsesområder for elektrisk energi i Norge.

Til slutt vil jeg rette en takk til mine veiledere, Eivind Karlsen (Statens vegvesen) og Eilif Hugo Hansen, som begge har vært svært behjelpelige og imøtekommende i hele prosessen med dette arbeidet.

Trondheim 17. juni 2019

Sammendrag

Denne studien undersøker muligheter og utfordringer med elektriske veier i Norge. Til å svare på dette, studeres hvordan elektriske veier kan være tilpasset å forsyne trafikken i Norge. Det er sett at elektrisk forsyning på veien kan supplere den konvensjonelle stasjonære ladeteknikken på en slik måte at behovet for batterier reduseres. Mellom annet gir det muligheten for at flere kjøretøy kan utnytte elektrisk energi i framtiden. Vurderingene som er gjort tilsier også at et samspill mellom elektriske veier og batteri – trolig er den mest klimavennlige og energieffektive drivstoffløsningen som er mulig å få til i Norge i dag.

Videre er det sett nærmere på ulike elektriske veisystemer, og forsøkt å gi en status på disse systemene i dag. Her er det funnet et bredt spekter av løsninger, hvorav samtlige er vurdert å ha klare fordeler og ulemper til hverandre. Siden ladesystemene distribueres på veien medfører det at systemene må ha stor utstrekning, og følgelig blir de derfor også dyre løsninger. Det skjer ennå stor utvikling på området, og det er vanskelig å tro at dette kommer på norske veier innen få år. Studien viser imidlertid svært mange fordeler med elektrisk forsyning på veien, og tilsier at det likevel kun er spørsmål om tid før elektriske veier kommer til Norge. Med dette som utgangspunkt, vurderes også hvordan man kan planlegge og legge til rette for elektriske veier i framtiden. Erfaringen er at svært mange faktorer har betydning for hvordan man distribuerer elektriske ladestier i veinettet. Derfor er det vanskelig å finne en generell framgangsmåte for alle strekninger sett under ett. I en tidlig startfase synes det hensiktsmessig å planlegge elektriske ladestier for hver enkelt veistrekning, framfor å tenke på veinettet i en helhet.

Et viktig punkt i planleggingen er tilmed å forsøke og utnytte eksisterende elektrisk infrastruktur langs veien slik det er i dag. I et konkret eksempel er det derfor sett på konfigurering av elektrisk forsyning til godstrafikken gjennom Rogfasttunnelen. Det er tatt utgangspunkt i planlagt elektrisk infrastruktur i tunnelen, samt at tidligere arbeid beskriver forbruket av elektrisitet til godskjøretøyene som befinner seg på denne strekningen. Enkle beregninger og vurderinger, tilsier at Rogfast skal være kapabel til å forsyne ventet godstrafikk på strekningen i mange år framover.

Abstract

This study investigates opportunities and challenges with electric roads in Norway. To answer this, we study how electric roads can be adapted to supply the traffic in Norway. Here it is found that electric roads can supplement the conventional stationary charging technique in such a way that the need for batteries is reduced. Among other things, this gives the possibility that more vehicles can utilize electrical energy in the future. The assessments that have been made also indicate that an interaction between electric roads and battery - probably are the most climate-friendly and energy-efficient fuel solution that is possible to obtain in Norway today.

Further, various electric road systems have been studied, and attempts have been made to provide a status of these systems today. A wide range of solutions have been found here, all of which are considered to have definite pros and cons to each other. Since the charging systems are distributed on the road, the systems must have a large extent, and consequently they also become expensive solutions. There is still great development in the area, and it's difficult to believe that this will be on Norwegian roads within a few years. However, the study shows many benefits of electrical supply on the road, and indicates that it's still only a matter of time before electric roads come to Norway. With this as a starting point, it's also considered how to plan and facilitate electric roads in the future. The work has shown that many factors influence how to distribute electrical charging paths in the road network. Therefore it's difficult to find a general procedure for all road sections as a whole. At an early stage, it seems appropriate to plan electrical charging paths on each individual road section, rather than thinking about the entire road network together.

An important point in planning is even to try and exploit existing electrical infrastructure along the way as it's today. In a specific example, it's therefore considered to configure electric road supply for freight traffic through the Rogfast tunnel. It's based on the planned electrical infrastructure in the tunnel, and that previous work describes the consumption of electricity for the freight vehicles located on this stretch. Simple calculations and assessments indicate that Rogfast will be able to supply expected freight traffic on the route for many years to come.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	viii
Figurer	x
1 Innledning	1
1.1 Elektrifisering av vei	1
1.2 Bakgrunn i klimaproblemene	3
1.3 Studiens formål	4
1.4 Tidligere arbeid	5
2 Grunnlag for elektrisk vei i Norge	7
2.1 På vei mot framtidens drivstoffteknologi	7
2.2 Klimavennlig drivstoffteknologi	8
2.2.1 Hydrogengass	8
2.2.2 Biogass	9
2.2.3 Batterielektrisitet	10
2.3 Tilgang på fornybare ressurser	11
2.4 Elektrisitet i Norge	11
2.5 Hydrogen og biogass	13
2.6 Elektrisk vei en fellesnevner for alle kjøretøy?	13
2.7 Elektrisk vei og batteri	14
2.8 Økte krav til stasjonær lading	15
2.9 Nye verdier nasjonalt og internasjonalt	17
3 Infrastruktur for elektrisk mobilitet på vei	19
3.1 Lading under kjøring	19
3.2 Dynamiske ladesystemer på vei	20

3.2.1	Kjøreledning	20
3.2.2	Skinnesystemer i veibanen	24
3.2.3	Trådløs lading på vei	27
3.3	Systemdata	30
3.4	Økonomi	30
3.5	Status for dynamiske ladesystemer på vei	31
4	Planlegging av elektrisk vei	33
4.1	Et bredt samarbeidsprosjekt	33
4.2	En startblokk for framtidig ekspansjon	34
4.3	Distribusjon av ladestier	35
4.4	Trafikk og klimagassutslipp	38
4.5	Forbruk og forsyning	41
4.5.1	Harmoni mellom batteri og elektrisk vei	41
4.5.2	Strekning, hastighet og tid	43
4.5.3	Effekt- og energiforbruk på veien	44
4.6	Elektroinstallasjoner	47
5	Konfigurering av elektrisk forsyning i Rogfast	49
5.1	Rogfasttunnelen	49
5.2	Lov, forskrift og norm	51
5.3	Gunstige forutsetninger	52
5.3.1	Beskyttelse mot værmessige utfordringer	52
5.3.2	Tunnelens utforming	52
5.3.3	Terrengprofil	53
5.3.4	Luftkvalitet	53
5.3.5	Trafikkgrunnlag	54
5.3.6	Nettverkstopologi	55
5.4	Elektrisk infrastruktur for godstransport	56
6	Diskusjon	59
6.1	Elektrisk vei i Norge	59
6.2	Teknologien	60
6.3	Alt-i-ett-system	61
6.4	Langdistanse transport	62
6.5	Begynn i det små	64
6.6	Prøveprosjekt i Rogfast?	65
6.7	Konfigurering av elektroinstallasjonen	65
7	Konklusjon	67
	Referanser	69

Figurer

1.1	I framtiden kan infrastruktur for vei mer eller mindre ligne på bilbaner. Foto: Knut Arild Vold	2
1.2	Fordelingen av de ikke-kvotepliktige utslippene i Norge i 2017. Statistikk: Statistisk sentralbyrå (SSB)	3
2.1	Antall hydrogenkjøretøy i Norge de siste seks årene. Tall fra 2018 inkluderer 5 busser og 1 varebil, resten er personbiler. Statistikk: Hydrogen.no	8
2.2	Tall på viktige kjøretøygrupper som benytter metangass i Norge. Statistikk: SSB	9
2.3	Antall (tusen) helelektriske personbiler i Norge de siste seks årene. Statistikk: SSB	10
2.4	Det nordiske strømnettet. Piler viser effektflyt i MW. Illustrasjon: Statnett.no	12
2.5	Infrastruktur for elektrisk vei kan være ekstra krevende både miljømessig og økonomisk. Illustrasjon: Siemens (2017)	14
2.6	Parkering forbeholdt for elbiler kan stå ubenyttet over lengre perioder. Foto: Einar Jørstad	16
3.1	Siemens eHighway. Foto: Siemens (2017)	21
3.2	Trolleybuss i Bergen. Foto: Public-transport.net	22
3.3	Infrastruktur for Siemens eHighway. Foto: InsideEVs.com	23
3.4	Elektriske veisystemer med ulike skinneløsninger i veibanen.	25
3.5	Prinsipptegning for seksjonering av skinnesystemer. Illustrasjon: Elways (2014)	26
3.6	(a) Prinsipiell virkemåte for trådløs lading, og (b) infrastruktur for forsyning på veien.	27
3.7	Renault har testet trådløst lading i Frankrike. Foto: Groupe Renault	28
3.8	Buss som benytter OLEV-systemet i byen Gumi. Foto: KAIST	29
3.9	Svenska Elvägar har arbeidet med elektriske veier siden 2008, og planlegger en litt mer elegant løsning med kjøreledning i framtiden. Illustrasjon: Elvag.se	31

4.1	Elektrisk jernbane krever stedvis nærhet til det overordnede elektriske forsyningssystemet. Illustrasjon: Bane NOR (2014)	35
4.2	Mange steder kan det være hensiktsmessig med felles forsyning for jernbane og elektrisk vei. Foto: Eivind Molde	36
4.3	Absolutte (millioner tonn) og relative utslippsreduksjoner i veitrafikken i Norge som funksjon av at en økt andel av de mest trafikkerte strekningene med europavei (E) og riksvei (N) blir elektrifisert. Figur: Taljegard et al. (2017)	38
4.4	De største hovedveiene i Norge og Norden. Illustrasjon: Vegdata.no . . .	40
4.5	Total energibalanse for to tilfeller med batteriforsyning, sammenlignet med “ideell” direkte forsyning fra elektrisk vei.	42
4.6	Elektriske ladestier må trolig ha egne kjørefelt – enten det er nå, eller i framtiden. Illustrasjon: Highways England	44
4.7	Tyngdekraften i forhold til bevegelsesretningen for to ulike situasjoner. . .	46
4.8	Overordnet flytskjema for planlegging av elektroinstallasjoner	47
4.9	Den naturlige føringsveien for elektrisk energi i tunneler er ofte langs med undersiden av veibanen. Foto: Statens vegvesen	48
5.1	E39 Rogfast. Illustrasjon: Statens vegvesen (2018b)	50
5.2	Terrengprofil for Rogfasttunnelen, sett fra sør mot nord. Tunnellengde (m) langs horisontalaksen og høyde under havet (m) langs vertikalaksen. Illustrasjon: Lotsberg (2015)	53
5.3	Tiltakskostnader pr. tonn CO ₂ redusert ved elektrifisering av hhv. ny eller eksisterende vei, som funksjon av antall kjøretøy over 12,5 meter. Figur: Langhelle et al. (2018)	54
5.4	Illustrasjon av høyspent forsyningsnett i Rogfasttunnelen	55
5.5	eHighway fungerer tilsynelatende selv med tett trafikk. Foto: Siemens AS	58

Innledning

1.1 Elektrifisering av vei

Klimavennlige drivstoffløsninger for veitrafikken har vært et stort tema i flere tiår. Med tiden har vi fått kjøretøy som utnytter blant annet biobrensel, hydrogen, og strøm. Ikke overraskende har det vært både fordeler og ulemper med de ulike løsningene. Det har igjen resultert i hybride kjøretøy, som typisk kan være utstyrt med både fossil forbrenningsmotor og elektrisk motor, nettopp for å overkomme begrensningene ved de ulike drivstoffteknologiene hver for seg. Etterhvert som det har pågått forskning og utvikling på områdene, har de ulike teknologiene både blitt billigere og bedre. Likevel er det ennå et behov for at utviklingen fortsetter, om ikke like stor grad som det den har gjort hittil. For selv om teknologiene tilsynelatende begynner å bli gode drivstoffløsninger, kreves det at de må kunne forsyne et stort antall kjøretøy, til og med innenfor ulike kjøretøygrupper.

De siste årene har det vært en enorm økning i personbiler som utnytter strøm her i Norge. Økningen har vært stor innenfor både hybride og helelektriske biler. Takket være stor utvikling innenfor batteriteknologien, har flere av de helelektriske bilene etterhvert fått “fossil rekkevidde“. Det betyr at de kan kjøre distanser som er noenlunde tilsvarende med fossile biler før man må fylle drivstoff. Når batteriteknologien begynner å bli jevnt over bra hos de fleste av produsentene, betyr det i prinsippet at rekkevidden er avhengig av hvor mange battericeller det mulig å plassere i kjøretøyet. Større og tyngre kjøretøy som lastebiler og busser, har naturligvis et større effektbehov enn personbilene, og krever derfor et større antall battericeller for å opprettholde den samme rekkevidden. En ulempe med battericellene er imidlertid at de fortsatt har relativt høy vekt. Flere battericeller betyr derfor økt kjøretøyvekt, og dermed høyere strømforbruk ved kjøring. Flere battericeller bidrar også til økt negativ klimapåvirkning på grunn av utslippene i produksjonssyklusen til batteriene. En ønsker gjerne at batteriene skal være så små og lette som mulig, men de må også ha tilstrekkelig ytelse og kapasitet til å gjennomføre de tiltenkte arbeidsoppgavene på en god måte. Foreløpig har ikke teknologien kommet langt nok til at rene batteriløsninger er den mest fullgode teknologien særlig for tyngre kjøretøy.

Færre battericeller medfører at kjøretøyene må stanse oftere for å lade. Men hva om det finnes løsninger for å forsyne kjøretøyene med elkraft mens de kjører på veien? Elektriske veier har fått økt oppmerksomhet blant forskningsmiljøene etterhvert som klimapolitikken har blitt mye strengere de siste årene. Blant mange teknologiske nyvinninger på markedet i dag, er ideen med elektriske veier forholdsvis enkel å forstå. De fleste har kanskje prøvd en bilbane, og vet at bilene forsynes med strøm via skinner i veibanen, se **fig. 1.1**. Prinsippet med å overføre strøm fra banen til kjøretøyet, er imidlertid det eneste en bør ta med seg fra denne miniatyrmodellen til virkeligheten. Med hensyn til blant annet drift, vedlikehold, og økonomi, er det ikke hensiktsmessig å bygge ut strømskinner i hele veinettet. Det går mot å bygge strømforsyning langs utvalgte strekninger, og heller bruke batteri som forsyning mellom disse strekningene. Dette innebærer gjerne at kjøretøyene må tilføres mer elektrisk energi på ladestrekningene enn det de forbruker under kjøringen her. På den måten får de “romslig” kapasitet fram til neste ladestrekning, og de kan eventuelt kjøre uavbrutt over lengre distanser. Løsninger med elektrisk forsyning på veiene kan derfor bidra til økt rekkevidde selv med færre battericeller, i tillegg til at tyngre kjøretøy også kan begynne å utnytte elektrisk energi på en fornuftig måte.

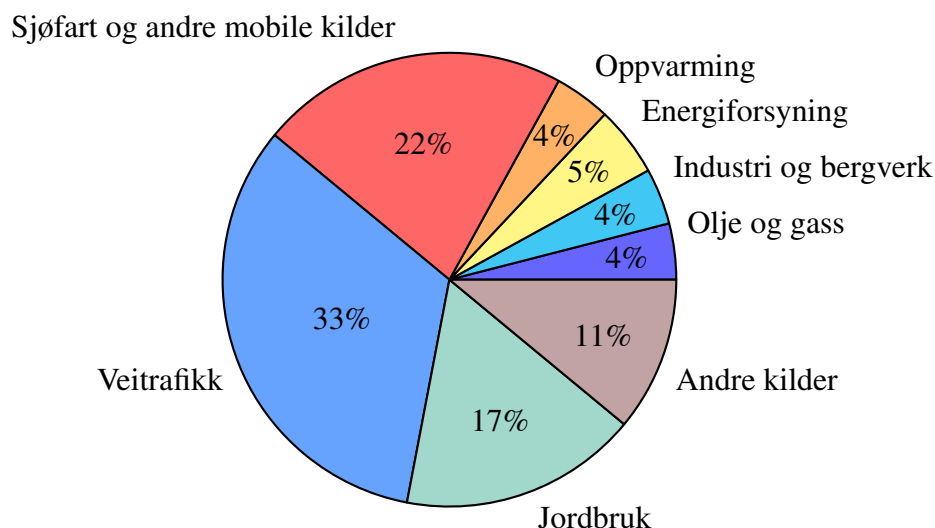


Figur 1.1: I framtiden kan infrastruktur for vei mer eller mindre ligne på bilbaner. Foto: Knut Arild Vold

Med elektrisk forsyning under kjøring kan bilene utnytte energien direkte. Dermed reduserer vi tapene som henger sammen med overføring og lagring av elektrisk energi i battericeller. På den måten reduserer vi også effekt- og energiforbruket på strekningene med elektrisk vei. Elektrisk forsyning på veiene vil i mange tilfeller likevel kreve en storstilt oppgradering av strømnettet lokalt sett. Andre steder derimot, kan det være at infrastrukturen allerede er godt tilpasset slike løsninger, samt at det kan være gunstig med tanke på for eksempel overskuddskraft. Elektriske veier kan fort vise seg å bli den endelige løsningen for å bli kvitt alt av fossile kjøretøy i framtiden. I alle fall hvis man betrakter dette som en interoperatibel løsning sammen med en eller flere av de andre klimavennlige drivstoffløsningene.

1.2 Bakgrunn i klimaproblemene

“Klimaendringene er en av vår tids største trusler“ står det i klimameldingen som regjeringen har lagt fram for Stortinget (Regjeringen, 2017b). Klimameldingen beskriver blant annet hvordan Norge har forpliktet seg til å samarbeide med EU for å redusere klimagassutslippene fram mot år 2030. Dette samarbeidet er forankret i den såkalte Parisavtalen, som er en internasjonal klimaavtale med globalt fokus på tilpasning til klimaendringene og lavere utslipp. EUs bidrag til Parisavtalen er å redusere europeiske utslipp med minst 40% fram mot 2030 – sammenlignet med 1990. Herunder har EU fastsatt nasjonale utslippsmål for de europeiske landene. For Norge innbefatter dette å redusere de ikke-kvotepliktige¹ utslippene med minst 40% fram mot 2030 – sammenlignet med 2005. Dette er en betydelig reduksjon i utslippene, og betyr at Norge må handle raskt og iverksette tiltak på de områdene hvor potensialet er stort. **Fig. 1.2** nedenfor er en oversikt på de ikke-kvotepliktige utslippene i Norge i 2017, fordelt på ulike sektorer.



Figur 1.2: Fordelingen av de ikke-kvotepliktige utslippene i Norge i 2017. Statistikk: Statistisk sentralbyrå (SSB)

Fordelingen viser at veitrafikken representerer den største delen av de ikke-kvotepliktige utslippene i Norge. For å imøtekomme klimamålene fram mot 2030, er det dermed stort potensial i å redusere utslippene fra veiene. Det foregår derfor forskning og utvikling for å finne alternative og klimavennlige løsninger for veitrafikken. Elektrifisering av veinettet har etterhvert blitt et av de viktigste temaene, selv om teknologien kanskje ennå ikke står klar til å bistå den svært omfattende veitrafikken. I kjølvannet av klimapolitikken har dette imidlertid fått større oppmerksomhet enn tidligere, og en ser at de teknologiske løsningene for elektrifisering av vei både blir bedre, og øker i utbredelse.

¹Utslipp som ikke regnes å ha sammenheng med handel eller virksomhet i EUs marked (Regjeringen, 2017b).

I Nasjonal transportplan for perioden 2018–2029, har regjeringen satt seg ambisiøse mål for å redusere klimagassutslippene fra veitrafikken (Regjeringen, 2017a). Mellom annet skal de fleste nye kjøretøy på veien være såkalte nullutslippskjøretøy² innen 2030. Dette gjelder i stor grad også for tyngre kjøretøy som busser og lastebiler. Utslippsreduksjonene skal imidlertid skje uten begrensning i mobilitet, samtidig som det er ventet at transporten på vei vil fortsette å øke i årene framover. En forutsetning for å nå disse målene, er at teknologien og infrastrukturen for alternative drivstoff på veien blir forbedret, slik at det blir fordelaktig å velge nullutslippskjøretøy foran konvensjonelle fossile kjøretøy (Regjeringen, 2017a). Begrensninger i rekkevidde og lademuligheter er nemlig blant de viktigste årsakene til at mange ikke ønsker å investere i batterielektriske kjøretøy (Elbilbarometeret, 2018). For å få flere elektriske kjøretøy på veien i framtiden er det nødvendig å legge til rette med tilstrekkelig ladeinfrastruktur, enten det er infrastruktur for konvensjonell stasjonær lading, eller lading under kjøring.

Teknologisk utvikling handler blant annet om å finne nye anvendelsesområder. Etter en tilpasning til nye oppgaver blir det gjerne muligheter for forbedringer, og slik går utviklingen sin gang. Grunnleggende kunnskap og forståelse er sannsynligvis de viktigste forutsetningene, enten man skal forbedre en teknologisk løsning, eller rett og slett benytte seg av den. Ikke minst er dette viktige forutsetninger når man skal forsøke å planlegge en framtidig teknologisk utvikling innenfor veitrafikken. Utfordringene med å få trafikken over på nye drivstoffløsninger henger nøye sammen med hvor omfattende trafikken på vei er. Det gjelder både med hensyn til utstrekning, så vel som mangfold og antall av kjøretøy. Veitrafikken er også et kompleks samspill mellom mange ulike aktører, som mellom annet har ansvar for å bygge og drifte vei, eller har ansvar for å utforme kjøretøy som er tilpasset til veien og klimaet. En annen ting er at det finnes flere klimavennlige drivstoffløsninger å velge i, og det i seg selv kan gi vel så mange utfordringer – som det gir muligheter.

Elektriske veisystemer er fortsatt relativt ny teknologi, og mange vet ikke engang at det finnes. Andre hevder at teknologien allerede er moden nok, og at den kan bidra med å gjøre veitrafikken utslippsfri. Hittil har det vært relativt liten aktivitet rundt denne teknologien her i Norge. Hvis det skal bli mulig å innføre dette på norske veier innen kort tid, blir vi trolig nødt til å fremme mer kunnskap og erfaring om teknologien.

1.3 Studiens formål

Formålet med denne studien er å identifisere og synliggjøre både muligheter og utfordringer med elektriske veier i Norge. En viktig del av dette, er å undersøke hvordan forholdene ligger til rette med tanke på elektrisk forsyning her i landet. Underveis er det også naturlig å vurdere elektrisk forsyning på veien opp mot andre klimavennlige drivstoffløsninger – likeledes som for tradisjonelle fossile drivstoff. Studien innbefatter å se nærmere på de ulike teknikkene som finnes innenfor elektriske veisystemer, og forsøker å gi et overblikk om hvordan statusen for disse systemene er i dag. Med økt kunnskap og forståelse om elektriske veisystemer, forsøker forfatteren å resonnerer seg til hvordan systemene kan

²Fellebetegnelse for kjøretøy som kun benytter hydrogen eller batterielektrisitet

brukes for å redusere utslippene fra veitrafikken. Det er ingen fasitsvar på hvordan dette vil se ut i framtiden. For ulike aktører innenfor veitrafikken, er det imidlertid hensiktsmessig å være best mulig forberedt på hva som kan komme til å skje. Samtidig er de til en viss grad med på å styre utviklingen selv.

Avslutningsvis skal studien se nærmere på planlegging av elektrisk vei i et pågående veiprosjekt for Statens vegvesen. Som sentral aktør innenfor veibygging i Norge, er det svært viktig med god kunnskap og forståelse omkring infrastruktur på vei. Elektriske veier representerer en stor infrastrukturkostnad, og utbyggere av vei har behov for å vite om løsningene er varige. Igjen er det vanskelig å spå framtiden. Forsyningsløsninger på vei er nemlig forholdsvis ny teknologi, og er ennå under utvikling. Det gjør at det er vanskelig å vurdere levetiden til disse systemene. I denne studien tas det sikte på å berøre disse utfordringene nærmere, samt forsøke å vise mulighetene som kan bidra til å forbedre framtidsutsiktene for elektriske veisystemer.

1.4 Tidligere arbeid

Elektriske veisystemer favner relativt bredt i litteraturen. Det skyldes at det er mange forhold som vedrører til elektriske veisystemer, på samme måte som gjelder for veitrafikken forøvrig. Det åpner også mange muligheter for å drive med forskning og utvikling på området. Selv om elektriske veisystemer omfavner mange kunnskapsområder, er det tilsynelatende mange av områdene som allerede har fått “god dekning”. Disse områdene underbygges ofte av svært detaljerte betraktninger, noe som også gjerne krever gode ferdigheter.

I denne studien er det forsøkt å ha en så subjektiv tilnærming som mulig. Med det menes at progresjonen i arbeidet, og de avveiningene som tas, i størst grad er basert på de betraktninger som forfatteren selv sitter med. Til tider har dette også vært nødvendig. Både med hensyn til bruk av tid, og fordi tilgjengelig litteratur bare til en viss grad kan gi konkrete svar på spørsmålene rundt elektriske veisystemer ennå. Siden kunnskapen om ulike veisystemer har vært manglende for forfatteren sin del, har det oppstått et behov for å finne litteratur på dette området. Underveis har man gått gjennom mye stoff, og deler av dette har naturligvis vært til inspirasjon for arbeidet. Rapporten slik den framtrer i sin helhet, er derfor en tydelig miks av forfatterens egne betraktninger, og med inspirasjon fra tidligere studier og arbeid.

Tidligere arbeid som har hatt stor betydning for arbeidet med denne rapporten er hovedsakelig ELinGO-prosjektet³. Forsknings- og utviklingsprosjektet ELinGO er en omfattende studie som foregikk i perioden 2016–2018, med mål om å bidra til elektrifisering av godstrafikken på vei i Norge (Langhelle et al., 2018). ELinGO har studert teknologiene for elektriske veisystemer, gjort nokså omfattende økonomiske betraktninger om elektrisk vei, og vurdert viktige betingelser i forbindelse med samfunn, miljø, og klima. ELinGO er på mange måter et godt utgangspunkt til å vurdere elektriske veisystemer i Norge.

³ELinGO- Elektrisk infrastruktur for godstransport

Grunnlag for elektrisk vei i Norge

2.1 På vei mot framtidens drivstoffteknologi

Innledningsvis ble det nevnt at det finnes nyere og mer klimavennlige kjøretøy, kontra de konvensjonelle kjøretøyene som utnytter fossilt brensel. I tillegg til kjøretøy som utnytter elektrisitet, er dette typisk teknologi som utnytter biogass eller hydrogengass som drivstoffmiddel. Når det i dag bygges nye veier, er det svært viktig at det blir lagt til rette for at nettopp disse teknologiene kan utnyttes på en god måte. På den måten blir de klimavennlige alternativene mer konkurransedyktige i forhold til de kjøretøyene det finnes flest av i dag, og som utnytter fossilt drivstoff.

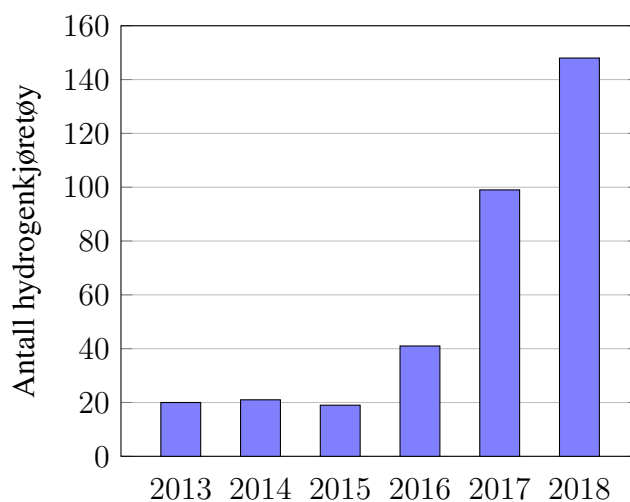
Et spørsmål som dukker opp, er om det skal legges til rette for alle mulige klimavennlige drivstoff på veien, eller om det er mer hensiktsmessig å velge én retning, slik at alle kjøretøyene kan benytte samme drivstoffteknologi. På den annen side, er det kanskje mer hensiktsmessig å benytte ulike drivstoffteknologier til ulike formål, som f.eks. til transport over lengre distanser, og kollektivtrafikk i byer. Det er nemlig ikke sikkert at en type teknologi egner seg best til alle formål, eller at én teknologi for absolutt alle kjøretøy gir best mulig samfunnsøkonomisk resultat totalt sett. Derimot er det rimelig å anta at et variert mangfold av drivstoffteknologier faktisk sikrer best mulig utnyttelse av tilgjengelige energiressurser.

Vi befinner oss ennå i en tidlig overgangsfase fra fossile kjøretøy til mer klimavennlige alternativer. Det innebærer at det nærmest er umulig å få til en fullt optimal løsning i utnyttelsen av ulike energibærere på kort sikt. Det er også vanskelig å forutse hvilken sammensetning av ulike teknologier som vil være den mest optimale løsningen i framtiden. Det som derimot er sikkert, er at utviklingen innenfor klimavennlige drivstoffteknologier stadig går framover. Et viktig steg underveis i utviklingen, er at teknologien blir tatt i bruk og testet i større skala. Teknologiske framskritt er nemlig ofte et resultat av at man forsøker å forbedre allerede eksisterende løsninger. For å nå klimamålene innen 2030, er det derfor viktig at Norge satser på den eller de teknologiene hvor potensialet er stort i dag.

2.2 Klimavennlig drivstoffteknologi

2.2.1 Hydrogengass

Et hydrogenkjøretøy er som navnet tilsier, et kjøretøy som utnytter hydrogen som drivstoff. Motoren som skaper framdrift til kjøretøyet utnytter elektrisk energi som produseres i en brenselcelle, der hydrogen og oksygen virker som “brennstoff”. Restproduktet av den kjemiske reaksjonen mellom hydrogen og oksygen er rent vann, og tilsier at kjøretøyene i seg selv er svært klimavennlige. Til tross for dette har hydrogenkjøretøyene ennå ikke gjort sitt inntog her i Norge. **Fig. 2.1** viser at det foreløpig bare er en liten bestand av hydrogenkjøretøy i Norge, selv om økningen siden 2015 har vært relativt stor. Avgjørende faktorer kan være begrenset utvalg i kjøretøy og fyllestasjoner (Blaker, 2018).



Figur 2.1: Antall hydrogenkjøretøy i Norge de siste seks årene. Tall fra 2018 inkluderer 5 busser og 1 varebil, resten er personbiler. Statistikk: Hydrogen.no

Potensialet for hydrogenkjøretøy i framtiden er uansett relativt stort, fordi hydrogen kan fungere som en energibærer for fornybare energikilder. Ulempen er imidlertid at hydrogenatomene er bundet til andre stoffer, som f.eks. vann, og det er nokså ressurskrevende å spalte hydrogenet til ren form slik vi utnytter det i kjøretøyene. Ren hydrogengass kan produseres ved elektrolyse av vann, hvor en utnytter elektrisk energi for å skille hydrogenatomene fra oksygenbindingene. Prosessen fra elektrisitet til bevegelse via hydrogen, kan ha en samlet virkningsgrad på mellom 30 og 35 prosent (Regjeringen, 2016). Kjøretøy som utnytter elektrisk energi direkte fra veien, vil med det være i størrelsesorden 3 ganger mer energieffektive enn kjøretøy som går på hydrogen fra elektrolyse.

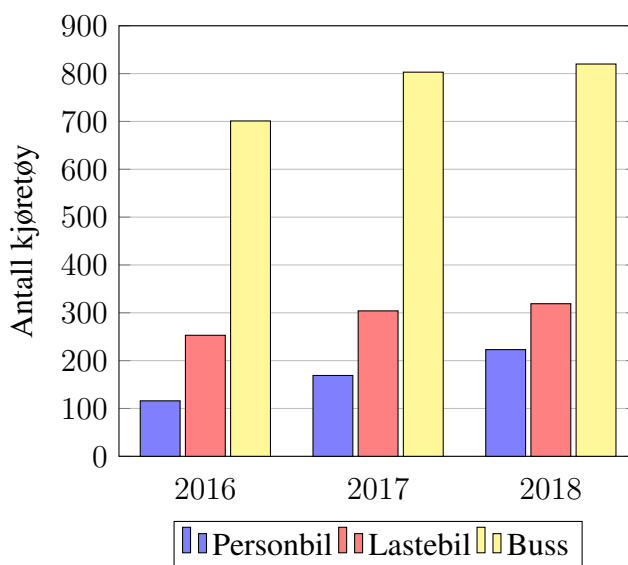
En viktig fordel med hydrogenkjøretøyene, er at både produksjon og forbruk av hydrogen er utslippsfritt. Det gjelder i alle fall så lenge at elektrisiteten som benyttes til å produsere hydrogengassen kommer fra fornybar energi. Et aktuelt tema er at i framtiden kan overskuddskraft fra fornybare energikilder benyttes til å produsere hydrogengass, og på den måten kan vi lagre og utnytte energi som ellers ville gått tapt.

2.2.2 Biogass

På lik linje med hydrogenkjøretøy, kan kjøretøy som utnytter biogass kalles for biogasskjøretøy. Biogass er hovedsakelig en blanding av metangass (CH_4) og karbondioksid, og oppstår når organiske materialer råtner uten at det er tilgang på luft (Løvaas, 2016). Dette er helt naturlige prosesser i organiske kretsløp, og innebærer på en måte at biogass er en fornybar naturgass. Naturgass skyldes nemlig nedbrytning av fossilt organisk materiale, og forekommer blant annet som et biprodukt ved oljeutvinning. På samme måte som biogass, består naturgass av en stor andel metangass, og det er metangassen som fungerer som drivstoff. Biogass er på den annen side metangass som er produsert ved menneskestyrt forråtnelse av f.eks. matavfall, eller husdyrgjødsel.

Framdriftssystemet i biogasskjøretøy består av en forbrenningsmotor som altså bruker metangass som brennstoff. Metangassen reagerer med oksygen, og skaper en knallgass på samme måte som i fossile forbrenningsmotorer. Restproduktet av forbrenningen er vann og karbondioksid. I motsetning til hydrogenkjøretøy, har kjøretøy som utnytter biogass derfor utslipp av karbondioksid. Dette kan vi imidlertid se bort i fra, fordi CO_2 -utslippene fra organisk avfall er like stort enten det har gått med til biogassforbrenning eller ikke. Biogass er derfor en klimanøytral fornybar energikilde, og kan brukes til å dekke et energibehov for kjøretøy. Kjøretøy som utnytter biogass kan imidlertid bidra til såkalt "lokal forurensing" pga. CO_2 -utslippene, men de tilfører ikke ny CO_2 til jordens atmosfære slik som de fossile kjøretøyene gjør (Avfall Norge, 2017).

I Norge er metangass som drivstoffkilde mest utbredt blant tyngre kjøretøy som busser og lastebiler. Blant disse to kjøretøygruppene er det også en betydelig større andel som benytter metangass, enn hva som gjelder for hydrogen og batterielektrisitet som drivstoffløsning.

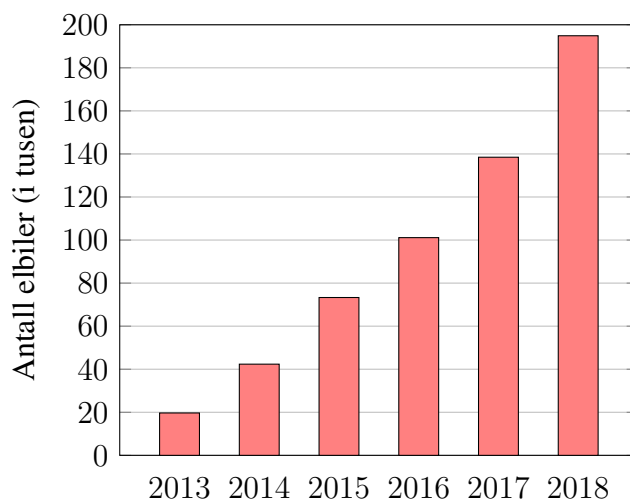


Figur 2.2: Tall på viktige kjøretøygrupper som benytter metangass i Norge. Statistikk: SSB

Fig. 2.2 viser at det har vært en økning innenfor samtlige kjøretøygrupper de siste tre årene. Økningen har vært størst blant personbilene, men de henger likevel langt etter, tatt i betraktning at det finnes mange flere personbiler enn hva det gjør av lastebiler og busser. Til sammenligning var det i slutten av 2017 over 55.000 kjøretøy i Sverige som utnyttet metangass hovedsakelig fra biogass, og over 50.000 var personbiler og mindre varebiler (Energigas Sverige, 2018). Det er derfor rimelig å påstå at biogass i veitransporten i Norge foreløpig ikke er godt nok utnyttet. Særlig ikke blant de minste kjøretøyene. En fordel med biogass som drivstoffmiddel er imidlertid at det har vist seg å fungere godt også for de større kjøretøygruppene. Således er potensialet for å redusere klimagassutslippene stort ved å benytte biogass.

2.2.3 Batterielektrisitet

Batterielektriske kjøretøy som utnytter opplagret elektrisk energi, er den alternative drivstoffteknologien som inntil nå har fått klart størst utbredelse totalt sett her i Norge. Utbredelsen er imidlertid nesten utelukkende begrenset til personbilene. **Fig. 2.3** viser tall på helelektriske personbiler i Norge de siste seks årene. Det har vært en jevnt høy vekst i denne perioden, og årsakene til det kan være mange. For det første er mange innforstått med at elbiler er klimavennlige, og for mange har det å eie en elbil blitt en slags sosial aksept. I Norge er det og en fordel at det meste av den elektriske energien vi bruker til å lade elbilene med, kommer fra fornybar energi. Ikke minst har også økt rekkevidde, økt tilgang på ladestasjoner, samt økonomiske incentiver bidratt mye til å fremme veksten.



Figur 2.3: Antall (tusener) helelektriske personbiler i Norge de siste seks årene. Statistikk: SSB

Det pågår stadig en debatt om hvorvidt elektriske kjøretøy er mer klimavennlige sammenlignet med konvensjonelle fossile kjøretøy. Argumentene mot elektriske kjøretøy faller i stor grad på hvor den elektriske energien som benyttes til å produsere og lade batterier kommer fra. Bedre utnyttelse av fornybare energikilder som f.eks. sol- og vindkraft, bidrar til at elektriske drivstoffløsninger blir mer klimavennlige også flere steder utenfor Norge.

For tyngre kjøretøygrupper har biogass, eller generelt metangass, gjort større inntreden enn det batterielektriske løsninger har greid foreløpig. En stor ulempe med batterielektriske løsninger for tyngre kjøretøy, er som nevnt at det kreves relativt mange battericeller for å oppnå en viss rekkevidde. Andre ulemper som omrammer dette, er blant annet forholdsvis kort levetid på batterier, og at de er nokså ressurskrevende å produsere. Teknologisk utvikling kan bidra til et helt annet bilde om bare få år fram i tid. En tidobling i antall elbiler i Norge på bare seks år er et godt eksempel på nettopp det (**fig. 2.3**).

2.3 Tilgang på fornybare ressurser

Antall kjøretøy som utnytter fornybare drivstoffteknologier i dag, i tillegg til de som er ventet på markedet, er viktige argumenter for hvilke drivstoffteknologier det er hensiktsmessig å satse på i årene som kommer. Andre viktige momenter er:

- tilgjengeligheten av de fornybare ressursene i dag
- infrastrukturen for distribusjon av disse ressursene

For å nå klimamålene er det viktig å utnytte de fornybare energiresursene vi har på en god måte. Det innebærer blant annet å utnytte de ressursene vi har mye av, som altså har høy grad av tilgjengelighet. Tilgjengeligheten av ulike ressurser er ofte et resultat av naturgitte betingelser, men det kan også i større eller mindre grad bli påvirket av oss mennesker, som f.eks. ved magasinkraftverk¹. I bunn og grunn er tilgjengeligheten endatil avhengig av tiltakene som gjort for å utnytte eller foredle de ulike ressursene.

I mange tilfeller er tilgjengeligheten størst på steder der behovet er minst. Det skyldes blant annet at vi bosetter oss mer og mer i urbane strøk. Infrastruktur for å distribuere disse ressursene er dermed vel så viktig som ressursene i seg selv. Hvor omfattende infrastruktur som kreves avhenger igjen av hvor stort behovet er, og hvorhen behovet ligger. Dersom kjøretøy i framtiden skal forsynes med elektrisitet på veien, vil det i mange tilfeller kreve en utbygging av strømmettet, enten det er i byene eller ute i distriktene. På den annen side kan økt infrastruktur langs med veiene, føre til at det blir fordelaktig å utnytte mer av fornybare energikilder som sol- og vindkraft i framtiden (Langhelle et al., 2018).

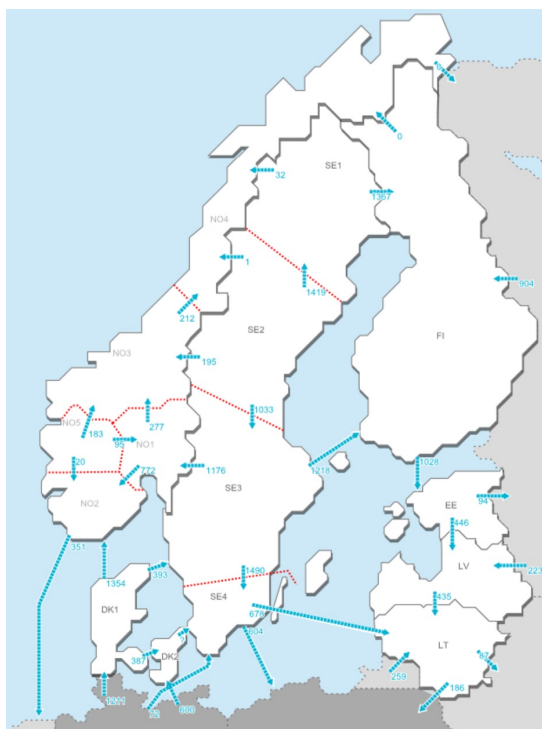
2.4 Elektrisitet i Norge

Elektrisitet i Norge har en lang og innholdsrik historie. I begynnelsen ble elektrisiteten hovedsakelig brukt til belysning, men etterhvert oppdaget man mange flere måter å anvende denne energibæreren på. Det medførte at teknologien utviklet seg raskt, og den har stadig spredt seg til nye bruksområder. I dag kan elektrisk energi på sett og vis brukes til alle mulige formål, og vi har tilgang på elektrisitet bortimot overalt hvor vi befinner oss. Elektrisk kraft står altså sterkt her i Norge, og mye av det skyldes naturgitte forutsetninger med variert terreng og vesentlig vått klima. Inspirert av norske sagbruk som ble drevet av

¹Vannkraftverk som bruker opplagret vann fra et magasin eller en kunstig dam.

vannkraft, vokste det fram mange vannkraftverk allerede rundt starten av 1900-tallet. Det ble dermed økt tilgang på elkraft her i landet, og det la grunnlaget for ny og tung industri. Norge har derfor en lang tradisjon med produksjon og bruk av elektrisk energi, og det har bidratt til at vi har ledende teknologiske miljøer innenfor elfagene. På grunn av de naturmessige utfordringene har Norge også ledende fagmiljøer innenfor veibygging. Dette er utvilsomt viktige forutsetninger i utviklingen av elektriske veier her i landet.

Elektrisiteten her i landet er i all hovedsak klimavennlig. Produksjon av strøm er nesten utelukkende basert på fornybare kilder, og det meste av produksjonen kommer fra vannkraft. Det skyldes at tilgjengeligheten på vannkraft er stor, og at det er gjort store tiltak med å bygge ut kraftverk for å foredle vannet. Samtidig med at tilgjengeligheten er stor, er infrastrukturen for forsyning av elektrisitet svært omfattende. Hele Norges fastland omfattes av ett stort, og sammenkoblet strømmnett. Strømlinjene er videre koblet sammen med flere av de nordiske nabolandene – så vel som flere andre land via undersjøiske overføringskabler. På den måten kan vi importere og eksportere elektrisk energi via de kraftlinjene vi har til våre naboland. Strømmettet utgjør derfor en svært robust energiinfrastruktur, og kan levere store mengder energi på svært kort varsel.



Figur 2.4: Det nordiske strømmettet. Piler viser effektflyt i MW. Illustrasjon: Statnett.no

Hvordan strømmen flyter i nettet er til dels styrt av prisene på energi, og det medfører i perioder at Norge importerer ikke-klimavennlig kraft fra andre land. Norge bidrar imidlertid med grønn energi når de eksporterer kraft til andre land. På en årlig basis, har Norge som regel en netto eksport av elektrisk energi. I prinsippet betyr det at vi har et overskudd av elektrisk energi her i landet. Det er i seg selv en god forutsetning for å begynne å etablere elektriske veier, og på den måten legge til rette for flere elektriske kjøretøy.

2.5 Hydrogen og biogass

Overskudd av elektrisk energi aktualiserer mulighetene for å etablere mer elektrolysebasert hydrogenproduksjon. Mesteparten av hydrogenproduksjonen i dag, foregår ved å spalte hydrogen fra bindinger med karbon, og ikke ved elektrolyse som gjerne anses for å være den mest klimavennlige framgangsmåten (DNV GL, 2019). Størsteparten av hydrogenet som produseres i Norge i dag blir også brukt i industri, mens bare en liten del er tilgjengelig for å benytte til veitransport. Dette tyder derfor på at hydrogen som drivstoffmiddel har en lang vei å gå før det får stor innflytelse på veitransporten her i Norge.

Det er derimot større produksjon av biogass til veitransporten, og betydelig flere fyllestasjoner enn med hydrogen. Mange av fyllestasjonene er imidlertid ikke kommersielle fyllestasjoner, men forbeholdt til f.eks. kollektivbusser eller lignende kjøretøy. Det er kanskje denne rollen vi må forvente at biogassen vil ha også i framtiden, som et supplement til en eller flere andre drivstoffteknologier. Det er ikke ventet at mengden organisk avfall vil gå ned, tvert imot, men det er heller ikke tenkelig at biogass skal kunne dekke behovet for all veitransport (Avfall Norge, 2017). Vi vil naturligvis fortsette å håndtere avfall også i tiden framover, og veitransporten bør dermed bidra til å utnytte denne ressursen.

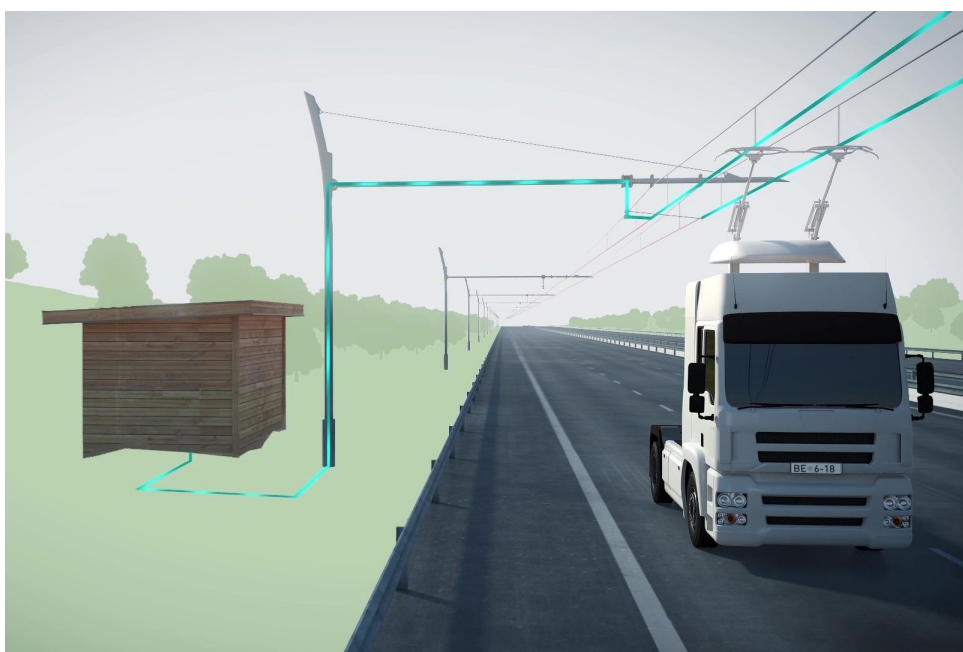
2.6 Elektrisk vei en fellesnevner for alle kjøretøy?

Med stor tilgang på elektrisitet nesten overalt her i Norge, er det vanskelig å se for seg at framtidens drivstoffteknologi skal være helt foruten elektrisk energi. Tvert imot, det er heller mye som tyder på at elektrisk energi vil være den store bærebjelken blant drivstoffteknologiene i veitrafikken her i landet. Uansett om vi benytter batterielektrisitet, eller hydrogen fra elektrolyse, så må strømmen produseres først. I neste steg så ser vi også at ved å utnytte strømmen direkte, uten å omforme energien via et batteri eller hydrogen, så blir virkningsgraden størst.

I et klimaorientert samfunn er virkningsgraden naturligvis et svært viktig begrep. Derfor er det rimelig å tro at elektrisk vei etterhvert kan bli en felles løsning for flere alternative drivstoffteknologier, og ikke nødvendigvis kun for de kjøretøyene som har batteri. Hydrogenkjøretøyene benytter også elektriske motorer, og kan derfor i teorien forsynes direkte med strøm langs veibanen. Det kan også hende at kjøretøy som benytter biogass etterhvert kan begynne å produsere strøm til en elmotor, enten via en forbrenningsmotor, eller en brenselcelle med biogass som brennstoff. Hvert enkelt kjøretøy får dermed mindre behov for energilagre, og det åpner muligheten for flere kjøretøy med blant annet hydrogen og biogass som drivstoffmiddel. Vi kan altså få tre forskjellige slags “hybrider”, som alle kan utnytte elektrisitet langs veibanen direkte, og med høy virkningsgrad. De ulike drivstoffene vi bruker utover dette, bidrar også til best mulig utnyttelse av andre tilgjengelige energiresurser. På den måten blir den totale virkningsgraden til veitrafikksystemet best mulig. Hvis vi først skal bygge elektrisk infrastruktur på vei, ligger en stor del av lønnsomheten i at mange faktisk kan benytte seg av dette. Offentlig satsing på elektriske veier som en felles løsning for flere klimavennlige drivstoffalternativer, kan også anses for å være en likeverdig og nøytral støtteordning til ulike teknologier.

2.7 Elektrisk vei og batteri

Av de klimavennlige drivstoffteknologiene, så er en løsning med batterier kanskje mest nærliggende å benytte seg av på elektriske veier akkurat i dag. Elektrisk vei kan tilpasses til de batterielektriske kjøretøyene, ved at kjøretøyene blir mottakelige for å lade på veien på samme måte som de lader på stasjonære ladeuttak. I prinsippet høres dette veldig enkelt ut, men i virkeligheten er det imidlertid en del utfordringer som må tas hensyn til. Utfordringene innbefatter blant annet at det må gjøres større eller mindre konstruksjonsmessige inngrep på kjøretøyene, at deler av kjøretøyene skal være i kontakt med stillestående deler i veikonstruksjonen, eller at elektrisk infrastruktur i veikonstruksjonen utgjør en fare mot mennesker eller dyr. Ikke minst er det et spørsmål om store investeringskostnader. Til tross for en del praktiske utfordringer, er nok sistnevnte en av de viktigste årsakene til at elektriske veier ikke har kommet lenger i dag.



Figur 2.5: Infrastruktur for elektrisk vei kan være ekstra krevende både miljømessig og økonomisk. Illustrasjon: Siemens (2017)

Gevinsten ved å løse utfordringene med elektrisk forsyning i fart er imidlertid veldig stor. Det har ført til at det etterhvert har kommet flere ulike teknologier som kan brukes på dette området. I bakgrunnen for det hele ligger klimaproblemene og dekarbonisering av vei-transporten, men for batterielektriske kjøretøy isolert sett, så bidrar elektriske veier nemlig til økt rekkevidde. Vi kan dermed oppnå samme rekkevidder som før også med mindre batteripakker. For kjøretøyene totalt sett er batterikostnaden relativt stor, og elektrisk vei kan dermed bidra til å redusere kostnadene på kjøretøy. Batterivekten er også relativt stor, og elektrisk vei kan dermed bidra til å øke nyttelasten. Økt nyttelast er selvfølgelig svært fordelaktig for blant annet lastebiler som gjerne ønsker å transportere mest mulig last pr. tur. Dette henger altså sammen med at kjøretøyvekten blir lavere, som i seg selv er et svært viktig steg i retning av å elektrifisere også tynge kjøretøygrupper.

En viktig fordel med elektrisk vei og batteri, er at det åpner mulighetene for “uendelig” kjørelengde. Avhengig av effektbehovet til kjøretøyet, og mulighetene for effektuttak fra veien, kan man i mange situasjoner både lade batteriene og få direkte forsyning til elmotorene. Dermed får vi omtrent maksimal utnyttelse av kjøretøyene. Andre hybride løsninger må på et eller annet tidspunkt uansett stoppe for å fylle tanken – såfremt det ikke bygges elektriske veier overalt. Det er imidlertid ingenting som tyder på at det sistnevnte kommer til å skje.

Elektrisk vei og batteri representerer en synergi som kan være med å gjøre veitrafikken mest mulig energieffektiv. Bremsing under kjøring er i seg selv et energitap som kun går med til varmeutvikling. Kjøretøy som drives av elmotorer kan imidlertid regenerere mye av denne energien, og dermed øke energieffektivitet til systemet. Elektriske kjøretøy gjør dette i dag, ved at bremseenergien går med til å lade de interne batteriene. Men hva skjer hvis de interne batteriene er fulladet og man blir nødt til bremse? Dette er sannsynligvis en nokså uvanlig situasjon i dag, men det som da vil skje er at energien går tapt. En slik situasjon kan imidlertid bli mer aktuell dersom vi får elektriske veier, men da kan også bremseenergien mates tilbake til det distribuerte strømmettet langs veien. Bremseenergien kan så utnyttes av andre egnede kjøretøy, eller av andre forbrukere på det overliggende nettet. Bremseenergi er naturligvis uavhengig av om man befinner seg på eller utenfor elektriske ladestier, og batterielektriske kjøretøy bidrar derfor til bedre utnyttelse av denne energien. Generelt er det kanskje mindre sannsynlig med elektriske ladestier i nedoverbakker pga. at kjøretøyene da vil ha lavt forbruk. Kjøring i nedoverbakker forbindes normalt gjerne med bremsing, og batteriene er derfor viktig for å utnytte denne “overskuddsenergien” på best mulig måte. Bremseenergi til lading av internt batteri er normalt også mer effektivt enn å levere energien ut på nettet på igjen.

2.8 Økte krav til stasjonær lading

Norge er et av verdens største marked for elektriske personbiler. Sett i forhold til befolkningstall, har Norge klart størst andel elbiler per innbygger (EV-volumes.com, 2019). Tall fra nybilsalget i mars 2019, viser at det ble solgt 10 728 nye helelektriske personbiler, og med en markedsandel på 58,4% (OFV, 2019). En høyere markedsandel er aldri før blitt registrert her i landet. Økningen i antall elbiler medfører dermed at det blir et økt behov for elektriske ladestasjoner. For å imøtekomme et stadig økende behov må det derfor bygges flere ladestasjoner. En ulempe med lading av elbil er at det fortsatt er relativt tidkrevende sammenlignet med å fylle drivstofftanken med fossilt brensel. Tidkrevende lading medfører at ladestasjonene gjerne må ha mange ladeuttak, og de må derfor ha stor utstrekning og samlet sett et høyt maksimalt effektuttak. Med svært mange ladeuttak kan man og tenke seg at hvert enkelt uttak får dårligere utnyttelsesgrad, ved at de i perioder står ubenyttet over lengre tid, se **fig. 2.6**.

Elektrifisering av vei kan imidlertid bidra til at behovet for stasjonær lading blir redusert. Dermed blir behovet for nye stasjonære ladestasjoner også redusert. En annen måte å se det på, er at det blir mindre ladekøer på stasjonene vi allerede har. Færre biler trenger å lade samtidig, og det blir dermed raskere ladeopphold for enhver.



Figur 2.6: Parkering forbeholdt for elbiler kan stå ubenyttet over lengre perioder. Foto: Einar Jørstad

Ladestasjoner er som nevnt krevende infrastruktur, både plassmessig, men også med hensyn til høye effektuttak fra nettet. Helt siden elbilene begynte å komme på markedet, har spørsmålet om ladetid blitt mye diskutert. En av de viktigste ulempene med elbiler har altså vært treg lading. Å lade batteriene i en elbil, fungerer i prinsippet på samme måte som når man fyller tanken med bensin eller diesel. Tiden det tar å fylle er avhengig av volumet på tanken og volumstrømmen fra drivstoffpumpa. Selv om ladetiden er for mange en viktig faktor, må tankvolumet, og dernest rekkevidden anses for å ha aller størst betydning. For å beskrive selve energioverføringen til batteriet er det derfor energistrømmen per tidsenhet, og ladetiden som er de bestemmende faktorene. Når elektrisk energi skal overføres til et batteri bruker vi altså elektrisk effekt om denne energistrømmen. Energioverføringen kan dermed uttrykkes som et produkt av effekt og ladetid.

$$Energi = Effekt * Tid \quad (2.1)$$

Dersom tiden for å lade et gitt batteri skal reduseres så må effekten økes, jf. likning (2.1). Det har etterhvert ført til såkalte hurtigladerne, som altså lader raskere enn før ved at de benytter høyere effektoverføring. Med som så mange andre ting, finnes det også fysiske begrensninger i forbindelse med lading av batterier, og det er ikke slik at vi i framtiden kan forvente oss øyeblikkelig lading selv om utviklingen har gått raskt framover de siste årene. Ikke desto mindre er hurtigladerne relativt store belastninger på forsyningsnettet, nettopp fordi vi forsøker å lade så raskt som mulig. Elektrisk forsyning på veien kan imidlertid bidra til at effekt- og energiuttaket blir bedre fordelt både i tid og rom (Langhelle et al., 2018). En tidsmessig og geografisk fordeling av belastningene på nettet er generelt nok så gunstig rent elektroteknisk sett. På den måten blir den reelle forsyningsevnen til nettet størst mulig.

2.9 Nye verdier nasjonalt og internasjonalt

Elektrisk vei kan bidra med å skape nye verdier her i Norge. I kapp med klimaendringene er fokuset sterkt rettet mot tiltak som kan bidra med å skape et mer bærekraftig samfunn, både her i landet så vel som verden forøvrig. Norge har vært i førerretet ved flere anledninger hva gjelder teknologiske nyvinninger, og kanskje aller mest innenfor området med fornybare løsninger. Vi innledet blant annet verdens første batteriferje “Ampere” i 2015. Det er også nylig bestemt at norske selskaper skal bygge verdens første ferje som går på hydrogen (Vadset, 2019).

Norge har kommet langt med å overføre transportløsninger til batteri, men vi henger ennå langt etter land som f.eks. Sverige og Tyskland når det gjelder å få til elektriske ladesystemer på vei. Dette er likevel en stor mulighet for Norge til å leve opp til sitt rykte som en sentral aktør innenfor fornybare energiløsninger. Selskaper her i landet er godt rustet med kunnskap om teknologi, og mange ønsker at vi skal være helt i toppen når det gjelder å utvikle nye bærekraftige løsninger. På mange måter er jo dette en konkurransesituasjon mellom ulike land og selskaper, der penger helt klart spiller en viktig rolle. Det er ikke dermed sagt at vi ikke skal bidra med kunnskap til andre, selv om de også ligger foran oss i utviklingen. Snarere tvert i mot. Klimaendringene er en global miljømessig utfordring, og det er derfor vel så viktig at Norge bidrar slik at andre eventuelt kan ta steget videre. Hva er vel penger verdt dersom klimaet og miljøet forfaller?

Trafikk på vei er et område som de aller fleste land har til felles med hverandre. Elektrisk vei kan derfor bidra med å skape nye verdier i at det knyttes sterkere relasjoner internasjonalt. For Norge sin del er det fordelaktig at vi raskt kan få kunnskap om ny teknologi, ved å se på hva andre har gjort før oss til nå. Vi bør likevel delta aktivt selv, for eventuelt å tilpasse løsninger slik at det blir gjort mest mulig hensiktsmessig med hensyn til de forholdene som opptrer her i landet. Mye tyder på at elektrisk vei legger til rette for at det blir mer fordelaktig å utnytte også andre drivstoffteknologier i ulike hybrider. Dermed kan vi skape nye verdier i ny kjøretøyteknologi og infrastruktur langs med veiene.

Selv om teknologiutvikling nå om dagen ofte kan medføre at arbeidsplasser går tapt, er det derimot rimelig å tro at satsing på elektriske veisystemer kan bidra med å skape mange nye arbeidsplasser. Dette er faktisk svært viktig, fordi konsekvensene av å gjøre klima- og miljømessige tiltak i trafikken kan medføre mange færre arbeidsplasser i forbindelse med olje- og gassindustrien her i Norge.

Infrastruktur for elektrisk mobilitet på vei

3.1 Lading under kjøring

Hittil har det vært vanlig å stanse på dedikerte områder for å lade batteriene i elektriske kjøretøy. Dette kalles gjerne for stasjonær lading, fordi kjøretøyet står i ro mens det lader. I begynnelsen var det hovedsakelig stasjonær lading via kabel, men etterhvert har det også blitt mer vanlig med stasjonære trådløse ladestasjoner som overfører energi til kjøretøyet via magnetiske felt. Nå ønsker vi også å lade kjøretøyene våre mens vi befinner oss på veien. De som har prøvd elbil kjenner kanskje til at det svært irriterende å stanse tidligere enn planlagt på grunn av for dårlig batterikapasitet. Verre er hvis batteriene går tomme når det ikke er lademuligheter i nærheten. Mange er nettopp av den oppfatning at batteriene altfor ofte blir dårlige på de mest ugunstige tidspunktene. Lading under kjøring kan kanskje bidra til å redusere ulempene med å stanse for å lade kjøretøyet underveis på en strekning. Likevel er det reduksjon av batterienheter og fossile utslipp, ved at større kjøretøy også kan begynne å benytte seg av strøm på veien, som er i størst fokus hva gjelder å få i stand elektriske forsyningsløsninger på veinettet.

For å bidra til elektrifisering av flere kjøretøy på vei, er det gjort storstilt innsats i å utvikle teknologiske løsninger for å supplere den konvensjonelle stasjonære ladeteknikken. Løsningene går altså ut på lading av kjøretøyene mens de faktisk kjører på veien. Lading i fart er derfor framtidsrettet og opportunistisk. Det kan bidra til å gjøre transporten på vei utslippsfri, og det gjør det mulig å lade der kjøretøyene allerede befinner seg. Lading i fart bidrar derfor til økt mobilitet for elektriske kjøretøy, og legger samtidig til rette for flere elektriske kjøretøy på veiene.

Electric Road Systems er et begrep som omfatter alle teknologier som muliggjør elektrisk energioverføring til kjøretøy i fart. Til å beskrive enkelte ladeteknikker kan man i stedet bruke betegnelsen *dynamisk ladesystem*. Dynamisk henviser her til at ladingen foregår i fart. Blant dynamiske ladesystemer på vei finner vi løsninger som benytter både gammel og ny teknologi, og det jobbes til stadighet med å forbedre disse løsningene. De ulike ladesystemene har mange likheter, men også betydelige forskjeller, og de vil derfor ha forskjellig grad av tilpasningsdyktighet i ulike situasjoner. Det vil si at et ladesystem som

passer godt i tørt og varmt klima, ikke nødvendigvis passer like godt inn her i Norge, nettopp på grunn av klimatiske forhold. En av likhetene derimot, er at alle ladesystemene krever en viss tilgang på elektrisk energi fra forsyningsnettet. Dette medfører at forskjellige veistrekninger vil ha ulik lønnsomhet av å installere ladesystemer for elektriske kjøretøy. På grunn av den allerede omfattende infrastrukturen i veitunneler her til lands, er kanskje flere av ladesystemene bedre tilpasset å implementere i en veitunnel, enn på vanlige veistrekninger ute i dagen.

3.2 Dynamiske ladesystemer på vei

Mulighetene for både kablet og trådløs lading av elektriske kjøretøy i stasjonær tilstand ble nevnt innledningsvis i kapittelet. Innenfor begge disse hovedkategoriene for stasjonær lading, er det imidlertid svært mange forskjellige ladestasjoner som er tilpasset til de ulike bilmerkene og produsentene. Dynamiske ladesystemer kan ikke være tilpasset til ulike merker innefor samme type kjøretøy dersom systemene skal kunne implementeres på offentlig vei. På samme måte som de stasjonære ladeteknikkene, kan de dynamiske ladesystemene også deles inn i to hovedkategorier ettersom de er basert enten på trådløs, eller ikke-trådløs teknologi:

- Konduktivt ladesystem (ikke-trådløs)
- Induktivt ladesystem (trådløs)

Det er hovedsakelig blant konduktive dynamiske ladesystemer det er størst mulighet for å være “kreativ“, og det er også her vi finner størst utbredelse i hvordan løsningene er gjort rent fysisk. Den induktive ladeteknikken derimot er nærmest som en svart boks, men det er fortsatt veldig mange parametre som spiller inn og har betydning for funksjonaliteten til systemet. Det er derfor mange forskjellige produsenter som har utviklet induktive ladestier som først og fremst er tilpasset til deres egne produkter. I det neste følger en introduksjon til de dynamiske ladesystemene som inntil nå har fått størst utbredelse.

3.2.1 Kjøreledning

Kjøreledningen er kanskje den eldste og mest kjente teknikken som kan benyttes for å elektrifisere veinettet. Kjøreledningen er i seg selv strømførende liner som henger over kjøretøyene på veien, og som distribuerer elektrisk energi via en pantograf som er plassert på toppen av kjøretøyet. Denne teknikken ble tatt i bruk for over hundre år siden på jernbane og sporveier i byene. Siemens har adaptert denne løsningen med energioverføring også til lastebiler på vei. Mange snakker om å overføre mer av godstransporten på vei til jernbane, nettopp for redusere utslippene av klimagasser. Jernbanen har imidlertid sine begrensninger, blant annet i utstrekning og kapasitet på linjene. Jernbanen er også mer sårbar ved avstengte linjer. Det er lite som tyder på en storstilt utbygging av jernbanen i Norge, og det vil uansett ta lang tid å bygge ut tilstrekkelig. I framtiden må vi derfor uansett belage oss på at en god del av godstransporten fortsatt må foregå via veinettet.

For å ta hensyn til klimaet og utslippene ved godstransport på vei, er Siemens sin løsning å overføre deler av infrastrukturen i jernbanen til veien, se **fig 3.1**. Siemens kaller denne løsningen for “The eHighway system”.



Figur 3.1: Siemens eHighway. Foto: Siemens (2017)

Kanskje den mest synlige forskjellen, bortsett fra at systemet ikke forsyner sporvogner – men istedet kjøretøy på vei, er at systemet krever to overhengende strømliner. På sporveiene benytter man gjerne én overhengende line, mens sporveien, dvs. skinnene, danner den såkalte returveien for strømmen slik at det blir en sluttet krets. For å få en sluttet strømkrets i ladesystemet på veien, kreves det derfor to overhengende strømliner som forsyner hver sin fase. Én ekstra strømledning krever imidlertid ubetydelig med ekstra infrastruktur. Dette systemet kan faktisk være svært fordelaktig å implementere på vei kontra å bygge nye jernbanestrekninger, fordi veien allerede er der, og man slipper å bygge lange, dyre sporveier i tillegg. På den måten kan kjøreledningen kanskje innlemmes som et alternativ i jernbanepolitikken, og dermed få større gjennomslagskraft til å realiseres i stor skala.

I følge Siemens er framdriftssystemet eHighway dobbelt så effektivt som de konvensjonelle fossile forbrenningsmotorene. Den elektriske energien som overføres til lastebilene kan utnyttes med en virkningsgrad på over 80% (Siemens, 2017). Systemet fungerer også effektivt på strekninger med varierende terreng, fordi lastebiler som bremses produserer energi som mates tilbake på kjøreledningen og det overliggende forsyningsnettet. Energien som blir tilgjengelig på kjøreledningen kan så utnyttes effektivt av andre lastebiler som eventuelt befinner seg i nærheten og har behov for energi. I tillegg blir utslippene av klimagasser redusert ved at man utnytter mer elektrisitet kontra fossile brennstoff.

Siemens eHighway er i prinsippet samme teknologi som de velkjente “trolleybussene” for alvor begynte å ta i bruk under første halvdel av 1900-tallet. Før var det ikke uvanlig at kollektivtransporten i de store byene bestod av trolleybusser, eller trådbusser, som benyttet en overhengende kjøreledning. En ulempe den gang var at trådbussene som regel ikke hadde en alternativ drivstoffkilde, i tillegg til at batteriteknologien var altfor dårlig. Bussene var derfor helt avhengige av kjøreledningen, og evnen de hadde til å bevege seg utenfor kjøreledningene var begrenset av de forholdsvis lange pantografarmene, se **fig 3.2**. Derav måtte man ha kjøreledning overalt hvor trådbussene skulle ferdes. En slik løsning fungerte derfor tilstrekkelig ved lave hastigheter og for kollektivtrafikk i byene, men var ikke hensiktsmessig å forflytte ut til distriktene og de lange ferdselsårene.



Figur 3.2: Trolleybuss i Bergen. Foto: Public-transport.net

I dag kan kjøreledningen utnyttes i flere hybride konfigurasjoner. Det er i prinsippet ingen begrensninger i hvilke alternative drivstoffkilder som kan benyttes i tillegg til kjøreledningen og en elektrisk motor. Mange forskjellige systemer er svært fordelaktig fordi de tillater høyere fleksibilitet og bedre utnyttelse av energiresurser. I motsetning til trådbussene, kan lastebilene på eHighway også bevege seg utenfor kjøreledningen. Det er selvfølgelig en viktig forutsetning når vi ikke tenker å bygge kjøreledning overalt. Utformingen av kjørekontaktene, sammen med en aktiv pantografarm, gjør det mulig med rask inn- og utkobling fra kjøreledningen i hastigheter helt opp til 90 km/t (Siemens, 2017). Man blir altså ikke begrenset mot forbikjøringer, eller eventuelle hindringer i veien. Det er også en stor fordel at eksisterende systemer, både for jernbane, trikk, og trådbusser, har bevist at teknologien er trygg for trafikantene på vei, at det har lang levetid, samt at det har relativt lave drifts- og vedlikeholdskostnader (Siemens, 2017).

Siemens eHighway er allerede blitt testet flere steder i verden, og i senere tid også på offentlig vei. I juni 2016 ble en 2 km lang strekning på E16 i Gävle i Sverige åpnet med Siemens eHighway kjøreledning. Strekningen er en del av et testprosjekt i samarbeid

med blant andre Scania og Trafikverket i Sverige. Her har Scania bidratt med to hybride lastebiler som benytter biodiesel i tillegg til strøm fra kjøreledningen. Siemens har også vært med å installere og demonstrere eHighway i USA, hvor de i 2017 åpnet omlag 3 km med kjøreledning på en lengre strekning mellom to store havneområder i nærheten av Los Angeles. Demonstrasjonen er et samarbeidsprosjekt med blant andre Volvo, som har levert lastebiler med tre forskjellige hybride løsninger. De ulike løsningene innbefatter diesel, naturgass, og en helelektrisk løsning med batteri. I senere tid er det også planlagt og igangsatt flere nye forsøk med kjøreledningen på motorveier i Tyskland (Siemens, 2017).

Til tross for at det er noen år siden eHighway kom på veien første gang, er det vanskelig å finne fram litteratur som beskriver erfaringer som er tilegnet gjennom prosjektene med dette systemet. Siemens presenterte eHighway allerede i 2012, og siden den gang har det trolig vært omfattende testing av systemet innad i selskapet. Informasjonen som foreligger omkring systemet er i alle fall stort sett begrenset til det de selv legger fram. Det at nyere prosjekter har blitt til på offentlig vei også utenfor Tyskland, tyder kanskje på at eHighway kan være en god løsning for veitrafikk. Erfaringer fra disse prøveprosjektene vil sannsynligvis gi viktig informasjon med tanke på en mer helhetlig vurdering av systemet. Det svenske prosjektet kan antageligvis bidra med erfaringer om hvordan kjøreledningen er tilpasset til nordisk vær og klima. Demonstrasjonene i USA kan forhåpentligvis gi økt innsikt i hvordan ulike drivstoffløsninger egner seg i kombinasjon med kjøreledningen.

Trafikverket i Sverige trekker fram at kjøreledningen har et betydelig visuelt uttrykk. Det vedrører både at stolper og ledninger påvirker trafikantenes synsferdigheter under kjøring, så vel som at infrastrukturen har stor påvirkning på landskapsbildet generelt sett. Forbedret utforming av infrastrukturen, gjerne med færre overhengende ledninger, mener Trafikverket skulle kunne bidra til bedre visuell føring for trafikantene (Trafikverket, 2017).



Figur 3.3: Infrastruktur for Siemens eHighway. Foto: InsideEVs.com

Det er liten tvil om at kjøreledningen og dens infrastruktur har et stort estetisk problem. På én måte kan kjøreledningen kanskje oppfattes som harmonisk, men det er vanskeligere å forstå at dette skal være vakkert. Et annet problem som ennå ikke har blitt nevnt eksplisitt, er at kjøreledningen hovedsakelig er tilpasset for lastebiler på hovedveiene. For de mindre kjøretøyene – i hovedsak personbilene, ligger det en del utfordringer i å benytte seg av kjøreledningen. Først og fremst vil det kreve en pantograf som er relativt stor i forhold til kjøretøyet, og det vil sannsynligvis sette begrensninger for hvor fort bilen kan kjøre mens den er tilkoblet kjøreledningen. Videre må energien transporteres på en sikker måte til batteriet som ofte befinner seg i nedre del av bilen. Alt i alt vil det kreve større konstruksjonsmessige inngrep på personbilene, og det er derfor lite sannsynlig at både større kjøretøy og mindre personbiler vil kunne benytte seg av en og samme kjøreledning.

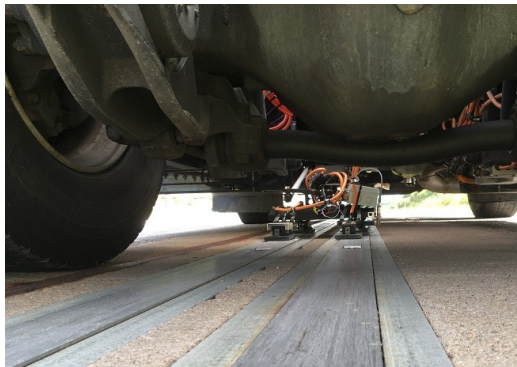
En lavere kjøreledning tilpasset for mindre kjøretøy, vil ikke være forsvarlig med hensyn til sikkerhetsavstand på elektriske forsyningskabler. Kjøreledningen vil dessuten være til hinder for større kjøretøy, som dermed ikke kan benytte denne delen av veien. Den neste kategorien innenfor konduktive ladesystemer har imidlertid et mindre visuelt uttrykk, og er samtidig mye bedre tilpasset de minste kjøretøyene.

3.2.2 Skinnesystemer i veibanen

Inspirert av mulighetene med elektrisk forsyning på veien, er det utviklet skinneløsninger for energioverføring til kjøretøyene fra veibanen, som vist i **fig. 1.1**. Skinnesystemene benytter glidende kontaktflater på samme måte som kjøreledningen, men hovedforskjellen ligger i at elektrisiteten forsynes fra strømskinner i veibanen under kjøretøyene ¹. Dette innebærer dermed en relativt kort avstand til det elektriske forsyningsmediet også for lavere kjøretøy som f.eks. personbiler. I motsetning til kjøreledningen, er skinnesystemer i veibanen derfor vel så godt tilpasset til små kjøretøy, som til store kjøretøy.

En “omvendt” pantografarm er festet på undersiden – eller like bak på kjøretøyet, og mottar elektrisk energi fra en strømskinne i veibanen under seg. Se forøvrig **fig. 3.4a**. Den elektriske energien blir så brukt til å drive en elektrisk motor i kjøretøyet. På samme måte som med kjøreledningen er det heller ingen begrensninger i hvilke hybride konfigurasjoner som kan fungere her, såfremt det i hvertfall finnes en elektromotor. Hybride konfigurasjoner uten batteri, vil også kunne produsere energi ved bremsing, som igjen føres tilbake til strømskinnen og blir tilgjengelig for andre forbrukere. Skinnesystemene i veibanen krever imidlertid ubetydelig med synlig infrastruktur sammenlignet med kjøreledningen. Systemet faller også i god harmoni med veibanen og veimerkingen ellers. Dette er blant viktige årsaker til at det nå foregår forskning og utvikling for å kunne realisere elektriske ladestier ved hjelp av glidekontakter i veibanen. Mens Siemens tilsynelatende er de eneste som har valgt å gå skikkelig inn for kjøreledningen, er det i stedet mange flere aktører som har valgt å satse på skinnebaserte løsninger i veibanen. Selskapet Alstom har blant annet tilpasset en skinneløsning for veitrafikken som i utgangspunktet er utviklet for å unngå kjøreledning for trikk og bybane (Alstom, 2017).

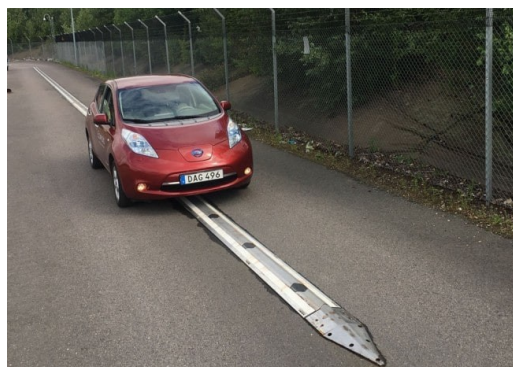
¹Det finnes også en type skinnesystem som baserer seg på forsyning fra siden av veibanen (Alaküla and Márquez-Fernández, 2017)



(a) Alstom



(b) Elways



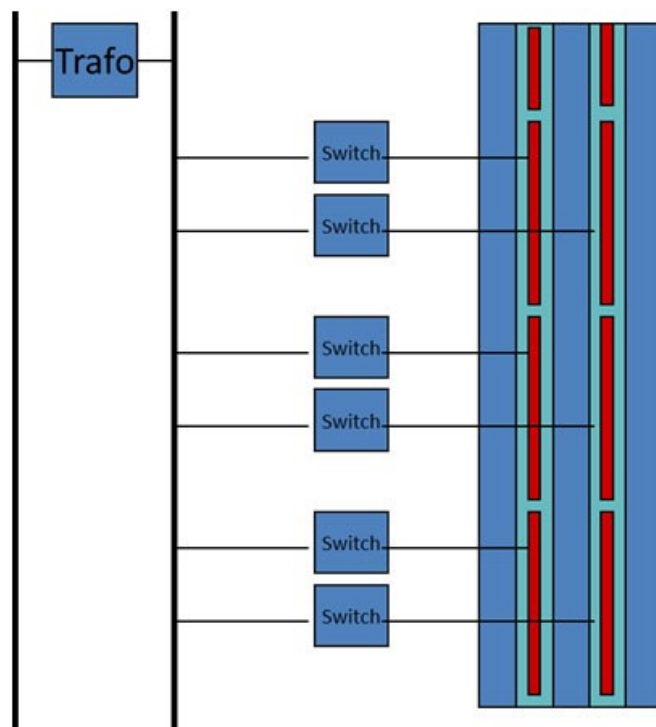
(c) Elonroad

Figur 3.4: Elektriske veisystemer med ulike skinneløsninger i veibanen.

Til tross for at det finnes flere forskjellige konsepter, er det foreløpig kun ett av de skinneløste systemene som har blitt testet på offentlig vei. Dette systemet er utviklet av det svenske selskapet Elways, og har siden 2017 stått på drift langs en veistrekning ved Arlanda flyplass i Sverige. Veiprojektet – med tilnavn *eRoadArlanda*, omfatter 2 km med elektriske skinner i veien, og forsyner en 18 tonnns varebil som frakter gods mellom flyplassen og en terminal for PostNord (*eRoadArlanda*, 2019). Elways benytter en strømskinne som er fullstendig integrert i veibanen, se **fig. 3.4b**. Strømskinnen består hovedsakelig av to spor, der hvert spor distribuerer hver sin fase. Strømvogteren på kjøretøyet består av to tapper som senkes ned i sporene. Tappene når så fram til potensialfordelingene som befinner seg i bunnen av sporene. Teknikken er således en glidende variant av et støpsel i en stikkontakt, slik vi typisk kjenner det igjen fra boliginstallasjoner.

En generell utfordring blant konduktive ladesystemer er eksponeringen av spenningsutsatte deler i veibanen. Dette gjelder også særskilt blant skinneløste systemene, fordi kjøretøyet tross alt er montert høyt over bakken. For Elways sin løsning er faren for å komme i kontakt med spenningsatte deler noenlunde begrenset, ved at potensialet ligger relativt dypt nede i sporene. Sporene er imidlertid brede nok til at dette kan utgjøre en fare i spesielle situasjoner. For de andre skinneløste systemene er potensialfordelingen mye lettere tilgjengelig, og dermed er faren for berøring også mye større. En løsning på dette er at skinneløste systemene seksjonerer. Det betyr at ladestrekningen i sin helhet består av kortere strømskinner som hver er isolert seg i mellom. Hver enkelt skinneseksjon bidrar derfor skiftevis med

forsyning når et kjøretøy beveger seg på ladestrekningen. Når en seksjon ikke bidrar til å forsyne et kjøretøy, blir spenningen koblet fra, og spenningsutsatte deler på seksjonen blir jordnet. Det at ladestrekningen deles inn i flere kortere seksjoner krever imidlertid en god del økt infrastruktur i forbindelse med den overordnede strømforsyningen, se **fig. 3.5**.



Figur 3.5: Prinsipp tegning for seksjonering av skinneresystemer. Illustrasjon: Elways (2014)

Hver enkelt seksjon behøver en dedikert bryter (switch) som kobler seksjonen henholdsvis inn og ut, ettersom det befinner seg egnet kjøretøy på seksjonen eller ikke. Videre benytter Elways seksjoner som gjerne er 50 m lange. Siden uttakene fra veien er så jevnlig som 50 m, er det hensiktsmessig med en parallell hovedkabel fra forsyningstrafoen langs med veien. På lengre veistrekninger er det også hensiktsmessig med parallell høyspent forsyning mellom forsyningstrafoer langs med veien, slik som illustrert helt til venstre i **fig. 3.5**. Med hensyn til seksjoneringen, er det forsøkt å finne informasjon om man også kan føre forsyningsstrømmen internt langs med selve skinnegangene. Det er generelt lite opplysninger på dette området. En slik løsning vil trolig gjøre det lettere å installere systemene, og medfører i så fall at systemene kanskje blir enda mer attraktive i framtiden.

En annen generell utfordring blant skinnebaserte ladesystemer, er at de er relativt mye utsatt for påkjenninger fra omgivelsene. Elways sin skinneløsning er kanskje til og med mer utsatt enn de andre skinneresystemene når det gjelder nedbør og frost. Alstom og Elonroad har “tette” løsninger, og de ligger for såvidt mer eller mindre over veibanen. Elways sin løsning derimot, er antageligvis mer utsatt for at snø og is kan feste seg i og langs skinnegangene. Omfattende testing i forbindelse med eRoadArlanda har imidlertid vist at teknikken fint kan greie å omgå disse utfordringene (Elways, 2019). Til tider har det likevel vært behov for å ta i bruk interne varmekabler langs skinnegangene.

3.2.3 Trådløs lading på vei

Induktiv energioverføring er en teknikk som har vært kjent i over et århundre. Den geniale oppfinneren Nikola Tesla fant ut at det var mulig å overføre elektrisk energi trådløst, eller magnetisk, ved hjelp av en egenskap hos elektriske ledere som kalles for induktivitet. Denne oppdagelsen er kanskje den viktigste hendelsen i elektrisitetens relativt korte historie. Siden den gang har elektromagnetisme nemlig hatt stor innflytelse i nesten samtlige situasjoner der vi anvender elektrisk energi. Det er derfor naturlig at induktiv energioverføring også blir et aktuelt tema når vi nå skal forsøke å elektrifisere trafikken på vei.

Det er først i nyere tid at induktiv energioverføring på veien har fått økt fokus. Det er likevel ikke store forskjeller fra stasjonær induktiv lading som jo har fått større utbredelse til nå. Prinsippet for energioverføringen gjelder i begge tilfeller på samme måte som for en vanlig transformator, mens hovedforskjellen ligger i utstrekningen av de to systemene. Ved dynamisk lading blir veibanen konstruert med magnetiske spoler som overfører magnetisk energi til spoler i kjøretøyene, se **fig. 3.6a**. Det medfører at ladesystemet i veibanen må ha mye større utstrekning enn hvis kjøretøyene ladet stasjonært på ett punkt.



Figur 3.6: (a) Prinsipiell virkemåte for trådløs lading, og (b) infrastruktur for forsyning på veien.

Økt utstrekning medfører selvfølgelig større kostnader ved å bygge systemet på vei. Trådløs lading på veien krever også nokså omfattende infrastruktur slik det framkommer av **fig. 3.6b**. Det skyldes nemlig at det er mange komponenter som må inngå i forsyningen for at det skal fungere på en god måte. Å overføre høy effekt og energi via magnetiske felt, krever gjerne også en viss størrelse på spolene. Sammenlignet med de konduktive ladesystemene er det naturlig å tro at trådløs energioverføring generelt vil bli en dyrere løsning. Det er eksempelvis langt større inngrep som må gjøres i forbindelse med veibanen sammenlignet med skinnesystemene. Omfattende infrastruktur med spoleviklinger, i tillegg til andre komplekse strømforsyningsenheter, vil antageligvis også løfte kostnadsnivået betraktelig sammenlignet med “enkle” strømførende ledninger og skinner.

Selv om trådløse ladesystemer på veien sannsynligvis vil bli en dyrere løsning, så finnes det flere gode grunner som gjør systemene mer ettertraktet framfor de andre konduktive forsyningsløsningene. Blant de viktigste fordelene henger bokstavelig talt sammen med betegnelsen for systemet i seg selv, altså trådløs, eller nærmere bestemt kontaktløs. Induktiv lading eliminerer nettopp behovet for glidende kontaktflater i energioverføringen.

Konduktive dynamiske ladesystemer derimot, medfører mekaniske påkjenninger og slitasje som over tid kan føre til at komponenter må skiftes ut. Disse systemene krever gjerne også større konstruksjonsmessige inngrep på kjøretøyene, med aktive strømvtagere som må knytte metallisk forbindelse med infrastrukturen i eller rundt veibanen. Med trådløs energioverføring slipper man kanskje større inngrep i selve utformingen av kjøretøyene, og man unngår dermed tap av energi i forbindelse med økt luftmotstand, eller motstand i elektriske glideflater.

En annen viktig fordel med trådløse ladesystemer, er at den magnetiske energioverføringen stort sett går uforstyrret gjennom de fleste materialer. Det gjør at vi kan kapsle systemet fullstendig inn i veibanen, og dermed blir det mye mindre utsatt for vær og vind. Systemet fungerer selv om det er både snø og is – tilmed asfalt, mellom spolene i veibanen og kjøretøyene. De konduktive ladesystemene er også mer utsatt for støv og fuktighet, som over tid bidrar til mekanisk slitasje på overføringsmediene. Slik som de værmessige forholdene er her i landet, er det liten tvil om at trådløs dynamisk lading innehar viktige egenskaper som gjør at systemet kan være godt egnet på norske veier. Det er imidlertid en viss usikkerhet om hvordan infrastrukturen takler frost i bakken (Langhelle et al., 2018), som jo er et stort problem i forbindelse med veibygging her i Norge.



Figur 3.7: Renault har testet trådløst lading i Frankrike. Foto: Groupe Renault

Fig. 3.7 viser hvordan et induktivt ladesystem kan ta seg ut på veien. Den brede mørke stripen langs med undersiden av varebilen dekker over de magnetiske spolene i veibanen. Selv om den magnetiske energien stort sett får gå uforstyrret mellom veibanen og kjøretøyet, er det svært viktig for energioverføringen at kjøretøyet beveger seg så nært senterlinjen langs med ladefeltet som mulig. De som har prøvd stasjonær trådløs lading, enten med mobiltelefon eller elbil, vet at posisjoneringen mellom spolene er helt avgjørende med tanke på optimal lading. På samme måte gjelder dette også for trådløs dynamisk lading på vei. Årsaken til det er at magnetfeltet fra veibanen – av naturlige grunner, vil spre seg i luften før det treffer spolen i kjøretøyet. Det betyr at vi ikke får overført all energi fra veibanen til kjøretøyet, men vi får likevel best mulig kobling dersom spolene står rett ovenfor hverandre. I den forbindelse kan det i framtiden bli behov for automatisk kjøretøyassistanse, slik at optimal ladeposisjon blir best mulig ivaretatt.

Dårlig magnetisk kobling mellom veibanen og kjøretøyet, medfører i sin tur at energivirkningsgraden til det trådløse systemet blir svekket. Hvor god den magnetiske koblingen blir, er blant annet avhengig av hvordan spolene i veibanen seksjoneres. På samme måte som for skinnesystemene er trådløse ladesystemer også delt inn i seksjoner, slik at når det ikke er kjøretøy til stede blir seksjonen liggende i “dvalemodus”. Kortere seksjoner vil normalt gi bedre magnetisk kobling. Lengre seksjoner kan trolig være vel så bra ved høy hastighet, samt at det kan være mer hensiktsmessig i forbindelse med installasjonen av systemet. Foreløpig er det vanskelig å si noe om optimal distribusjon, men med ytterligere testing og utvikling kan vi kanskje få mer konkrete svar i framtiden. Det er også uvisst i hvor stor grad spredningen av magnetiske felter kan gi uheldig innvirkning på mennesker eller dyr som eventuelt befinner seg i nærheten.

Det er tilsynelatende mange muligheter og utfordringer med enhver av de nevnte teknologiene innenfor dynamiske ladesystemer. I forbindelse med den trådløse teknikken, synes det imidlertid å veie ekstra tungt at man unngår glidende kontaktflater i energioverføringen, samt at infrastrukturen er bedre beskyttet mot omgivelsesmessige faktorer. Teknikken er også godt egnet til bruk for alle mulige kjøretøy samtidig. Dette er blant viktige årsaker til at det nå finnes mange ulike aktører som forsøker å utvikle og tilpasse teknikken for veitrafikk. Med mange aktører er det ikke hensiktsmessig å gå nøye inn på hver enkelt. Selve løsningene bygger stort sett på den samme teknikken uansett. Tidlig ute blant trådløse systemer var imidlertid det såkalte OLEV (On-Line Electric Vehicle) systemet. OLEV-systemet ble utviklet ved et universitet i Sør-Korea, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), og har etter det blitt innført på veier i Sør-Korea ved en rekke anledninger (KAIST, 2013). I 2013 ble systemet blant annet tatt i bruk på en 24 km lang rute for kollektivtransport i byen Gumi. OLEV-systemet er tilpasset for lading både på holdeplasser og under kjøring, og kan derfor anses for å være en svært anvendelig ladeteknikk for framtiden.



Figur 3.8: Buss som benytter OLEV-systemet i byen Gumi. Foto: KAIST

3.3 Systemdata

Med mange ulike teknikker og systemer under utvikling, er det vanskelig å holde en oppdatert oversikt over de forskjellige systemdataene som til enhver tid gjelder. En erfaring er også at aktørene er tilbakeholden med opplysninger og testdata omkring systemene. Det er i grunn forståelig, da dette representerer en viktig konkurransesituasjon for mange. Denne studien legger uansett ikke vekt på å presentere detaljerte systembeskrivelser om ladesystemene på vei. Det meste om systemene er basert på enkle betraktninger. ELinGO har imidlertid lagt ned mer arbeid i detaljerte beskrivelser omkring de ulike systemene. Dette ligger tilgjengelig i “arbeidspakke 2” under prosjektet (Suul and Guidi, 2018).

Det er likevel interessant å vite om hvor stor effekt de ulike systemene tillater å forsyne. Dette har gjerne stor betydning i en helhetlig vurdering, både for systemene seg i mellom, men også i hvilke situasjoner de er aktuelle å ta i bruk på vei. (Alaküla and Márquez-Fernández, 2017) hevder imidlertid at samtlige av de konduktive ladesystemene nevnt ovenfor, skal være kapable til å forsyne “full heavy duty truck traffic flow”. Det kan tyde på at ytelsen til de konduktive systemene ikke skal være noen begrensning for å bli brukt i veitrafikken. Likevel er det mulig å spore nokså store forskjeller innad mellom systemene, og her er det særlig Alstom som skiller seg ut. Med Alstom sin skinneløsning skal det være mulig å forsyne hvert enkelt kjøretøy med hele 1,5 MW (Alaküla and Márquez-Fernández, 2017). Til sammenligning gir løsningene fra Siemens, Elways, og Elonroad, i området rundt 200-250 kW. Det gir grunn for å tro at også disse systemene kan ha mulighet for å øke ytelsesnivået etterhvert. Blant trådløse ladesystemer på veien er det imidlertid kun OLEV-systemet som er i nærheten av lignende forsyningsegenskaper som Siemens, Elways, og Elonroad. Generelt sett har derfor trådløse ladesystemer på veien foreløpig lavere forsyningsevne enn det de konduktive systemene har.

3.4 Økonomi

Det er liten tvil om at infrastruktur for elektrisk forsyning på veien generelt representerer en betydelig investeringskostnad. Spørsmålet er imidlertid hvordan økonomien ser ut i et langt perspektiv, og sammenlignet med eksisterende og alternative løsninger. Dette er et spørsmål som til dels er vanskelig å svare på, og i hvertfall for de ulike teknologiene innenfor elektrisk vei. Det skyldes nettopp at teknologien ikke er prøvet i veldig stor grad, ei heller over mye lengre tid. Det er derfor en usikkerhet knyttet til levetid og kostnadsobjekter som kan påløpe underveis i livsløpet til de ulike teknologiene.

Det finnes imidlertid flere eksempler på studier som har gjort kostnadsanalyser i forbindelse med elektriske veisystemer. Felles for disse er likevel at de stort sett er basert på estimerer omkring kostnadsobjekter, samt forventet trafikkutvikling i mange år framover. Studiene viser gjerne at elektriske veisystemer er gode økonomiske tiltak sammenlignet med den fossile veitrafikken vi har i dag. Det er på en måte ingen stor overraskelse, når vi vet at hovedfokuset globalt ligger på å redusere bruk av fossilt brensel. Etterhvert med økt kunnskap og erfaring fra nye testprosjekter med elektrisk vei, vil det antageligvis bli enklere å si noe konkret om økonomien rundt de forskjellige elektriske veisystemene.

3.5 Status for dynamiske ladesystemer på vei

Dynamiske ladesystemer på vei er hovedsakelig en teknologi under utvikling, og det er ennå ikke tatt i bruk på norske veier i dag. Situasjonen er imidlertid svært annerledes i vårt nærmeste naboland Sverige, som allerede har fått i gang flere prøveprosjekter med ulike systemer – både på og utenfor offentlig vei. Man kan derfor si at dynamiske ladesystemer på vei har en helt annen status i Sverige enn det har her i Norge. Også andre steder i verden er det stor aktivitet i forbindelse med elektriske veisystemer. Til tross for at det meste ennå er prøveprosjekter, er det i det hele tatt mye som tyder på at dynamiske ladesystemer etterhvert kan ha det som skal til for å bli en fungerende løsning på vei.



Figur 3.9: Svenska Elvägar har arbeidet med elektriske veier siden 2008, og planlegger en litt mer elegant løsning med kjøreledning i framtiden. Illustrasjon: Elvag.se

Selv om teknologien begynner å komme langt, gjenstår fortsatt noen utfordringer før dette kan få stor innflytelse på veitrafikken verden over. Framfor alt er det kanskje et spørsmål om kostnader før man tørr å satse stortilt på disse løsningene. Mange små prøveprosjekter rundt om i verden kan være en indikasjon på dette. En viktig forutsetning er vel at kostnadene til en viss grad må kunne gjenspeile effekten dette gir med tanke på utslippene. Teknologiens historie viser imidlertid utallige eksempler der utvikling gjør at løsninger både blir billigere og bedre. Således er det grunn for å tro at kostnadene ikke vil spille like stor rolle for framtidens systemer.

En annen utfordring, som tildels også vedrører rundt økonomien, er at det finnes mange forskjellige ladesystemer som kan være aktuelle å bruke. I Sverige har man flere prosjekter med konduktive ladesystemer, men nå skal de også i gang med å teste trådløst system (InsideEVs, 2019). Store ressurser går altså med til testing, og det tar kanskje lengre tid før løsningene kommer på vei. Det tyder nok også på en usikkerhet om hvilket ladesystem man skal satse på, for dersom dynamiske ladesystemer skal ha en hensiktsmessig effekt i trafikken, bør det helst være en bred løsning som favner mange kjøretøy.

Oppgaven blir dermed å standardisere løsningene, gjerne på tvers av kjøretøygrupper, men kanskje også på tvers av landegrenser. Interoperabilitet mellom ulike systemer er typisk en stor utfordring i dagens teknologiske samfunn. Ikke minst kan det bli utfordringer med avregningen av elektrisk energi. Standarder er derfor viktige virkemidler når teknologi skal tas i bruk i stor skala. Demonstrasjonene består gjerne av noen få dedikerte kjøretøy på en kortere teststrekning. Det er imidlertid helt andre forutsetninger som gjelder når dette skal distribueres for den offentlige trafikken.

Uansett hvilken holdning man har til dynamiske ladesystemer på vei, så er det ingen tvil om at teknologien har hatt stor utvikling bare de siste årene. Videre utvikling er imidlertid nært knyttet opp mot samfunnet som sådan, og samfunnsendringer er antageligvis en nødvendig forutsetning for den teknologiske utviklingen her i landet. Flere aktører i Norge må derfor få øynene opp for elektriske forsyningsløsninger på veien. En slik grunnleggende drivkraft er trolig det som må til for å bedre statusen til dynamiske ladesystemer også her i Norge.

Planlegging av elektrisk vei

4.1 Et bredt samarbeidsprosjekt

Den raske utviklingen innenfor dynamiske ladesystemer, gjør at elektrisk forsyning langs veien er mer aktuelt enn noen gang før. Inspirasjon fra stadig nye prøveprosjekter bidrar også til økt fokus på storskala distribusjon av elektriske ladestier i veinettet. Utviklingen og det brede utvalget i teknologiløsninger er imidlertid en utfordring for de som skal legge til rette for dette på veien. Hvilket ladesystem skal man bygge ut? Og går utviklingen så raskt at man blir nødt til å skifte ut hele systemet om bare få år fram i tid? Dette er helt klart viktige spørsmål som dukker opp når ny teknologi skal implementeres i betydelig omfang.

En annen utfordring er at dette omfatter et samarbeid mellom mange ulike aktører, og som både har forskjellige mål og arbeidsoppgaver. Blant viktige aktører i forbindelse med elektriske veier finner vi:

- Utbyggere av vei
- Driftsansvarlige for vei
- Nettdistributører
- Energidistributører
- Bilindustrien

Med mange ulike aktører tilsier at det må utøves en form for samhandling, for på den måten å utvikle løsninger som er tilfredsstillende for alle parter. Det innebærer eksempelvis at den som planlegger selve veibyggingen, også planlegger hvor det kan etableres føringsveier, slik at forsyning av elektrisk utstyr kan foregå på en fornuftig måte. I neste omgang er det viktig med en eller annen form for overensstemmelse mellom det elektriske veisystemet og bilindustrien som sådan, slik at den supplerende infrastrukturen faktisk kan imøtekomme et behov på nær sagt kort sikt.

For å legge til rette for en ønsket framtidig utvikling er det derfor svært viktig med nøye planlegging. Som regel er det generelle formålet med planleggingen å finne en mest mulig optimal løsning, som innenfor rammebetingelsene tilfredsstillende de kravene som er satt for prosjektet. I store prosjekter er det mange hensyn som må veies opp mot hverandre, og optimalisering av enkelte faktorer er vanskelig. Det kreves derfor at de som planlegger har god kunnskap om alle faktorene, for på den måten greie å finne fram til gode kompromisser. Tverrfaglig kunnskap og innspill kan best ivaretas ved at hver enkelt aktør deltar aktivt i denne prosessen.

4.2 En startblokk for framtidig ekspansjon

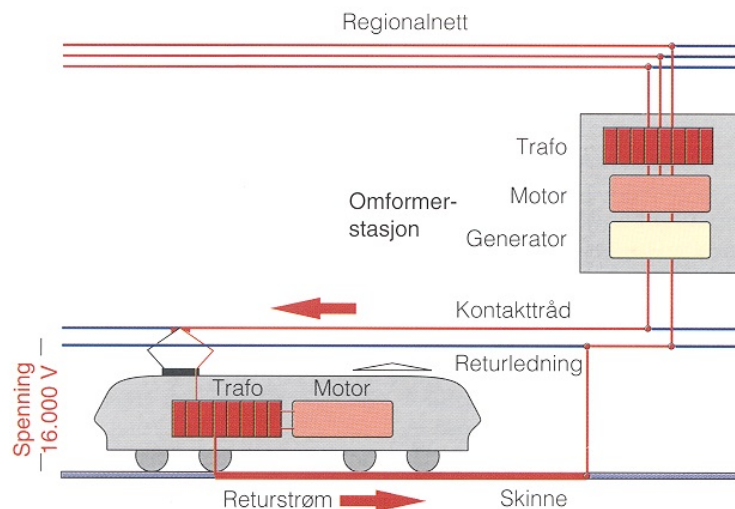
For at man skal lykkes med å integrere dynamiske ladesystemer på veien allerede i nær framtid, er man altså avhengig av at det blir gjort omfattende samarbeid mellom de ulike aktørene på et tidlig tidspunkt. Foreløpig er det lite som tyder på at dette samarbeidet har kommet godt i gang. Til tross for at teknologien begynner å komme langt, samt at det har vært en del nye demonstrasjonsprosjekter både i Sverige og Tyskland, så er det vanskelig å se for seg at dette kan få stor innflytelse på norske veier allerede innen få år. Det kan forklares med at det tar tid å bygge opp under en helt ny teknologi i veitransporten, blant annet pga. den kompleksiteten dette systemet omfatter.

Selv om det på kort sikt ikke synes aktuelt å implementere dynamiske ladesystemer på veier her i Norge, så kan det være muligheter for å gjøre forberedende arbeid for å få elektriske veier på lang sikt. Ennå fordi det er mye som tyder på at teknologien etterhvert vil bli realisert på norske veier uansett. Spørsmålet er derfor hvilke tiltak som kan gjøres idag, som bidrar til at det blir enklere – og gjerne billigere, å ta imot denne teknologien på et senere tidspunkt. Det mest innlysende svaret kan være å bidra med forskning og utvikling på området. Blant de som har ansvar for veibygging her i landet, er det kanskje mer retningsgivende å vite hvilke fysiske tiltak de kan gjøre i forbindelse med veibyggingen allerede i dag.

Å begynne med klare definerte mål – uten å kjenne den endelige løsningen, er noe som gjerne kjennetegner det å planlegge. I noen tilfeller har man ingen formening om hvordan løsningen kan se ut, mens i andre tilfeller vet man at det finnes mange ulike løsninger som kan være tilfredsstillende. For å finne fram til en egnet løsning, vil man som hovedregel forsøke å arbeide seg ut i fra de generelle forutsetningene for prosjektet. En forutsetning for alle løsningene med elektriske veier er nettopp at de krever tilgang på elektrisk forsyning, og det i større grad enn det veinettet stort sett har installert i dag. Det betyr at nettselskapene og utbyggere av vei, allerede i dag bør ha et framtidsrettet blikk i forbindelse med nye veiprojekter. Det er nemlig ofte slik for elektriske installasjoner, at det koster mer å gjøre endringer i ettertid enn når man installerer første gang. Således kan det å legge til rette for økt energiutrustning på nye veiprojekter anses for å være en positiv langsiktig investering. Dersom man legger de riktige forutsetningene til grunn, så vil denne utrustningen etterhvert fungere som en “startblokk” for innføringen av elektriske veier her i landet.

4.3 Distribusjon av ladestier

Utbyggere av vei, så vel som nettselskapene forøvrig, kan allerede nå derfor bidra med å legge til rette for elektriske veier i framtiden. Dette er faktisk en svært gunstig situasjon, sammenlignet med at nevnte aktører skal forsøke å se inn i spådomskulen, og dermed bruke lang tid på å vurdere hvilken teknologi som eventuelt kan komme på veien i framtiden. I værste fall ender de opp med å gjøre ingen verdens ting. Om ikke det, er sannsynligheten også stor for at ting kan bli gjort forgjeves. Jernbanen er imidlertid et godt eksempel på at dynamiske ladesystemer uansett vil kreve en eller annen form for energitrustning langs med norske veier.



Figur 4.1: Elektrisk jernbane krever stedvis nærhet til det overordnede elektriske forsyningssystemet. Illustrasjon: Bane NOR (2014)

Jernbanenettet er forsynt fra egne dedikerte matestasjoner som står jevnt fordelt langs med linjene. Matestasjonene er igjen avhengige av kraftforsyning fra det store sammenkoblede forsyningsnettet, slik som **fig. 4.1** viser. Jernbanen utgjør derfor en omfattende infrastruktur, både med hensyn til stor utstrekning så vel som høy forsyningsgrad av elektrisk energi. I grunnleggende forstand er det svært mange likhetstrekk mellom forsyning av elektriske sporvogner, og hvordan man ser for seg elektrisk forsyning av kjøretøy på veien. På web-siden forskning.no er det tilmed publisert en artikkel med overskriften: “Veien – den nye jernbanen”. Artikkelen fokuserer mellom annet på fordeler med å overføre prinsipper fra jernbanen til veitrafikken.

I motsetning til hvordan store deler av jernbanenettet er kontinuerlig belagt med strøm, så har man en helt annen tankegang i forbindelse med elektrifisering av veinettet. Det er hovedsakelig snakk om å elektrifisere mindre deler av veinettet, mens batteri eller andre hybride løsninger skal sørge for forsyning mellom disse strømbelagte strekningene. Det bringer fram en ny og viktig problemstilling – nemlig hvor i veinettet skal man legge til rette for forsyning? Dersom en kun skal elektrifisere deler av veinettet, er det opplagt at hvilke strekninger som blir belagt med strøm vil ha stor betydning både for økonomien

så vel som ytelsen til ladesystemet. For et helhetlig godt resultat, er det ikke hensiktsmessig å installere alt langs én sammenhengende strekning, men det krever en god fordeling, og dermed en nøye helhetlig planlegging. Den effektive utnyttelsen av ladesystemet krever altså, ikke overraskende, en strategisk utplassering av ladestiene. Ved å optimalisere plasseringen av strekningene med lading kan man dermed forbedre ytelsen til ladesystemet totalt sett. Den ideelle distribusjonen er imidlertid påvirket av svært mange faktorer. Over tid er det sannsynlig at flere av disse faktorene kan endre seg, og dermed påvirke systemet annerledes. Kompleksiteten som er forbundet med veitransporten, tilsier at det i oppstartsfasen kan være lurt å basere seg på enklere tilnærminger.



Figur 4.2: Mange steder kan det være hensiktsmessig med felles forsyning for jernbane og elektrisk vei. Foto: Eivind Molde

Jernbanen har som nevnt en omfattende elektrisk infrastruktur, og dermed muligheten for store effekt- og energiuttak fra nettet. Det “lokale” energiuttaket til å drive et tog framover er likevel relativt smått, sammenlignet med effektuttaket som finner sted når et tog faktisk passerer i høy hastighet. Det skyldes nemlig at tiden et tog befinner seg på en strekning, normalt er liten i forhold til tiden det ikke befinner seg tog på strekningen. I prinsippet kan det bety at den lokale energikapasiteten i jernbanenettet er dårlig utnyttet av sporvognene alene. God tilgang på kraft er imidlertid viktig grobunn for innføring av elektriske veier. I tillegg kan elektriske veier bidra til å utnytte denne eksisterende infrastrukturen bedre. Flere steder ligger forholdene faktisk godt til rette for å utnytte dette samspillet, som **fig. 4.2** viser, mens det dessverre er mange flere steder hvor det ikke er like innlysende å utføre dette.

Faktum er at veisystemet utgjør en mye mer finmasket struktur enn det jernbanenettet gjør. Til sammen er det derfor mange flere kilometer med vei enn hva det er med jernbane her i landet. (Bane NOR, 2014) oppgir at kun 10% av de totale kostnadene med utbygging av jernbane henger sammen med strømforsyningen, men likevel er ikke alle jernbanestrekningene i Norge forsynt med elektrisitet. Det tilsier at man heller ikke bør ha som mål å elektrifisere alle strekninger med vei. For å finne en hensiktsmessig strategi

for utplasseringen av ladestrekninger i veinettet, er det kanskje først og fremst naturlig å vurdere om forsyningen skal foregå i byene, ute i distriktene, eller langs med de store ferdselsårene. Det er mange fordeler og ulemper knyttet til dette, men et par enkle betraktninger kan være nok til å finne en hensiktsmessig framgangsmåte. Det behøver ikke å være en enten-eller løsning for de ulike områdene i framtiden, men i en startfase kan det være fordelaktig å innsnevre satsingsområdene, og gjerne til der behovet er størst. På den måten kan teknologien få et tidlig og solid fotfeste, i tillegg til at det skjer uten store overflødige tiltak.

Strategi for utplassering av elektriske ladestier bør helst være med utgangspunkt i et samfunnsøkonomisk henseende. Det innbefatter gjerne at mange skal ha nytte av de tiltakene som her blir gjort. Urbaniseringen i Norge har ført til at det bor mange flere mennesker i byene enn hva det gjør ute i distriktene. Oslo er f.eks. det klart minste fylket her i landet arealmessig, men det er også det fylket som har flest antall innbyggere (SSB, 2019). En enkel betraktning basert på transportbehov gjør det derfor mindre aktuelt med elektrisk vei ute i distriktene – sammenlignet med byene. Samtidig er det også mange veitrafikanter som benytter de lange og store ferdselsårene. Til dette er det knyttet større behov for lang rekkevidde på kjøretøy, i motsetning til byene hvor elbiler allerede har vist at de er mer enn kapable for oppgaven. Klima- og miljømessig innsikt tilsier også at mer og mer av transportbehovene i byene må overføres til kollektivtransport eller lignende, og her begynner man allerede å komme langt med andre klimavennlige forsyningsløsninger. Dessuten kan det stilles spørsmål om hvorvidt infrastrukturen for dynamiske ladesystemer er best egnet for å distribueres i byene, blant annet med hensyn til sikkerhet når mennesker stort sett ferdes overalt i trafikken. Enkle overveielser hva angår transportbehov og sikkerhet, taler derfor for en satsing på elektrisk forsyning av veitransport på hovedveiene.

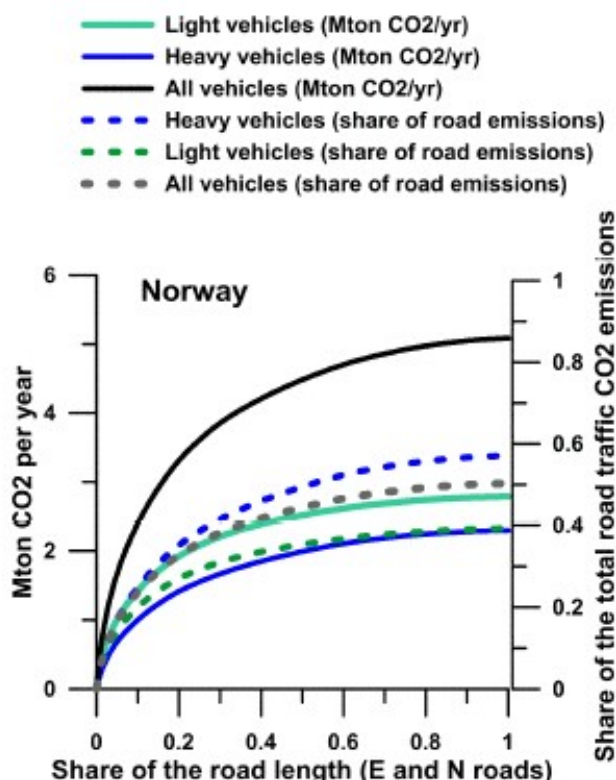
Den samfunnsøkonomiske interessen av at mange kan benytte seg av tiltakene, er i dette tilfellet egentlig knyttet til en reduksjon av klimagassutslippene. Hvis man for enkelthets skyld ser bort i fra kjørehastighet og at ulike kjøretøy har varierende utslippsmengder, så er det opplagt at utslippene er størst der hvor trafikken er størst. En får dermed størst utslippsreduksjoner ved å elektrifisere de mest trafikkerte strekningene, som igjen gjerne utgjør deler av hovedveiene. Etterhvert som man elektrifiserer mindre trafikkerte veier, vil det også bli lavere utslippsreduksjoner som følge av disse tiltakene. Denne effekten kan bli ytterligere forsterket, om en i tillegg tar hensyn til høyere utslipp ved økt kjørehastighet, samt at ulike kjøretøygrupper har varierende utslippsmengder. Tyngre kjøretøy, som f.eks. lastebiler, har langt høyere utslipp sammelignet med personbiler, og hovedveiene med relativt høy kjørehastighet er nemlig viktige ferdselsårer for tungtransporten. Strekninger med høy trafikk er derfor et godt utgangspunkt for innføring av elektriske veier.

(Miljødirektoratet, 2018) kan fortelle at utslippene fra veitransporten her i landet har vært nokså stabile de siste årene, til tross for at utslippene fra personbiler har gått ned. Det skyldes nemlig at utslippene fra tunge kjøretøy og varebiler har gått opp. De totale utslippene fra de tyngre kjøretøyene er faktisk snart på høyde med utslippene fra personbiler. Det er forventet at antall tyngre kjøretøy, så vel som transportbehovet ellers, vil fortsette å stige også i årene framover (Gustavsen, 2017). Elektrisk forsyning langs hovedveiene er derfor særdeles viktig med hensyn til å elektrifisere tungtransporten.

4.4 Trafikk og klimagassutslipp

En grunnleggende forståelse er altså at utslippsreduksjonene blir lavere etterhvert som man elektrifiserer mindre og mindre trafikkerte strekninger. Det betyr at man i utgangspunktet begynner med de mest trafikkerte strekningene, hvorpå utslippsreduksjonene er størst. Når hensikten ikke er å elektrifisere hele veinettet, så blir det et spørsmål om hvor langt det er tilrådelig å gjøre tiltak på stadig mindre trafikkerte veier. Med andre ord, hvor stor andel av veinettet skal vi elektrifisere?

I hvor stor grad man skal elektrifisere norske veier er blant annet avhengig av hvor mye man ønsker å redusere klimagassutslippene. Faktum er at med oversikt over trafikksamsetningen på ulike strekninger her i landet, så er det mulig å si noe om hvor store klimagassutslipp det er på disse strekningene. Ved å erstatte disse strekningene med elektrisk vei, så finner vi også hvor store utslippsreduksjoner det gir. (Taljegard et al., 2017) har blant annet undersøkt hvordan CO₂-utslippene fra veitrafikken i Norge kan reduseres ved å elektrifisere deler av hovedveiene. **Fig. 4.3** er hentet fra dette arbeidet. Den viser i hvor stor grad en elektrifisering av de mest trafikkerte strekningene på europaveier (E) og riksveier (N) i Norge kan bidra til å redusere CO₂-utslippene. Horisontalaksen er altså ordnet slik at de mest trafikkerte strekningene regnes først, og dermed flater kurvene ut som følge av at de representerer etterhvert mindre trafikkerte veistrekninger.



Figur 4.3: Absolutte (millioner tonn) og relative utslippsreduksjoner i veitrafikken i Norge som funksjon av at en økt andel av de mest trafikkerte strekningene med europavei (E) og riksvei (N) blir elektrifisert. Figur: Taljegard et al. (2017)

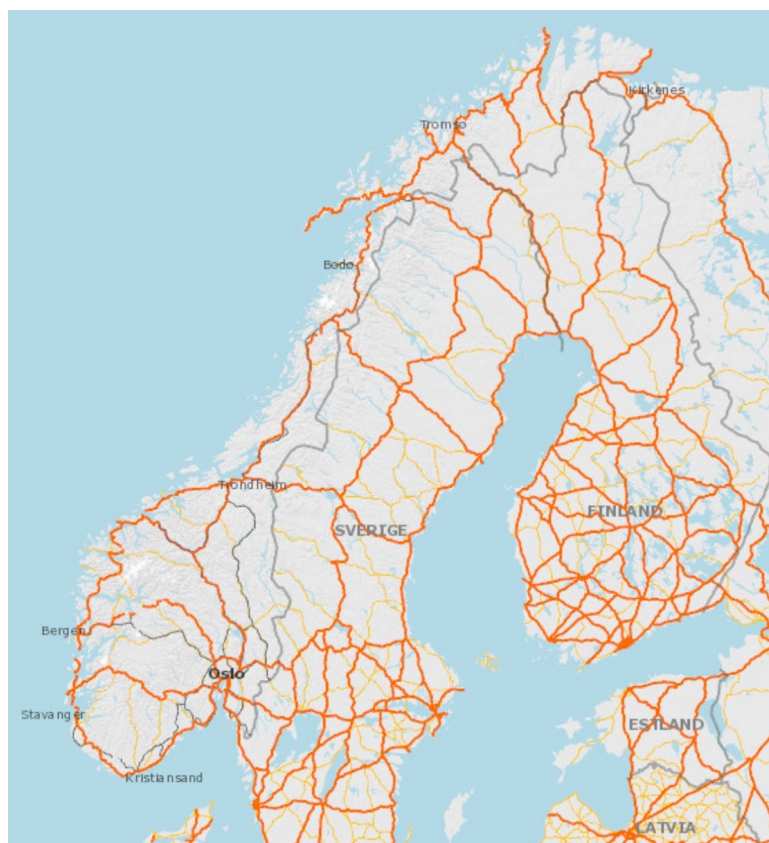
Det er i det hele tatt svært mye informasjon å lese ut av **fig. 4.3**. Ikke overraskende er de relative utslippsreduksjonene størst ved å elektrifisere de mest trafikkerte strekningene. Det gjelder både samlet sett, samt for henholdsvis lette og tunge kjøretøy hver for seg. De reelle utslippsreduksjonene (heltrukken kurve) er større ved å elektrifisere en viss andel av de mest trafikkerte strekningene for lettere kjøretøy, kontra de tyngre kjøretøyene. I forbindelse med de relative utslippene innenfor hver kjøretøykategori er det imidlertid motsatt. Det skyldes rett og slett at de totale utslippene fra lettere kjøretøy i trafikken er større enn de samlet sett er for tyngre kjøretøy.

Figuren viser at en fullstendig elektrifisering av norske E- og N-veier (inkludert alle kjøretøygrupper) kan bidra til å halvere de totale CO₂-utslippene fra veitrafikken. Tiltak på halvparten av disse veiene vil ennå gi nærmere 45% reduksjon i de totale utslippene. Sistnevnte er derfor tilsynelatende mye mer gunstig rent samfunnsøkonomisk sett. I hvor stor grad man skal elektrifisere norske veier er nemlig også et økonomisk spørsmål. Et økonomisk perspektiv kan også være grunnlag for å vurdere om man skal bygge ladesystemer som egnet for alle kjøretøygrupper. Det er kanskje billigere å bygge elektrisk infrastruktur som skal forsyne lettere kjøretøy, og **fig. 4.3** viser at de reelle utslippsreduksjonene på en gitt strekningsandel er større for lettere kjøretøy enn for tunge kjøretøy.

Utviklingen i veitransporten taler imidlertid i mot dette. Utslipp fra personbiler går ned som følge av innføringen av nullutslippsteknologi, og teknologien har kommet langt nok til at det kan dekke kjøring over lengre distanser på hovedveiene. Stor vekst av nullutslippskjøretøy her i landet, vil antageligvis bidra til å redusere utslippene fra lettere kjøretøy betraktelig de neste årene – både på og utenfor hovedveiene. I motsatt fall går utslippene fra tunge kjøretøy opp, og det mangler utbredt klimavennlig teknologi som er egnet for tyngre kjøretøy over lengre distanser. **Fig. 4.3** viser at nærmere 60% av de totale utslippene fra tyngre kjøretøygrupper i Norge kommer fra E- og N-veiene. Hva gjelder reduksjon av klimagassutslipp fra veitrafikken, er det derfor rimelig å påpeke et større behov for elektrisk forsyning til tyngre kjøretøy på hovedveiene.

Når man først og fremst er opptatt av å gjøre tiltak på hovedveiene, er det egentlig av mindre betydning å se på hvordan ulike strekningsandeler påvirker utslippsreduksjonene totalt sett. E- og N-veiene representerer “bare” halvparten av de totale utslippene fra vei i Norge, og i direkte forstand bidrar elektrifisering av hovedveiene kun til å redusere utslippene fra hovedveiene selv. Det høres kanskje banalt ut, men det svarer for at man ikke trenger å elektrifisere svært omfattende strekningsandeler for å få en reell stor reduksjon nettopp fra disse strekningene. Svart heltrukken kurve i **fig. 4.3** viser at tiltak på 10% av de mest trafikkerte E- og N-veiene gir en halvering av utslippene fra disse veiene. Tilsvarende måtte vi elektrifisere samtlige hovedveier i Norge – dvs. ti ganger så mye vei, for å få en halvering av utslippene totalt sett. I følge (Taljegard et al., 2017) svarer 10% av E- og N-veiene til en samlet strekning på rundt 1 100 km, som igjen kun tilsvarer ca. 1,2% av det totale veinettet her i Norge. Poenget er derfor at elektrisk vei er svært godt tilpasset til hovedveiene med hensyn til å redusere klimagassutslipp, nemlig fordi det ikke krever svært stor utstrekning. Vi ser også av **fig. 4.3** at elektriske veier alene ikke kan brukes for å få klimagassutslippene fra veitrafikken ned til et minimum.

Er det virkelig så enkelt at vi bare kan gå ut å elektrifisere de aller mest trafikkerte strekningene langs med hovedveiene her i landet? Svaret på det er mest trolig nei. Det er viktig å ha en god forståelse for hva disse tallene egentlig presenterer, og ikke bare stole blindt på at de tilsynelatende bestemmer hvilke veier som er hensiktsmessig å elektrifisere. Faktum er at mange av strekningene med størst trafikk her i landet er nært knyttet til områdene i og rundt byene. Dersom tiltakene konsekvent blir rettet mot de mest trafikkerte veistrekningene, vil vi i stor grad også få en “urbanisering” av elektriske ladestier. Det medfører gjerne at det blir stor innbyrdes avstand mellom ladestiene, og er ikke gunstig for de som skal bevege seg over lengre distanser på hovedveiene. Trafikken på bynære strekninger kan være stor fordi mange beveger seg til og fra byene, men mange av disse vil kanskje i mindre i grad være avhengig av elektrisk forsyning på vei. Ladestiene må distribueres slik at kjøretøyene som skal langt – kan komme seg fram på en god måte. Det innbefatter at man i tilfeller også må elektrifisere strekninger som ikke nødvendigvis alltid er fullt så trafikkerte.



Figur 4.4: De største hovedveiene i Norge og Norden. Illustrasjon: Vegdata.no

Fig. 4.4 viser blant annet at det er relativt store avstander mellom de store byene som Oslo, Bergen og Trondheim. Spesielt sammenlignet med den sørlige delen av Finland, hvor de store hovedveiene utgjør et mye mer finmasket veinett. Lange avstander mellom byene her i Norge, medfører at vi ikke bare kan elektrifisere de mest trafikkerte strekningene. Vi må trolig elektrifisere flere strekninger mellom byene for at det skal være hensiktsmessig å komme seg fram.

Ta for eksempel hovedferdselsåren mellom Trondheim og Oslo. Den består i sin helhet av flere kortere veistrekninger, som hver for seg har stor spredning i trafikkmengde. Først og fremst er det høy trafikk på strekningene inn og ut av de to byene, men det ligger også noen tettsteder i mellom dette som kan knyttes opp mot relativt høy trafikk. Sør for Trondheim kan det likevel tenkes at man må helt til Lillehammer før trafikken blir “stor nok” til å installere elektrisk forsyning i veien. Denne distansen tilsvarer omkring 36 mil, i tillegg til at man skal forsere mange høydemetere over Dovrefjell. Flere elektriske personbiler er gode nok for tilsvarende distanser i dag, men på vinterføre kan det være helt i grenseland. Et av hovedpoengene med elektrisk vei er vel nettopp å kunne redusere størrelsen på batteriene, og da må avstanden mellom ladestrekningene betydelig ned. En annen ting er jo at det også må være mulig å bevege seg noe utenfor hovedveiene. Størrelsen på batterier blir derfor avhengig av hvor, og hvor tett vi distribuerer ladestrekningene.

Planlegging av elektrisk vei kan ikke utelukkende være med utgangspunkt i et samfunnsøkonomisk henseende. Det må også ha som mål å oppfylle visse funksjonskrav for systemet som helhet. For at elektrisk vei skal fungere for langdistanse transport, må vi hensynta de behovene det stiller til blant annet forbruk og forsyning. Hvis målet er å elektrifisere en gitt ferdselsåre, basert med utgangspunkt i f.eks. klimagassutslipp, så vil de funksjonsmessige kravene til systemet i størst grad være bestemmende for volumet av elektrisk forsyning langs veien.

4.5 Forbruk og forsyning

Det er ingen tvil om at det er mange faktorer som er viktige i forbindelse med planlegging og iverksettelse av tiltak for å elektrifisere norske veier. Kanskje den viktigste faktoren er imidlertid at forsyningen av elektrisk energi er tilstrekkelig stor til at trafikken på disse veiene kan foregå på en hensiktsmessig måte. Planlegging av infrastruktur for elektrisk forsyning på vei må derfor vitterlig nok ses i sammenheng med forbruket på veiene.

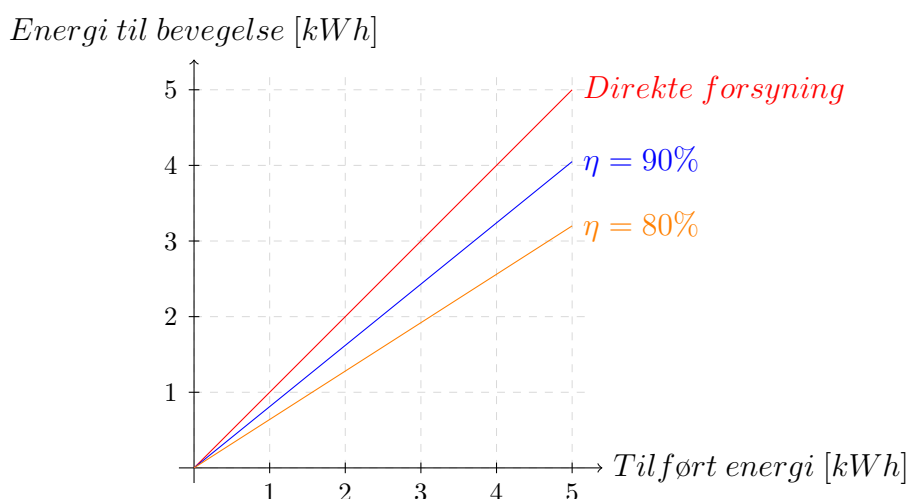
4.5.1 Harmoni mellom batteri og elektrisk vei

Energibehov til kjøretøy på elektrisk vei dekkes vekselvis av opplagret energi, enten fra batteri eller annet drivstoff, i tillegg til direkte elektrisk forsyning fra delvise ladestrekninger på veien. Energiforsyningen utgjør derfor et samspill mellom to ulike forsyningsenheter. På en gitt strekning med et gitt energibehov, blir derfor størrelsesforholdene mellom de to forsyningsenhetene avhengige av hverandre. Hvis vi øker den ene, så kan vi redusere den andre. Noen ganger kan vi til og med øke den ene bare for å få muligheten til å redusere den andre. En gitt sammensetning kan være styrt av mange faktorer, og hensikten blir derfor å skape en best mulig sammensetning på bakgrunn av alle faktorene.

For batterielektriske kjøretøy gjelder et samspill mellom volum av ladestrekninger og batterikapasitet i kjøretøyene. Vi får derfor at begge forsyningsenhetene benytter elektrisk energi fra det overliggende strømmettet. Tilsynelatende svarer det for at størrelsesforholdene mellom enhetene er ubetydelig for den totale energibruken som sådan. Fra et energiperspektiv er det dermed heller ingenting i veien for å benytte grenstilfellene, som

da enten blir ren batteriforsyning, eller elektrisk forsyning langs med hele veinettet. Det er likevel vanskelig å tro at elektrisk vei og batteriforsyning er helt likeverdige når det kommer til energiutnyttelse. I trafikken er det totale energibehovet stort, og bare små relative forskjeller i energiutnyttelsen kan medføre store reelle tap. På bakgrunn av det, er det interessant å gjøre nærmere betraktninger om hvorvidt batteriforsyning er vel så bra som elektrisk vei når det kommer til utnyttelsesgraden av energi. Foreløpig er det kun løsningen med ren batteriforsyning som har gjort nevneverdig inntreden i veitrafikken. Mye av det skyldes trolig store økonomiske forskjeller, i tillegg til at batteri ennå har viktige teknologiske egenskaper. Det henter i hvertfall til at størrelsesforholdene mellom batteriforsyning og elektrisk vei, langt i fra kan begrunnes med små ulikheter i energiutnyttelsesgrad.

Fra den elektriske energien blir til langsgående bevegelse i kjøretøyet – oppstår det tap av energi. Tapene betyr helt enkelt at elektriske kjøretøy ikke greier å nyttiggjøre hele energiforsyningen til bevegelse. Det er vanlig å snakke om at en stor del av tapene skjer i forbindelse med batteriene. Tapene skjer nemlig både når energi skal tilføres batteriet, og når energi skal tas ut av batteriet. De relative tapene kan som regel uttrykkes implisitt ved hjelp av en energivirkningsgrad η . Det kan være utfordrende å finne konkrete tall på virkningsgraden for lading av batteri i elektriske kjøretøy, blant annet fordi det er store forskjeller mellom de ulike produsentene. Basert på et bredt overblikk i litteraturen, er det rimelig å anta en virkningsgrad i området 80-90% for en stor andel av kjøretøyene. Det beskriver altså virkningsgraden for å lade batteriet, mens den samme virkningsgraden stort sett gjelder når energi skal hentes ut av batteriet igjen. Direkte forsyning fra veien vil også medføre visse tap underveis, men det er rimelig å anta at disse tapene tilmed vil inngå for batteriforsyningen. For enkelhets skyld ser vi så bort i fra dette nå. Det omfatter derfor også virkningsgraden i elmotorene. Disse forenklingene er kun ment for å betrakte hovedprinsipper omkring energiregnskapet for henholdsvis batteri og direkte forsyning fra veien. Følgelig kan dette illustreres ved hjelp av en figur.



Figur 4.5: Total energibalanse for to tilfeller med batteriforsyning, sammenlignet med “ideell” direkte forsyning fra elektrisk vei.

Fig. 4.5 illustrerer at kjøretøyene i seg selv utnytter energien bedre når de får direkte elektrisk forsyning fra veien. For å få tilsvarende energi til bevegelse – via et batteri med en virkningsgrad på 90% begge veier, må den tilførte energien i utgangspunktet være:

$$\text{Tilført energi} = \frac{5 \text{ kWh}}{0.90 * 0.90} \approx 6.2 \text{ kWh} \quad (4.1)$$

Basert på dette kan elektrisk vei bidra med å redusere det totale energiforbruket i vei-trafikken – sammelignet med ren batteriforsyning. Hvis man derimot også vektlegger de energitapene som er felles for begge løsningene, f.eks. ved å medregne tap i elmotoren, blir imidlertid forskjellen i energiutnyttelsen mer og mer visket ut. Det er fordi den totale virkningsgraden for systemet er lik produktet av alle virkningsfaktorene i systemet. Et større elektrisk veinett vil normalt også medføre større overføringstap, og dermed får tapene i forbindelse med batteriene mindre betydning. Totalt sett kan dette tyde på at graden av energiutnyttelse har mindre betydning på sammensetningen mellom batteri og elektrisk vei. Det er også vanskelig å bestemme et generelt størrelsesforhold mellom disse kun basert på energiutnyttelse. En tilsynelatende høyere virkningsgrad på elektriske veier, i tillegg til høyere veikostnader, er likevel svært gode argumenter for å etablere elektrisk forsyning på kortere strekninger der hvor forbruket er vesentlig stort.

4.5.2 Strekning, hastighet og tid

I kapittel 2 så vi at for en gitt energioverføring, ble den stasjonære ladetiden avhengig av hvor stor elektrisk effekt vi kunne tilføre batteriet. Ved dynamisk energioverføring på veien gjelder prinsippene om effekt og tid på samme måte, men her er det mer naturlig å snakke om effekten og den dynamiske ladetiden. Dynamisk ladetid er tiden et kjøretøy befinner seg på en ladestrekning, og beskriver derfor tiden det faktisk foregår en energioverføring. Ved kjøring i konstant hastighet kan dynamisk ladetid også beskrives ved hjelp av to andre størrelser, nemlig med hastigheten til kjøretøyet og strekningen på ladestiene. Følgelig er dynamisk ladetid uttrykt som brøken mellom ladestrekning og kjørehastighet, derav likning 4.2.

$$\text{Tid} = \frac{\text{Strekning}}{\text{Hastighet}} \quad (4.2)$$

Fra kapittel 2 husker vi også at lang ladetid generelt er gunstig når man skal overføre mye energi. Før å øke den dynamiske ladetiden kan vi derfor enten 1) øke ladestrekning, eller 2) redusere hastigheten, jf. likning 4.2. Dynamiske ladesystemer på vei er ennå forholdsvis kostbar infrastruktur, og det er derfor et overordnet mål å prøve å begrense hvor lange strekninger man må bygge ut. Motsatt er det imidlertid gratis å senke hastigheten på disse ladestrekningene, selv om det medfører økt kjøretid for den enkelte. Den dynamiske ladetiden er lineært proporsjonal med strekningen over hastigheten. Det betyr at en halvering av kjørehastigheten på en gitt strekning, medfører en dobling i tiden man befinner seg på en denne strekningen. En dobling i ladetiden medfører i sin tur at man kan doble den totale energioverføringen på denne strekningen. For å få til det uten å redusere kjørehastigheten, må man altså doble ladestrekningen. Det igjen medfører gjerne en dobling av byggekostnadene.

En halvering av kjørehastigheten på hovedveiene kan ikke anses for å være en hensiktsmessig løsning for trafikken sett under ett. Selv om alle kjøretøy blir egnet for elektrisk vei, så er det ikke sikkert at alle kjøretøyene vil ha behov for lading på absolutt alle ladestrekninger. Mye tyder derfor på at infrastruktur for forsyning på veien bør ha egne særskilte kjørefelt, hvorpå det er hensiktsmessig for flere å kjøre med lav hastighet. Det må trolig være egne kjørefelt både i en tidlig fase så vel som senere i framtiden. På den måten kan alle trafikanter fortsette å bruke veien som før.



Figur 4.6: Elektriske ladestier må trolig ha egne kjørefelt – enten det er nå, eller i framtiden. Illustrasjon: Highways England

4.5.3 Effekt- og energiforbruk på veien

Effekt og energi er begge svært viktige fysiske størrelser som vedrører hvordan man ferdes på veiene. Effekt har betydning for hvor fort det er mulig å kjøre, eller eventuelt hvor bratt man kan kjøre og samtidig holde en viss hastighet. Energien er dernest et mål på hvor lenge det er mulig å utvikle en gitt effekt, eller hvor mange ganger det er mulig å gjennomføre en bestemt arbeidsoppgave. Det totale energiforbruket (W) på en strekning, kan dermed finnes ved å integrere det tidsvarierende effektforbruket ($p(t)$) over tiden (t) man bruker på nettopp denne strekningen, derav likning 4.3.

$$W = \int_0^t p(t) dt \quad (4.3)$$

Effekt beskriver derfor et arbeid per tidsenhet. Tiden du bruker på å gjennomføre et bestemt arbeid er altså et mål på effekten du har. På veien må kjøretøyene gjøre et arbeid med å utøve en langsgående kraft (F) langs en strekning (s). Tiden de bruker på å gjennomføre dette arbeidet er så med på å bestemme effekten, gitt av likning 4.4.

$$P = \frac{F * s}{t} \quad (4.4)$$

I likning 4.4 uttrykker P en konstant effekt som følge av at kjøretøyet utvikler en konstant kraft F langs hele strekningen s . Det er tilfellet når man kjører langs en homogen strekning med konstant hastighet v . Når vi betrakter konstant kjørehastighet kan vi sette inn for likning 4.2. Derav får vi at effekten kan uttrykkes som:

$$P = F * v \quad (4.5)$$

Effekten kan derfor også betegne hvor stor kraft kjøretøyet greier å utvikle ved en bestemt hastighet. Her er det underforstått at kraften virker i samme retning som hastigheten. Men hvordan finner man kraften F som bestemmer hvor stor effekt kjøretøyet må utvikle i ulike tilfeller? Dette er nemlig viktig informasjon med tanke på å planlegge den elektriske forsyningen langs med veiene. Så langt har vi vært innom enkle, grunnleggende likninger, til å beskrive viktige fysiske størrelser. Veien videre er i utgangspunktet også relativ enkel å forstå, men dersom man skal gjøre svært detaljerte og nøyaktige beregninger, så blir arbeidet raskt svært omfattende. En slik omfattende gjennomgang er ikke hensiktsmessig å gjennomføre her, og det er kun hovedmomentene som blir trukket fram for å overveie hvordan man kan planlegge forsyningen for elektriske veier.

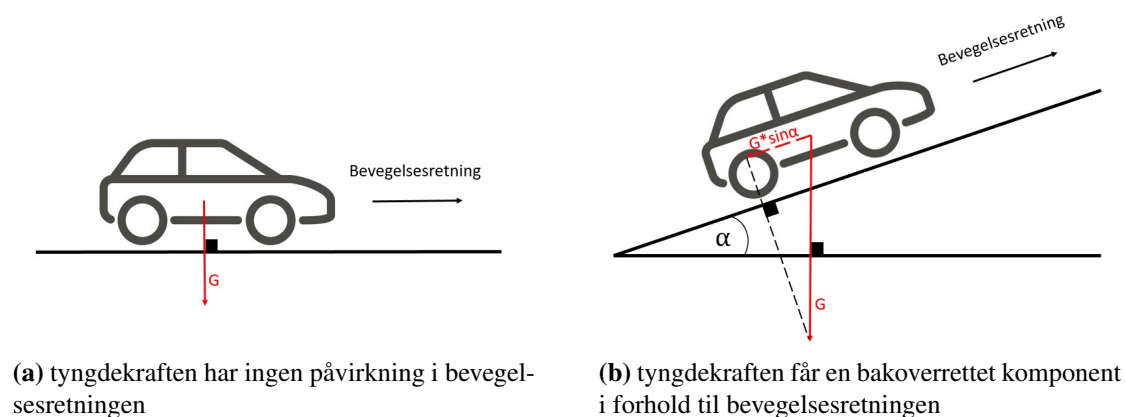
For å forstå hvordan krefter virker på et kjøretøy, er det viktig å kjenne til Newtons lover. Når kjøretøyet beveger seg med en konstant rettlinjert hastighet, så sier Newton at summen av kreftene på kjøretøyet er lik null. Det betyr at kraften som kjøretøyet utvikler i bevegelsesretningen, må være like stor som summen av alle andre krefter som virker på kjøretøyet i mot bevegelsesretningen. For å opprettholde konstant hastighet, må kjøretøyet derfor hele tiden utvikle en kraft som er like stor og motsatt rettet som kreftene fra omgivelsene.

$$\vec{F}_{\text{kjøretøy}} = - \sum \vec{F}_{\text{omgivelser}} \quad (4.6)$$

Av kreftene som virker mot bevegelsesretningen finner vi i stor grad ulike friksjonskrefter. Luftmotstanden er som regel den største komponenten blant friksjonskreftene på veien, og størrelsen på denne kraften henger nøye sammen med hastigheten til kjøretøyet. Luftmotstanden er proporsjonal med kvadratet av kjørehastigheten, hvilket betyr at den får 4 ganger så stor betydning når man dobler kjørehastigheten. Hvis vi kun betrakter luftmotstanden, så blir effektbehovet proporsjonalt med kjørehastigheten i tredje potens, jf. likning 4.5. En liten endring i hastighet vil derfor medføre en stor endring i effektbehov. Det er imidlertid flere krefter som virker fra omgivelsene, og dermed blir ikke den reelle påvirkningen like stor. Poenget er likevel at effektbehovet kan reduseres mye av å senke hastigheten på veien.

Det er åpenbart for mange at også tyngdekraften spiller en viktig rolle for effektbehovet på veien. Faktum er at den har størst betydning ettersom vi beveger oss i vertikalplanet. I motsetning til friksjonskreftene som alltid virker i mot bevegelsesretningen, kan tyngdekraften faktisk påvirke effektbehovet både positivt og negativt. Tyngdekraften (G) virker alltid inn mot jordas sentrum, og dersom vi beveger oss langs en vannrett strekning får vi at tyngdekraften står vinkelrett på bevegelsesretningen, se **fig. 4.7a**. Tyngdekraften har

dermed ingen direkte påvirkning på bevegelsen, selv om den likevel har en viss betydning for friksjonsmotstanden i dekkene på kjøretøyet. Tyngdekraften får imidlertid mye større betydning etterhvert når vi begynner å bevege oss oppover, se **fig. 4.7b**. I motbakke får tyngdekraften en komponent som virker i motsatt retning av bevegelsesretningen, og dermed må kjøretøyet utvikle en større kraft for å opprettholde den samme hastigheten. I nedoverbakke derimot, virker tyngdekraften med bevegelsesretningen. Det medfører at effektforbruket blir lavere, og dernest effektbehovet fra forsyningen. Avhengig av hellingsgrad og hastighet på kjøretøyet, kan effektforbruket i nedoverbakker også bli negativ. Det betyr i så fall at kjøretøyet drives fram av tyngdekraften.



Figur 4.7: Tyngdekraften i forhold til bevegelsesretningen for to ulike situasjoner.

Med et gitt kjøretøy og hastighet, kan vi konkludere med at effektbehovet blir klart størst i motbakkene. Det at tyngdekraften spiller en viktig rolle, medfører også at vekten på kjøretøyene har stor betydning for effektbehovet i ulike tilfeller.

I seksjon 4.5.1 poengterte vi at høyere virkningsgrad ved direkte forsyning kan være hensiktsmessig å utnytte på strekninger hvor forbruket er stort. Det henviser f.eks. til strekninger der det er stor trafikk. For ett enkelt kjøretøy isolert sett, betyr det at det kan være hensiktsmessig å etablere elektriske veier på strekninger med mye stigning. En begrunnelse basert på høyt forbruk tilsier også strekninger der hvor hastigheten er høy, men da vet vi at ladetiden pr. ladestrekning kommer dårligere ut. Selv om elektrisk vei kan forsyne effektbehovet på selve ladestrekningen, ønsker vi også at det skal være mulig å lade batteriene samtidig. Ved å redusere hastigheten på en gitt ladestrekning, kan vi altså øke den tilgjengelige ladeeffekten – samtidig som ladetiden øker.

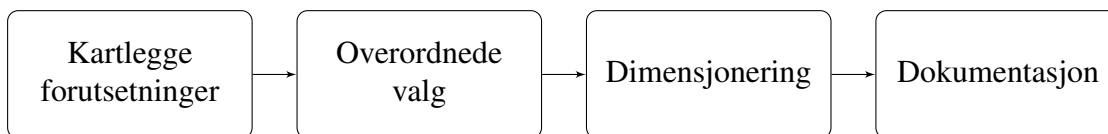
I mange tilfeller skjer det faktisk en naturlig hastighetsreduksjon i forbindelse med motbakker, fordi det blir vanskeligere for kjøretøyet å utvikle nok kraft til å holde en konstant hastighet. Idet kjøretøyet ikke lenger greier å opprettholde en viss hastighet, betyr det i prinsippet at effektforbruket har sin høyeste verdi. Jo større forbruket er, jo større betydning får også virkningsgraden for de reelle tapene som oppstår her. Mye tyder derfor på at elektrisk forsyning langs stigninger på veien, er en generell løsningsmetode som kan være formålstjenlig på mange måter.

4.6 Elektroinstallasjoner

Begrepet *elektroinstallasjon* kan brukes i vid forstand. Det brukes ofte for å betegne elektrisk utstyr som utgjør en bestemt funksjon, eller for elektrisk utstyr som befinner seg innenfor et gitt område, som f.eks. i et bolighus. I dagens “teknologiske samfunn” stilles det gjerne større krav til elektriske installasjoner enn tidligere, og nøye planlegging er derfor viktig. (Hansen, 2010) beskriver viktige mål ved planleggingen av elektroinstallasjoner:

- *Installasjonen skal dekke brukerens behov*
- *Installasjonen skal fungere som tilsiktet*
- *Installasjonen skal ikke være til fare for personer, husdyr og eiendom*

For å tilfredsstille de generelle målene ved store installasjoner, kan det være en fordel å systematisere planleggingsprosessen i faser. Første fase innbefatter gjerne å kartlegge de generelle forutsetningene for prosjektet. I neste fase lar man informasjonen fra foregående fase stå, og bygger videre med ny informasjon. Dersom de ulike fasene kommer i “riktig” rekkefølge, øker sjansen for at sluttresultatet er realistisk med hensyn på de generelle forutsetningene.

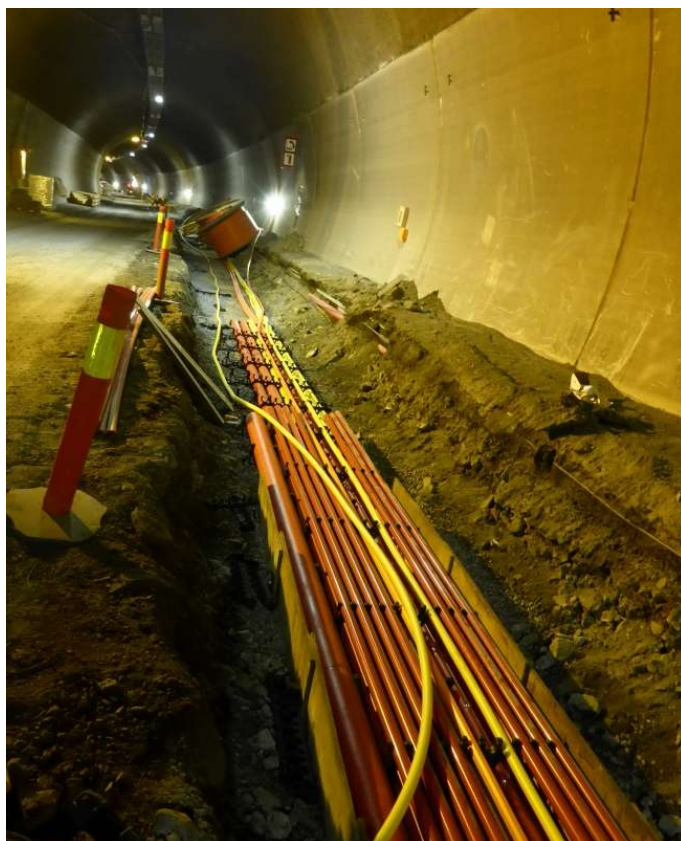


Figur 4.8: Overordnet flytskjema for planlegging av elektroinstallasjoner

Forutsetningene for elektroinstallasjonen er som regel det beste utgangspunktet en har for å begynne å planlegge. En viktig del er å finne ut hvilke nåværende og framtidige behov som skal dekkes. Behovene er i mange tilfeller kanskje den viktigste forutsetningen for hvordan det elektriske anlegget til slutt blir seende ut. I tillegg til behovsanalysen må det innhentes informasjon om ytre forutsetninger for installasjonen, samt andre stedlige forhold som kan være med å påvirke utformingen av det elektriske anlegget. Det kan være forhold knyttet til føringsveier, eller det kan være stedlige forhold som omgivelser og miljø. Stedlige forhold kan også henge sammen med særegne lovmessige krav, f.eks. fra det lokale nettselskapet – eller fra eieren selv.

Med utgangspunkt i de bestemte forutsetningene må det gjøres overordnede valg som har relativt stor betydning for installasjonen. I forbindelse med elektroinstallasjoner kan dette typisk være valg av forsyningssystem. Forsyningssystemet har betydning for installasjonens egenskaper både i drift, og ved feil. Et annet viktig valg er å bestemme hvordan bygningen i praksis skal forsynes med strøm. Plasseringer og antall forsyningspunkter må velges med bakgrunn i behovsanalysen og de bygningsmessige forholdene. Planleggeren må også foreta valg om føringsveier og forsyningsprinsipp, med oppdeling i hovedfordelinger og underfordelinger dersom dette er nødvendig. Installasjonens geografiske

utbredelse har som regel stor betydning for hvordan en velger å løse dette. Ved mindre installasjoner trenger man ikke nødvendigvis en klar strategi – eller gjøre nøye planlegging, fordi omfanget er lite og det er ofte flere gode løsningsalternativer. I tunnelinstallasjoner derimot, er det gjerne færre tekniske og økonomiske gode alternativer.



Figur 4.9: Den naturlige føringsveien for elektrisk energi i tunneler er ofte langs med undersiden av veibanen. Foto: Statens vegvesen

Neste fase i planleggingen går på beregninger og dimensjonering av utstyr. Planleggeren dimensjonerer blant annet lengde og tverrsnitt for alle hovedkabler og kursledninger i installasjonen. Når vi snakker om økt energiutrustning langs det norske veinettet, med tanke på en framtidig innføring av elektriske veier, er det i praksis to ting vi kan gjøre. Det ene er fysisk å bygge ut forsyningsanleggene med kabler og transformatorer som har høyere kapasitet, slik at det meste er på plass for et senere tidspunkt. Alternativ to er å etablere føringsveier med f.eks. trekkeør til lavspen- og høyspenttraseer som i **fig. 4.9**, slik at det blir lettere å installere i ettertid. Sistnevnte vil derfor være en billigere løsning akkurat nå, i tillegg til at man reduserer sannsynligheten for å gjøre unødige tiltak. En kombinasjon av begge alternativene er likevel kanskje den beste løsningen med tanke på langsiktig økonomi.

Konfigurering av elektrisk forsyning i Rogfast

I en konkret situasjon, skal vi se nærmere på planlegging og konfigurering av elektrisk forsyning til kjøretøy på veien. Til dette er det valgt å se på Rogfasttunnelen. Begrunnelsen for det, er først og fremst at Statens vegvesen står som byggherre på dette prosjektet. For det andre har ELinGO vist at elektrisk forsyning i stigningene ut av Rogfasttunnelen kan være en hensiktsmessig løsning på strekningen mellom Stavanger og Bergen. Sist, men ikke minst, ønsker forfatteren å utdype en påstand fra tidligere i rapporten – om at nye norske veitunneler kan være godt egnet for å implementere dynamiske ladesystemer.

Kapittelet begynner med en kort beskrivelse av Rogfasttunnelen, samt viktige kravdokumenter som gjelder i forbindelse med planleggingen og utformingen av elektriske anlegg her. Deretter følger grunnlagene som anses å være gunstige med tanke på å etablere elektriske veisystemer i tunnelen. Avslutningsvis skal vi se nærmere på forsyningsbehov til kjøretøy i tunnelen, og vurdere dette i forhold til den allerede planlagte installasjonen. Målet er å synliggjøre hva som kreves av forsyning til kjøretøy i tunnelen, og hvorvidt det eksisterende elektriske anlegget må utvides eller ikke for å ta imot trafikk på strekningen. Vurderingen gjøres med utgangspunkt i aktuelle data som foreligger fra ElinGo-prosjektet.

5.1 Rogfasttunnelen

I Norge finnes det i dag over 1100 veitunneler, hvor over 30 av disse er undersjøiske tunneler (Statens vegvesen, 2018a). At det finnes så mange tunneler i et lite land som Norge, gjenspeiler at det generelt er krevende å bygge vei her. Varierende landskap med bratte fjellsider og kronglete fjorder, har ført til byggingen av mange veitunneler. Tunneler bygges blant annet for å sikre trafikken i rasfarlige områder. Andre steder kan tunneler være et tiltak som sikrer bedre trafikkflyt. Flere steder ønsker en nå å erstatte tidkrevende ferjesamband med broer og undersjøiske tunneler. Hvis strekningen er lang, eller er utsatt for mye sjø og vind, kan ofte den beste løsningen være å bygge undersjøiske tunneler (Statens vegvesen, 2018a).

I forbindelse med mål om “ferjefri E39 mellom Kristiansand og Trondheim“, vedtok Stortinget i 2017 byggingen av en undersjøisk veitunnel for kryssing av Boknafjorden og Kvitsøyfjorden i Rogaland, se **fig. 5.1**. Tunnelprosjektet har fått navnet Rogfast. I sammenheng med mål om ferjefri E39, er dette det første tiltaket som avløser et ferjesamband på strekningen. Når tunnelen blir ferdigstilt i år 2025-2026, vil den være verdens lengste og dypeste undersjøiske tunnel, med en lengde på 26,7 km og dypeste punkt 392 muh. Tunnelen skal bestå av to løp, og omtrent midtveis i tunnelen blir det et stort toplanskryss for avkjøring opp til Kvitsøy (Statens vegvesen, 2018b).



Figur 5.1: E39 Rogfast. Illustrasjon: Statens vegvesen (2018b)

Prosjektet Rogfast vil med andre ord by på svært mange tekniske og økonomiske utfordringer. Både i planleggingsfasen, så vel som underveis i byggingen. I tillegg til sprenging og bearbeiding av tunnellop på undersiden av havbunnen, krever en slik tunnel en god del elektroteknisk utstyr. De senere årene har kravene til utforming av tunneler blitt strengere, både visuelt og med tanke på sikkerhet (Statens vegvesen, 2018a). Mellom annet legger det ekstra føringer for den elektrotekniske delen av tunnelanlegget. Elektroinstallasjoner i tunnelen innbefatter blant annet belysningsanlegg, nødstrømsanlegg, ventilasjonsanlegg, vannpumpeanlegg m.m., og alt skal forsynes fra tekniske rom som står i tilknytning til tunnellopene. Omfattende elektrisk infrastruktur er trolig det som gjør tunnelen til et godt utgangspunkt for å implementere dynamiske ladesystemer. På den annen side kan omfanget og sikkerhetsutfordringene som er knyttet til dynamiske ladesystemer på vei, nettopp være viktige argumenter for ikke å implementere disse her.

Nedlagte ferjestrekninger kan godt tenkes å være et steg i retning mer klimavennlig transport. Ferjene blir imidlertid erstattet med kjøretøy på vei, og det er derfor hensiktsmessig å forsøke og redusere klimagassutslippene fra trafikken som oppstår på disse strekningene. Det er også hensiktsmessig å vurdere elektriske veisystemer i forbindelse med planleggingen av nye tunnelprosjekter, siden det normalt vil kreve større tiltak å implementere løsninger etter at tunnelen er satt på drift.

5.2 Lov, forskrift og norm

Elektrisitet er ofte forbundet med stor fare. Det foreligger derfor omfattende reguleringer av elektriske anlegg gjennom lover, forskrifter og normer. Den som planlegger en elektrisk installasjon, må kjenne til forskriftskravene som gjelder for nettopp denne installasjonen, for han eller hun er nemlig pliktig til å oppfylle forskriftens krav.

Bygging av veitunneler vedrører en rekke kravdokumenter som legger føringer for planleggingen og utførelsen. For det elektriske lavspenningsanlegget gjelder at den elektriske installasjonen samsvarer med *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg*, forkortet FEL. Forskriften er hjemlet i *Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr*, bedre kjent som el-tilsynsloven. (FEL, 1999) stiller blant annet krav til:

Planlegging og utførelse §16-19, for å sikre at anlegget blir egnet til den forutsatte bruk, og at mennesker, husdyr og eiendom er beskyttet mot fare og skader ved normal bruk

FEL tar for seg de juridisk bindende temaene, men beskriver ikke hvilke detaljerte krav som stilles til utførelsen av anlegget. I veiledningen til forskriften blir det henvist til normen NEK 400, og den kan benyttes for å tilfredsstille sikkerhetskravene i forskriften. I motsetning til lover og forskrifter, er ikke normene forpliktet juridisk. Normene viser imidlertid hvordan det er mulig å oppfylle de lovpålagte kravene. Dersom det benyttes andre løsninger enn de det henvises til i forskriften, må det imidlertid dokumenteres at tilsvarende sikkerhetsnivå er ivaretatt (NEK 400, 2018).

For elektriske installasjoner i veitunneler gjelder også kravdokumenter fra Statens vegvesen selv. Disse er hjemlet i *Forskrift om anlegg av offentlig veg*, etter *Veglovens § 13*. Kravdokumentene, som forskriften henviser til som *Vegnormalene*, består av en serie med håndbøker som må benyttes i utformingen av offentlige veianlegg. Veinormalene gjelder derfor absolutt for alle utbyggere i regi av Statens vegvesen. Underordnet veinormalene finnes det også et utvalg av mer detaljerte veiledninger. Ved planlegging av elektroinstallasjoner i tunnel, benytter man blant annet følgende veinormaler:

- Håndbok N200: Vegbygging
- Håndbok N500: Vegtunneler
- Håndbok N601: Elektriske anlegg

Kravdokumentene i dette delkapittelet gjelder hovedsakelig for forsyning til elektrisk utstyr langs veien slik det er i dag. Det foreligger ikke særskilte krav for de ulike elektriske veisystemene ennå, siden det ikke finnes noe av det her i landet. Enkelte punkter i kravdokumentene i dag vil trolig stride i mot dynamiske ladesystemer på veien. Dette er forhold som etterhvert må tas til ettersyn hvis det skal bli mulig å innføre teknologien på norske veier. Antageligvis må elektriske veisystemer uansett imøtekomme de fleste av kravene som allerede finnes innenfor gjeldende lovverk, og særlig det som angår selve forsyningen av elektrisk energi. Det er derfor hensiktsmessig å ha god kjennskap til de ovennevnte kravdokumentene før man går igang med planleggingen av elektriske veisystemer.

5.3 Gunstige forutsetninger

Av kunnskapen som er opparbeidet gjennom rapportarbeidet, tilsier at det er flere gode grunner til å implementere dynamiske ladesystemer i Rogfasttunnelen. Seksjonene som følger herunder tar sikte på å utdype nærmere omkring de gunstige omstendighetene.

5.3.1 Beskyttelse mot værmessige utfordringer

Generelt for veitunneler gjelder at man blir skjermet for været på utsiden av tunnelen. I lange tunneler slik som Rogfast, blir man stort sett skjermet mot all slags vær og vind, og kan kjøre under tørre stabile forhold hele året rundt. Beskyttelse mot værmessige utfordringer, er en forutsetning som antageligvis vil veie særdeles tungt når det blir snakk om elektriske veisystemer her i Norge. De største utfordringene her til lands er sannsynligvis i forbindelse med snø og frost, som enten dekker til infrastrukturen eller medfører telehiv i bakken. I lange veitunneler – og særlig de som er langt under bakken, er faren for frost svært liten. På den måten omgår Rogfasttunnelen kanskje en av de viktigste utfordringene med å installere dynamiske ladesystemer på veier i Norge.

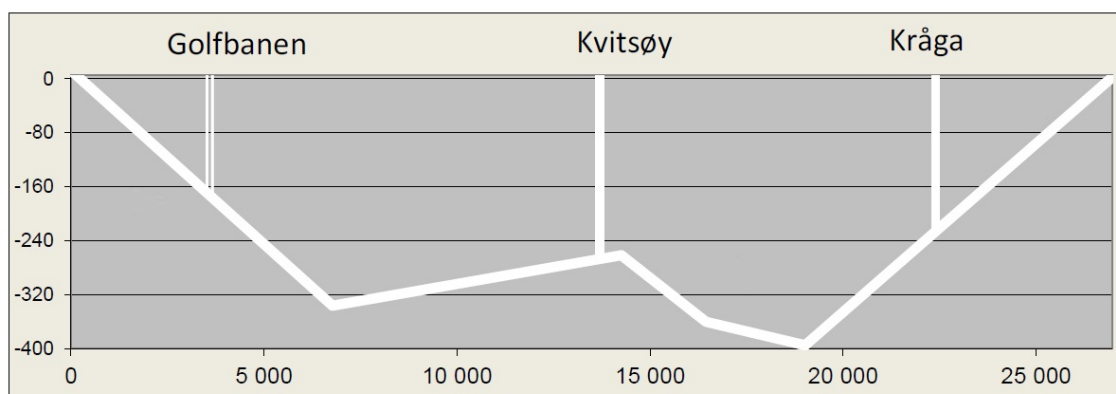
5.3.2 Tunnelens utforming

Rogfast skal bestå av to tunnellop, og hvert løp får to kjørefelter for enveiskjørt trafikk. Minst to kjørefelt i hver retning er generelt fordelaktig dersom man skal installere elektriske veisystemer. Ett felt kan benyttes til å forsyne kjøretøy, som gjerne holder en lav hastighet for å oppnå økt ladetid pr. ladestrekning. Det andre kjørefeltet muliggjør at trafikken kan fortsette å flyte relativt uforstyrret. Konstruksjonsmessig kan tunnelprofilen med to kjørefelt også være fordelaktig med tanke på å installere kjøreledning i taket. Normalt henger belyningsanlegget langs midten av tunnelprofilen, men det kan tenkes å flytte belysningen litt mot siden, slik at det blir bedre plass til kjøreledning langs med ett av kjørefeltene. Selve tunnelprofilen med tak og vegger er dessuten en hensiktsfull måte å føre fram kjøreledningen på, fordi det normalt krever mindre konstruksjonsmaterialer enn på vei utendørs. Når det er sagt, blir det et spørsmål om det er tilstrekkelig takhøyde i tunnelen til å implementere kjøreledning. Håndbok N500 fastsetter at “tunnelprofilen skal gi rom for tekniske installasjoner, og at behov for lokale utvidelser vurderes i hvert enkelt tilfelle”. Derneft kan man spørre seg om kjøreledning langs med tunnelen kan anses for å være en lokal utvidelse. En annen ting er at ventilasjonsvifter i tunneltaket trolig uansett vil komme i konflikt med kjøreledning i tunnelen.

At tunnelprofilen skal gi rom for tekniske installasjoner, gjelder for såvidt også for føringen av elektrisk energi til utstyr i tunnelen. Tilsynelatende er det nokså vanlig med trekkerør mellom kummer langs med veiskulderen. Kontinuerlig føringsvei langs med veibanen er en viktig forutsetning for dynamiske ladesystemer, og særlig for skinnebaserte og trådløse systemer som jo krever forsyning til kortere seksjoner. Disse systemene kan imidlertid kreve at avstanden mellom trekkekummene reduseres i forhold til det som er vanlig praksis i dag, nettopp fordi de behøver nokså jevnlig uttak fra forsyningen. Kanskje kan det til og med være hensiktsmessig å benytte kabelkulverter i forbindelse med disse systemene.

5.3.3 Terrengprofil

I delkapittel 4.5 resonnerte vi oss fram til at strekninger med mye stigning kan være gunstig med tanke på å etablere elektriske ladestier. De fleste undersjøiske tunneler omfatter naturlig nok relativt mye stigning, og således kan Rogfasttunnelen være et godt egnet sted.



Figur 5.2: Terrengprofil for Rogfasttunnelen, sett fra sør mot nord. Tunnellengde (m) langs horisontalaksen og høyde under havet (m) langs vertikalaksen. Illustrasjon: Lotsberg (2015)

Det er altså enkle, generelle betraktninger omkring kjørehastighet og forbruk, som leder oss fram til at stigningene kan være gunstige med tanke på elektriske veier. ELinGO har imidlertid gjort nokså omfattende beregninger på stigningene ut av Rogfast i nord, og foreslår dette som en god løsning for elektriske ladestier på strekningen. Det samme burde derfor gjelde for stigningene ut av tunnelen i sør. Dersom tunnelen forsynes fra begge sidene, innebærer det at vi slipper å føre den høye effekten til kjøretøyene gjennom hele tunnelen, og dermed blir energitapene i forbindelse med kraftforsyningen lavere.

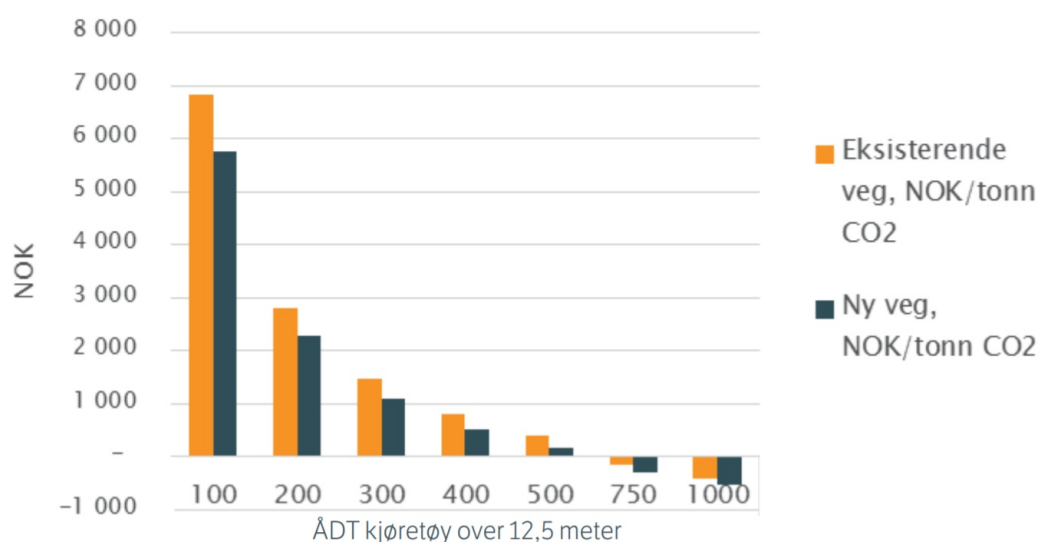
5.3.4 Luftkvalitet

En overgang til mer klimavennlig drivstoffteknologi på strekninger i tunnel, er svært gunstig med tanke på luftkvaliteten inne i selve tunnelene. Trafikken som flyter gjennom tunnelen produserer nemlig støv og eksos som er skadelig å puste inn. Støvet medfører også redusert sikt for trafikantene, både direkte og indirekte, ved at det over tid fester seg til overflatene i tunnelen og reduserer lysforholdene. En generert luftstrøm fra et ventilasjonsanlegg bidrar så til å transportere støv og eksos ut av tunnelen. Tunnelventilasjon har derfor stor betydning med hensyn til helse og sikkerhet. I lange tunneler med stor trafikk, blir andelen av støv og giftige avgasser stor, samt at eksponeringstiden blir lang. For de som benytter tunnelen ofte kan dette ha stor helseskadelig effekt.

En betydelig andel av utslippene skyldes normalt når kjøretøyene befinner seg i stigningene ut av tunnelen. Ved å redusere hastigheten i stigningene, er det også mulig å redusere hvor mye støv som produseres i forbindelse med slitasje på veien. Dynamiske ladesystemer i stigningene ut av tunnelen, kan derfor bidra til å øke luftkvaliteten i Rogfast. På den annen side reduseres også behovet for ventilasjonsanlegg i tunnelen. Det er som regel gunstig med tanke på økonomi, samt for drift og vedlikehold i tunnelen.

5.3.5 Trafikkgrunnlag

Regjeringens strategi for å nå klimamålene, kan gå ut på å iverksette klimatiltak med anslått samfunnsøkonomisk kostnad til under 500 kroner pr. tonn reduksjon i CO₂ (Regjeringen, 2017c). ELinGO har gjort anslag på tiltakskostnader ved elektrifisering av vei for tunge kjøretøy i Norge, se **fig. 5.3**. Anslagene er gjort med utgangspunkt i at en tredjedel av 200 km med vei blir elektrifisert. Tiltakskostnadene er videre basert på gjennomsnittlig døgntrafikk (ÅDT) for kjøretøy over 12,5 meter, og et middels kostnadsestimat for elektrisk vei.



Figur 5.3: Tiltakskostnader pr. tonn CO₂ redusert ved elektrifisering av hhv. ny eller eksisterende vei, som funksjon av antall kjøretøy over 12,5 meter. Figur: Langhelle et al. (2018)

Hvis en går ut i fra **fig. 5.3**, bør det i gjennomsnitt være minst 400 kjøretøy over 12,5 meter hver dag på strekningen med ny vei. Likeledes for eksisterende vei, kreves i underkant av 500 kjøretøy i gjennomsnitt hver dag. Flere veistreknings i Norge er i følge ELinGO allerede innenfor tiltaksgrensene, og dersom prognosen med 2% årlig vekst i godstransporten er reelt, vil mange flere veistreknings etterhvert falle inn under dette sjiktet innen 2030 (Langhelle et al., 2018). Når Rogfast står ferdig i 2025-2026, er det ventet at trafikken på denne strekningen vil øke betydelig, og dermed også på strekningen Stavanger-Bergen. “Erfaringen er at ferjeavløsningsprosjekter gir trafikkvekst langt utover generelle prognoser” (Nørbech, 2018). Likevel er den årlige trafikkveksten på 2% nok til at strekningen Stavanger-Bergen kan havne innenfor tiltaksgrensene innen 2030 (Nørbech, 2018).

Det er mange forutsetninger som ligger til grunn for disse kostnadsberegningene. Likevel er det rimelig å anta at trafikkgrunnlaget i Rogfasttunnelen kan bli godt nok til at det er hensiktsmessig å implementere elektriske veisystemer her. **Fig. 5.3** viser tydelig at trafikken generelt er svært viktig med tanke på de samfunnsøkonomiske kostnadene ved elektrifisering av vei. Når trafikk tallene kommer opp i en viss størrelse, ser vi at tiltakene etterhvert til og med kan bli samfunnsøkonomisk lønnsomme. Figuren viser også at det generelt er billigere å elektrifisere nye vei, sammenlignet med eksisterende veier.

5.3.6 Nettverkstopologi

I seksjon 3.2.2 kom vi inn på at føringsveier langs med veibanen, både for lav- og høyspent fordeling, generelt er gunstig med tanke på forsyning av elektriske veisystemer. Det skyldes blant annet begrensningene i overføringsevne for lavspente forsyningssystemer. I lange veitunneler er det normalt et behov for både lavspent og høyspent kraftoverføring, og det er naturlig at begge føres fram langs med tunnelen og veien. I så fall har Rogfasttunnelen – så vel som mange andre veitunneler, allerede gode betingelser på plass med hensyn til å forsyne elektrisk energi til kjøretøyene som ferdes her.

Det er vanlig å bygge opp forsyningsnettet i en hierarkisk struktur, med elektriske fordelinger på ulike nivåer. Strukturen i oppbyggingen av det elektriske forsyningsnettet kalles gjerne for *nettverkstopologi*. Topologien kan gjøres på mange måter, og bestemmes blant annet ut i fra hvilken type installasjon det er snakk om. I installasjoner med stor geografisk utbredelse, har valg av topologi stor betydning både for tekniske, driftsmessige, samt økonomiske forhold ved installasjonen. For tunnelinstallasjonen er det praktisk å tenke seg en struktur med tre hovednivåer:

På forsyningsnivå: fra høyspent forsyning til nettstasjon

På fordelingsnivå: fra nettstasjon til fordelinger

På kursnivå: fra fordelinger til forbrukskurser

På samtlige nivåer får vi egentlig at tunnelens utforming, utstrekning, og tilgjengelige føringsveier har stor betydning for nettverkstopologien. På forsyningsnivå er det motatt tegninger fra Statens vegvesen direkte. De viser den overordnede nettstrukturen med høyspent forsyning til nettstasjoner langs med tunnelen. I Rogfast er det planlagt å benytte to parallelle radialer – en for hvert tunnelløp, og med forsyning fra regionalnettet på begge sider av tunnelen, se **fig. 5.4**. I tillegg er det flere tverrforbindelser mellom radialene som kan legges inn, slik at forsyningsnettet utgjør et maskenett. En oppnår dermed høyere leveringspålitelighet. Det er også egne nettstasjoner for hvert tunnelløp. Disse har typisk en innbyrdes avstand på 1500 m, og står plassert i tekniske rom i nær tilknytning til tunneløpene.



Figur 5.4: Illustrasjon av høyspent forsyningsnett i Rogfasttunnelen

Videre opplysninger – som også kommer fram av Statens vegvesen direkte, er omkring den planlagte installerte effekten til utstyr i tunnelen, samt planlagt traføyttelse i forbindelse med nettstasjonene. Alle transformatorer er imidlertid ikke like store, på grunn av variasjoner i omfanget av elektrisk utstyr langs med tunnelen. I forbindelse med stigningene ut av tunnelen, er det i hovedsak planlagt å bruke nokså like transformatoryttelser.

Planlagt traføyttelse	1250 kVA
Effektfaktor $\cos \phi$	0.85
Planlagt installert effekt	630 kW
“Ledig” aktiv effekt	433 kW

Tabell 5.1: Effektrekningskap for en typisk nettstasjon i stigningene ut av Rogfast.

Tab. 5.1 viser at tilgjengelig effekt til kjøretøy på veien er i overkant av 400 kW, slik installasjonen er planlagt i dag. Dette er imidlertid basert på den totale installerte effekten til komponentene i anlegget, men det er sjelden at alle komponentene er i drift samtidig med maksimal belastning. I hvor stor grad komponentene i installasjonen yter sin maksimale belastning samtidig, beskriver det vi kaller for samtidighetsfaktoren til installasjonen. Ofte er det slik at jo flere komponenter som inngår i installasjonen, jo lavere blir samtidighetsfaktoren for systemet som helhet. Statens vegvesen beskriver derfor også et estimert maksimalt effektforkbruk i tunnelen ved rushtrafikk, men her varierer tallene nokså mye mellom hver enkelt nettstasjon. Bare i forbindelse med stigningene ut av tunnelen, kan det maksimale effektforkbruket variere mellom 150 og 500 kW. Det er likevel en god del mindre enn de 630 kW som totalt er installert i hver nettstasjon. Hvis vi forutsetter at samme effektfaktor gjelder – uavhengig av belastning, medfører det at tilgjengelig effekt til å forsyne kjøretøy på veien kan variere fra alt mellom 563 til 913 kW. Selv i de mest “tunge” periodene med rushtrafikk, er den tilgjengelige effekten faktisk større enn den totale belastningen på forsyningen. Det tyder på at forsyningsnettet i tunnelen er relativt romslig med tanke på å tilknytte flere belastninger. Før vi kan si mer konkret om hvorvidt forsyningsnettet er egnet for å ta imot kjøretøy på veien, må vi se nærmere på hvor stor effektlastning kjøretøyene medfører.

5.4 Elektrisk infrastruktur for godstransport

ELinGO har gjort beregninger med elektrisk vei på strekningen mellom Stavanger og Bergen, for å undersøke mulighetene med å redusere batterikapasiteten for tynge godkjøretøy. Her er det undersøkt ulike scenarier, og et av scenariene omfatter å etablere elektriske ladestier i Rogfasttunnelen, samt en annen undersjøisk tunnel på strekningen. Dette omtales som “14%-scenariet”, som viser til at 14% av den totale kjøretiden på strekningen er med elektrisk forsyning fra veien. 14%-scenariet omfatter 15 km med elektrisk forsyning i forholdsvis bratte stigninger, hvorav 10 km av dette er stigningene ut av Rogfast i nord. Med denne konfigurasjonen av elektrisk vei, viser ELinGO at tynge godstransport på strekningen mellom Stavanger og Bergen kan redusere batterikapasiteten i kjøretøyene med en tredjedel (Langhelle et al., 2018).

Det er selvfølgelig mange forutsetninger som er lagt til grunn for disse beregningene, og det er ikke meningen å utdype nærmere rundt disse i denne rapporten. Utfyllende informasjon om beregningene ligger tilgjengelig i “arbeidspakke 3” under prosjektet (Rennemo et al., 2018). Vi er imidlertid interessert i å se på effektverdiene som er brukt i forbindelse med kjøretøyene og den elektriske forsyningen langs veien. Siden ELinGO kun fokuserer på forsyning av godstransporten, skal vi i videre betraktninger om den elektriske forsyningen i tunnelen – også kun fokusere på denne typen kjøretøy.

ELinGO forutsetter å bruke 300 kW forsyning til hvert enkelt kjøretøy langs veien. Beregningene viser imidlertid at nesten all denne effekten går med til direkte forsyning når kjøretøyene befinner seg i stigningene ut av Rogfast. Lading av batterier er omtrent utelukket på denne delen av strekningen, selv om kjøretøyene ikke kjører fortere enn omlag 40 km/t. På den annen side medfører det at energivirkningsgraden for forsyningen blir høyere, siden vi unngår tapene i forbindelse med batteriene (Rennemo et al., 2018). Grunnlag for forsyning av tunge godskjøretøy i tunnelen, kan derfor baseres på at hvert enkelt kjøretøy krever omlag 300 kW med elektrisk forsyning. I prinsippet kunne man gjerne valgt et høyere tall, og på den måten hatt mulighet til enten å lade batteriene samtidig, eller rett og slett kjøre fortere. Med hensyn til bedre energivirkningsgrad, og at de fleste dynamiske ladesystemene pr. dags dato har lavere forsyningsevner enn 300 kW, synes det hensiktsmessig å holde seg til denne verdien i planleggingen av tunnelen.

I seksjon 5.3.6 fant vi ut at tilgjengelig effekt i hver enkelt nettstasjon kan variere mellom omlag 550 til 900 kW langs med stigningene ut av tunnelen. Det betyr at hver enkelt nettstasjon greier å forsyne minst ett kjøretøy av gangen. I prinsippet er det også mulig at én nettstasjon kan forsyne tre kjøretøy samtidig, men i praksis vil det kunne oppstå problemer etterhvert som man beveger seg mellom ulike nettstasjoner. I størst grad kan vi kanskje si at det er mulig på forsyne to kjøretøy samtidig med én enkelt nettstasjon. Utenfor rushtrafikk burde det i alle fall være mulig, for da vil den tilgjengelige effekten normalt også være større. Likevel er det kanskje i rushtrafikk at temaet om flere kjøretøy samtidig blir mest aktuelt. Transformatorene kan dessuten, under visse forbehold, også gå med mindre overbelastninger gjennom kortere perioder. Mye tyder kanskje på at det skal være mulig å forsyne to kjøretøy samtidig fra hver enkelt nettstasjon.

Med utgangspunkt i to kjøretøy pr. nettstasjon, kan vi undersøke nærmere om hvor stor trafikk det er mulig å forsyne i stigningene i Rogfast. Hver nettstasjon dekker omlag 1500 m, og vi forutsetter, med bakgrunn i ELinGO, at godstransporten kjører med en konstant hastighet på 40 km/t i stigningene. Derav kan vi finne den minste gjennomsnittlige avstanden mellom kjøretøyene, målt i sekunder:

$$\frac{0.75 \text{ km} * 3600 \text{ sek/t}}{40 \text{ km/t}} = 67.5 \text{ sek} \quad (5.1)$$

Denne avstanden bruker vi så til å bestemme maksimalt antall kjøretøy som kan forsynes i løpet av en dag:

$$\frac{60 \text{ sek} * 60 \text{ min} * 24 \text{ timer}}{67.5 \text{ sek/kjøretøy}} = 1280 \text{ kjøretøy} \quad (5.2)$$

Likning 5.2 viser altså maksimalt 1280 kjøretøy i løpet av en dag. I seksjon 5.3.5 var vi inne på at trafikken for kjøretøy over 12,5 meter på strekningen mellom Stavanger og Bergen, antageligvis kan komme opp i omlag 500 kjøretøy pr. dag innen år 2030 (Nørbech, 2018). Det kan tyde på at Rogfasttunnelen er kapabel til å ta imot all godstransport som er ventet på strekningen i mange år framover. Selvfølgelig vil det kunne oppstå noen praktiske utfordringer ved at enkelte kjøretøy kommer for tett innpå hverandre. I den forbindelse kan det være hensiktsmessig å gjøre tiltak slik at godstransporten holder en viss avstand i stigningene. Lignende tiltak gjelder forøvrig også i andre sammenhenger med veitrafikken i dag. Det er vanskelig å vurdere svært konkret hvordan dette vil kunne foregå i praksis, da godstransporten ofte er mer spredt blant døgnets timer enn det personbiltrafikken er. En god del av godstransporten foregår i tillegg utenfor rushtrafikken. Det er mange avveininger i forbindelse med dette området, og en nøye vurdering bør gjøres før man setter i gang å bygge elektrisk vei i tunnelen.



Figur 5.5: eHighway fungerer tilsynelatende selv med tett trafikk. Foto: Siemens AS

Til nå har vi sammenlignet med ventet trafikk mot år 2030, men elektriske forsyningsanlegg har gjerne en levetid som er mye lengre enn det. Kanskje bør vi planlegge etter ventet trafikk i 2050, sånn at vi slipper å gjøre store oppgraderinger på forsyningsanlegget underveis. På den annen side vet vi at det er stor usikkerhet omkring elektriske veisystemer i dag, så vel som at det er vanskelig å spå trafikken langt fram i tid. Det er nesten umulig å si hvor mange kjøretøy som vil benytte seg av elektrisk forsyning langs veien i framtiden. I Nasjonal transportplan for 2018-2029 er det et mål at: “innen 2030 skal 50% av nye lastebiler være nullutslippskjøretøy” (Regjeringen, 2017a). Det kan bety at selve trafikkgrunnlaget i Rogfast innen 2030, er mye lavere enn de 500 kjøretøyene vi først snakket om. Det er heller ikke gitt at de 500 kjøretøyene kun svarer til godstransport, en viss andel er antageligvis også buss. Kanskje vil godstransporten på strekningen bare bestå av rundt 100-200 kjøretøy som faktisk kan benytte seg av elektrisk forsyning fra veien. Tiltak i forbindelse med Rogfasttunnelen blir dermed mindre gunstig rent økonomisk, men den allerede planlagte elektriske forsyningen i tunnelen står derimot mye bedre rustet til å forsyne alt av egnet godskjøretøy på strekningen.

Diskusjon

Underveis i arbeidet har det blitt tilegnet ny kunnskap. Ny kunnskap har dannet grunnlaget for å tilegne ytterligere ny kunnskap, og slik har det foregått en jevn progresjon i arbeidet. Når vi nå nærmer oss slutten, kan det være nyttig å se tilbake på arbeidet som har blitt gjort, med bakgrunn i den kunnskapen vi nå besitter. Selve utgangspunktet for arbeidet var å undersøke muligheter og utfordringer med elektriske forsyningsløsninger på vei i Norge.

6.1 Elektrisk vei i Norge

I kapittel 2 er det forsøkt å gi et innblikk i hvorfor elektrisk forsyning på veien kan være en god drivstoffløsning i Norge. Der får vi se flere gode grunner til å satse på mer elektrisitet i trafikken her i landet. Framfor alt med tanke på tilgangen til ressursene, men også på grunn av bred og god kunnskap om både produksjon og bruk av elektrisk energi. Det faktum at så og si all elektrisk kraft som produseres i Norge er med vannkraft, er antageligvis ett av de viktigste argumentene for å elektrifisere mer av trafikken på vei.

En økning i antall elektriske kjøretøy medfører imidlertid økte krav til elektrisk forsyning rundt om i landet. Derfor kan utbygging av lokal sol- og vindkraft være hensiktsmessige løsninger for å møte et økende behov for elektrisk forsyning på veien. Igjen kommer viktigheten av stor tilgang på vannkraft inn i bildet. Vannkraft fra magasinkraftverk gir oss muligheten til å lagre “elektrisk energi” i store batterier (dammer). I motsetning til sol- og vindkraft, er magasinkraftverkene derfor en stabil, fleksibel, og pålitelig energikilde. Ikke minst er elektrisiteten fra vannkraft svært energieffektiv sammenlignet med de fleste andre alternativer. Med sol- og vindkraft er det i stedet en utfordring når været ikke tillater å produsere strøm. I motsatt fall kan det også bli en utfordring at det produseres for mye. Sol- og vindkraft har nemlig lav reguleringsevne sammenlignet med magasinkraftverkene, og det er i det hele tatt ikke mulig å basere et stort forsyningsnett kun på slike energikilder. Med stor tilgang på vannkraft her i landet, har vi muligheten til å utnytte sol- og vindkraft på en god måte. Dermed sparer vi også magasinene våre, og vi får en vinn-vinn-situasjon.

Det kan være mange måter å argumentere for elektrisk vei her i landet. En måte det blir gjort på i kapittel 2, er å argumentere for at andre klimavennlige løsninger ennå ikke er tilstrekkelig nok. Infrastrukturkostnad er en stor utfordring i forbindelse med elektriske veisystemer, men dette gjelder forsåvidt også for alle de andre klimavennlige drivstoffteknologiene som er nevnt. Hydrogen og biogass er relativt lite utbredt i Norge, og en av de viktigste utfordringene er nettopp lademulighetene. Antall batterielektriske kjøretøy øker som aldri før, men det gjør følgelig også behovet for ladestasjoner. Samtlige av alternativene har sine begrensninger, og det kan bli utfordrende å imøtekomme hele veitrafikken selv med alle de tre løsningene vi har i dag. Det at andre løsninger ikke virker å være tilstrekkelig nok, kan være en viktig årsak til at fokuset blir mer rettet mot elektrisk forsyning på veien. Samtidig ser vi at elektrisk vei kan egne seg i hybride løsninger med enhver av de andre drivstoffteknologiene.

6.2 Teknologien

Elektriske veisystemer består i alt av flere teknologiske løsninger. Samtlige av veisystemene har imidlertid både fordeler og ulemper til hverandre. Blant annet er ikke alle systemene egnet for å forsyne ulike kjøretøygrupper samtidig. Dette gjør at det blir vanskeligere å kåre vinnere og tapere blant de ulike systemene. Ikke bare kan kjøretøyene ha ulike forutsetninger, men ofte har også omgivelsene ulike forutsetninger, og medfører at det kan være naturlig å benytte forskjellige løsninger i ulike sammenhenger. For veitrafikken som helhet, synes det likevel å være gunstig at flest mulig kjøretøy kan benytte en og samme teknikk, og dermed én felles ladeinfrastruktur. Betrachninger om økonomi og klimagassutslipp, viser nettopp at trafikkgrunnlaget spiller en sentral rolle i denne sammenhengen.

Foreløpig er det liten konsensus om hvilken ladeteknologi som eventuelt kan bli den “ene” løsningen for veitrafikken. Dermed oppstår et problem med å innføre teknikken allerede i dag. Noen mener kanskje at konduktive ladesystemer er den mest modne teknikken akkurat nå, men at trådløs lading bør være framtidens løsning. Da blir spørsmålet hvordan veitrafikken skal forholde seg til denne utviklingen. I teknologisk sammenheng vet vi at første løsning som regel ikke er den beste løsningen. Den beste løsningen kommer ofte som et resultat av en teknologisk utvikling, og kanskje aller mest fordi teknologien underveis blir tatt i bruk og får gjennomgått mye testing. Generelt kalles dette for prøve-og-feile-metoden. Den kan ofte medføre store feiltrinn, eller dyre løsninger, men metoden er gjerne en viktig forutsetning for at man i det hele tatt lykkes med å oppnå et resultat.

Vi kan ikke sitte nede og vente på at løsningene etterhvert skal bli “gode av seg selv”. Følgelig har vi to mulige strategier å gå videre med. Enten først installere konduktive systemer, og etterhvert bytte om til trådløst system. Eller begynne med trådløse systemer i dag, for så å oppgradere teknikken underveis. Selv om vi begynner å bygge elektrisk vei i dag, betyr ikke det at alle strekninger med elektrisk vei i framtiden har måttet gjennomgå den samme prosessen som beskrevet over. Det vil ta tid å bygge opp under denne teknologien, og første løsning for et nytt veiprojekt, vil forhåpentligvis være en forbedret løsning fra et annet tidligere prosjekt.

Mye tyder altså på en gradvis innføring av forsyningssystemene på veien. Både med hensyn til systemenes utstrekning, så vel som de teknologiske løsningene underveis. Videre må man spørre seg hvordan dette vil ha påvirkning på veibyggingen her i landet. Stadig nye utskiftninger, og attpåtil nye løsninger, synes å være en krevende framtid for utbyggere av vei.

Likevel kan det hende at utviklingen av nye systemløsninger passer inn med den naturlige syklusen for utskifting av veier i Norge. Veien skal kanskje ligge der i 100 år, men selve veidekket må normalt skiftes etter 10-15 år uansett. Kombinert med legging av nytt asfaltdekke, kan det være hensiktsmessig å installere eller forbedre løsninger for elektrisk forsyning i veien. I løpet av denne perioden har det trolig skjedd større teknologiske forbedringer, og modifikasjoner etter en slik periode er kanskje ikke så dumt likevel. Dette kan også bidra til en positiv utvikling innenfor veibyggingen, slik at løsninger enten på ny eller gammel vei, etterhvert både blir enklere, raskere, og billigere å installere. Kanskje kan vi finne nye og bedre løsninger med å forsyne elektrisk energi langs med veiene.

En viktig egenskap med elektrisk forsyning på veien, er at det åpner mulighetene for å utnytte mer av de klimavennlige drivstoffalternativene i hybride løsninger. Ofte snakker vi om at elektriske veier er bedre enn de alternativene drivstoffteknologiene, men faktum er at vi ikke skal ha direkte elektrisk forsyning overalt i veinettet. Kjøretøyene er derfor avhengige av interne energilagere, og det kan gjøres med en effektiv utnyttelse av ulike energikilder. I Norge ønsker vi kanskje først og fremst å utnytte mest mulig elektrisitet til kjøretøyene. Til en viss grad, ser vi derfor helst at elektrisk forsyning på veien skal gå med til å supplere batteriløsningene, slik at det etterhvert blir mindre behov for batterier i trafikken. Dernest får vi at jo større tiltak som gjøres på veien, desto mer kan vi redusere batteriene.

Foreløpig ser vi det slik at elektriske veier er en dyr løsning, men at teknologisk utvikling kan medføre langt billigere løsninger i framtiden. Spørsmålet er hvordan kostnader skal vurderes dersom utviklingen innenfor batteriteknologien går i akkurat samme retning. Det meste tyder nettopp på ytterligere forbedringer av batteriteknologien, og det kan medføre både lavere pris og vekt i framtiden. Kanskje går utviklingen slik at den kostnadmessige forskjellen mellom begge teknologiene forblir nesten uendret selv mange år fram tid. I så fall er det vanskelig å si om forsyningsløsningene på vei eventuelt bør bli tatt i bruk i større omfang.

6.3 Alt-i-ett-system

Det er verdt å merke seg at samtlige av de dynamiske ladesystemene presentert tidligere, i praksis også skulle kunne fungere når kjøretøyene ikke beveger seg. Vi har så langt betraktet dynamiske ladesystemer ved at kjøretøyene stadig er i bevegelse. En annen måte å betrakte dette på er når kjøretøyene står i ro, men fortsatt befinner seg på selve veien. Dette kan typisk være i forbindelse med lyskryss, eller holdeplasser for kollektivtransport. På den måten oppnår vi at kjøretøyene ennå kan lade på stedene de allerede befinner seg.

Lading i forbindelse med holdeplasser for buss eller taxi er et tema som allerede er vel kjent for mange. Det finnes nemlig flere eksempler der pantograf eller trådløs lading er benyttet til lading ved bussholdeplasser (ABB (2017), Bombardier (2017)). Holdeplasslading for kollektivtransport kan godt betraktes som en variant av elektrisk vei. Spørsmålet er likevel om disse kjøretøyene også skal kunne lade mens de faktisk kjører på veien. Det gjelder kanskje i større grad for taxiene, som jo ikke kjører faste ruter, og som tidvis gjerne har behov for å operere over større områder.

De nye elbussene til AtB i Trondheim skal imidlertid bruke 3 til 6 minutter på lading ved endeholdeplasser (AtB, 2019). Med en kombinasjon av elektrisk forsyning langs med rutene vil det være mulig å redusere ventetiden, samtidig som påliteligheten til systemet øker. I så fall vil det være gunstig at kjøretøyene kan lade på samme måte på veien, som når de lader på holdeplassene. Poenget er derfor at dynamiske ladesystemer kan ha mulighetene for å skape et “alt-i-ett-system” for kjøretøyene på vei. Å være kompatibel med flere ulike ladesystemer krever normalt større inngrep på kjøretøyene, og det er sannsynligvis ikke hensiktsmessig hverken teknisk, eller økonomisk.

Kanskje er det enklere å se for seg denne situasjonen med personbiler på vei. Elektrisk vei vil trolig aldri bli så omfattende at det fjerner behovet for stasjonær lading, hverken på større ladestasjoner eller i stikkontakten hjemme. Det er derfor svært fordelaktig hvis samme ladeteknikk kan benyttes enten vi lader i stillstand, eller når kjøretøyet er i bevegelse.

Det er ikke dermed sagt at en felles løsning gjør det enklere å bestemme hvilket ladesystem vi skal bruke. Dessuten er det vanskelig å tro på et felles system med alle kjøretøygruppene samtidig. Trådløs lading er kanskje den mest fleksible løsningen totalt sett, men det kan knyttes en viss usikkerhet opp mot relativt høye kostnader og lavere forsyningsevne. Skinnesystemene er også tilpasset for ulike kjøretøygrupper, men kan trolig by på større utfordringer med vinterføre her i landet. I tillegg kan berøringsfaren i forbindelse med skinnene kanskje gjøre at systemet ikke er anvendelig i alle situasjoner med trafikk på vei. Pantograf for kjøreledning eller holdeplasslading er kanskje den sikreste løsningen med tanke på omgivelsene, men den tillater kun forsyning til større kjøretøy som vogntog og busser. Kjøreledningen har dessuten et mye større miljømessig avtrykk sammenlignet med de andre teknikkene. Et alt-i-ett-system kan fungere godt for hver enkelt kjøretøygruppe, men mye tyder likevel på at forskjellige kjøretøygrupper kan ha behov for å benytte seg av ulike ladesystemer.

6.4 Langdistanse transport

Kanskje er det motstridende for mange å satse på elektrisk forsyning langs hovedveiene foran tiltak i byene, i og med at en stor andel av de totale klimagassutslippene kommer i forbindelse med byene. Det er imidlertid diskutert mange gode grunner til å satse på langdistanse transport først. Flere ganger er det også kommet fram til at forsyning av tyngre kjøretøy kanskje aller mest bør prioriteres i forbindelse med elektriske veier nå.

Elektrifisering av hovedveiene gir egentlig først og fremst kjøretøyene som stort sett befinner seg på disse veiene. I mange tilfeller gjelder nettopp det for tynge kjøretøy, som f.eks. lastebiler. Personbiltrafikken derimot, har som regel et større behov for å bevege seg også utenfor hovedveiene, og dermed blir potensialet for å redusere batterikapasiteten mindre. Jo mindre man benytter de elektriske veiene, desto større blir også kostnadene ved å gjøre kjøretøyene egnet for elektrisk vei. Det gjelder i hvertfall så lenge man ikke kan benytte samme ladeteknikk stasjonært – som på veien.

Det fokuseres mye på at elektriske veisystemer må tilpasses til langdistanse transport for tynge kjøretøy. Gjerne fordi det er her de største utfordringene ligger med tanke på å bruke batterier. Det behøver likevel ikke bety at det er på dette området vi først bør begynne. For hvorfor skal vi begynne med det som kanskje er vanskeligst først? Da er det kanskje bedre å begynne med tynge rutegående kjøretøy på kortere strekninger. Inspirasjonen til det stammer fra prøveprosjektene med eHighway i USA, og eRoadArlanda i Sverige. Slike løsninger er trolig enklere å implementere på et tidlig tidspunkt, og det er et viktig poeng i forbindelse med klimagassutslippene. Utbredelsen av dynamiske ladesystemer for sporveier og trådbusser, er i tillegg en god indikasjon på at dette først og fremst egner seg best for rutegående trafikk.

At vi ønsker å redusere utslippene i årene framover, betyr i prinsippet at vi bør begynne å kutte i utslippene allerede idag. Utslippene skjer nå, og vi reduserer mer dersom vi begynner tidlig. Samtidig behøver vi kanskje ikke å redusere like mye i framtiden, hvis vi allerede kan kutte mye i dag. På den annen side, er det likevel mye som tyder på at det blir dyrere å komme i gang tidlig. Det viser seg trolig at den største utfordringen med å redusere klimagassene fra trafikken i dag, hovedsakelig ikke skyldes begrensninger i selve teknologiene, men det handler om viljen til å bruke nok penger.

Fokus på elektrifisering av tynge kjøretøy på hovedveiene, henger altså nøye sammen med potensialet for å redusere klimagassutslipp. Over halvparten av de totale utslippene fra tungtransporten kommer nettopp fra hovedveiene (**fig. 4.3**). Derfor kan det bli vanskelig å nå framtidige klimamål hvis vi ikke finner løsninger som passer disse kjøretøyene. I så fall må vi kanskje begynne å tenke i nye baner. Hvorfor kan ikke trafikken forsøke å innrette seg etter elektrisk vei og batteri, heller enn at elektrisk vei og batteri kun skal innrette seg etter trafikken? I Nasjonal transportplan står det imidlertid at utslippsreduksjonene i veitrafikken skal skje uten begrensninger i mobilitet. I overgangen til nye drivstoffløsninger er det vanskelig å tro at vi kan tilfredsstille dette punktet fullt ut. De fleste elbiler i dag har dårligere rekkevidder enn de fossile forgjengerne. Det tar også lengre tid å lade elektrisk enn å fylle tanken med fossil brensel. Redusert mobilitet er trolig en av de største utfordringene med å få trafikken over på klimavennlige drivstoffløsninger i dag, men vi er på mange måter kanskje nødt for å tilpasse oss det i årene framover.

En trafikkmessig tilpasning til elektriske veisystemer er trolig ikke så virkelighetsfjernt uansett. Det er ennå uvisst hvorvidt elektriske veisystemer kan håndtere at kjøretøy kommer svært tett på hverandre. Enten det er mange små, eller flere store kjøretøy samtidig. I den sammenheng kan det bli behov overordnede styringssystemer på veien, som passer på at kjøretøyene holder tilstrekkelig avstand til hverandre.

6.5 Begynn i det små

En viktig erfaring med planlegging av elektriske ladestier, er at det momentane effektbehovet underveis på en strekning er vel så viktig som det totale energibehovet på strekningen. En måte å illustrere det på, er at det hjelper ikke å ha nok penger totalt sett i løpet av et år, hvis man ikke kan betale regningene som forfaller underveis. Likviditeten symboliserer på den måten tilgjengelig batterikapasitet. Når målet er å redusere batteribehovene, medfører det at ladestiene i større grad må distribueres omkring områdene der hvor forbruket er stort. Det gjør også at det blir mer utfordrende å lage generelle konfigurasjoner for hvordan ladestiene skal distribueres omkring i veinettet. Ulike strekninger kan som regel ha store forskjeller i trafikk, hastighet, og terreng. Selv om stigningene synes å være en generelt god løsning, er det ikke nødvendigvis slik at alle strekninger har stigninger som utpreger seg i stor grad.

Mye kan tyde på at planlegging av elektriske ladestier i stor grad må vurderes i forhold til hver enkelt strekning. For å redusere batteribehovene må forsyningen på best mulig måte tilpasses til forbruket underveis på de ulike strekningene. Det er imidlertid viktig å se det helhetlige bildet. Mange av kjøretøyene vil nemlig være avhengige av å kunne ferdes på ulike strekninger med elektrisk vei. Kanskje ikke bare i Norge, men også i utlandet. For ikke å glemme at kjøretøyene bør ha en viss mobilitet også utenfor strekninger med elektrisk vei. Det kan altså bli vanskelig å redusere batteriene ned til et minimum. Det skyldes også at omgivelsesmessige faktorer som nedbør og lavere temperaturer kan føre til sterkt redusert batterikapasitet. Rekkevidden kan derfor variere mye i ulike situasjoner, og således blir det et vanskeligere utgangspunkt for å planlegge elektriske veisystemer.

I kapittel 2 ble argumentet om “uendelig kjørelengde” brukt i forbindelse med elektriske veier. Det betyr i så fall at energiforsyningen langs en gitt strekning, må være i størrelsesorden like stor som det totale energiforbruket på strekningen. På lange kjøreturer er det imidlertid et naturlig behov for å stanse og hvile, og da kan vi like gjerne lade stasjonært. For de som kjører nyttetransport er det også krav om å hvile etter en viss tid på veien. Selv om elektriske veier reduserer behovet for stasjonær lading, så vil stasjonære ladeuttak fortsatt være en viktig infrastruktur. Spesielt i forbindelse med redusert batterikapasitet eller tekniske feil på veien.

I en innføringsfase synes det naturlig å starte med mindre tiltak, og derfra tilegne mer kunnskap og erfaring om hvordan systemene fungerer. Det kan begrunnes med relativt krevende naturforhold i forbindelse med bygging og drift av norske veier. En storstilt planlegging bør være med utgangspunkt i prøving på vei her i Norge, selv om mye av testingen i Sverige kanskje er tilstrekkelig overførbar. En annen ting er at det trolig ikke vil skje en eksplosiv utvikling i antall kjøretøy som kan benytte seg av elektrisk forsyning på veien. Det er også naturlig med en gradvis reduksjon av batterikapasiteten i kjøretøyene. Dermed blir ikke behovet for elektrisk forsyning på veien så stort til å begynne med. Begynn derfor i det små, og vurder strekningene som har stort potensial både i forhold til trafikk, forbruk, og forsyningsmuligheter. I den forstand blir det også naturlig å fokusere nærmere på hver enkelt strekning, framfor systemet som helhet.

6.6 Prøveprosjekt i Rogfast?

De enkle beregningene som er gjort, tyder på at det elektriske anlegget i Rogfast er i stand til å forsyne en god del kjøretøy i stigningene ut av tunnelen. I alle fall skal det være i stand til å forsyne et prøveprosjekt som kun involverer noen få kjøretøy. Det er nemlig ennå ikke fått til et prøveprosjekt med elektrisk vei her i landet. Likevel snakker vi om at elektrisk vei kan være svært aktuelt å bruke. Erfaringer fra andre land, tilsier at vi også bør teste systemene før disse eventuelt kan bli innført i et større omfang. I forbindelse med et testprosjekt her i Norge, kan det derfor hende at Rogfasttunnelen er en god kandidat. Tunnelen har vist seg å ha flere gode forutsetninger med hensyn til elektriske veisystemer. Det er heller ikke observert tilfeller med testing i veitunneler i andre land. Et norsk testprosjekt i tunnel kan dermed også bidra i større internasjonal sammenheng.

Vi har sett at det kan være mange fordeler med elektriske ladestier i tunneler, men det er også mulig at det medfører noen viktige ulemper. En ulempe kan være i forbindelse med vedlikeholdet av systemene. Trafikken gjør det vanskelig å drive med vedlikehold i tunnellopet, og ikke minst i nærheten av selve veibanen. Det er heller ikke gunstig å måtte stenge tunnelen ofte for å drive med vedlikeholdsarbeid. Spørsmålet er også hvordan elektriske veier kan påvirke faren for brann. Usikkerheten om hvordan elektriske veier kan fungere i en tunnel, er dessuten et godt argument for nettopp å lage et prøveprosjekt her. Forhåpentligvis kan vi få et tydelig svar på om løsningen fungerer, og vi kan få nye ideer som omgår eventuelle problemer som oppstår.

Utfordringene med været og naturen i Norge, henviser i stedet til å fokusere på et utendørs prøveprosjekt. Disse utfordringene kan trolig få stor betydning for hvilke ladesystemer vi velger å bruke i ulike områder og situasjoner. Omfattende testing må derfor til, før en eventuell framtidig satsing på norske veier. En annen ting er at den klart største andelen av elektriske veier mest sannsynlig vil befinne seg på vanlige veistrekninger utendørs. Et utendørs prøveprosjekt har derfor et mye større nedslagsfelt enn det som gjelder med Rogfast. Dersom systemene fungerer dårlig utendørs, kan det altså få stor betydning om elektriske veier i det hele tatt er hensiktsmessig å bruke her i landet.

6.7 Konfigurering av elektroinstallasjonen

Selv om Rogfast trolig har mer enn nok installert effekt, så kreves likevel at installasjonen må utvides for å forsyne ladestrekningene med strøm. Hvilken strategi en velger å bruke her, er til en viss grad avhengig av type ladesystem, samt på hvilket tidspunkt det er tenkt å bruke systemet. Det er nemlig ikke nødvendig å bygge forsyningsanlegget fullt ut med kabler og brytere, og særlig ikke hvis en er i tvil om det kan bli elektrisk veier i det hele tatt. For å være rustet mot framtidige behov ved elektriske installasjoner, er det generelt god praksis å dimensjonere føringsveier med ekstra kapasitet. På den måten kan framtidige utvidelser både bli enklere og billigere. En slik tankemåte gjelder også særskilt i forbindelse med Rogfast, siden tunneler vanligvis ikke er egnet for store utvidelser i etterkant av åpning. Dersom dynamiske ladesystemer blir aktuelt for Rogfast, må

man ta hensyn til dette ved dimensjoneringen av føringsveiene i tunnelen. Derav må man vurdere aktuelle ladesystemer, og finne ut hva som kreves av infrastruktur for elektrisk forsyning. Det er hensiktsmessig å legge til rette for mest mulig av denne infrastrukturen under byggeperioden, slik at senere idriftsettelse ikke medfører unødige lang avstengning av tunnelen.

Enkle uttak ved nettstasjonene (hver 1500 m) er antageligvis i lengste laget med tanke på å forsyne de elektriske veisystemene. Kjøretøyene trekker en relativt høy effekt, og i verste fall kan de befinne seg 750 m fra forsyningen. Ventilasjonsviftene i tunnelen krever mindre effekt enn kjøretøyene, men de er til gjengjeld plassert i nær tilknytning til nettstasjonene. Utfordringen med elektrisk forsyning til kjøretøyene, er at dette skal skje kontinuerlig de siste 10 km ut av tunnelen. Det beste med tanke på elektroinstallasjonen, vil jo være å ha kortere ladestrekninger i nærheten av selve nettstasjonene. Det gir en enklere og billigere installasjon, samtidig som man unngår større utfordringer med blant annet overføringstap, spenningsfall, og verninstillinger. Kortere ladestrekninger er derimot ikke gunstig for kjøretøyene som behøver forsyning gjennom tunnelen. Man må derfor finne en hensiktsmessig løsning for elektroinstallasjonen, slik at kjøretøyene kan lade kontinuerlig den siste strekningen ut av tunnelen.

Det er vanskelig å finne beskrivelser om overordnede prinsipper for forsyning av ulike systemer på vei. Det gjelder både om størrelsen på forsyningene, og hvor tett man skal forsyne. For skinnesystemer og trådløs lading, er det rimelig å tro at man bør lage større eller mindre fordelinger ut fra nettstasjonene. Disse brukes så til å forsyne et utvalg av seksjoner på ladestrekningen. Underfordelingene bidrar dermed til å redusere ulempene med lange avstander mellom nettstasjonene. Til gjengjeld kan det medføre ekstra utfordringer i forbindelse med installasjonen i tunnelen. Underfordelingene krever gjerne tilgang på rom, og rom er generelt en utfordring i forbindelse med veitunneler. Blant systemene som krever seksjonering, er kanskje det beste å finne en løsning med underfordelinger i trekkekummer eller kulverter. Fordelingene blir nesten en naturlig del av installasjonen, og medfører ubetydelig med ekstra ledningsføring.

Dersom det er mulig å benytte kjøreledning i tunnelen, er det trolig mindre behov for flere fordelinger underveis. Man kan heller tenke seg to uttak fra hver nettstasjon inn på kjøreledningen. På den måten blir avstanden mellom forsyningene halvert til 750 m. Til sammenligning krever Elways forsyning til hver skinneseksjon på 50 m. Utformingen av elektroinstallasjonen er derfor delvis avhengig av ladesystemet man eventuelt velger å benytte i tunnelen.

Konklusjon

Studien har gitt økt kunnskap og forståelse om omfanget av elektriske forsyningsløsninger på vei. Den har også gitt forståelse for kompleksiteten som gjelder i forbindelse med veitrafikken. Det er svært mange muligheter og utfordringer knyttet til elektriske forsyningsløsninger på vei, og ikke minst når disse løsningene skal settes sammen i et større system på offentlig vei. På bakgrunn av denne kompleksiteten, samt at mye av arbeidet er basert på enkle grunnleggende betraktninger, er det derfor vanskelig å trekke svært bestemte slutninger fra vurderingene som er gjort. Av det totale arbeidet som er lagt ned, er det likevel mulig å trekke fram følgende observasjoner:

- Norge har gunstige forutsetninger med tanke på å forsyne klimavennlig elektrisk energi til veitrafikken. Det er imidlertid behov for lokale oppgraderinger av energinfrastrukturen i forbindelse med elektriske ladestier i veinettet
- Kombinasjonen elektrisk vei og batteri, er trolig den mest klimavennlige og energieffektive drivstoffløsningen som er mulig å få til i veitransporten i Norge i dag
- Investeringskostnader og mangel på kunnskap, er sannsynligvis blant de viktigste årsakene til at elektriske veier ikke har kommet lenger i Norge. Det er lite som tilsier at mangel på teknologiske løsninger er av stor betydning i denne sammenhengen
- Trafikkmengden har tilsynelatende svært stor betydning med tanke på økonomien og utslippsreduksjonene ved elektriske forsyningsløsninger på veien
- Fast trafikk på strekninger med delvis elektrisk vei, har klart størst potensial for å nyttiggjøre seg av elektrisk forsyning på veien. I en startfase er det derfor naturlig å etablere elektriske ladestier som er rettet mot rutegående kjøretøy

Punktene er nokså generelt framstilt, og de underbygges av grunnleggende resonnementer underveis i rapporten. Med bakgrunn i denne studien, er det ennå mange spørsmål som må besvares i forbindelse med elektriske ladesystemer på vei i Norge. Videre arbeid bør derfor omfatte mer detaljerte betraktninger enn det som er gjort her. Det viser også at demonstrasjonsprosjekter i Norge trolig er en viktig forutsetning for å tilegne mer konkret kunnskap og erfaring om systemene her i landet.

Referanser

ABB, 2017. Abb powers 450kw fast charging for electric buses in gothenburg.
<http://www.abb.com>, [Hentet 30. mai 2019].

Alaküla, M., Márquez-Fernández, F. J., Aug 2017. Dynamic charging solutions in sweden: An overview. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). pp. 1–6.

Alstom, 2017. Alstom presents aps for road, its innovative electric road solution.
<https://www.alstom.com>, [Hentet 27. mai 2019].

AtB, 2019. Bussene som settes i trafikk.
<https://www.atb.no>, [Hentet 23. mai 2019].

Avfall Norge, K. M., 2017. Biogass - verdifullt, effektivt og klimanøytralt.
<https://www.avfallnorge.no>, [Hentet 30. april 2019].

Bane NOR, N. S., 2014. Slik fungerer jernbanen.
<https://www.banenor.no>, [Hentet 3. mai 2019].

Blaker, M., 2018. Derfor har hydrogenbiler blitt en flopp i norge så langt.
<https://www.nettavisen.no>, [Hentet 26. april 2019].

Bombardier, 2017. Bombardier's primove e-buses pass 500,000 km milestone.
<https://www.bombardier.com>, [Hentet 30. mai 2019].

DNV GL, E. M. . T., 2019. Produksjon og bruk av hydrogen i norge.

Elbilbarometeret, 2018. Nordisk elbilbarometer 2017-2018.
<https://elbil.no>, [Hentet 31. mars 2019].

Elways, 2014. Elways solution to electric feeding of road vehicles.
<https://www.elways.se>, [Hentet 9. april 2019].

Elways, 2019. Test results from tests at arlanda.
<http://www.elways.se>, [Hentet 29. mai 2019].

-
- Energigas Sverige, F. S., 2018. Statistik om fordonsgas.
<https://www.energigas.se>, [Hentet 23. april 2019].
- eRoadArlanda, 2019. About the project.
<https://www.eroadarlanda.com>, [Hentet 10. april 2019].
- EV-volumes.com, R. I., 2019. Global ev sales for 2018 – final results.
<http://www.ev-volumes.com>, [Hentet 30. april 2019].
- FEL, 1999. Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg.
- Gustavsen, T. M., 2017. Godstransporten øker – flere lastebiler og trailere på vegene.
<https://vegnett.no>, [Hentet 7. mai 2019].
- Hansen, E. H., 2010. Elektroinstallasjoner, utg. 2010. Edition. Classica, Trondheim.
- InsideEVs, 2019. Sweden to test dynamic wireless charging on island of gotland.
<https://insideevs.com>, [Hentet 31. mai 2019].
- KAIST, 2013. Kaist's wireless online electric vehicle (olev) runs inner city roads.
<https://www.kaist.edu>, [Hentet 29. mai 2019].
- Langhelle, O., Bohne, R., Nørbech, T. E., 2018. Elektrisk veg i norge? oppsummering av en konseptanalyse.
- Lotsberg, G., 2015. E39 rognfast : Tunnelventilasjon og luftkvalitet.
- Løvaas, R., 2016. Biogass.
<https://snl.no>, [Hentet 29. mars 2019].
- Miljødirektoratet, 2018. Klimagassutslipp fra transport.
<https://www.miljostatus.no>, [Hentet 5. mai 2019].
- NEK 400, ., 2018. Elektriske lavspenningsinstallasjoner.
- Nørbech, T. E., 2018. Tungtrafikkprognoser på utvalgte veger, elingo appendix iii.
- OFV, 2019. Opplysningsrådet for veitrafikken - bilsalget i mars 2019.
<https://www.ofv.no>, [Hentet 26. april 2019].
- Regjeringen, 2016. Meld. st. 25 (2015–2016), kraft til endring — energipolitikken mot 2030.
<https://www.regjeringen.no>, [Hentet 30. april 2019].
- Regjeringen, 2017a. Meld. st. 33 (2016–2017), nasjonal transportplan 2018–2029.
<https://www.regjeringen.no>, [Hentet 28. mars 2019].
- Regjeringen, 2017b. Meld. st. 41 (2016–2017), klimastrategi for 2030 – norsk omstilling i europeisk samarbeid.
<https://www.regjeringen.no>, [Hentet 28. mars 2019].
-

-
- Regjeringen, 2017c. Slik skal Norge nå klimamålene for 2030.
<https://www.regjeringen.no>, [Hentet 28. mai 2019].
- Rennemo, O., Hjelkrem, O. A., Kristensen, T., Suul, J. A., Brauhaus, P., Lyse, A. A., 2018. Energy and infrastructure - demands and requirements.
- Siemens, 2017. ehighway – solutions for electrified road freight transport.
<https://www.siemens.com>, [Hentet 4. april 2019].
- SSB, 2019. Fakta om befolkningen.
<https://www.ssb.no>, [Hentet 5. mai 2019].
- Statens vegvesen, ., 2018a. Vegtunneler.
<https://www.vegvesen.no>, [Hentet 20. mai 2019].
- Statens vegvesen, ., 2018b. E39 rognfast.
<https://www.vegvesen.no>, [Hentet 20. mai 2019].
- Suul, J. A., Guidi, G., 2018. Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles.
- Taljegard, M., Thorson, L., Odenberger, M., Johnsson, F., Aug 2017. Electric road systems in Norway and Sweden-impact on CO2 emissions and infrastructure cost. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). pp. 1–6.
- Trafikverket, 2017. Nationell färdplan för elvägar.
- Vadset, K. W., 2019. Westcon bygger verdens første hydrogenferje.
<http://maritimt.com>, [Hentet 24. mai 2019].

