CHALMERS

Analys av dagens och framtidens koldioxidemissioner längs Europaväg 39

- en del av det norska projektet *Ferjefri E39*

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet

Lovisa Axelsson
Evelin Blom
Simon Kastari
Vania Khairallah
David Norenius
Sabina Söderstjerna Jörgensson

Instutitionen för Energi och miljö
Avdelningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Analys av dagens och framtidens koldioxidemissioner längs Europaväg 39
- en del av det norska projektet *Ferjefri E39*

©Författare: Lovisa Axelsson, Evelin Blom, Simon Kastari, Vania Khairallah, David Norenius, Sabina Söderstjerna Jörgensson, 2015

Kontaktuppgifter:
Lovisa Axelsson alovisa@student.chalmers.se
Evelin Blom evelin@student.chalmers.se
Simon Kastari kastari@student.chalmers.se
Vania Khairallah vania@student.chalmers.se
David Norenius norenius@student.chalmers.se
Sabina Söderstjerna Jörgensson jsabina@student.chalmers.se

Instutitionen för Energi och miljö
Avdelningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Omslagsbild: Projekt Ferjefri E39 [Hämtad 2015-06-05: http://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/ferjefriE39]
Göteborg, Sverige 2015

Förord

Kandidatarbetet *beräkning utav energiflöden längs E39* startades under våren 2015 och avslutades i maj samma år. Det har varit väldigt kul och lärorikt att vara en del av projektet *Ferjefri E39*. För det vill vi tacka Statens Vegvesen som bidragit med bakgrundsinformation om vägen samt diverse vägparametrar.

Vi skulle vilja tacka Mats Alakula (Professor, Lunds Universitet), Sven B. Andersson (Docent, Tillämpad Mekanik CTH), Mario Plos (Docent, Bygg- och miljöteknik CTH) som har hjälpt oss med värdefull information genom projektets gång. Vi skulle även vilja tacka Volvo Cars och speciellt Björn Lindenberg och Klaas Burgdorf som hjälpt oss med den framtagna modellen.

Ett extra stort tack vill vi ge till vår handledare Maria Taljegård som har hjälpt oss otroligt mycket med projektet och som alltid funnits till hands, både kvällar och helger. Utan hennes råd och engagemang hade projektet varit mycket svårare att genomföra.

Lovisa, Evelin, Simon, Vania, David och Sabina
Göteborg 2015

Abstract

The project *Ferjefri E39* aims to make the E39-route between Kristiansand and Trondheim free from ferries and, despite of an expected increase in traffic volumes, reduce the carbon dioxide emissions from the road. In this report, different vehicle technologies have been compared with respect to energy consumption, CO_2-emissions, efficiency and cost.

Currently Norwar is investing in electrical vehicles and the main focus in this report is therefore on electrical vehicles and electrification of the road. A change towards an electrified vehicle fleet could cause problems with, for example, new peaks for electricity and power demand. Plug-in-hybrid electric vehicles could be a possible transition towards a vehicle fleet free from fossil fuels. However, the batteries required with regard to range and weight are today not applicable for heavier vehicles. Biofuel could be used by all vehicle types, but are a limited resource phasing problems with competition from other energy sectors and from food production. Electric vehicles that utilize electricity produced from a fuel cell is another possible technology, with the main benefit of only emitting steam when operated. But fuel cells are today more expensive compared to other alternative vehicle technologies.

In order to get a general overview of how these vehicle technologies might affect the demand for electricity in E39-region, the energy consumption and carbon dioxide emissions from the E39 has been calculated. This was done by creating a fuel consumption model based on known physical and empirical relations. The input parameters used in the model were based on road and fuel properties, and different vehicle parameters. The current carbon dioxide emissions from E39 were calculated to 0.75 Mt and are expected to increase with 90 % until 2060 if fossil fuels continue to dominate the market. If, however, a transition to alternative technologies investigated in this study, takes place, there is a possibility to reduce the emissions with 100 %. A complete transition to electricity would be the most energy efficient alternative, and the traffic on E39 would require 3.25 TWh in year 2060, which is only an increase of 0.3 TWh compared with the current usage, in spite of the large increase in the number of vehicles. An entire enforcement of bioenergy requires 5.42 TWh year 2060 and fossil fuel that requires 5.85 TWh. In order to see if this energy consumption 2060 could be covered by energy generated along the road, an investigation of the electricity and biofuel potential in the region was done. Energy generated from wind in the fjords covers only 9.6 % of the E39 energy consumption 2060 when the road is completely electrified. The corresponding number for solar energy is 11.8 %. However, the potential for bioenergy might be able, considering competition with other sectors, to cover parts of the energy demand for E39. But if also considering biofuel production from algae, a technology that today is under development, a larger part of the energy demand for E39 could come from biofuels.

Ferjefri E39 is a multidimensional project with many perspectives to consider, and an introduction of several vehicle technologies might be needed in order to reduce the carbon dioxide emissions.

Keywords: International E-road network, Ferjefri E39, carbon dioxide emission, future scenario, 2060, electrification system

Sammanfattning

Projektet *Ferjefri E39* har som mål att göra sträckan mellan Kristiansand och Trondheim färjefri samt, trots ett väntat ökat trafikflöde, minska koldioxidutsläppen längs vägen. Därför står det klart att nya fordonstekniker och alternativa bränslen krävs. Olika tekniker som i dagsläget anses kunna bli kommersiellt gångbara har jämförts med hänsyn till energiåtgång, CO_2-emissioner, verkningsgrad samt kostnad.

Idag satsar Norge mycket på elfordon, därför ligger huvudfokus på olika typer av elfordon och en elektrifiering av vägen. Det kan dock vara problematiskt att göra en abrupt övergång till el. Därför ses hybridtekniken som en möjlig övergång mot en helt fossilfri fordonsflotta. Däremot är batterierna som krävs svåra att applicera på tyngre fordon på grund av dess tyngd och räckvidd. Biobränsle är ytterligare ett alternativ som dessutom är gångbar för alla fordon. En annan framtida fordonsteknik är vätgasdrivna bränslecellsfordon som i dagsläget är en dyr teknik men har vattenånga som enda avgasemission vid framdrivning.

En övergripande bild av hur dessa tekniker skulle minska CO_2-emissionerna i regionen kräver kännedom om energiåtgången och koldioxidutsläppen längs E39:an. Detta åstadkoms genom att en beräkningsmodell, med utgångspunkt i kända fysikaliska och empiriska samband, togs fram. Parametrarna som användes baserades på vägens, fordonkategoriernas och bränslenas egenskaper samt antalet fordon längs med vägen per dygn. De beräknade koldioxidutsläppen är i dagsläget 0.75 Mton och förväntas öka med 91 % till år 2060 om fossila bränslen fortsätter att dominera marknaden på samma sätt som idag. Om däremot en övergång sker till någon av de framtida teknikerna som undersökts är det möjligt att reducera utsläppen från vägen med 100 %. En fullständig övergång till el år 2060 skulle kräva minst energi med 3.25 TWh, vilket är en ökning med 0.3 TWh jämfört med idag. En fullständig tillämpning av biobränsle skulle kräva 5.42 TWh vilket kan jämföras med 5.85 TWh om man fortsätter köra på fossila bränslen. För att se om denna energiåtgång kan täckas med energiproduktion längs vägen har litteraturstudier och beräkningar gjorts om el- och bränslepotentialen i regionen. Vindkapaciteten i fjordarna täcker endast 9.6 % av energiåtgången år 2060 vid elektrifiering av vägen. Samma siffra för solenergi är 11.8 %. Om man istället väljer att placera vindkraftverken och solcellspanelerna på land finns en teoretisk potential att täcka behoven. För bioenergi finns potentialen för att möjligen kunna täcka hela fordonsflottans behov år 2060. Dock råder det konkurrens mellan olika sektorer vad gäller biomassa.

Ferjefri E39 är ett komplext projekt med många perspektiv att ta hänsyn till. Som nämnts, finns det bland annat konkurrens om biomassan i Norge, utmaningar med batterier i tunga fordon och en tillämpning av flera tekniker vore därför rimlig för att reducera koldioxidutsläppen.

Nyckelord: Europaväg 39, Ferjefri E39, koldioxidemissioner, framtidsscenarion år 2060, elektrifiering

Innehåll

1 Inledning **1**
1.1 Syfte . . . 1
1.2 Frågeställning . . . 2
1.3 Avgränsningar . . . 2

2 Beräkningsmodell och parametrar **4**
2.1 Energimodellen . . . 4
2.2 Bränsleförbrukning och koldioxidemissioner . . . 6
2.3 Parametrar för nutidsscenariot . . . 7
2.4 Genomsnittlig bränsleförbrukning . . . 8
2.5 Fordonsparametrar för år 2060 . . . 9

3 Framtida fordonstekniker och bränslen **10**
3.1 Hybridteknik . . . 10
3.2 Elbilar med batteri . . . 11
3.2.1 Batterityper och ekonomiska aspekter . . . 12
3.2.2 Elbilen i Norge . . . 13
3.3 Bränslecellsfordon och vätgasproduktion . . . 13
3.3.1 Bränslecellen . . . 14
3.3.2 Vätgasproduktion . . . 15
3.3.3 Vätgasproduktion med överskottsel i regionen . . . 17
3.4 Elektrifiering av vägen . . . 18
3.4.1 Konduktion . . . 18
3.4.2 Induktion . . . 20
3.4.3 Komponenter i systemet . . . 22
3.4.4 Nätutbyggnad vid elektrifiering . . . 23
3.5 Fordonståg . . . 23
3.6 Biobränsle . . . 25
3.6.1 Biobränsle i Norge idag . . . 25
3.6.2 Potential för biobränsle . . . 26
3.7 Koldioxidemissionsfaktorer för framtida tekniker och bränslen . . . 26
3.7.1 Från elektricitet . . . 27
3.7.2 Från biobränsle . . . 27
3.7.3 Från vätgas . . . 28

4 Energiproduktion i området längs E39:an **29**
4.1 Vindkraftverk integrerade i brokonstruktioner . . . 29
4.1.1 Placering av vindturbinerna . . . 31
4.1.2 Kostnader för vindkraftverk . . . 31
4.1.3 För- och nackdelar med integrerade vindkraftverk . . . 32
4.2 Solpaneler integrerade i brokonstruktioner . . . 32
4.2.1 Placering av solpanelerna . . . 33
4.2.2 Kostnader för integrerade solpaneler . . . 34
4.2.3 För- och nackdelar med integrerade solpaneler i brokonstruktion . . . 35

5 Resultat **36**
5.1 Energiåtgång och koldioxidemissioner för nutidsscenario . . . 36

5.2 Energiåtgång och koldioxidemissioner år 2020 och 2060 . . . 38
5.2.1 År 2020 . . . 38
5.2.2 År 2060 . . . 39
5.3 Kostnadsanalys av framtida tekniker . . . 42
5.3.1 Elbilar med batteri . . . 42
5.3.2 Bränslecellsbilar . . . 43
5.3.3 Elvägar . . . 43
5.3.4 Fordonståg . . . 44
5.3.5 Sammanställning av kostnadsanalys . . . 45
5.4 Energiåtgång och energiproduktion . . . 45

6 Diskussion **47**
6.1 Framtida tekniker . . . 48
6.2 Energi- och bränslepotential i regionen . . . 50
6.3 Koldioxidemissioner i framtiden . . . 51
6.4 Begränsningar i projektet . . . 51
6.4.1 Modellen . . . 52
6.4.2 Kostnadsberäkningar . . . 52
6.5 Rekommendationer för fortsatt arbete . . . 54

7 Slutsatser **55**

Referenser **57**

A MATLAB-modell för energiflödet längs E39 **63**

B MATLAB-modell för bränsleförbrukning och koldioxidemissioner **67**

C Resultat per delsträcka **71**

D MATLAB-modell för koldioxidutsläpp från färjorna **73**

E Vindkraftverk integrerade i brokonstruktion **74**

F Solpaneler monterade på brokonstruktion **75**

G Arbetsfördelning **76**

Figurer

1 Hybridmotorns verkningsgrad [1] 11
2 Skiss över reaktionsförloppet i en bränslecell [3] 14
3 Produktion av vätgas genom elekrolys 16
4 Till vänster är en vanlig spole, den separeras sedan och den primära spolen dras ut för att kunna integreras i vägen [5] 21
5 Den övre bilden visar de induktionsslingor som integreras i vägen, den undre visar värmeslingor för snösmältning [5] 21
6 De olika komponenterna i systemet [6] 22
7 Illustration över luftflödet i ett fordonståg [7] 24
8 Luftmotståndsreduktion i ett fordonståg. På y-axeln är den procentuella reduktionen för respektive fordon och på x-axeln är avståndet mellan fordonen [7] 24
9 På y-axeln visas den minskade bränsleförbrukningen och på x-axeln avståndet mellan fordonen [7] 24
10 Rotor med horisontalaxel, HAWT [8] 30
11 Rotor med vertikalaxel, VAWT [9] 30
12 Beräknade koldioxidutsläpp [kg] per 2 mil för personbilar, samt ÅDT skalad för att förenkla jämförelse. 36
13 Beräknad total daglig energiåtgång [MWh] längs vägen, samt ÅDT skalad för att förenkla jämförelse. 37
14 Beräknad utveckling av koldioxidutsläpp [Mton] för idag, år 2020 och 2060 om fossila bränslen används 40
15 Beräknad energiförbrukning för de olika framtidsscenarierna längs E39 år 2060 41
16 Beräknad energiförbrukning för personbilar år 2060 42

Tabeller

1 Fordonsparametrar . . . 7
2 Parametrar för beräkning av bränsleförbrukning och CO_2-emissioner [16][17][80][81] . 7
3 Sammanställd genomsnittlig förbrukning . . . 8
4 Verkningsgrader för olika bränslekategorier år 2020 och år 2060 . . . 9
5 Fördelar och utmaningar för de olika produktionsteknikerna [41][42][43][44] . . . 16
6 Teoretisk vätestation [38] . . . 17
7 Elkapacitet i området kring E39:an [103][47] . . . 17
8 Vindhastigheter, vindtimmar/år och årlig energiproduktion [75] [74] . . . 30
9 Kostnad/installerad MW vid respektive fjord . . . 31
10 Kostnad för 1 MW HAWT på land . . . 32
11 Energiproduktion i GWh/år beroende av placering . . . 33
12 Kostnader för solcellspaneler integrerade i brokonstruktion . . . 34
13 Kostnader beroende på placering . . . 34
14 Kostnad beroende av energiproduktion och placering, MNOK . . . 35
15 Sammanställning av resultaten för nutidsscenariot . . . 37
16 Beräknad mängd koldioxid som de olika färjorna släpper ut . . . 38
17 Sammanställning av resultaten för år 2020 med fossila bränslen . . . 38
18 Sammanställning av resultaten för år 2060 med fossila bränslen . . . 39
19 Sammanställning av den beräknade energiförbrukningen i TWh/år för år 2060 med framtida tekniker . . . 40
20 Beräknad kostnad per ton reducerat CO_2 för elbilar, infrastruktur för region E39 . . . 42
21 Beräknad kostnad för införande av tankningsinfrastruktur fram till 2060 . . . 43
22 Beräknad kostnad per ton reducerat CO_2 för elvägar . . . 44
23 Beräknad körsträcka för att tjäna in investeringen i fordonståg . . . 44
24 Sammanställning av NOK/ton CO_2 för de olika teknikerna . . . 45
25 Kostnaden för att täcka energiåtgången längs E39:an med solcellspaneler på mark [123] . 46
26 Fördelar och nackdelar med framtida fordonstekniker och bränslen . . . 48

1 Inledning

Majoriteten av dagens klimatforskare är överens om att dörren för att nå de mål FN:s klimatpanel har satt upp, håller på att stängas. I Intergovermental Panel on Climate Changes, IPCC:s, femte klimatrapport har en gräns på en temperaturökning på ytterligare cirka 2°C relativt jordens medeltemperatur före industrisamhället, bedömts vara brytpunkten för verkligt allvarliga klimatförändrändringar [65]. Den mänskliga påverkan på klimatet är tydlig och mätningar visar att utsläppen av växthusgas till följd av mänsklig aktivitet historiskt sett är större än någonsin. De antropogena utsläppen av växthusgaser har ständigt ökat sen industrisamhällets uppkomst och drivs på av en ständig befolkningsökning och växande ekonomier. Den ökande koncentrationen av växthusgaser i atmosfären är det som leder till växthuseffekten och således en höjning av jordens medeltemperatur. Att den globala medeltemperaturen stiger leder bland annat till att polarisarna smälter med en förhöjd havsnivå som följd. Detta medför i sin tur att många låglänta områden riskerar att bli översvämmade. En förhöjd medeltemperatur kan också leda till mer extremt väder och således fler klimatrelaterade katastrofer [66].

Än är det inte för sent att minimera klimatförändringarna. Något som kan göras är att förändra sättet naturens resurser används på. Det behöver utvecklas nya tekniker för att bättre utnyttja och använda oss av de förnybara energikällor som finns. EU:s mål är att fram till år 2030 minska koldioxidutsläppen med 40 % och öka andelen förnybara energikällor med minst 27 % [10]. Norge har valt att följa dessa mål och i projektet *Ferjefri E39* ska det utredas om Europaväg 39, som går längs den norska kusten mellan Kristiansand och Trondheim, kan bli klimatneutral [11][12].

Projektet *Ferjefri E39* har som mål att göra sträckan mellan Kristiansand och Trondheim färjefri, vilket förväntas förkorta restiden avsevärt. E39:an sammanbinder flera av Norges största och viktigaste städer och längs vägen ligger det industrier och företag som genererar omkring hälften av Norges exportvaror [67]. En förkortad restid tillsammans med andra faktorer såsom befolkningsökning förväntas ge ett ökat trafikflöde längs E39:an i framtiden [68]. Ett av målen i projektet är dock att minska CO_2-utsläppen längs sträckan trots det ökade trafikflödet. Ett annat mål är att all energi som används längs med vägen ska produceras i anslutning till vägen. Detta är något man på institutionen för Energi och Miljö på Chalmers fått i uppdrag att titta på.

Tidigare studier har gjorts som visar hur nya tekniker kan användas för att minska CO_2-utsläppen från transportsektorn [69]. Dessa studier behandlar olika tekniker var för sig så som; elvägar [70][71], biobränslen, elbilar och bränsleceller. Det finns även studier över elproduktionskapaciteten i fjordarna längs E39:an [72][73][74][75]. Dock saknas det en helhetsbild över hur dessa tekniker kan appliceras för att minska koldioxidemissionerna längs E39:an. Inte heller har beräkningar för huruvida energiåtgången för fordonen på vägen år 2060 kan produceras i region E39 gjorts. Dessutom finns ingen kostnadsuppskattning med jämförelse mellan elvägar och de olika teknikerna.

1.1 Syfte

Detta kandidatarbete genomförs som en del av projektet *Ferjefri E39* och kartlägger energiförbrukningen och CO_2-utsläppen längs vägen idag och år 2060. Genom studier av rapporter om befintliga tekniker görs en sammanställning för olika alternativ att reducera CO_2-utsläppen fram till år 2060 trots en förväntad ökning av trafikflödet. En kostnadsanalys genomförs för att se hur mycket de olika teknikerna kostar per ton reducerat koldioxid. Vidare görs en utredning för om el- och bränslepotentialen längs med vägen kan täcka det framtida energibehovet. Syftet är att denna rapport ska ge en övergripande bild över olika alternativ för att minska CO_2-utsläppen längs E39:an år 2060.

1.2 Frågeställning

Med hjälp av en nutidsanalys och studier över framtida fordonstekniker har potentiella framtidsscenarion för år 2060 gällande energiförbrukning och CO_2-emissioner längs väg E39 uppskattats. De forskningsfrågor som har besvarats presenteras nedan.

- Hur stora är CO_2-emissionerna längs E39:an idag?
- Hur kan CO_2-emissionerna komma att se ut i framtiden?
- Hur skiljer sig energiförbrukningen längs E39:an idag gentemot år 2060?
- Finns det möjlighet att minska utsläppen med framtida tekniker trots ökade trafikflöden?
- Hur mycket skulle dessa tekniker kosta i förhållande till nyttan de gör?
- Vilken potential finns det i regionen för att bioenergi ska kunna vara en alternativ energikälla i framtiden?
- Är det lönsamt att integrera förnybara källor i brokonstruktioner i fjordarna?
- Är kapaciteten i fjordarna tillräcklig för att täcka energiåtgången längs E39:an år 2060?
- Kommer en elektrifiering av E39:an påverka den regionala elbalansen?

1.3 Avgränsningar

För att få fram en relevant och användbar rapport har följande avgränsningar gjorts med hänsyn till projektets syfte och tidsram.

Vid sammanställning av de olika parametrarna för vägen såsom sträcka, årsdygnstrafik (som hädanefter betecknas med ÅDT), lutning och hastighet har vägen delats upp i kortare delsträckor. Den uppdelning som används är den som Statens Vegvesen gjort med avseende på förändringar i höjdmeter över havet.

Vegvesens mätning av ÅDT längs E39:an är uppdelad i andel långa och korta fordon. För att kunna använda detta i den framtagna modellen har en noggrannare indelning i fordonskategorier gjorts. Denna indelning gjordes med utgångspunkt ifrån statistik över den norska fordonsflottan. Utifrån denna statistik har vi valt att bortse ifrån motorcyklar då de utgör en så pass liten del av fordonsflottan. Vi antog att det är samma fördelning längs E39:an som för hela Norge. Detta antas också när fordonskategorierierna delas in i olika bränslekategorier. Bränslekategorierna som ansetts tillräckligt stora för att påverka resultatet och därför borde tas hänsyn till i beräkningarna för nutida koldioxidutsläpp är bensin och diesel.

Vid framtagningen av modellen har flera avgränsningar gjorts. Hänsyn har inte tagits till vad som händer vid inbromsningen av ett fordon. Dessutom har accelerationen antagits vara konstant för hela accelerationssträckan. Utöver det har påfarter och avfarter bortsetts ifrån eftersom de sträckorna är så pass korta att de inte har en betydande påverkan på den totala energiförbrukningen per mil. Vid beräkningar i modellen används ett snittfordon för varje fordonskategori för att begränsa antalet körningar av modellen.

Hänsyn har inte tagits till väder eller vind över sträckan eftersom inverkan på bränsleförbrukningen av dessa parametrar inte är helt fastställd i dagsläget.

Antaganden och approximationer har gjorts eftersom det är framtidsscenarion för år 2060 som sammanställts. Det är svårt att förutspå hur exempelvis fordonsflottan kommer se ut år 2060, därför behandlar rapporten främst scenarior med utgång från befintlig teknik. Både diesel- och bensinfordon har antagits bli 0.7 % effektivare per år. De framtida tekniker som hanteras i denna rapport är teknik som har kommit relativt långt i utvecklingen och skulle kunna ha implementerats till år 2060. Hänsyn har inte tagits till andra tekniker som är tidigare i sin utvecklingsfas.

I rapporten behandlas bara den delen av E39:an som går mellan Kristiansand och Trondheim. De sex fylken som vägen går igenom är; Vest-Agder, Rogaland, Hordaland, Sogn og Fjordane, Møre og Romsdal samt Sør-Trøndelag och detta område refereras i denna rapport som region E39.

2 Beräkningsmodell och parametrar

En beräkningsmodell togs fram i `MATLAB` för att kunna simulera bränsleförbrukningen och beräkna CO_2-emissionerna längs vägen. Modellen är uppdelad i två delar där den första delen beräknar hur mycket energi det krävs för att driva bilen framåt och den andra delen omvandlar energiförbrukningen till bränsleförbrukning och CO_2-emissioner. Modellen finns bifogad i appendix A och B. Parametrarna som använts i modellen finns i avsnitt 2.3 och 2.5.

2.1 Energimodellen

Komplexiteten på modellen har anpassats efter syftet med modellen, den data som fanns tillgänglig och projektets tidsram. De parametrar som vi valde att inkludera för vägen var lutning, hastighet, ÅDT, international roughness index, iri och mean profile depth, mpd över hela sträckan. Iri och mpd är parametrar som beskriver vägbanans ojämnhet. Datan erhölls från Statens Vegvesen och Rambøll [13][68]. Vägen är cirka 107 mil lång och är uppdelad i 12983 delsträckor med varierande längd där indelningen är baserad på mätpunkterna för höjdskillnaden längs vägen.

De krafter på fordonen som är med i modellen är luftmotståndet, rullmotståndet, gravitationskraften, accelerationskraften och en hastighetsberoende kraft för att korrigera medelverkningsgraden på motorn och drivlinan i fordonet hädanefter kallad F_{motor}. Dessa krafter kan uttryckas med hjälp av kända ekvationer samt fysikaliska och empiriska samband. Parametrarna som inkluderades för fordonen som kör längs vägen var tvärsnittsarean, luftmotståndskoefficienten, massan samt radie och tröghetsmoment för däcken.

Den totala kraften som krävs för att driva ett fordon framåt beräknas enligt ekvation 1. Denna beräknas för de olika delsträckorna och summeras sedan för att få kraften över den totala sträckan. Kraften beräknas för en fordonskategori i taget eftersom de ingående parametrarna för fordonen skiljer sig åt. Dessutom beräknas energin som krävs för varje delsträcka för alla olika krafter genom att multiplicera respektive kraft med delsträckans längd. Dessa summeras sedan ihop på samma sätt som F_{fordon} till E_{fordon}.

$$F_{\text{fordon}} = F_g + F_{\text{luft}} + F_{\text{rull}} + F_{\text{acc}} + F_{\text{motor}} \quad [N] \tag{1}$$

Där F_g $[N]$ är gravitationskraften, F_{luft} $[N]$ är luftmotståndet, F_{rull} $[N]$ är rullmotståndet, F_{acc} $[N]$ är accelerationskraften och F_{motor} $[N]$ är en hastighetsberoende korrigering av medelverkningsgraden på motorn och drivlinan. Krafterna har beräknats enligt ekvationerna 2-7.

Gravitationskraften beräknas enligt ekvation 2

$$F_g = m \cdot g \cdot sin(\alpha) \quad [N] \tag{2}$$

där m $[kg]$ är fordonets massa, g $[m/s^2]$ är tyngdaccelerationen och α $[rad]$ är lutningen på vägen. Lutningen på vägen har beräknats med hjälp av Pythagoras sats med höjden på start- och slutpunkten och längden på delsträckan. Om lutningen var större än 5.7 grader angavs dock lutningen till att vara maximala 5.7 grader. Detta eftersom en bilväg i Norge inte bör vara brantare [76].

Rullmotståndet beräknas enligt ekvation 3.

$$\begin{cases} F_{\text{rull}} = rrc \cdot m \cdot g \quad [N] \\ \text{rrc} = Cr0 + iri \cdot v \cdot Cr1 + mpd \cdot Cr2 \\ \text{Cr0} = Cr00 + CrTemp(5 - T) \end{cases} \tag{3}$$

Rullmotståndet beräknas med hjälp av en rullmotståndskoefficient, *rrc*, som i sin tur är beroende av ett flertal ingående paramterar. Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI, har härlett ett empiriskt samband mellan vägens mpd, iri, fordonets hastighet och fordonstyp. Parametrarna *Cr* varierar med fordonskategori och flertalet mätningar. *Cr0* är beroende av luftens temperatur (T) och 5 grader har använts som referenstemperatur [77]. *iri* $[mm/m]$ är vägbanans jämnhet i längsled i och *mpd* $[mm]$ är vägbanans makrotextur [78].

Luftmotståndet beräknas enligt ekvation 4

$$F_{\text{luft}} = \rho_{\text{luft}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A_{\text{tvär}} \cdot C_D \quad [N] \tag{4}$$

där ρ_{luft} [kg/m^3] är luftens densitet, v [m/s] är hastighetsbegränsningen på vägen, $A_{\text{tvär}}$ [m^2] är tvärsnittsarean på fordonet och C_D är lufmotståndskoefficienten.

Accelerationskraften beräknas för varje delstäcka med en hastighetsökning enligt ekvation 5

$$\begin{cases} F_{\text{acc}} = m_{\text{acc}} \cdot a \quad [N] \\ m_{\text{acc}} = m + m_j \quad [kg] \\ m_j = (\text{antal däck}) \cdot \dfrac{J}{r^2} \quad [kg] \end{cases} \tag{5}$$

där a $[m/s^2]$ är accelerationen, J $[kg/m^2]$ är tröghetsmomentet för ett däck och r $[m]$ är däckets radie. Vid beräkningen av accelerationskraften har en konstant acceleration använts men den har varierat för de olika fordonskategorierna. Vid beräkning av den energi som krävs för att accelerera ett fordon har ekvation 6 använts.

$$\begin{cases} t_{\text{acc}} = (v_{\text{slut}} - v_{\text{start}}) \cdot a \quad [s] \\ langd_{\text{acc}} = v_{\text{start}} \cdot t_{\text{acc}} + a \cdot \dfrac{t_{\text{acc}}^2}{2} \quad [m] \\ E_{\text{acc}} = F_{\text{acc}} \cdot langd_{\text{acc}} \quad [J] \end{cases} \tag{6}$$

Dessa har använts för att beräkna accelerationslängden eftersom fordonet inte kommer att accelerera över hela delsträckan. v_{slut} $[m/s]$ är hastigheten på den nuvarande delsträckan, v_{start} $[m/s]$ är hastigheten på den föregående delsträckan, t_{acc} $[s]$ är accelerationstiden, a $[m/s^2]$ den konstanta accelerationen och dessa tillsammans ger accelerationslängden $langd_{\text{acc}}$ $[m]$.

Till sist användes F_{motor} som är en hastighetsberoende korrigering av medelverkningsgraden på motorn och drivlinan enligt ekvation 7 för att kompensera för att en konstant verkningsgrad används i beräkningen för bränsleförbrukningen.

$$F_{\text{motor}} = 0.04 \cdot v^2 - 10 \cdot v + 700 \quad [N] \tag{7}$$

där v $[km/h]$ är hastigheten på delsträckan.

Effekten, P_{fordon}, som krävs för att driva ett fordon längs varje delstäcka beräknas enligt ekvation 8

$$P_{\text{fordon}} = \frac{E_{\text{fordon}}}{t} + P_{\text{konst}} \quad [W] \tag{8}$$

där energin E_{fordon} $[Wh]$ är F_{fordon} multiplicerad med längden på varje delsträcka och P_{konst} är en konstantlast för exempelvis AC:n, stolsvärmen och radion i fordonet.

Slutligen beräknas den totala energiåtgången exklusive förluster, E_{tot}, $[Wh]$ i motorn per delsträcka för varje fordonskategori i ekvation 9. Detta görs med hänsyn till hur stor del fordonskategorin utgör av den totala ÅDT:n på delsträckan.

$$\begin{cases} P_{\text{tot}} = P_{\text{fordon}} \cdot ADT \quad [W] \\ E_{\text{tot}} = P_{\text{tot}} \cdot \dfrac{t}{3600} \quad [Wh] \end{cases} \tag{9}$$

P_{tot} $[W]$ är effekten, E_{tot} $[Wh]$ är energin och ÅDT är antalet fordon per dygn per delsträcka uppdelad i varje fordonskategori. Notera att t divideras med 3600 för att få tiden i timmar istället för i sekunder. E_{tot} för varje delsträcka summeras för att få den totala energiförbrukningen för att driva alla fordon i samma kategori längs hela E39:an.

2.2 Bränsleförbrukning och koldioxidemissioner

Bränsleförbrukningen för E39:an har beräknats från effekten och ekvationerna 10-16 användes för förbränningsmotorerna drivna med bensin och diesel [79]. Bränsleförbrukningen beräknas enligt ekvation 10

$$Q = \frac{P_{\text{tot}} \cdot Sfuel \cdot langd}{\rho \cdot v} \quad [l] \tag{10}$$

där P $[kW]$ är effekt, $Sfuel$ $[kg/kWh]$ specifik bränsleförbrukning, L $[m]$ sträcka, ρ $[kg/l]$ densiteten på bränslet och v $[m/h]$ är hastigheten på sträckan. Detta beräknas för de olika delsträckorna och summeras sedan för att få förbrukningen över hela E39:an.

Den specifika bränsleförbrukningen beräknas enligt ekvation 11

$$Sfuel = \frac{1}{\eta \cdot HV} \quad [kg/kWh] \tag{11}$$

där η är motorns verkningsgrad och HV $[kg/kWh]$ är det lägre värmevärdet för bränslet.

Utifrån bränsleförbrukningen beräknades CO_2-emissionerna för varje fordonskategori enligt ekvation 12

$$\text{CO}_2 = k \cdot Q \quad [kg] \tag{12}$$

där k är kilogram CO_2-utsläpp per liter bränsle.

Bränsleförbrukningen för elmotorer beräknades enligt ekvation 16

$$E_{\text{mil}} = \frac{E_{\text{fordon}} \cdot \eta}{L \cdot 10^4} \quad [kWh/mil] \tag{13}$$

där E_{fordon} är $P_{\text{fordon}} \cdot t \quad [kWh]$.

2.3 Parametrar för nutidsscenariot

I Norge är de största bränslekategorierna idag bensin och diesel och vid beräkning av bränsleförbrukningen och CO_2-emissionerna är det endast dessa som används eftersom övriga bränslekategorier är jämförelsevis små. För personbilar antas 55 % vara bensindrivna och 45 % dieseldrivna. Alla lätta lastbilar, tunga lastbilar och bussar antas vara dieseldrivna. De bränslekategorier som valdes baserades på statistik över registrerade fordon i Norge från Statisk Sentralbyrå, SSB [14]. Det är även därifrån som antalet fordon i de olika fordonskategorierna hämtades. De fordonskategorier som använts är dels baserade på ÅDT:n som är uppdelad i långa (12 %) och korta fordon (88 %) och dels på statistiken från SSB och är:

- Korta fordon
  - personbilar (84.7 %)
  - lätta lastbilar (15.3 %) notera att bilar upp till 7.5 ton räknas som lätt lastbil i Norge [15]
- Långa fordon
  - tunga lastbilar (88 %)
  - bussar (12 %)

I tabell 1 redovisas de parametrar som varierat mellan olika fordonskategorier vid beräkningar i modellen och representerar ett genomsnittligt fordon i varje kategori. Parametrarna för personbilar och tunga lastbilar har erhållits från Volvo. För bussar antogs samma värden som för tunga lastbilar och för lätta lastbilar har approximationer gjorts baserade på parametrarna för personbilar och tunga lastbilar. Av konfidentiella skäl kan inte vissa parametrar skrivas ut och står som X i tabell 1.

Tabell 1: Fordonsparametrar

	Bil	Lätt lastbil	Tung lastbil	Buss
m $[kg]$	1 500	5 000	40 000	21 000
J $[kg/m^2]$	2	X	X	X
r $[m]$	0.314	0.406	0.491	0.491
C_D	0.29	X	X	X
$A_{tvär}$ $[m^2]$	2.28	X	X	X
antal däck $[st]$	4	4	12	6
P_{konst} $[W]$	1.5	X	X	X
a	2	1.75	1	1

Parametrarna för de olika bränslena och motorerna som används i modellen, baserat på ett genomsnittligt fordon i dagens fordonsflotta, presenteras nedan i tabell 2.

Tabell 2: Parametrar för beräkning av bränsleförbrukning och CO_2-emissioner [16][17][80][81]

	Bensin	Diesel	Bioetanol	Biodiesel
ρ $[kg/l]$	0.750	0.815	0.790	0.884
η $[\%]$	27.5	37.5	27.5	37.5
HV $[kWh/m^3]$	9100	9800	5900	9150
k $[kg\ CO_2/l]$	2.33	2.42	0	0

Densiteten, ρ, det lägre värmevärdet HV och CO_2-utsläppskonstanten, k, är för bensin baserade på en inblandning av 1.1 % etanol [82] och för diesel en inblandning av 4.7 % biodiesel [18][16]. För båda bränslena är CO_2-utsläppskonstanten bara baserad på hur mycket CO_2 som släpps ut från bilen och hänsyn tas inte till hur mycket CO_2 som släpps ut under bränslets produktion. Förbränningsmotorns verkningsgrad, η, är ett medelvärde för motorernas verkningsgrader [17].

2.4 Genomsnittlig bränsleförbrukning

För att få fram ett referensvärde för att verifiera modellen användes data över en genomsnittlig bränsleförbrukning för varje fordonskategori. De genomsnittliga bränsleförbrukningarna för fordons- och bränslekategorierna som är presenterade i kapitel 2.3 har beräknats på olika sätt som följd av tillgången på information, se nedan.

Det vanligaste bilmärket bland pesonbilar i Norge är Volkswagen enligt SSB och därför har olika Volkswagenmodeller fått utgöra den genomsnittliga personbilen för diesel- och bensinkategorin. Äldre bilar har oftast högre bränsleförbrukning och därför insamlades statistik över fördelningen av olika årsmodeller [19]. Siffrorna för dieselbilarnas bränsleförbrukning har huvudsakligen tagits från Bilstart [20], medan siffrorna för bensinbilarna kommer från både Bilstart och Bilsvar [21]. Den genomsnittliga bränsleförbrukningen för de olika kategorierna beräknades med hjälp av ett viktat medelvärde som berodde på hur stor andel som föll inom varje ålderskategori. Antalet modeller har varierat något mellan de olika kategorierna och när det varit möjligt har bränsleförbrukningen på landsväg valts. Se tabell 3 för slutgiltiga siffror på den genomsnittliga bränsleförbrukningen. För de lätta lastbilarna beräknades en genomsnittlig dieselförbrukning och den blev 1.26 liter/mil [22].

Lastbilar är en fordonskategori med stora variationer, framförallt viktmässigt med vikter från 7.5 ton till mer än 60 ton. Bränsleförbrukningen har därför beräknats för en tänkt genomsnittslastbil. För att hitta värden på de olika lastbilarnas bränsleförbrukning har olika rapporter lästs och då de har använt en lastbil på 40 ton som standard är det även vad som använts som genomsnittlig lastbil i denna rapport [83][84][85].

En genomsnittlig bränsleförbrukning för bussar beräknades med utgångspunkt i en rapport från *University of Manitoba* och *Manitoba Hydro* [86]. Det är en omfattande rapport som har betraktat 545 dieselbussar på 89 olika vägsträckningar över 11 månader för att få fram en genomsnittlig bränsleförbrukning. Den sammanställda bränsleförbrukningen för samtliga fordonskategorier kan ses i tabell 3.

Tabell 3: Sammanställd genomsnittlig förbrukning

Kategori	**Förbrukning [liter/mil]**
Personbil - *bensin*	0.79
Personbil - *diesel*	0.49
Lätt lastbil	1.26
Buss	5.83
Tung lastbil	4.15

Den genomsnittliga bränsleförbruknkingen för bussarna verkar något hög och kommer troligtvis som en följd av de många antal stopp som bussarna i undersökningen gjort, ca 2 st per kilometer. Därför går det att anta att bussarna som kör längs E39:an kommer ha en lägre bränsleförbrukning per mil.

2.5 Fordonsparametrar för år 2060

Beräkningarna har utförts år 2060 då data för ÅDT har tagits fram av Rambøll. Anledningen till att år 2060 valts är att då anses alla investeringar vara återbetalda och eventuella bompengar har avskaffats. För år 2060 beräknas ÅDT:n i genomsnitt öka med ungefär 345 %.

Vid beräkningen av hybridbilars CO_2-utsläpp används en plug-in-hybrid, som presenteras närmare i avsnitt 3.1, med en elmotor och en förbränningsmotor som drivs av biobränsle. Hybridbilen har antagits använda sig av förbränningsmotorn längs med hela sträckan eftersom den sträcka som går att köra på elmotorn är liten i detta sammanhang. Elmotorn bidrar dock till en förhöjd verkningsgrad även vid körning med förbränningsmotorn. Vid beräkning av bränsleförbrukningen för hybridbilar har värden använts baserade på dagens biodiesel, dessa presenteras i tabell 2. Detta har gjorts då det i dagsläget är oklart vilken densitet och vilket värmevärde biobränslet kommer att ha år 2060.

Alla fordonsberoende parametrar har hållits konstanta fram till år 2060 med undantag för verkningsgraderna och vikterna. För elfordonen har en viktökning på 14 % använts för personbilar, lätta lastbilar och bussar. De tunga lastbilarna antas inte kunna drivas enbart med batteri därför har vikten beräknats öka med 1.5 ton, vilket motsvarar 3.75 %, och beror på det batteri och de komponenter som krävs för att köra en lastbil på de elvägar som presenteras närmare i avsnitt 3.4. På grund av brist på data har följande antagande gjorts; för hybridbilarna har en viktökning med 10 % antagits, återigen för alla fordon utom de tunga lastbilarna som istället antas öka i vikt med 1 ton motsvarande 2.5 %. Vätgasfordon antas öka med 3.4 % i vikt för samtliga fordonskategorier.

De verkningsgrader som antagits för förbränningsmotorerna i framtidsscenarierna har baserats på en årlig förbättring på 0.7 % [69]. I verkligheten sker inte hela denna förbättring enbart i motorn utan är en sammanräkning av den totala förbättringen på fordonet, inkluderat t.ex. minskat luft- och rullmotstånd. Vilka värden de beräknas få kan ses i tabell 4 tillsammans med verkningsgrader för el och bränsleceller.

Tabell 4: Verkningsgrader för olika bränslekategorier år 2020 och år 2060

Motor	**År 2020** [%]	**År 2060** [%]
Bensin	28.5	37.6
Diesel	38.8	51.3
- Tung lastbil	44.5	58.9
Hybrid	–	61.6
Biobränsle		
- Tunga lastbilar	–	58.9
- Övriga	–	51.3
El	–	95.0
Bränslecell	–	70.0

I denna beräkning antas alla fordon köra på biodiesel vid användning av biobränsle. Antagandet baseras på att det redan idag är möjligt att köra på 100 % biodiesel medan det för bioetanol krävs en viss inblandning av bensin [23]. Dessutom beräknas biodieselproduktionen i Europa vara nästan dubbelt så stor som produktionen av bioetanol år 2020 [87].

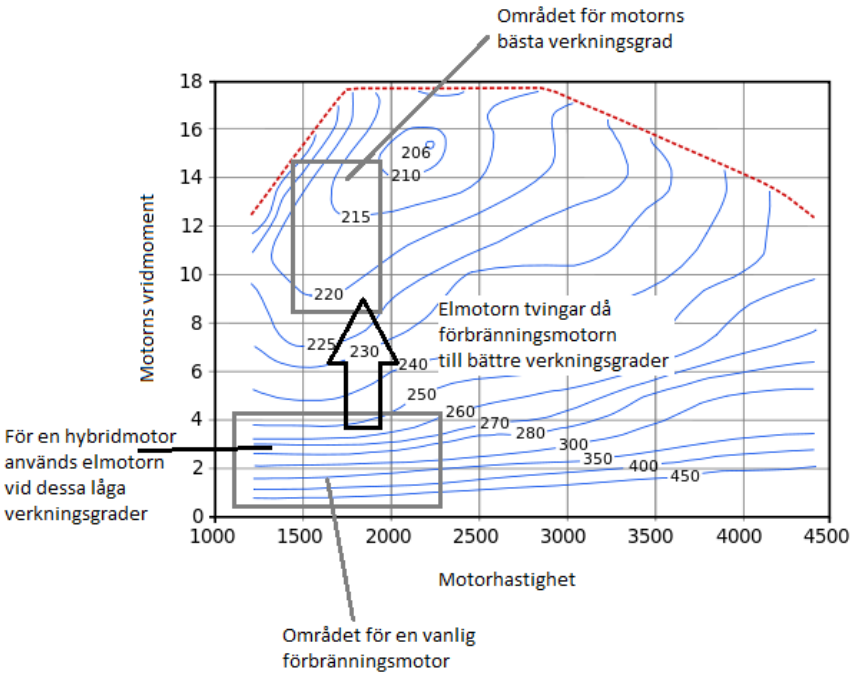
3 Framtida fordonstekniker och bränslen

Norge har beslutat att följa EU-kommissionens utsläppsmål att minska CO_2-utsläppen med 40 % fram till år 2030 trots att de inte är med i EU [10]. Med målet i projektet *Ferjefri E39* att minska koldioxidutsläppen trots ökade trafikflöden i framtiden står det klart att nya fordonstekniker och nya bränslen krävs. Olika tekniker som i dagsläget anses kunna bli kommersiellt gångbara har jämförts med hänsyn till energiåtgång, CO_2-emissioner, verkningsgrad samt kostnad. I rapporten har fokus lagts på de nedan presenterade fordons- och bränsleteknikerna, men det bedrivs även forskning på ett antal andra områden som inte har behandlats på grund av projektets tidsramar. De framtida teknikerna varierar en del för lätta och tunga fordon och det är inte självklart att samma teknik kommer att användas i båda fallen.

3.1 Hybridteknik

Hybridfordon bygger på en teknik där det finns två drivmotorer. Det vanligaste är hybridelbilar där fordonet drivs av en elmotor och en förbränningsmotor. Det finns olika sätt att använda dessa motorer varav ett sätt är att låta fordonet ladda batteriet till elmotorn i nedförsbackar, inbromsningar och då förbränningsmotorn används. I en plug-in-hybrid kan batteriet dessutom laddas med sladd och bilen drivs av elmotorn tills batteriet tar slut då fordonet drivs av förbränningsmotorn istället. I Norge har man valt att satsa på den sistnämnda tekniken. Ett projekt som flera stora aktörer är inblandade i är Grønn Bil [24]. Projektets mål är att öka infasningen av laddbara bilar, vilket är både elbilar och plug-in-hybridbilar, fram till år 2020 [88]. Visionen är att 30 % av personbilarna ska vara laddbara bilar år 2018 och av dessa ska 18 procentenheter vara plug-in-hybrider och 12 procentenheter elbilar. Detta visar att Norge satsar på plug-in-hybriden och det kommer därför vara den hybridtekniken som denna rapport fokuserar på.

Plug-in-hybriden har både en elmotor och en förbränningsmotor som samverkar. Detta innebär att bilen kan köra på elmotorn tills batteriet är slut och därefter tar förbränningsmotorn över. Räckvidden för batteriet är i genomsnitt 5 mil men när bilen drivs av förbränningsmotorn kommer elmotorn höja verkningsgraden för denna. Enligt Sven B. Andersson höjer elmotorn verkningsgraden på förbränningsmotorn med 5-10 % genom att öka motorns vridmoment med hjälp av elmotorn och därmed flytta motorn till ett område med högre verkningsgrad, se figur 1. Detta innebär att bränsleförbrukningen minskar även då man kör på förbränningsmotorn, vilket innebär lägre CO_2-utsläpp jämfört med en vanlig förbränningsmotor (Sven B. Andersson, Docent, Tillämpad Mekanik, CTH, 2015).



Figur 1: Hybridmotorns verkningsgrad [1]

Det finns fortfarande stora tekniska utmaningar för hybridteknik för tunga fordon. Det krävs mycket energi för att driva dessa fordon vilket medför att batterierna blir väldigt stora. Hybridtekniken har sin främsta fördel i trafik som innefattar många start och stopp då batteriet laddas vid inbromsning. För tunga fordon kan det handla om distrubutionslastbilar, sopbilar eller bussar. Volvo har sålt 50 lastbilar på prov varav de flesta gått som distrubutions- eller sopbilar, för att se vad det får för respons. Hybridlastbilarna har 15-20 % lägre bränsleförbrukning än en vanlig diesellastbil [25]. De är dessutom betydligt tystare vid start och stopp vilket är en stor fördel då stor del av sträckan körs i tätbebyggt område. I övrigt är hybridlastbilarna snarlika i drift och underhåll jämfört med en vanlig lastbil men den stora skillnaden är inköpspriset. Idag är tekniken dyr och utbudet på marknaden begränsad. Vad gäller bussar råder dock ett helt annat läge då Volvo numera endast säljer bussar som har en hybridlösning alternativt är helt eldrivna. Norge är ett av de länder som har flest bussar med hybridlösning [26]. Redan sommaren 2010 sattes de första hybridbussarna i bruk i Trondheim och efter det har antalet ökat [27]. Enligt L.Mårtensson tros hybridtekniken få större betydelse i framtiden på längre sträckor också och hybridtekniken kan då bidra med en minskad bränsleförbrukning på cirka 5 % (L. Mårtensson, Miljödirektör Volvo Lastvagnar, 2015).

3.2 Elbilar med batteri

Ett sätt att minska samhällets oljeberoende på sikt är att omfördela dagens fordonsflotta och ge elfordon större delaktighet. Elfordon har många fördelar; hög energitäthet, en mycket hög verkningsgrad i motorn samt ingen tomgång. De minskar också de lokala utsläppen i städer då de direkta utsläppen vid drift är noll. Elfordon är även mycket tystare än fordon med förbränningsmotor i låga hastigheter vilket är fördelaktigt i stadstrafik [28]. Verkningsgraden för en elmotor är cirka 95 % vilket kan jämföras med en genomsnittlig modern dieselmotor som har en verkningsgrad på 35-42 % [17].

Vid jämförelse med bensin och diesel är el egentligen inte ett drivmedel i den bemärkelsen, utan en typ av energibärare som används vid distribution. Elproduktionen kan vara småskalig eller storskalig, det gör produktionen väldigt flexibel och anpassningsbar utan att det nödvändigtvis berör elfordonen. Denna flexibilitet anses kunna minska användandet av fossila bränslen [80]. I genomsnitt använder en elbil 2 kWh per mil och en generell bensindriven bil 5.3 kWh per mil [89]. En elbil kan således ta sig längre än en bensindriven bil med ekvivalent mängd energi [90].

Om det ska vara miljövänligt att köra elbil måste också elen produceras på ett miljövänligt vis. Globalt sett sker mycket av elproduktionen med hjälp av fossila bränslen och den förnybara delen är en minoritet. Norge har en förhållandevis stor andel elproduktion från förnybara energikällor där cirka 96 % av elproduktionen kommer från vattenkraft [91]. Norges ingenjör och teknologorganisation, NITO, förutspår att förnybar energi kommer bli en värdefull exportvara i framtiden. Norge är ett land som haft ett överskott på elektricitet producerad genom vattenkraft. Om Norge inte ökar sin produktion av förnybar energi i takt med att efterfrågan ökar kan de komma att stå inför problemet att behöva välja om de ska exportera eller bruka energin själva inom landet i framtiden [92].

En elbil saknar förbränningsmotor och bilens användbarhet är till största del beroende av batteriets egenskaper. Batteriet är grundförutsättningen för bilens räckvidd, även laddningstiden kan anses begränsande vid användande. I en elbil behövs ingen växellåda då vridmomentet från en elmotor är konstant. Tiden det tar att ladda en elbil skiljer sig beroende på batterikapacitet, ström samt spänning. I vägguttagen är det vanligt med 230 V och en säkring som klarar 10 ampere. Det krävs då 10 timmar för att ladda ett batteri på 20 kWh och resulterar i en körsträcka på cirka 10 mil [93]. Den elbil som i dagsläget har det största batteriet och således den längsta räckvidden har två batteristorlekar, ett på 60 kWh och ett på 85 kWh [29]. Skulle dessa laddas med hjälp av ett vanligt vägguttag skulle det ta 30 och 43 timmar för att nå full laddning [30]. Uppladdningstiden kan optimeras om en så kallad laddbox används, laddtiden kan sänkas med upp till tio gånger [31]. Fördelen med att använda en laddbox är också att den kan leverera den optimala effekten till bilen och gör laddningen säkrare [32].

3.2.1 Batterityper och ekonomiska aspekter

Idag är det främst litiumjonsbatterier som används för att driva elbilar, men till en förhållandevis hög kostnad. Batterier med uppgiften att framdriva ett fordon måste uppfylla följande krav:

- Lång livslängd
- Hög säkerhet
- Kort laddningstid
- Låg kostnad på kort och lång sikt för ägaren
- Hög prestanda

Även om litiumjonsbatterier i dagsläget har en hög kostnad anses det vara den mest lovande batteritekniken och mycket investering och forskning fokuseras kring denna. Det forskas även på nya batterilösningar som kan komma att uppfylla de tidigare nämnda kraven. Några av dem är; metall-luftbatterier som skulle kunna uppnå en hög energitäthet, zink-luftbatterier som har potential att produceras till låg kostnad och natriumjonsbatterier som är intressanta ur säkerhetssynpunkt [33].

Elbilen har i dagsläget ett förhållandevis högt inköpspris och en stor del av kostnaden är bunden till

batteripaketet. Den långsiktiga kostnaden blir styrd av batteriets livslängd, andrahandsvärdet av bilen samt kostnad för eventuellt batteribyte. Den stora kostnaden för batteriet vid inköpspriset kan kringgås genom att batteriet istället hyrs ut till en fast månadskostnad. Ett annat alternativ är att inte äga bilen själv utan istället ingå i en bilpool [93]. För att elbilen ska kunna utmana bilar med förbränningsmotor måste priset också ligga i paritet med dessa. Undersökningar visar att kostnaden för batteripaket måste sjunka under 150 USD/kWh för att elbilar ska kunna slå sig in på den stora marknaden. Idag ligger batteripriset på ungefär 300 USD/kWh och motsvarar generellt ca 25 % av fordonets kostnad [94]. Kostnaden för den enskilda battericellen tillsammans med montering av batteripaket står för 70-80 % av den totala kostnaden för batteripaketet. I battericellen ingår ädelmetaller och andra förhållandevis dyra material till elektroder, elektrolyt, separatorer och material för inkapsling av battericellen. Kostnaden för dessa komponenter minskar i takt med att försäljningen ökar [2]. I dagsläget mer än fördubblas elbilsmarknaden varje år och många av de stora fordonsaktörerna ingår i samarbeten med batteritillverkare. Tesla Motors och Panasonic har exempelvis upprättat en batterikonstruktionsanläggning med en kapacitet för att tillverka 500 000 batteripaket per år [34][35].

3.2.2 Elbilen i Norge

I Norge fanns år 2012 över 8 000 elbilar, mer än 3 000 laddställen och upp emot 100 snabbladdningsstationer [95]. En markant ökning har skett då det i april år 2015 fanns hela 55 858 elbilar registrerade i Norge varav 20 940 elbilar i regionen E39:an [36]. Norge har statliga subventioner för att få konsumenterna att köpa elbil. Några av dem är listade nedan [93]:

- Momsbefrielse vid inköp
- Tillgång till kollektivtrafikkörfält
- Undantag från trängselavgift/bompeng (eller nedsatt avgift i vissa fall)
- Undantag från registreringsavgift
- Reducerad årlig fordonsskatt

Norge har dock bestämt att elbilsstimulanserna ska pågå till år 2017 eller tills det att antalet 50 000 elbilar uppnås vilket skedde i april 2015 [95]. Trots den snabbt växande elbilsförsäljningen är andelen elbilar i Norge fortfarande liten. Den sträckan alla elbilar sammanlagt körde år 2014 motsvarade 0.7 % av vad den norska fordonsflottan körde totalt [37].

För att fler elbilar ska kunna användas i Norge behöver infrastrukturen för laddningsstationer byggas ut ytterligare. Norges strategi för fortsatt utveckling av elbilsinfrastrukturen riktar sig främst mot områden med goda förutsättningar för elbilar vad gäller klimat och befolkningstäthet. 90 % av Norges befolkning ska kunna försörjas genom 105 snabbladdningsstationer i Osloregionen, 143 snabbladdare längs med den södra kusten och 9 snabbladdare längs med viktiga huvudstråk mellan kust och inlandet. Kostnaden för dessa uppskattas bli mellan 126 och 168 miljoner norska kronor [96].

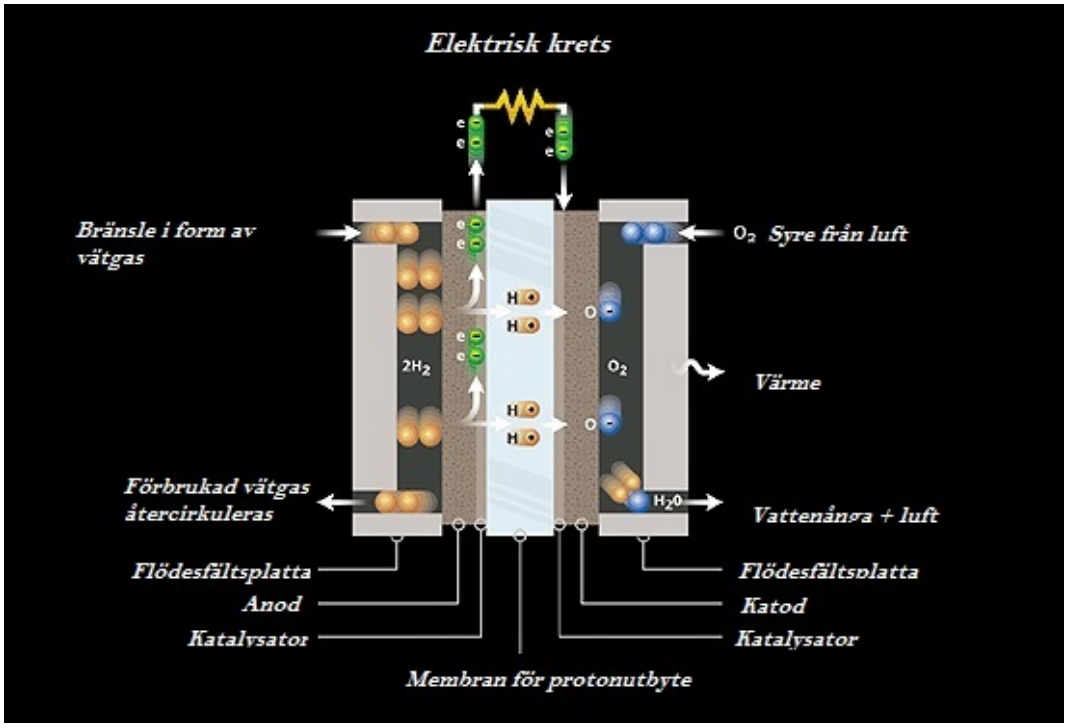
3.3 Bränslecellsfordon och vätgasproduktion

Introduktionen av bränslecellsfordon i transportsektorn står inför flera tekniska, ekonomiska och miljömässiga utmaningar kopplade till produktion och nyttjande av väte som bränsle. För att vätgas ska slå sig in som bränsle krävs en kostnadsreduktion och politiskt stöd. Övergången till ett transportsystem med större andel väte måste också hitta lösningar när det kommer till transport och distribution från centraliserade väteproduktionsstationer till vätestationer för tankning av fordon. I en studie utförd av NorWays

på uppdrag av Statoil, Norsk Hydro och Statkraft, förutspåddes att väte som bränsle inom transportsektorn kan bli konkurrenskraftigt vid 5 % marknadsandelar vilket skulle kunna uppnås år 2025 [97]. En introduktion av väte som energibärare förutspås kunna sänka CO_2-utsläppen från transportsektorn med ungefär 50 % till år 2050 [98].

3.3.1 Bränslecellen

En bränslecellsbil framdrivs med elmotorer likt en vanlig elbil. Skillnaden är att det är bränsleceller istället för ett batteri som ger elektricitet. Dessa bilar har god räckvidd och kan köra cirka 40 mil på en full tank [38]. Det som avgör hur pass miljövänligt det är att övergå till bränsleceller inom transportsektorn är genom vilken metod vätgasen framställs. En bränslecell drivs av syre och väte och producerar värme, elektricitet och vatten genom en process som inte innefattar någon förbränning. Tekniken bygger på samma princip som hos ett vanligt uppladdningsbart batteri, två elektroder står i kontakt med varandra via en elektrolyt. Elektroderna skapar en potentialskillnad genom att den ena är positivt laddad och den andra negativt laddad, katod respektive anod. Därtill finns en katalysator, ofta av platina, som delar väteatomerna i protoner och elektroner. Elektronerna måste ta en omväg via en elektrisk krets mellan katod och anod och bildar således en ström, medan protonerna kan vandra genom elektrolyten, se figur 2 nedan. Hos katoden bildas vatten som biprodukt [39].



Figur 2: Skiss över reaktionsförloppet i en bränslecell [3]

Avgörande för bränslecellens funktion är alltså att elektrolyten bara släpper igenom protoner och på så sätt tvingar runt elektroner genom den elektriska kretsen. För att bränslecellen ska kunna göra just detta behövs bränsle i form av syre och väte.

En bränslecell saknar helt rörliga delar och är således tystgående och kräver relativt lite underhåll. En enkel bränslecell genererar låg spänning men för att höja spänningen som produceras sammankopplas

flera bränsleceller i bränslecellsstackar. Antalet bränsleceller i stacken avgör storleken på spänningen som produceras. Strömstyrkan beror å andra sidan på cellernas area [39].

3.3.2 Vätgasproduktion

Väte kan anses vara ett miljövänligt bränsle med nollutsläpp om vätet som används i en bränslecell är framtaget från förnybara källor. Avgörande för miljövänligheten hos en bränslecellsbil blir hur pass miljövänlig framställningen av vätgas är. Väte är ett av de vanligaste grundämnena på jorden men förekommer i regel i kemiska föreningar på grund av dess höga reaktionsbenägenhet [38]. För att utvinna vätet måste de kemiska bindningarna brytas på något sätt, dessa sätt kan delas in i fyra olika kategorier [40]:

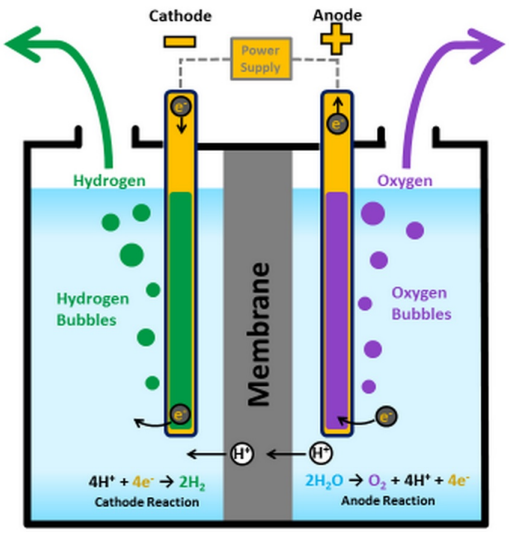
- Termokemiska processer - Naturgas eller kol utsätts för het ånga under tryck för att utvinna vätgas
- Elektrolys - spjälkning av vattenmolekyler med hjälp av elektricitet
- Fotoelektriska och fotobiologiska processer
- Biologiska processer

I de två sistnämnda punkterna ingår tekniker som befinner sig tidigt i utvecklingsfasen och behandlas inte ytterligare i denna rapport.

De termokemiska processerna innefattar ångreformering av naturgas och kolförgasning. Vid ångreformering av naturgas, vanligen metan (CH_4), reagerar metanet med vattenånga under ett tryck på 3-35 bar. Detta driver igång en kemisk reaktion där väte, kolmonoxid och koldioxid bildas i två steg.

Vid kolförgasning reagerar kol med syre och vattenånga under högt tryck och temperatur och bildar därigenom en gas som till största del består av kolmonoxid och väte. Vätet separeras och lagras och koldioxiden fångas in för förvaring för att undvika koldioxidutsläpp [41].

Då vätgas framställs genom elektrolys används elektricitet för att spjälka upp vattenmolekyler i väte och syre. Elektrolys bygger på att en anod och en katod är separerade med ett membran som är genomsläppligt för vätejoner. Vatten reagerar vid anoden och bildar syre samt positivt laddade vätejoner (protoner) som sedan attraheras av den negativt laddade katoden. Vid katoden tar vätejonerna upp elektroner, som tillförs av den pålagda elektriska strömmen, och bildar vätgas [42], se figur 3.



Figur 3: Produktion av vätgas genom elekrolys
[4]

I tabell 5 nedan har en sammanställning gjorts med fördelar samt utmaningar hos de olika produktionsmetoderna.

Tabell 5: Fördelar och utmaningar för de olika produktionsteknikerna [41][42][43][44]

	Elektrolys	**Ångreformering**	**Kolförgasning**
Fördelar	Potential för nollutsläpp då el från förnyelsebara energikällor används	Förhållandevis låg produktionskostnad. Kan kombineras med koldioxidinfångning	Många länder har god tillgång på kol. Kan kombineras med koldioxidinfångning
Utmaningar	Förhållandevis dyr teknik med där systemet har energiförluster på ungefär 30-40 % i dagsläget	Släpper ut CO_2 om inte koldioxidinfångning används	Koldioxidinfångning behövs. Utöver CO_2-emissioner tillkommer även utsläpp av svaveloxider, kväveoxider och andra partiklar

För att distribuera den producerade vätgasen krävs en utbyggnad av infrastruktur. I NorWays rapport [99] uppskattas den totala kostnaden för att införa en infrastruktur som kan försörja 1,76 miljoner vätgasdrivna fordon år 2050 bli totalt 12.6 MDNOK, en kostnad på 7 157 NOK per fordon. Priset att tanka sin bränslecellsbil med vätgas uppskattas bli 505 NOK/kg mellan åren 2015-2018 för att sen sjunka till 72 NOK/kg år 2025 [96]. En bränslecellsbil förbrukar ungefär 0.105 kg/mil och full tank innehåller cirka 3.92 kg vätgas vid 350 bars tryck [38]. Full tank i dagsläget blir således 1 980 NOK och kring år 2025 282 NOK [96].

3.3.3 Vätgasproduktion med överskottsel i regionen

I detta stycke görs ett räkneexempel med en teoretisk vätestation för produktion av vätgas. Energiåtgång för att driva vätestationen uppskattas utifrån data taget från tillverkare av de ingående komponenterna i vätestationen. Differensen undersöks mellan producerad elektricitet och konsumerad elektricitet i området kring E39:an för att ge en uppskattning om vilken kapacitet som finns i området. Antagande görs att det antal registrerade bilar i region E39 är det antal bilar som behöver framdrivas i området, se tabell 7. Elektrolys förutspås vara den dominerande framställningsmetoden för väte i Europa år 2050 därför är den teoretiska vätestationen en station som använder sig av elektrolys [100]. Detta för att slutligen beräkna en kostnad per ton CO_2-utsläpp som jämförs mellan de olika fordonsteknikerna.

Enligt Europakommissionen körs en bil i snitt mindre än 50 km/dag. För att köra 50 km med en bränslecellsbil krävs 6.4 Nm^3, en normalkubik är en m^3 vid standardtryck och standardtemperatur. Antagande görs att vätet produceras genom elektrolys i en tänkt vätestation med tre komponenter som listas nedan [38].

1. En elektrolyser [101]
2. En renare [45]
3. En kompressor [46]

I tabell 6 nedan, beräknas energiåtgången för att driva vätestationen.

Tabell 6: Teoretisk vätestation [38]

	kW	**Nm^3/h**	**kWh/Nm^3**
Electrolyser	500	100	5
Renare	0.5	15	0.033
Kompressor	22.5	46	0.489
Efterbehandling/övrigt			0.18
Totalt			**5.7**

I tabell 6 kan ses att det från den uppskattade vätestationen går åt 5.7 kWh/Nm^3 väte som produceras. Energiåtgången för att producera en Nm^3 vätgas ligger i den typiska storleksordningen för att framställa vätgas genom elektrolys. [102].

I tabell 7 visas det överskott från elproduktionen i region E39 samt antalet registrerade bilar i området.

Tabell 7: Elkapacitet i området kring E39:an [103][47]

Fylken	**Elproduktion (2011) [GWh/år]**	**Elkonsumtion (2011) [GWh/år]**	**Differens [GWh/år]**	**Antal reg. personbilar (2014)**
Sør-Trøndelag	4 819	5 398	- 579	145 030
Møre og Romsdal	6 746	10 221	-3 475	135 431
Sogn og Fjordane	14 487	6 720	+ 7 767	54 638
Hordaland	16 910	11 899	+ 5 011	226 967
Rogaland	11 486	10 611	+ 875	223 744
Vest-Agder	8 204	6 022	+ 2 182	83 715
Total	**62 652**	**50 871**	**+ 11 781**	**869 525**

Datan är tagen från år 2011 och visar elproduktionen och elkonsumtionen för varje fylke i området kring E39:an. Som kan ses i tabell 7 finns ett överskott på 11 781 GWh per år i regionen kring E39:an vilket motsvarar drygt 32 GWh per dag. Ingen hänsyn har tagits till förluster vid eldistributionen och elproduktion. Dessa förluster uppgår till mellan 7 % och 10 % av den totala elproduktionen i hela Norge [103] [48].

I ekvation 14 beräknas hur mycket väte som måste produceras av stationen för att driva bränslecellsbilarna i regionen.

$$\text{Förbrukning/bil och dag} \cdot \text{ Antal bilar} = \text{Förbrukning/dag} \tag{14}$$

där väteförbrukningen per bil och dag är 6.4 Nm^3 och antalet bilar är 869 525 st vilket ger en total förbrukning per dag på 5 564 960 Nm^3. I ekvation 15 beräknas hur mycket energi det går åt för att producera mängden väte per dag.

$$\text{Energiinnehåll/normalkubik} \cdot \text{Normalkubik/dag} = \text{ Energibehov/dag} \tag{15}$$

där energiinehåll per normalkubik är 5.7 kWh/Nm^3 och förbrukningen per dag är 5 564 960 Nm^3 och det totala energibehovet per dag är 31 720 272 kWh.

Som tidigare nämnts finns ett överskott på strax över 32 GWh per dag i regionen vilket kan jämföras med den energin som krävs för att övergå till bränslecellsfordon regionen vilket motsvaras av knappt 32 GWh.

3.4 Elektrifiering av vägen

Nackdelen med elfordon är svårigheten att lagra en större mängd el utan att batterierna blir alltför stora och tunga. Batterier används idag för att driva personbilar, men är svårt att applicera på tung trafik. Ett batteri till en lastbil skulle med dagens teknik väga cirka 14 ton om det dimensioneras för att endast behöva laddas under natten [104]. Det skulle resultera i att lastutrymmet och lastvikten minskar och därmed bli kostsamt för åkeriföretagen. För att ta sig längre sträckor som ofta är fallet för tung trafik skulle därmed ett antal stopp behöva göras längs vägen för att ladda batteriet. Alternativet till att behöva stanna och ladda samt slippa tunga batterier är att tillföra fordonen energi kontinuerligt längs vägen. För att göra detta finns huvudsakligen två olika tekniker, konduktion och induktion. Enligt Professor Mats Alakula på Lunds Universitet finns även en tredje teknik, kapacitiv överföring, men den är inte funktionell på grund av mycket höga spänningar. De höga spänningarna på upp till 40 kV gör att det på grund av elektriska fält kan vara skadligt att vistas i bilen, vi har därför inte valt att utreda detta närmare. Konduktion kan också delas in i två olika kategorier; de som hämtar energi ovanifrån likt ett tåg samt de som försörjs genom en skena i vägen.

För de olika elvägsteknikerna kommer ett system för debitering behöva utvecklas då alla använder sig av el från vägen för framdrivning. Elen kan inte debiteras direkt på samma sätt som fossila bränslen, utan behöver debiteras i efterhand. I de kommande kapitlen beskrivs de olika elvägsteknikerna mer ingående.

3.4.1 Konduktion

Konduktion betyder ledning, det vill säga att fordonet kommer ha direkt kontakt med strömkällan för att energi ska överföras. Detta kan ske på flera olika sätt; från en kontaktledning ovan vägen liksom de gamla trådbussarna, eller från en skena som byggs in i vägen. En strömavtagare på fordonet försörjer då en elmotor med energi från vägen. I knutpunkter som korsningar, tunnlar och broar kan problem

uppstå. En alternativ lösning är att låta fordonen köra på batteri förbi dessa komplicerade punkter för att undvika kostsamma lösningar. Det innebär att en intelligent strömavtagare utvecklas som själv känner av när det finns en kontaktledning tillgänglig, detta för att inte göra chaufförens uppgift för komplicerad. Det har även utretts om det går att ha kontaktledningen på sidan av vägen. Detta innebär dock en fara för nödställda fordon samt djur, samtidigt som antalet elektrifierade filer begränsas kraftigt. På grund av ovanstående nackdelar har vi valt att bortse från denna teknik.

3.4.1.1 Kontaktledningar

Kontaktledningar ovan vägen är en gammal teknik som användes redan under 1940-talet för att köra bussar. Kontaktedningar med en spänning på 750 VDC installeras för att kunna försörja en avtagare på fordonet med ström. Tekniken är enkel och används idag av all spårbunden trafik, men har även potential att sprida sig till gummihjulsfordon. Då systemet bygger på likström behöver gummihjulsfordon ha kontakt med två separata ledningar, en strömförande ledning samt en jordande ledning. Jorden hämtas för de spårbundna fordonen ifrån rälsen varpå endast en ledning krävs. Verkningsgraden för överföringen mellan kontaktledningen och avtagaren är nära hundra procent, dock förekommer förluster i andra komponenter på fordonet [70].

Fördelarna med detta system är att det är en välbeprövad teknik som är mycket driftsäker och förhållandevis billig att installera då ingen inverkan behöver göras på den befintliga vägbanan. Kostnaden för denna metod blir enligt beräkningar cirka 10 miljoner kronor per kilometer i båda riktningarna, en kostnad som förväntas minska vid massproduktion av komponenter. Den trådbundna lösningen går inte att applicera på personbilstrafik då avståndet mellan bilen och kontaktledningen skulle bli för stort. Enligt rådande regler ska det minsta fria avståndet på en väg till en strömförande ledning vara sex meter [105], vilket skulle resultera i att avtagaren behöver var cirka fyra meter lång.

Säkerheten på vägen anses öka då ett skyddsräcke för att skydda stolparna måste sättas upp vilket också kommer att skydda mot avåkning. Risken finns att kontaktledningarna rivs ner, av fallande träd eller liknande, något som skulle innebära stor fara för de som befinner sig på vägen. Kontaktledningarna innebär även problem vid specialtransporter då alternativa vägar kan behöva användas.

3.4.1.2 Elskena i vägbanan

En nyare version av konduktionslösningen är att istället för luftledningar integrera en elskena i vägbanan. Volvo och Alstom har tillsammans med flera samarbetspartners gjort en djupgående studie samt byggt en fullskalig testbana. Testbanans syfte är att undersöka hur kommersiellt gångbar denna teknik är och resultatet presenteras i en rapport på begäran av Energimyndigheten [70].

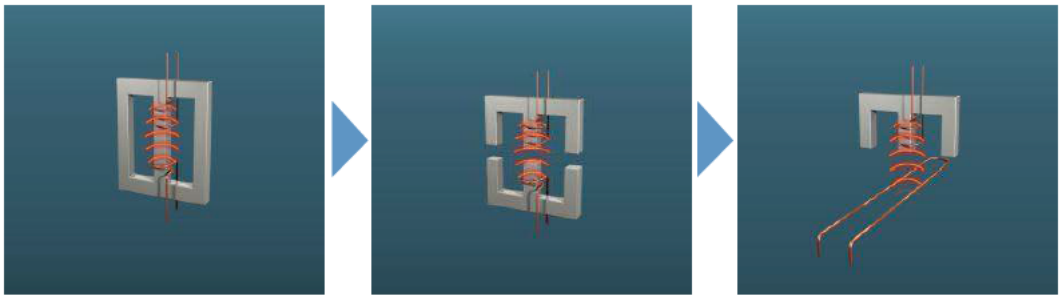
Systemets uppbyggnad består av en strömavtagare som placeras på undersidan av fordonet och en elskena som är integrerad i vägen. Detta gör lösningen applicerbar på både godstransporter och personbilar, vilket medför en stor vinning då fler fordonskategorier kan ta del av tekniken samt delar på installationskostnaderna. Det återstår dock många utmaningar innan tekniken kan användas kommersiellt. Som tidigare nämndes behöver intelligenta strömavtagare utvecklas, liksom ett debiteringssystem för den använda energin. Problemet med is och snö på kontaktskenan är också ett problem som återstår att lösa. Nya system för den totala snöhanteringen kan eventuellt krävas för att inte skada kontaktskenan, liksom nya system för beläggningsarbeten [70].

Det systemet som presenteras i rapporten baseras på teknik ifrån spårvagnar och består av strömförande segment på cirka 19 meter som exkluderat installationskostnader kostar 7.98 MNOK/km för båda rikningarna [70]. Anledningen till att det inte går att ha en kontinuerlig skena är att systemet baserar sig på likström, det vill säga att det finns en strömförande skena samt en jordande skena. En kontinuerlig skena som ständigt är strömförande skulle innebära livsfara om de två skenorna kortslöts. Genom att dela upp skenan i segment går det att göra endast vissa delar strömförande. Av säkerhetsskäl är ett segment endast strömförande inom hastighetsintervallet 60-100 km/h på fordonet. Det innebär att ingen person ska kunna befinna sig på skenan medan den är strömförande, utan att bli påkörd. Hastighetskravet innebär också att vid bilköer kommer skenan ej vara strömförande, vilket måste tas i beaktande när batteriet eller en mindre förbränningsmotor dimensioneras. Skenan aktiveras automatiskt genom att fordonet och kontaktskenan kommunicerar med varandra, vilket innebär att föraren inte märker någon större skillnad mot att köra dagens fordon. En annan säkerhetsaspekt är att kontaktskenorna i vägbanan skulle kunna bli hala vid blött väglag, men även hindra vattnet från att rinna av vägbanan då de sticker upp en liten bit ur asfalten. Detta skulle även kunna vara en säkerhetsrisk för motorcyklister då en kontinuerlig kant längs hela vägen skulle kunna öka risken för att tappa balansen.

Utöver Alstom och Volvos prototyp finns även ett antal mindre företag med liknande idéer på marknaden. Ett av dom är Elways som har en mycket lik konstruktion, den stora skillnaden är avtagaren som går ner i ett spår istället för att bara glida på. Det gör att denna lösning på ett bättre sätt kan hantera snö och is. Kostnaden blir i detta fall något lägre än för Alstoms lösning, cirka 4.3 MNOK/km. Företaget Elonroad presenterar också en lösning med den stora skillnaden att mycket liten åverkan behöver göras på befintlig väg då skenorna limmas på den befintliga vägbanan. Endast ett mindre område behöver grävas upp på tvären över vägen cirka var femhundrade meter för att försörja skenorna med ström. Detta gör att installationskostnaderna minskar markant men kostnaden för tekniken är ungefär den samma som för Alstom, cirka 8.7 MNOK/km. Dock tros priset kunna halveras vid implementering i större skala. Skenan skapar en ca fem centimeter hög kant på vägen men ska enligt utvecklaren Dan Zethraeus inte skapa några problem. Regnvatten är tänkt att det ska rinna under skenan och en lösning för snöplogning är under utveckling. En annan stor fördel med detta system är att det strömsätts endast en meter åt gången, alltså endast under fordonen och är därför lämpligt att använda i stadstrafik och hastigheter ner till stillastående (D.Zethraeus, Grundare Elonroad, 2015).

3.4.2 Induktion

En helt annan teknik för att överföra energi kontinuerligt till ett fordon i rörelse är via induktion. Induktion överför energi via ett starkt magnetfält utan att direktkontakt krävs. I vägen finns den primära spolen som överför energi till den sekundära spolen som finns i en mottagare på fordonet, se figur 4. En djupgående studie inom området, liknande den om konduktion, har genomförts av Scania i samarbete med Bombardier samt många fler på uppdrag av Energimyndigheten [71]. Även i detta fall har en fullskalig testanläggning byggts för att utreda användarvänligheten. En stor skillnad mellan projekten är att detta projekt till stor del bygger på obeprövad teknik och det finns få anläggningar i drift.



Figur 4: Till vänster är en vanlig spole, den separeras sedan och den primära spolen dras ut för att kunna integreras i vägen [5]

Det koncept som rapporten presenterar är till viss del likt konduktionsskenan i vägen. Även här är tanken att integrera 20 meter långa segment med jämna mellanrum på cirka 35 % av vägsträckningen i syfte att ladda fordonets batteri. En utredning om att elektrifiera hela vägen men sänka effekten av varje segment har gjorts men visat sig vara betydligt dyrare ur den byggnadstekniska aspekten. För att montera slingorna i vägbanan krävs att beläggningen fräses upp vilket är kostsamt, och att göra det på hela sträckan blir inte lönsamt [71]. Slingorna påminner mycket om de värmeslingorna som ibland läggs ner i vägar för att smälta snö och is se figur 5, därmed finns utvecklade arbetssätt samt maskiner för att utföra detta arbete. När slingorna är utlagda asfalteras området återigen, alltså finns det inga synliga delar i systemet. Slingorna klarar vissa tjälrörelser samt det vanliga slitaget på vägen utan problem, men om en slinga går av behöver den bytas ut omedelbart. När vägen ska läggas om kan nya maskiner behöva tas fram för att inte skada den inbyggda tekniken.

Figur 5: Den övre bilden visar de induktionsslingor som integreras i vägen, den undre visar värmeslingor för snösmältning [5]

Fördelen med induktion är att det kan användas för alla typer av fyrhjuliga fordon, det innebär inte heller några problem i korsningar och tunnlar då tekniken inte kräver en viss höjd. För att klara av de sträckor där energi inte kan hämtas direkt ur vägen föreslås ett batteri i kombination med en förbränningsmotor. Batteriet ska klara avståndet mellan segmenten samt korta sträckor, exempelvis stadskörning, medan förbränningsmotorn ska hjälpa till i branta backar eller när batteriet är slut och det inte finns tillgång till laddning. Detta resulterar dock i att mycket extravikt läggs på fordonet. Bara mottagaren till en lastbil väger med dagens teknik cirka 330 kg och inkluderat annan nödvändig utrustning innebär det att totalvikten ökar med cirka 550 kg utan batteriet inräknat.

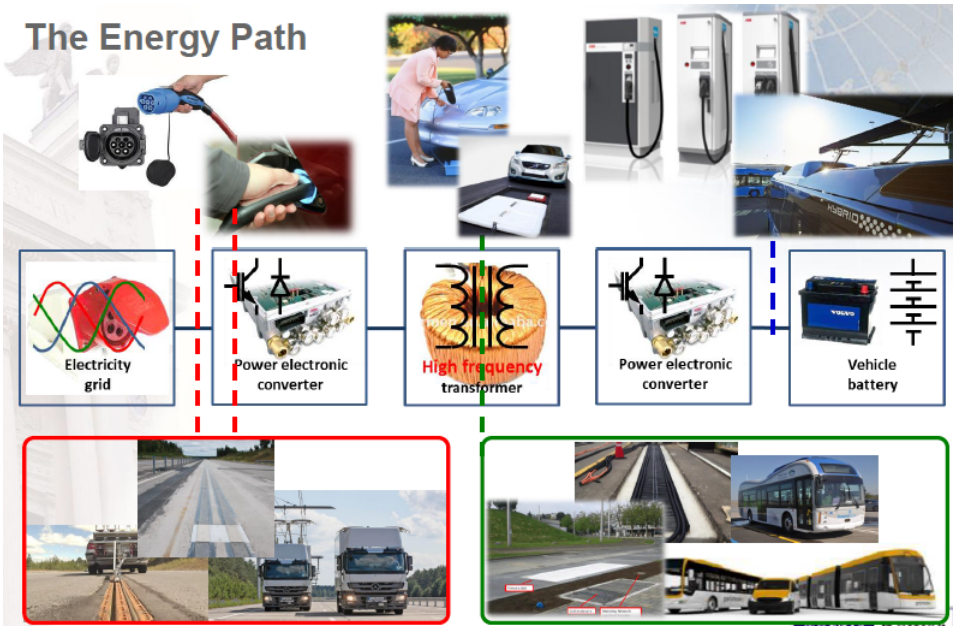
Den största säkerhetsrisken med induktion är de starka magnetfälten som finns mellan fordonet och vägbanan, risken finns att det kan påverka föraren och människor i närheten av vägen negativt. De mätningar som gjorts visar dock att nivåerna både i hytten och i lastutrymmet ligger under gränsvärdet som,

för det 25 Hz systen som används, är 6.25 μT [71]. Forskningen om hur magnetisk strålning påverkar människor har inte kunnat påvisa att det med säkerhet påverkar oss negativt. Det finns dock flera rapporter som visar att strålning skulle kunna ha ett samband med leukemi, främst hos barn [106]. De gränsvärdena som finns är satta till en femtiondel av den strålning som bedömdes påverka oss negativt. Hittills har olika lösningar för att skärma av strålningen från vägen så mycket som möjligt utretts. Det är också därför alternativet med segment främst utretts då det skulle minska risken för att andra trafikanter påverkas av strålningen.

Likt konduktionssegmenten kommer induktionssegmenten och fordonet att kommunicera med varandra och därmed endast vara aktiva när det befinner sig ett fordon över dem. De kommer dock inte aktiveras om det finns ett fordon som är närmare än 20 meter framför eller 10 meter bakom. Ett förslag som presenteras i rapporten är att i början av alla elektrifierade vägar sätta upp stationer, liknande de betalstationer som i vissa länder används i dagsläget, där fordonets dator tar emot en specifik kodslinga som sedan används för att kommunicera med vägen. Den skulle även kunna användas för debitering.

3.4.3 Komponenter i systemet

När det gäller elektrifiering av vägar finns som nämnt många tillsynes olika tekniker. Dock innefattar alla de presenterade teknikerna samma komponenter, i figur 6 illustreras de komponenter som behövs i systemet för att kunna använda sig av elektrifierade vägar. Den enda skillnaden är var komponenterna placeras, i fordonet eller integrerat i vägen. Konduktionsteknikerna samt de renodlade elbilarna som går på batteri har de flesta komponenterna i fordonet och behöver därmed endast strömförsörjning. Det gör också att det är mer vikt som läggs på fordonet vilket inte är bra ur energiförbrukningssynpunkt. Induktionstekniken kräver både komponenter i fordonet integrerade i vägen, vilket gör infrastrukturkostnaden högre. Vissa typer av hybrider laddas direkt in i batteriet vilket gör att lite extra komponenter behöver placeras på fordonet. Detta är en mycket viktig fråga då det i praktiken handlar om det är fordonstillverkaren och därmed brukaren som ska stå för kostnaderna för tekniken. Eller om den ska integreras i infrastrukturen och därmed staten får stå för en större del av kostnaderna.



Figur 6: De olika komponenterna i systemet [6]

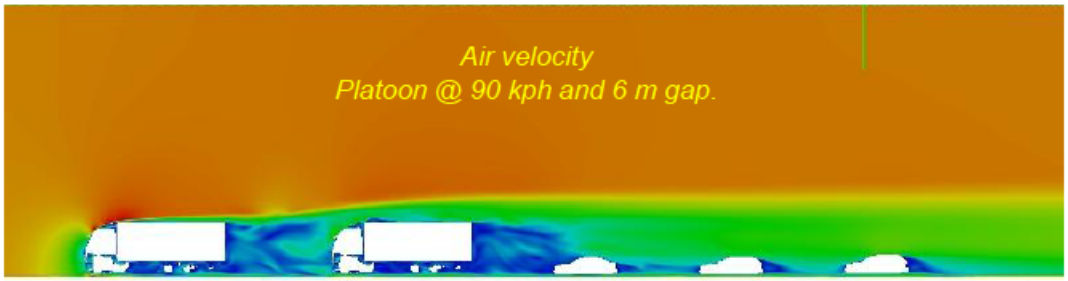
3.4.4 Nätutbyggnad vid elektrifiering

Om någon av de ovanstående teknikerna blir aktuell, kommer en omfattande utbyggnad av den elektriska infrastrukturen att krävas. För att försörja de olika teknikerna krävs 750V DC [70][71]. I Sverige och Norge finns ett regionalt elnät på 132 kV som enligt Vattenfall kan användas för att försörja en eventuell elväg [71][107]. Att bygga ut det nätet längs hela vägen skulle bli mycket kostsamt, därför krävs ett mellanliggande system för att försörja vägen. Enligt L.Spante skulle ett system på mellan 20-30 kV skulle vara lämpligt när det gäller kostnader för komponenter och kablar (L.Spante, Vattenfall Research and Development AB, 2015). Delar av distributionsnätet i Norge har en spänning på 24 kV och skulle därmed kunna användas. Problemet med de regionala näten och distributionsnätet är att de ägs av olika aktörer med rättigheterna till att bruka nätet [49]. Detta skulle kunna leda till stridigheter med lokala aktörer när det gäller att ansluta sig till detta nät, även brist på ledig kapacitet kan vara problematiskt. Samma situation råder även i Sverige, därför har Vattenfall valt att utreda ett nytt system på 30 kV som även är kompatibelt med vindkraftverk (L.Spante, Vattenfall Research and Development AB, 2015). Längs med vägen skulle det krävas transformatorstationer med jämna mellanrum för att omvandla 30 kV till 750 V. Beroende på transformatorernas storlek kan avståndet mellan dem variera, det som utretts av Alstom är att det skulle vara lämpligt att de satt med cirka en kilometers mellanrum [71]. Det skulle i sin tur medföra en kostnad på cirka 6.4 MSEK/km.

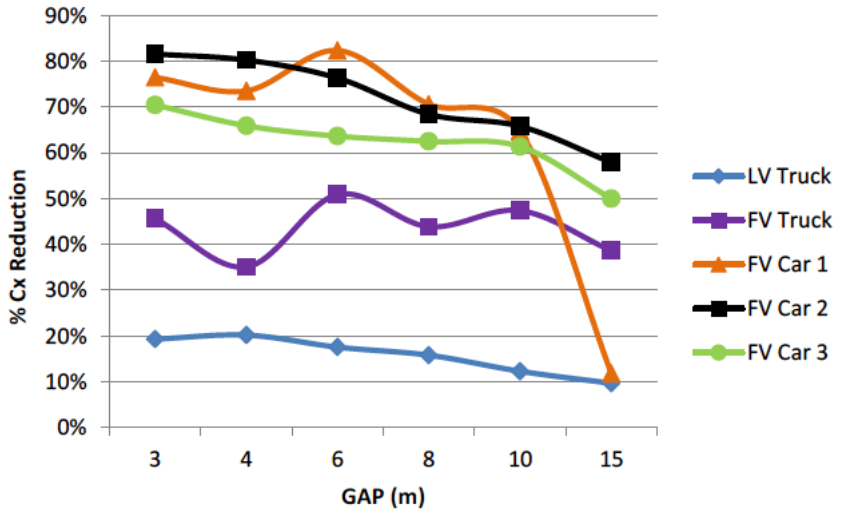
3.5 Fordonståg

Utöver de alternativa teknikerna som presenterats för att driva fordonet har det även gjorts studier på om autonoma fordon skulle kunna minska bränsleförbrukningen. En typ av autonoma fordon är fordonståg som utretts i ett EU-projekt kallat Safe Road Trains for the Environment, SARTRE. Tekniken med fordonståg bygger på att ett antal fordon kopplar samman sig med ett ledarfordon. Ledarfordonet består av ett fordon med en yrkeschaffuör som fått utbildning inom att leda ett fordonståg, exempelvis en lastbil eller en taxi. Det första fordonet körs som vanligt av chauffören medan de som åker bakom kan släppa ratten då fordonens datorer kommunicerar med varandra för att hålla avstånd och linje. Det innebär att fordonen kan köra närmare varandra eftersom en dator inte har samma reaktionstid som en människa och vid ett oväntat hinder skulle alltså de bakomvarande fordonen också hinna stanna. Tekniken som krävs för att fordonen ska kunna kommunicera med varandra består av diverse olika sensorer, ställdon och processenheter med mera. För att styra fordonet krävs också en elektronisk servostyrning samt en kontrollenhet. Tekniken baseras på befintliga komponenter och kostnaden är cirka 2000 EUR per fordon. Utöver det tillkommer en kostnad för utbildning av förare på 2500 EUR samt en årskostnad för kommunikationstjänsten mellan fordonen på 300 EUR.

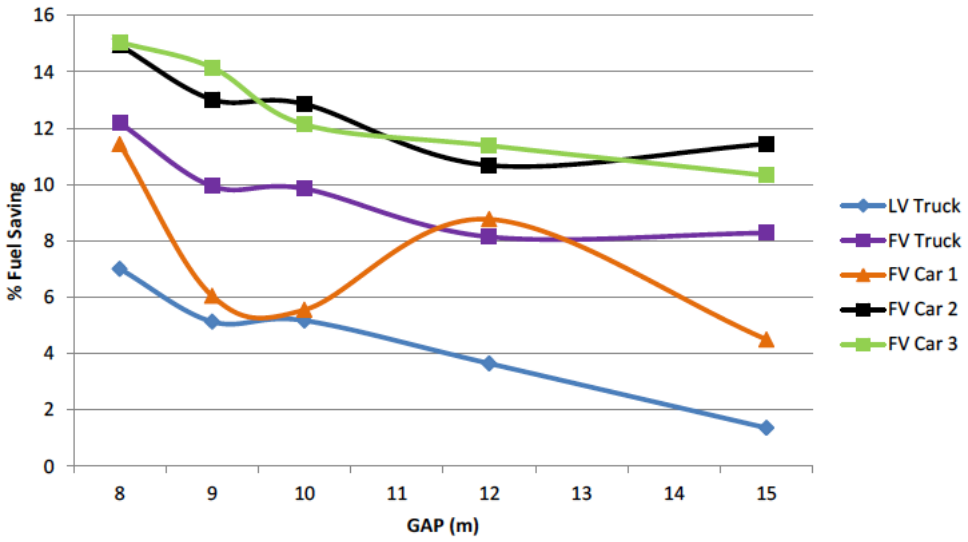
Fördelen med att köra nära är att det går att utnyttja den första bilens vinddrag till att minska luftmotståndet för de bakomvarande. Den fordonssammansättning som testen utförts på visas i figur 7 och består av en ledande lastbil av modellen Volvo FH12, en efterföljande lastbil av samma modell, samt tre personbilar av modellerna Volvo S60, V60 och XC60. Tester visar att luftmotståndet kan minskas med upp till 80 % för de bakomvarande bilarna samtidigt som det minskas med cirka 10-20 % även för det första fordonet, resultatet för alla fordon återfinns i figur 8 [108]. Detta innebär för dieselfordon en minskning med cirka 7-16 % av bränsleförbrukningen beroende på vilken position fordonet har i sammansättningen, se figur 9 för minskningen per fordon. Bränsleförbrukningen är starkt relaterad till CO_2-utsläppen, alltså kan slutsatsen dras att CO_2-utsläppen för dieselbilar också kan minska med 7-16 % [108]. Tekniken är även applicerbar för andra typer av fordon, exempelvis elbilar eller på elektrifierade vägar då energiförbrukningen kan reduceras.



Figur 7: Illustration över luftflödet i ett fordonståg [7]



Figur 8: Luftmotståndsreduktion i ett fordonståg. På y-axeln är den procentuella reduktionen för respektive fordon och på x-axeln är avståndet mellan fordonen [7]



Figur 9: På y-axeln visas den minskade bränsleförbrukningen och på x-axeln avståndet mellan fordonen [7]

Ett av de problem som upptäcktes under testkörning som utfördes på allmän väg i Spanien var att accelerationssträckor samt bromssträckor på motorvägar kan behöva förlängas för att trafikanter inte ska behöva tränga sig igenom ett fordonståg vid på eller av körning [109]. Systemet kan även effektivisera flödet i den tunga trafiken betydligt. Enligt dagens gällande EU-regler som även gäller i Norge får lastbilschaufförer köra i maximalt 4.5 timmar innan de måste ta rast i 45 minuter [50]. Med fordonstågen skulle chaufförerna slippa att stanna för att ta sin vila utan skulle kunna göra det längs vägen genom att koppla in sig i ett fordonståg.

3.6 Biobränsle

Ett sätt att minska användandet av fossila bränslen är att utnyttja naturens förnybara resurser till fullo. Detta kan göras genom att utvinna energi från biomassa, vilket är allt som består av vegetabiliskt material från jord- och skogsbruk. Avfall från exempelvis industrin och hushåll kan också användas som råvara till utvinning av bioenergi [110]. Vilken slutprodukt det blir av biomassan beror på vilken sorts biomassa som används. De tre biobränslena Norge satsar mest på är: bioetanol, biodiesel och biogas och är också de slutprodukterna vi kommer fokusera på i detta kapitel.

3.6.1 Biobränsle i Norge idag

Framställandet av bioetanol sker av biomassa som innehåller kolhydrater i form av socker, stärkelse eller cellulosa. Detta kan utvinnas från majs, sockerrör, sockerbetor eller potatis men bioetanol kan också produceras av växter som inte kan användas till mat, till exempel trävirke, gräs eller avfallsprodukter från lantbruket. Biodiesel däremot framställs ifrån vegetabiliska oljor eller animaliska fetter till exempel rapsolja, palmolja eller fiskolja. Den biodieseln som framställs med rapsolja som bas kallas rapsmetylester, RME, och är även den vanligaste biodieseln i Europa. Den biodieseln som framställs ifrån andra fettsyror kallas FattyAcidMethylEste, FAME, där fettsyrorna kan komma ifrån slakteriavfall, tallolja, fiskolja eller använt stekfett. Biogas framställs av matavfall, husdjursgödsel och avloppsslam [111]. När man rötar dessa bildas metan som är den största beståndsdelen i både biogas och naturgas [51]. Detta gör att biogas och naturgas har samma egenskaper när man använder det som bränsle. När man har framställt biogas kan man välja att kyla ner den och låta gasen övergå till flytande form och få Liquid Biogas, LBG, eller komprimera gasen och få Compressed Biogas, CBG [112][113].

Biogas är ett drivmedel som liknar naturgas men är dyrare och är därför inte lika utbrett som de andra biobränslena. Biogas används däremot i större utsträckning på båtar där man använder både LBG och Liquid Natural Gas, LNG och på bussar där man använder både CBG och Compressed Natural Gas, CNG. Det finns även ett antal företag som övergått till gaslastbilar, bland annat posten som satsar stort på biogas, av typen CBG [52].

Både bioetanol och biodiesel är drivmedel som liknar fossila bränslen och de kan därför användas direkt i dagens bilar. Redan idag används bioetanol och biodiesel som utspädning i fossila bränslen men också som renodlat drivmedel. Det finns begränsningar inom EU och i Norge på hur mycket biobränsle man får blanda i bränslena, max 7 % biodiesel i diesel och 10 % bioetanol i bensin [16]. I Norge idag är det inblandat 4.7 % [18] biodiesel i diesel och 1.1 % [82] bioetanol i bensin. Som drivmedel används bioetanol med 15 % bensin på sommaren, och 25 % bensin på vintern, för att underlätta kallstarter [23]. Ren biodiesel som bränsle utsätter motorn för mycket slitage och det krävs därför en godkänd motor för detta och hänsyn måste också tas till att biodiesel är mycket känsligare för kyla jämfört med fossilt diesel [53].

Det biobränsle som är störst i Norge idag är biodiesel framställt på fiskoljor och använd frityrolja,

FAME. Tätt efter kommer bioetanolen som i Norge är framställd från trävirke och halm. Den biogas som finns i Norge idag framställas av olika råvaror och vilken råvara som används beror på i vilken del av landet produktionen sker. Större delen av den biogas som är producerad för att driva bilar i Norge är producerad på avloppslam i kommunerna kring Oslo [114]. I kommunerna längs E39 produceras i dagsläget mest biogas till värme med både avloppslam och matavfall som råvara. Den mängd biobränsle som användes 2012 var 1.5 TWh och mängden biogas var 0.5 TWh, större delen av detta användes dock för värme [115].

3.6.2 Potential för biobränsle

Norge satsar stort för att öka både sin produktion och användning av biobränsle. En rapport från Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE, från 2014 beskriver Norges potential för produktion av bioenergi år 2020 [115]. De utgår ifrån vilken biomassa som används och delar även upp potentialen i regioner. Utifrån detta tror NVE att det i region E39 år 2020 kommer finnas potential för att tillverka 6.11 TWh bioenergi. Detta är uppdelat på skogsbruk som står för 4.52 TWh, industriavfall 0.08 TWh, jordbruksavfall 0.34 TWh, hushållsavfall 0.13 TWh, halm- och kornrester 0.34 TWh och slutligen alger 0.7 TWh. De tror även att utvecklingen av bioenergiproduktionen från alger inte kommer nå sin fulla potential förrän år 2030. Efter detta tror forskarna att den kommer nå en större produktion än bioenergin från skogsbruket. Detta innebär att de satsar mycket på bioenergi utvunnet från alger och det är därför denna rapport bara kommer att behandla denna biomassa.

Bioenergi från alger är något forskare över hela världen har börjat undersöka, även i Norge. Det har varit flera forskningsprojekt i bland annat Japan, Frankrike och Danmark där man undersökt hur alger på bästa sätt kan användas till biobränsle. Det man har kommit fram till är att alger är en väldigt mångsidig biomassa som kan förädlas till biodiesel, bioetanol och biogas [116]. Ur alger kommer bioetanol vara den stora produkten, om man fokuserar på att förädla den till biobränsle, och man kommer kunna utvinna ca 3 500 l/ha och i jämförelse med trävirke och sockerrör som producerar 6 000 l/ha är det lite [117]. Då Norge har en väldigt lång kustlinje och mycket hav finns det dock gott om plats för att kunna odla alger, cirka 1 400 ha, vilket skulle kunna generera 5.9 TWh vilket motsvarar 4.9 miljoner liter bioetanol. I forskningsprojekten har man både tänkt använda de alger som växer naturligt i havet men också plantera alger mellan vindkraftverk för att kunna få ut mer av havet. För att kunna börja producera bioetanol från alger kommer det krävas investeringar i både odlingsanläggningar och förädlingsfabriker. I Nederländerna gjordes en analys 2005 där kostnaden för att nå break-even beräknades för en odlingsanläggning och en fabrik som producerar 100 000 ton bioetanol/år. Den analysen visade att det kommer att kosta 120-200 NOK/ton våtvikt. Detta leder till att produktionen av bioetanol från alger kostar 10 NOK/l som kan jämföras med bioetanol från sockerrör som kostar 3-4 NOK/l men också bensin är mycket billigare med 6 NOK/l. Dessa kostnadskalkyler är inte positiva men ger en indikation på att tekniken och raffinaderierna behöver utvecklas för att få ner kostnaderna i framtiden.

3.7 Koldioxidemissionsfaktorer för framtida tekniker och bränslen

För att kunna göra en jämförelse mellan fordon som drivs av el, biobränsle och bränsleceller och traditionella fordon drivna av fossila bränslen har koldioxidemissionsfaktorer framtagits för de framtida drivmedlen.

3.7.1 Från elektricitet

När man talar om elfordon brukar man säga att dessa inte ge upphov till några koldioxidsutsläpp men om man tar hänsyn till hela livscykeln samt varifrån elen kommer stämmer inte detta. När man ska beräkna CO_2-emissionerna från de norska elfordonen finns det en del olika angreppssätt eftersom man kan ha olika perspektiv på elsystemet i Nogre och resten av världen. För att miljövärdera elen finns olika sätt att räkna på med *Konsekvensanalys* och *Bokföring*. Konsekvensanalys utvärderar förändring i elanvändningen och Bokföring bokför utsläpp på olika aktörer [118]. Även inom dessa olika räknesätt finns olika metoder och perspektiv och för framtida analyser är *Utsläppsrättshandelsperspektivet*, *Framåtblickande perspektiv* och ett *Genomsnittligt perspektiv* relevanta [119].

Utsläppsrätthandelsperspektivet bygger på att det finns ett gemensamt tak inom EU Emission Trading System, ETS, för mängden koldioxid som anläggningar inom energi- och industrisektorn får släppa ut. EU ETS består av alla medlemsländer i EU samt tre länder från EEA-EFTA (Norge, Lichtenstein och Island). Systemet går ut på att mängden koldioxid som får släppas ut delas in i utsläppsrätter vilka fördelas på olika anläggningar. Om en anläggning har ett underskott på utsläpp kan de antingen spara utsläppsrätterna till nästkommande år eller sälja överskottet till en annan anläggning som är i behov av fler utsläppsrätter [119]. Detta innebär att det kommer att finnas ett tak för utsläpp av koldioxid från dessa sektorer som inte får överskridas.

Det framåtblickande perspektivet används främst för att mäta miljöpåverkan av långsiktiga förändringar i elproduktionssystemet. Bedömningen av miljöpåverkan blir då skillnaden mellan två olika beräkningsfall där ett av fallen är systemet utan någon förändring och det andra är det ändrade systemet [119]. Denna metod är lämplig att använda när man räknar med att det krävs en ny elproduktionskapacitet och hänsyn ska tas till hur den nya elen ska produceras. Detta kräver dock en viss insyn i och/eller modeller för elsytemets framtida utveckling.

Ett genomsnittligt perspektiv baseras på historisk statistik och miljövärderingen sker på tidigare utsläpp från elsystemet. Då detta synssätt endast bygger på kända fakta behövs ingen modell för framtiden och är sådeles förhållandevis okomplicerat. Dock finns det andra svårigheter när det kommer till vilken systemavgränsning som ska göras, eftersom elsystemen är väldigt sammankopplade leder dessa avgränsningar till stora variationer i resultatet [119]. Som exempel bukar man säga att elen från det nordiska systemet släpper ut cirka 100 g CO_2/kWh medan samma siffra ur ett svenskt perspektiv istället är 20 g/kWh [54].

Eftersom en ökad mängd elfordon innebär en ökad elanvändning och på grund av osäkerheten i hur framtidens elsystem ser ut kommer den här rapporten att fokusera på konsekvensanlays med utsläppsrättshandelsperspektivet. Detta innebär kort att man räknar med att det inte blir några ökade utsläpp av koldioxid även om konsumtionen av el ökar. Det vill säga, antingen kommer ökningen att produceras fri från koldioxidutsläpp eller så kommer en motsvarande minskning vara tvungen att ske någon annanstans inom handelssystemet. Det innebär att den ökade mängden elfordon inte kommer att bidra till en ökad mängd utsläppt CO_2 i Europa varför det anses motiverat att räkna med en koldioxidfaktor på 0 kg CO_2/kWh för el. Detta eftersom de faktiska utsläppen som kommer till en följd av elfordonen istället kommer att hamna under det gemensamma utsläppstaket inom EU ETS för industri- och energisektorn.

3.7.2 Från biobränsle

Beräkning av CO_2-emissioner från biobränslen kan också hanteras på olika sätt. Ett sätt att räkna är att ta hänsyn till hela livscykeln och man inkluderar då odlingen, tillverkningen och transporten av bio-

bränslet. Då kan man använda sig av EU:s förnybarhetsdirektiv (RED). I detta direktiv som trädde i kraft år 2009 finns det krav på biodrivmedel för att de ska klassas som hållbara [55]. Målet med direktivet är att minska utsläppen gentemot fossila bränslen med 35 % år 2014, detta kommer ökas till 50 % år 2017 och ytterligare till 60 % år 2018. För att beräkna minskningen av CO_2-emissioner används ett normalvärde för det fossila bränslet, år 2010 var det 83.8 g CO_{2eq}/MJ, denna siffra kan komma att uppdateras ifall bränslekvaliteten på de fossila bränslena ökar [56].

Det andra sättet att hantera CO_2-emissioner från biobränslen är att bara ta hänsyn till nettoutsläppen, det vill säga när bränslet förbränns i motorn. Då räknar man med att biobränslen släpper ut 0 CO_2/l eftersom mängden CO_2 som släpps ut anses vara ekvivalent med den mängden CO_2 som råmaterialet tagit upp när det växt [120]. Detta är det vanligaste sättet att räkna på emissioner från biobränslen och är därför det angreppssätt vi valt. Det överrensstämmer också med det perspektiv att bara titta på nettoutsläppen som vi använt oss av för de övriga drivmedeln. Tack vare EU:s förnybarhetesdirektiv kommer förhoppningsvis biobränslen att närma sig nollutsläpp även för hela livscykeln fram till 2060.

3.7.3 Från vätgas

Precis som med biobränsle och elektricitet ses vätgas som ett bränsle som ger nollutsläpp vid framdrivandet av fordonet då det under drift inte produceras några utsläpp annat än vattenånga.

Med ett vidare perspektiv kan hänsyn tas till tillverkningsprocessen av väte som bränsle. Stora mängder väte produceras idag genom kommersiellt etablerade processer för oljeproduktion samt vid utvinning av naturgas och ammoniak. Men för att väte ska bli ett bränsle som är tillgängligt för allmänheten krävs att väteproduktionen uppfyller miljökrav och kostnadsbegränsningar. Väte är en energibärare som är flexibel i den aspekten att den kan produceras på ett flertal olika vis, däribland genom förnyelsebara energikällor dock också med hjälp av kärnkraft eller fossila bränslen. En miljövänlig teknik är framställning av väte genom elektrolys av vatten men idag används det endast då en liten mängd väte ska produceras på en specifik plats. På kort sikt kan bristen på väte producerat genom miljövänliga processer betyda att större delen av vätet kan komma att produceras med hjälp av fossila bränslen och utan CO_2-infångning. På lång sikt kan väte dock komma att produceras genom tekniker som släpper ut förhållandevis lite eller ingen CO_2. Dessutom kan samma argument som för elektricitet användas här, de utsläpp som faktiskt tillkommer som en följd av vätgasproduktion hamnar under utsläppstaket för energi- och industrisektorn vilket innebär att det totalt sett inte blir någon ökning av koldioxidutsläppen.

4 Energiproduktion i området längs E39:an

I Norge kommer cirka 96 % av elproduktionen från vattenkraft. Detta medför att elproduktionen varierar med säsongerna samt från år till år. En elektrifiering av vägnätet skulle kräva en anpassad energiproduktion för förbrukningen på vägen samt en hög leveranssäkerhet. En lösning skulle kunna vara att under våta perioder pumpa upp vatten till högt liggande magasin för att sedan använda under torrare perioder [107]. Norra Europa har ett starkt sammankopplat elnät som underlättar export och import av el vilket hjälper till att jämna ut variationerna i elproduktionen. Under de kommande åren görs stora satsningar på förnybar energi som ofta kommer från intermittenta elkällor. Detta gör att lagring av el samt utjämning blir alltmer viktig. Under en kommande tioårsperiod ska Norge satsa cirka 5-7 MDNOK per år för att bland annat förbättra sammankopplingen till andra länder men även för att öka leveranssäkerheten.

I och med en befolkningsökning samt att fler branscher som tidigare varit beroende av fossila bränslen byter till elenergi kommer efterfrågan att öka. Norge planerar därför en stor nyetablering av förnybara energikällor som också kommer kräva en utbyggnad av det centrala elnätet. Bland annat planeras 40-45 TWh vindkraft, 20 TWh havsvindkraft och 20 TWh vattenkraft [107].

I denna rapport redogörs beräkningar för energipotentialen för följande sju fjordar; Halsafjord, Moldefjord, Storfjord, Voldafjord, Nordfjord, Sognefjord samt Bjørnafjorden som alla ligger i region E39. Siffror från Stastisk Sentralbyrå visar att elförbrukningen år 2013 i region E39 var cirka 57 TWh [57]. En total elektrifiering av hela Norges bilflotta skulle kräva cirka 5 TWh vilket motsvarar cirka 5 % av Norges totala förbrukning [107]. Möjligheten att kompensera för den ökade energiåtgången längs E39:an genom att producera energi med förnybara källor i området har undersökts.

4.1 Vindkraftverk integrerade i brokonstruktioner

De åtta befintliga färjeförbindelserna längs vägen kommer i framtiden att ersättas med olika brokonstruktioner. Förutom att dessa broar ska förkorta restiden på E39:an är tanken att de ska fylla andra ändamål såsom att generera el genom integrerade vindkraftverk i brokonstruktionerna. Ett sådant projekt är en ny utmaning för ingenjörerna och aktörerna då det inte finns några tidigare liknande exempel och hur väl det fungerar är ännu oklart. Ytterligare är att broarna som ska konstrueras över fjordarna kommer att vara några av världens längsta vilket i sig är en utmaning som kräver många nya studier.

Miljön i fjordarna är lik den ute till havs och följande två typer av vindkraftverk som presenteras i figur 10 och 11 kan utvecklas med havsbaserad teknik. Den allra vanligaste typen är rotor med horisontalaxel, förkortat HAWT följt av rotor med vertikalaxel, VAWT. Det finns också vindkraftverk av fläktkaraktär, så kallade Ducted Augmented Wind Turbines, DAWT men på grund av brist på ekonomisk information om DAWT kommer inte denna modell att behandlas i rapporten.

Figur 10: Rotor med horisontalaxel, HAWT [8]

Figur 11: Rotor med vertikalaxel, VAWT [9]

Dagens vindturbiner börjar producera el vid en vindhastighet på 3-4 m/s [58]. En HAWT har i jämförelse med en VAWT betydligt högre energiproduktion per kvadratmeter och år [74]. Vid en vindhastighet på 7 m/s genererar en HAWT nästan dubbelt så mycket som en VAWT. Uppmätta vindhastigheter samt uppskattade vindtimmar per år vid respektive fjord presenteras i tabell 8 och är tagna från rapporter av Norconsult samt Rambøll [75][74]. Den förväntade årliga energiproduktionen i respektive fjord är beräknad av Norconsult. Påverkande faktorer är längden på fjorden som kommer att vara avgörande för hur många turbiner man kan placera på bron, vindhastigheten i området samt antal vindtimmar. Fler vindtimmar (driftstimmar) kommer att generera mer el [59].

Tabell 8: Vindhastigheter, vindtimmar/år och årlig energiproduktion [75] [74]

Fjord	**Vindhastighet**	**Vindtimmar/år**	**Energiproduktion [GWh/år]**	
			HAWT	VAWT
Halsafjord (Kanestraum-Halsa)	5-6m/s	1268	30.4	1.1
Moldefjord (Vestnes-Molde)	4-6m/s	1469	28.1	1.1
Storfjord (Festøy-Solavågen)	3-5m/s	2003	84	3.2
Voldafjord (Volda-Folkestad)	3-5m/s	1469	45.8	1.7
Nordfjord (Anda-Lote)	3-5m/s	935	19	1.7
Sognefjord (Oppedal-Lavik)	4-6m/s	1268	56.2	2
Bjørnafjord (Sandvikvågen-Halhjem)	5-7m/s	1469	47.5	1.8

Det finns många olika modeller på marknaden vilket gör beräkningarna i tabell 8 specifika för vissa modeller. För denna studie gäller en 2.3 MW HAWT med en rotordiameter på 101 m och för en VAWT räknas med en bredd på 5 m och höjd på 7 m [74].

Enligt en studie som Norconsult har gjort har det visat sig att de horinsontella vindkraftverken producerar mer el per kvadratmeter jämfört med de vertikala vilket också kan ses i tabell 8. Däremot kan de horisontella vindturbinerna endast vara riktade åt ett håll till skillnad från de vertikala som fångar upp all vertikal vind.

Det är främst Storfjorden som är intressant eftersom den kommer generera mest el sett till antal vindtimmar. I Storfjorden är det cirka 3.4 km mellan Festøy och Solavågen och 500 m djupt. Det finns hittills tre förslag på förbindelsen däremellan en hängbro, flytande bro eller en rörbro men endast de två förstnämnda är lämpliga för vindkraftverk. Med driftstimmar på 2003 vindtimmar/år i Storfjord motsvarar det 23 % av årets totala 8760 timmar och i Nordfjord som har de lägsta vindtimmar/år är kapacitetsfaktorn endast 11 %.

4.1.1 Placering av vindturbinerna

Norconsult, Ramböll och SP Technical Research Institute har tagit fram olika förslag på hur man kan integrera vindkraftverken i broarna, se appendix E. Genom att integrera vindturbiner i en konstruktion kan konstruktionens olika delar utnyttjas. I detta fall kan tornen eller pelarna på en hängbro utnyttjas eller pontonerna på en flytande bro och på så sätt sänka de totala kostnaderna jämfört med om man enbart bygger en bro och en vindkraftpark vid sidan av.

4.1.2 Kostnader för vindkraftverk

En lång framförhållning till projektering, en oförutsägbar teknikutveckling och en hittills oprövad idé i bagaget gör det svårt att kalkylera exakta kostnader för integrerade vindturbiner i brokonstruktioner. Många faktorer kommer att påverka kostnaden såsom modell, turbinens effekt, placering och driftstimmar. En mer generell kostnad för varje installerad MW baserat på 2.3 MW:s turbin vid varje fjord finns presenterad i tabell 9. I kostnaderna finns investerings- och underhållskostnader inräknade samt en uppskattning av en kostnadsökning på 50 % på grund av integrering i brokonstruktionen [72]. Vid beräkningen har det tagits hänsyn till vindtimmar per år och energiproduktionen från tabell 8 samt till en kalkylränta på 5 % och en livslängd på 20 år.

Tabell 9: Kostnad/installerad MW vid respektive fjord

Fjord	**Produktionskostnad [NOK/kWh]**		**Total kostnad [MNOK]**	
	HAWT	VAWT	HAWT	VAWT
Halsafjord	1.97	3.11	50	79
Moldefjord	1.7	2.69	50	79
Storfjord	1.25	1.97	50	79
Voldafjord	1.7	2.69	50	79
Nordfjord	2.68	4.22	50	79
Sognefjord	1.71	3.11	43.4	79
Bjørnafjord	1.7	2.69	50	79

Produktionskostnaden för HAWT i Sognefjord utmärker sig en aning från övriga fjordar. Detta beror dels på att vi har utgått från en vindturbin med samma kapacitet för alla fjordar och som syns i tabell 8

är energiproduktionskapacitet i detta område låg i förhållande till de andra, vilket resulterar i en högre produktionskostnad. Sognefjord är bland de bredaste fjordarna och har en hög kapacitet för energiproduktion vilket medför en lägre totalkostnad.

I tabell 10 presenteras en generell kostnad för 1 MW HAWT på land. Antalet driftstimmar i Norge uppskattas vara mellan 2500 och 3000 vilket ger en produktionskostnad för en landbaserad vindturbin mellan 0.52-0.6 NOK/kWh [121]. Norges vassdrags- og energidirektorat uppskattar en investeringskostnad för en landbaserad vindturbin på 12 989 NOK/kW som är omräknad till en annuitetskostnad med en kalkylränta på 5 %. Livslängden antas vara 20 år och antalet driftstimmar 2500.

Tabell 10: Kostnad för 1 MW HAWT på land

	Kostnad
Intevestering, drift och underhåll	0.42 NOK/kWh
Kostnad per turbin och år	1 042 270 NOK
Total kostnad	**20.8 MNOK**

4.1.3 För- och nackdelar med integrerade vindkraftverk

En av utmaningarna för brokonstruktörerna kommer att vara de vindlaster som broarna kommer att utsättas för då E39:an sträcker sig längs med Norges västkust. Vindkraftverkens optimala placering finns i områden med goda vindresurser i motsats till broarnas placering, som med fördel är skyddad från starka vindar. Dessutom kommer det att uppstå momentana laster såsom vibrationer från vindturbinerna när de är aktiva. Dessa dynamiska problem kan vara svåra att hantera. Framförallt gäller detta broar med större spännvidder där aerodynamiska och stabilititetsproblem är vanliga vilka i kombination med vindturbiner gör beräkningarna komplicerade. Enligt Mario Plos räknar man generellt med en livslängd på cirka 100 år vid dimensionering av en bro jämfört med livslängden på ett vindkraftverk som är 20 år (Mario Plos, Docent på Bygg- och miljöteknik CTH, 2015-03-16). Det är då viktigt att ta hänsyn till hur underhåll och utbyte av vindturbiner på bron organiseras och hur det kommer att påverka trafiken. Förslagsvis sköts underhållningen från vattnet med hjälp av fartyg för att inte behöva stoppa trafiken på bron under en längre period.

Området vid brobebyggelsen är en befintlig byggplats vilket är en fördel med att integrera vindturbinerna i broarna då man kan utnyttja befintliga byggmaskiner. Det finns en rad andra fördelar såsom delat underhåll, utnyttjande av befintlig infrastruktur och att andra markområden kan användas till annat. Befintligt elnät i bron kan kopplas till de installerade vindkraftverken och inbyggda värmeslingor i vägen kan smälta snö och is vintertid.

4.2 Solpaneler integrerade i brokonstruktioner

Jordens viktigaste energikälla är solen som också är grunden till allt liv här på jorden. Dess strålningsintensitet kan med dagens teknik fångas in och utnyttjas. Då det är en gratis energikälla blir solpaneler allt mer populärt och tekniken på den fronten utvecklas allt mer. Idag finns det två typer av tekniker. Den ena, som är den vanligare tekniken idag, fungerar som en solfångare som samlar in strålningen i form av värme vilket kan användas till upphettning av exempelvis vatten. Den andra tekniken är solcellspaneler som omvandlar solinstrålningen till el. Den sistnämnda tekniken är av större intresse vid placering av solpaneler i brokonstruktioner i detta projekt. Anledningen är att 60 % av den energin som kommer att produceras i Norge från solpaneler kommer att ske under de fyra sommarmånaderna och behovet av

värme är störst under vintertid [73]. Att lagra denna värme och använda det under vintertid kommer inte att vara ekonomiskt lönsamt om ens energieffektivt med den teknik som finns idag. Däremot har Norconsult kommit fram till att vid Voldafjorden finns möjligheten att distribuera alstrad värmeenergi då det är enda fjorden som har ett befolkat område i närheten. Hur energieffektivt det är och om det är ekonomiskt lönsamt återstår att undersökas.

Idag finns det två typer av solceller, kristallina paneler tunnfilmspaneler. Kristallina paneler är den vanligare och äldre typen och har också högre verkningsgrad. Solpanelerna kan vara kopplade till elnätet eller vara fristående. Vid koppling till elnätet kan den genererade elen utnyttjas av närliggande hushåll och industrier men även för belysning av vägen.

I Norge är solinstrålningen under ett år 700 kWh/m^2 i norr och upp till 1100 kWh/m^2 i söder [122]. Det är dock inte all instrålning som kan utnyttjas och riktning samt vinkel på solpanelerna är viktig för hur stor andel av solinstrålningen som kan nyttjas. Den optimala vinkeln skiljer sig beroende på vart man befinner sig och vilken väderstreckriktning det är.

4.2.1 Placering av solpanelerna

Hur och vart man placerar solpanelerna har en stor påverkan på energiproduktionen. Solpaneler ska placeras så öppet som möjligt och där det är minimal skuggtid. Detta för att panelerna är väldigt känsliga för skugga, framförallt de seriekopplade kristallina panelerna där det räcker att en kristall är skuggad för att panelen ska minska avsevärt i energiproduktion. Det finns några olika förslag på placeringar från Norconsult presenterade i appendix F. På pontonbroar kommmer det finnas en upphöjd del som passage för färjor och båtar. Ett förslag är att placera solpaneler över passagen som ett tak för vägen. Ett annat förslag är sidorna av ponton- och hängbroarna där det finns gott om arealer som solpanelerna kan placeras på. För hängbroar finns det möjlighet att utnyttja pelarna men även vajrarna. Placeringen kommer även ha betydelse för utseende, sikt på vägen, underhåll samt för hur exponerade solpanelerna kommer att vara för stänk av smuts från vägen.

Den potential för energiproduktion som kan fås i fjordarna är 382.7 GWh/år [73]. I tabell 11 är energiproduktionen för solceller beräknad för de olika fjordarna beroende på var någonstans på brokonstruktionen de är placerade. Värdena är framtagna av SP Technical Institute of Sweden och för solcellspaneler med vinkeln 45°[73]. Vid beräkning har hänsyn tagits till den mest optimala väderriktning för varje fjord vad gäller solinstrålning. Bjørnafjorden är uppedelad i två delar eftersom man där ska bygga två broar.

Tabell 11: Energiproduktion i GWh/år beroende av placering

Fjordarna	**Tak**		**Sidor**		**Vajrar**	**Pelare**
	Pontonbro	Hängbro	Pontonbro	Hängbro		
Halsafjorden	3.08	3.44	1.03	1.03	14.97	1.34
Moldefjorden	13.54	15.10	4.75	4.75	68.83	1.34
Storfjorden	5.73	6.39	2	2	29.06	1.34
Voldafjorden	3.39	3.79	1.17	1.17	16.89	1.34
Nordfjorden	2.87	3.2	0.99	0.99	14.41	1.34
Sognefjorden	6.42	7.16	2.23	2.23	32.26	1.35
Bjørnafjorden 1	2.7	3.01	0.93	0.93	13.51	1.34
Bjørnafjorden 2	9.66	10.77	3.38	3.38	49	1.34

Placeringen kommer att ha betydelse för brokonstruktionen och hur den påverkas av ytterligare påförd last. Vid takplacering eller på vajrarna skapar man fler ytor för vinden vilket kommer att öka vindlasterna på konstruktionen. Vikten av en solcellspanel (inklusive elkablar och monteringsutrusning) ligger mellan 10-15 kg/m^2 [73]. Enligt den svenska branschföreningen SSE genererar en solcell momentant 50-150 kWh/m^2·år beroende av system [60].

4.2.2 Kostnader för integrerade solpaneler

Det finns olika typer och former av solpaneler med olika energieffektivitet. Detta medför att det är svårt att sätta en exakt kostnad på tekniken. Dessutom är marknaden konkurrensberoende vilket gör att priserna stiger och sjunker i takt med förändring. Generellt kan man säga att för stora paneler ($\leq$ 10 kW) integrerade i brokonstruktion ligger priset 2500 ± 400 NOK/m^2 [73]. I denna kostnad uppskattas 1200 NOK/m^2 vara kostnaden från utrustningen som krävs till montering [74]. Kostnaden är även beroende av solstrålning och kommer därför att variera mellan de norra delarna av region E39 och de sydliga. I tabell 12 presenteras priserna som SP uppskattat för stora monokristallina solcellspaneler gjorda av silikon. De presenterade kostnaderna innefattar tillverkning, tillbehör såsom elkablar och växelbrytare samt installation. Underhållskostnaden för en stor solcellspanel är relativt liten och uppgår inte till mer än 1 % av den totala investeringen per år. Livslängden för en solcellspanel ligger idag mellan 20-30 år [73].

Tabell 12: Kostnader för solcellspaneler integrerade i brokonstruktion

	Norra	**Södra**
Soltimmar/år	8760	8760
Årlig solstrålning [kWh/m^2]	700	1100
Kostnad [NOK/kWh]	2.93-4.21	1.86-2.68

Kostnaderna från tabell 12 kan jämföras med kostnaden för en solcell placerad på mark som idag är 1.3-1.7 NOK/kWh beroende på vart i Norge man befinner sig [123]. Markkostnaden för att placera solcellspanelerna är i detta fall inte medräknad och måste tas hänsyn till.

Kostnaden för en solcellspanel kommer även vara starkt beroende av vald placering på bron. Behovet av installationskablar och system samt annan utrustning kommer att skilja sig åt. Ytan och dess väderstrecksriktning spelar också roll. Tabell 13 visar en estimerad kostnad med hänsyn till solcellspanelens placering som även finns i Statens Vegvesens rapport, Subproject Energy, [124]. Baserat på dessa siffror och den uppskattade energiproduktionen från tabell 11 har en kostnad räknats fram i tabell 14.

Tabell 13: Kostnader beroende på placering

Placering	**NOK/kWh/år**
Tak	20
Sida	11
Vajrar	20
Pelare	30

Tabell 14: Kostnad beroende av energiproduktion och placering, MNOK

Fjordarna	**Tak**		**Sidor**		**Vajrar**	**Pelare**
	Pontonbro	Hängbro	Pontonbro	Hängbro		
Halsafjorden	61.6	68.8	11.33	11.33	299.4	40.2
Moldefjorden	270.8	302	52.25	52.25	1376.6	40.2
Storfjorden	114.6	127.8	22	22	581.2	40.2
Voldafjorden	67.8	75.8	12.87	12.87	337.8	40.2
Nordfjorden	57.4	64	10.89	10.89	288.2	40.2
Sognefjorden	128.4	143.2	24.53	24.53	645.2	40.5
Bjørnafjorden 1	54	60.2	10.23	10.23	270.2	40.2
Bjørnafjorden 2	193.2	215.4	37.18	37.18	980	40.2

4.2.3 För- och nackdelar med integrerade solpaneler i brokonstruktion

Solcellspaneler kan framställas på många olika sätt och olika former beroende på placering. Deras utseende och val av solpanel styrs av tillämpningen vilket är både en fördel men även en nackdel med denna teknik. Att denna energiproducerande källa kan framställas i olika former gör att man fördelaktigt kan placera de i princip vart man vill och där solstrålningen är som bäst. Installeringen är relativt enkel och vid en noggrann planering finns redan i designfasen möjligheten att montera panelerna direkt i konstruktionen utan några större modifieringar. Genom att man utnyttjar arealer på bron och gör de användbara har man kvar mark, som annars skulle användas till en solcellspark, att använda till annat.

Olika modeller kostar givetvis olika mycket och de energieffektivaste är dyrare än de paneler som producerar en mindre mängd el. Dimensioneringen av solcellspanelen styrs mycket av placeringen och solstrålningen i området. En konstant dimensionering av panelerna medför att vid en lägre efterfrågan av elenergi vid ett specifikt tillfälle kommer att påverka lönsamheten negativt.

Ramen för solpaneler är oftast tillverkad av aluminium vilket i havsförhållanden kan leda till korrossionsproblem. Vid tillverkningen bör man tänka på miljön de kommer att befinna sig i och vid val av placering bör korrossionsproblem tas i beaktande.

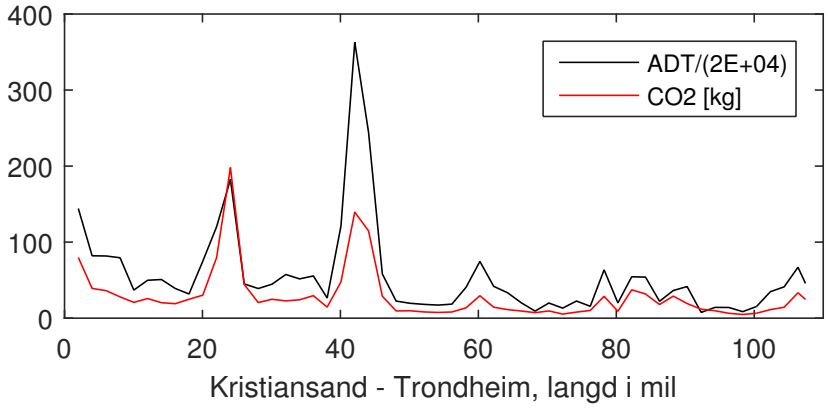
Med dagens teknik ligger verkningsgraden hos kiselbaserade solcellspaneler någonstans mellan 12-15 % [125]. Tekniken är fortfarande under utveckling och kan behöva effektiviseras ytterligare innan det är lönsamt att placera solpaneler i länder som Norge med en lägre solintensitet och färre soltimmar om året. Man behöver väga kostnaden i förhållande till energiproduktionen och jämföra med andra tekniker om det är lönsamt eller inte.

5 Resultat

Resultaten som presenteras nedan är resultat för olika scenarier från den beräkningsmodell som är framtagen i denna studie. I avsnitt 5.1 och 5.2 presenteras energiförbrukningen och CO_2-utsläppen för de olika scenarierna och i avsnitt 5.3 presenteras resultatet från kostnadsanalysen av de framtida teknikerna.

5.1 Energiåtgång och koldioxidemissioner för nutidsscenario

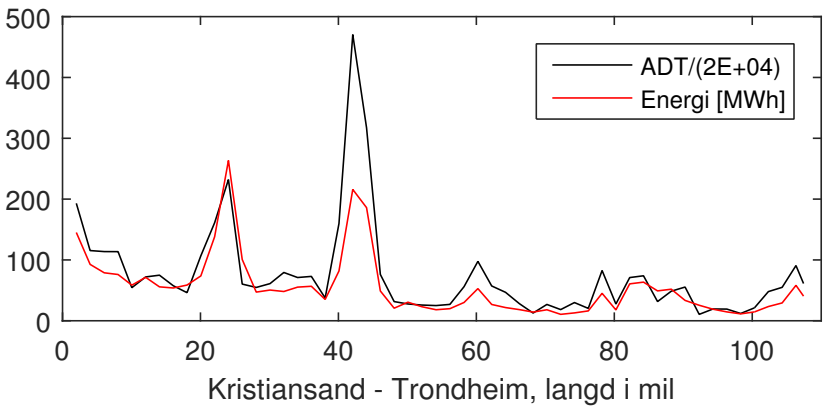
De beräknade dagliga koldioxidutsläppen för alla personbilar längs E39:an presenteras i figur 12. I figuren finns även ÅDT:n utritad, dock är den skalad för att vara i samma storleksordning som koldioxidutsläppen, för att lättare kunna jämföra dem med varandra. Koldioxidutsläppen och ÅDT:n presenteras per två mil. I appendix C finns resultaten per delsträcka presenterade. Enligt modellen är den genomsnittliga bränsleförbrukningen per mil för personbilar, 0.7484 l/mil för bensin och 0.5174 l/mil för diesel.



Figur 12: Beräknade koldioxidutsläpp [kg] per 2 mil för personbilar, samt ÅDT skalad för att förenkla jämförelse.

Vid ungefär 40 mil syns att toppen för koldioxidutsläppen är något lägre än vad man hade kunnat vänta sig med tanke på den höga toppen i ÅDT. Detta kan bero på att den sträckan är platt och därför inte kräver så mycket energi och därmed mindre bränsle för varje fordon. Motsvarande grafer för lätta lastbilar, tunga lastbilar och bussar har samma form som den i figur 12 men med en förskjutning i y-led. Därför presenteras endast de beräknade koldioxidutsläppen per 2 mil för personbilarna i grafen, för siffervärden se tabell 15.

I figur 13 presenteras den beräknade dagliga energiåtgången för alla fordonstyper per 2 mil längs hela E39:an i båda riktningarna. I figuren finns även ÅDT:n plottad som även här är skalad på samma sätt som i figuren ovan, för att det ska vara lättare att jämföra topparna med varandra.



Figur 13: Beräknad total daglig energiåtgång [MWh] längs vägen, samt ÅDT skalad för att förenkla jämförelse.

Man ser tydligt i figur 13 ovan att topparna i ÅDT och energiförbrukningen längs vägen stämmer överens med varandra. Återigen syns en något lägre topp än väntat vid ungefär 40 mil. Det kan dels bero på att den delen, som tidigare nämnt, är lite plattare men det kan även bero på att det längs den sträckan kör en lägre andel tunga fordon. Eftersom de tunga fordonen kräver mer energi per fordon skulle det kunna förklara varför energiförbrukningen är något låg i förhållande till ÅDT:n. Dock ser man i figur 12 att det även för enbart personbilarna är en lägre topp än väntat på samma delsträcka, det betyder att frånvaron av lutningen på sträckan troligtvis har en större inverkan på resultatet än andelen tunga fordon i just det här fallet.

I tabell 15 visas en sammanställning över resultaten från beräkningsmodellen. Dessa siffror har verifierats med hjälp av den statistiska analysen.

Tabell 15: Sammanställning av resultaten för nutidsscenariot

Fordon	**Energiåtgång [TWh/år]**	**Genomsnittlig bränsleförbrukning [l/mil]**	**Total bränsle-förbrukning [Ml/år]**	**CO_2-utsläpp [Mton/år]**
Personbil - *bensin*	0.705	0.7337	78	0.182
Personbil - *diesel*	0.423	0.5071	44	0.107
Lätt lastbil	0.412	1.2442	43	0.104
Tung lastbil	1.285	4.8818	134	0.323
Buss	0.124	3.4463	13	0.031
Totalt	**2.950**	——	**312**	**0.748**

I tabellen ovan syns tydligt att det enligt våra beräkningar är de tunga lastbilarna tillsammans med personbilarna som står för de största utsläppen i dagsläget. Detta trots att de tunga fordonen i genomsnitt endast utgör 13 % av den totala ÅDT:n längs E39:an. Därför skulle en åtgärd för att minska dessa utsläpp göra störst skillnad både totalt och per fordon. Enligt modellen står bussar för den minsta andelen av koldioxidutsläppen medan dieseldrivna personbilar och lätta lastbilar har ungefär lika stora totala utsläpp.

Nedan i tabell 16 ses hur mycket koldioxid de sju färjorna som finns längs E39:an enligt våra beräkningar släpper ut under ett år. För mer detaljerad beräkningsgång se appendix D.

Tabell 16: Beräknad mängd koldioxid som de olika färjorna släpper ut

Färjesträckning	CO_2-utsläpp [Mton/år]
Mortavika - Arsvågen	0.0138
Halhjem - Sandvikvåg	0.0368
Lavik - Oppedal	0.0064
Lote - Anda	0.0029
Festøya - Solavågen	0.0055
Molde - Vestnes	0.0121
Halsa - Kanestraum	0.0068
Totalt	**0.0843**

Detta innebär att de totala CO_2-utsläppen för alla fordon inklusive färjor längs E39:an i dagsläget enligt våra beräkningar är cirka 0.832 Mton per år.

5.2 Energiåtgång och koldioxidemissioner år 2020 och 2060

I samtliga framtidsscenarier har fordonsflottan antagits ha samma fördelning av personbilar, lätta lastbilar, tunga lastbilar och bussar som presenteras i kapitel 2.3. Dessutom antas alla parametrar för de olika bränslena vara samma som i nutidsscenariot. För de fossila bränslena antas dagens nivå av inblandat biobränsle i både bensin och diesel för både år 2020 och 2060.

5.2.1 År 2020

År 2020 är ÅDT:n och verkningsgraderna för fordonen de enda parametrarna som ändrats jämfört med nutidscenariot. För ÅDT:n används en uppskattning som Rambøll [68] har gjort genom trafikmodellering och för verkingsgraderna antogs en förbättring med 0.7 % per år [69]. Fordonsflottan har antagits se likadan ut år 2020 som den gör i dagsläget. Det innebär att även indelningen för bränslekategorierna, diesel och bensin, antas vara samma som tidigare. En sammanställning av hur energiåtgången och CO_2-utsläppen enligt modellen kommer att se ut år 2020 presenteras i tabell 17.

Tabell 17: Sammanställning av resultaten för år 2020 med fossila bränslen

Fordon	Energiåtgång [TWh/år]	Bränsleförbrukning [l/mil]	Total bränsleförbrukning [Ml/år]	CO_2-utsläpp [Mton/år]
Personbil - *bensin*	0.436	0.7085	120	0.280
Personbil - *diesel*	0.654	0.4897	68	0.165
Lätt lastbil	0.639	1.2016	66	0.161
Tung lastbil	2.004	4.5778	158	0.504
Buss	0.196	3.2583	20	0.049
Totalt	**3.927**	——	**432**	**1.159**

Koldioxidutsläppen från färjorna antas vara lika stora år 2020 som i nutidsscenariot eftersom det inte finns data på hur den ökade ÅDT:n påverkar antalet färjeturer. Det har därför antagits att dagens färjekapacitet räcker för att hantera ökningen av ÅDT:n. Det skulle enligt våra beräkningar innebära att de

totala CO_2-utsläppen för år 2020 blir cirka 1.244 Mton, vilket är en ökning med 0.412 Mton, eller 50 %, jämfört med dagsläget. Om den ökade ÅDT:n kräver fler färjeturer skulle det innebära att CO_2-utsläppen ökar med ytterligare några procent.

5.2.2 År 2060

Till år 2060 beräknas alla färjor och mindre rondeller längs E39:an vara bortbyggda samt att hastighetsbegränsningen höjts på en del delsträckor. Vidare har eventuella tullavgifter, som skulle kunna påverka ÅDT:n, inte räknats med då vägen enligt beräkningar ska vara avbetald tills dess.

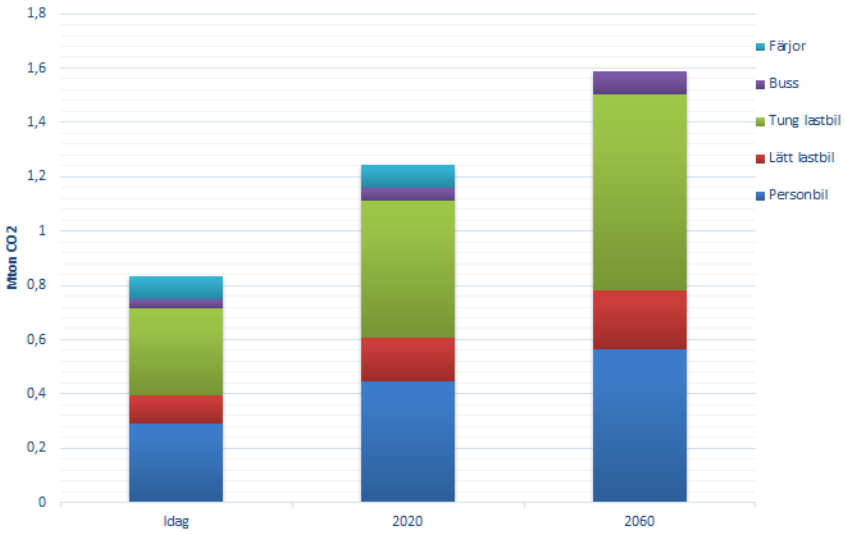
Ett framtida scenario med fossila bränslen har beräknats och resultatet kan ses i tabell 18. Det kan vara värt att notera att trots att verkningsgraderna nu höjts med nästan 37 % jämfört med nutidsscenariot så fortsätter koldioxidemissionerna för varje kategori att öka som följd av den högre ÅDT:n.

Tabell 18: Sammanställning av resultaten för år 2060 med fossila bränslen

Fordon	**Energiåtgång [TWh/år]**	**Genomsnittlig bränsleförbrukning [l/mil]**	**Total bränsleförbrukning [Ml/år]**	**CO_2-utsläpp [Mton/år]**
Personbil - *bensin*	1.379	0.53	152	0.355
Personbil - *diesel*	0.828	0.37	86	0.208
Lätt lastbil	0.861	0.94	90	0.217
Tung lastbil	2.473	3.82	300	0.725
Buss	0.245	3.16	34	0.082
Totalt	**5.851**	——	**662**	**1.587**

Om alla fordon skulle fortsätta köra på fossila bränslen skulle det, enligt beräkningarna, leda till en ökning med 91 % av koldioxidutsläppen längs E39:an jämfört med dagens utsläpp. Energiåtgången skulle enligt dessa siffror fördubblas gentemot nutidscenariot om man endast tar hänsyn till fordonstrafiken. Fortfarande står de tunga lastbilarna för den största delen, 46 %, av utsläppen. Det kan vara värt att notera att de, enligt beräkningarna, år 2060 har ungefär lika stora utsläpp som hela fordonsflottan i nutidsscenariot.

I figur 14 ses hur de olika fordonskategorierna kan komma att öka sina utsläpp av koldioxid enligt framtidsscenarierna som behandlats i rapporten, förutsatt att de endast använder sig av bensin och diesel som dessa ser ut idag.



Figur 14: Beräknad utveckling av koldioxidutsläpp [Mton] för idag, år 2020 och 2060 om fossila bränslen används

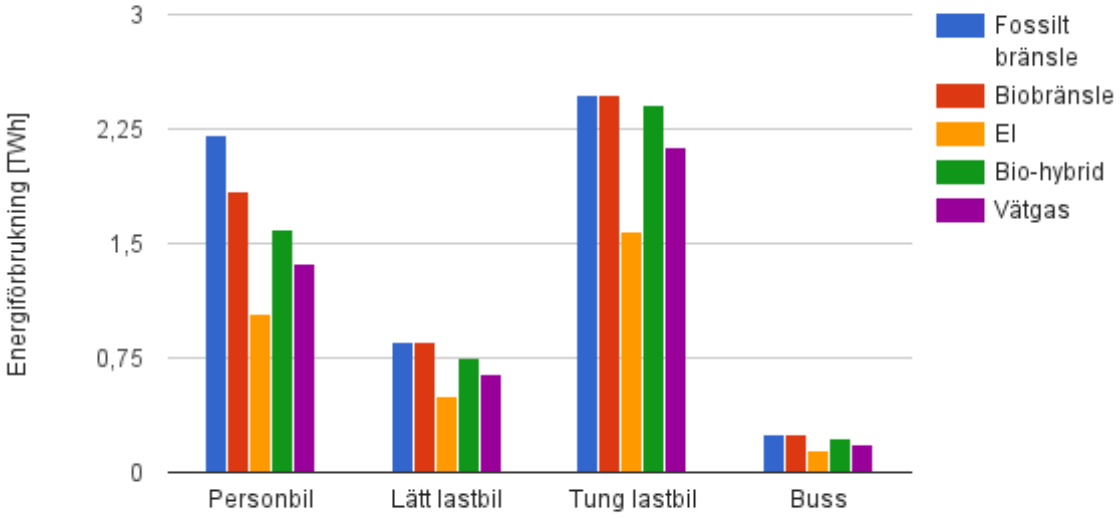
Som tidigare nämnts i kapitel 3.7 har vi valt att räkna med att koldioxidutsläppen för samtliga framtidsscenarion utan fossila bränslen kommer att vara noll. Energiförbrukning per år för de olika fordonsteknikerna har därför istället jämförts. För att underlätta beräkningarna har det antagits att hela fordonsflottan bytts ut till att bestå av ett och samma alternativ, t.ex. el eller biobränsle, i de olika framtidsscenarierna. I tabell 19 visas en sammanställning ev energiåtgången som krävs i olika scenarion. De framtida scenarierna som behandlats är:

- Allt bränsle byts ut till biobränslen med förbränningsmotorer
- Fullständig övergång till plug-in-hybrider med el och biobränsle
- Total elektrifiering av fordonsflottan
- Helt övergå till vätgasdrivna bränslecellsfordon

Tabell 19: Sammanställning av den beräknade energiförbrukningen i TWh/år för år 2060 med framtida tekniker

Fordon	**Biobränsle**	**Hybrid (m. biobränsle)**	**El**	**Vätgas**
Personbilar	1.839	1.589	1.037	1.363
Lätta lastbilar	0.861	0.750	0.494	0.641
Tunga lastbilar	2.473	2.409	1.577	2.133
Bussar	0.245	0.218	0.144	0.184
Totalt	**5.420**	**4.965**	**3.253**	**4.321**

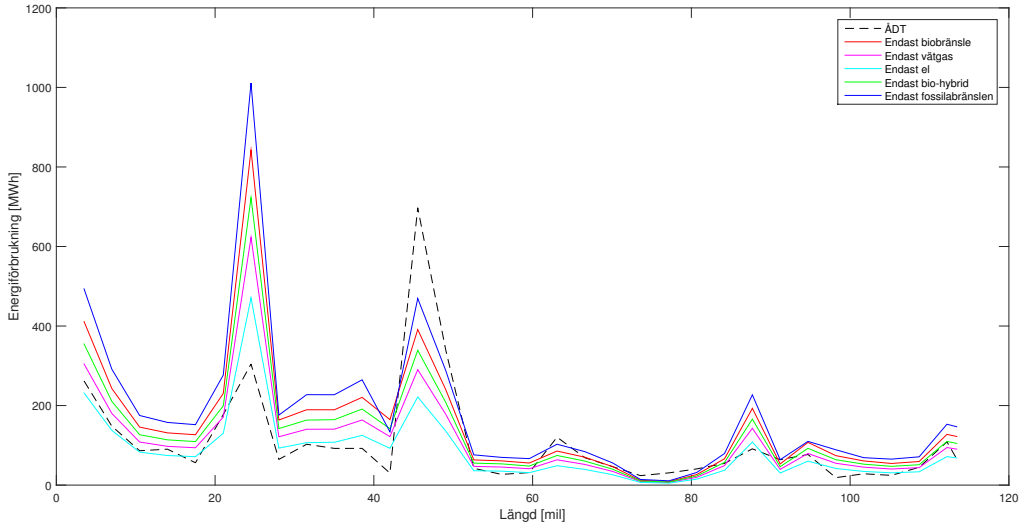
I figur 15 illusteras skillnaden i energiåtgång mellan de olika framtidsscenarierna samt hur det enligt våra beräkningar kommer att se ut vid fortsatt användning av endast fossila bränslen med en låg inblandning av biobränsle år 2060.



Figur 15: Beräknad energiförbrukning för de olika framtidsscenarierna längs E39 år 2060

Samma verkningsgrader har använts för alla fordonskategorier för biobränslemotorerna som dess respektive dieselmotor vilket gör att staplarna för fossila bränslen och biobränsle är samma för alla fordonskategorier utom personbilarna. Där blir det en skillnad då det för de fossila bränslena räknats med en mix på 45 % dieselbilar och 55 % bensinbilar vilket ger en högre bränsleförbrukning än för biobränslen då det antagits att 100 % kör på biodiesel eftersom dieselmotorn har högre verkningsgrad än bensinmotorn.

I figur 16 presenteras den beräknade energiförbrukningen för personbilar per 3.5 mil för de olika framtidsscenarierna samt hur det kan komma att se ut om de fortsätts drivas med fossila bränslena år 2060. Linjerna i grafen följer ÅDT:n och storleksordningarna på de olika fordonsteknikerna och bränslena följer varandra som väntat utifrån tabell 19. Formen på grafen skiljer sig åt gentemot den för år 2020 eftersom längen på delsträckorna skiljer sig i de båda fallen, för år 2020 delades vägen istället in i delsträckor á 2 mil.



Figur 16: Beräknad energiförbrukning för personbilar år 2060

5.3 Kostnadsanalys av framtida tekniker

En kostnad per ton reducerat CO_2 har beräknats fram för de olika framtida scenarierna för att kunna jämföra dem. Kostnaden baseras på investeringskostnaden för att upprätta en infrastruktur gällande tankningsstationer med avseende på antal fordon. Nollutsläpp har antagits för elbilstekniken, elvägar, biobränsle och bränslecellsbilar. Den mängd CO_2-utsläpp som antas möjlig att reducera är den mängd koldioxid som beräknats släppas ut med en fossildriven fordonsflotta fram till år 2060.

5.3.1 Elbilar med batteri

I ekvation 16 beräknas kostnaden för att införa elbilar i området E39:an. Beräkningen bygger på statens utgifter för infrastruktur, prissubventionering med mera per elbil [95].

$$\text{Kostnad per bil} \cdot \text{Antal bilar i regionen} = \text{Totalkostnad} \quad [\text{MDNOK}] \tag{16}$$

där kostnaden per bil är 97 766 NOK, antalet bilar i är 869 525 st och den totala kostnaden blir 85 MDNOK.

Kostnaden på 85 MDNOK tar hänsyn till både subventioner och upprättning av laddinfrastruktur. Kostnaden att upprätta en infrastruktur är 5652 NOK per elbil. För att få kostnaden för infrastrukturen kring E39:an antas alla personbilar registrerade i region E39 bytas ut till elbilar. Denna kostnad har räknats om till en annuitetkostnad med en beräknad livslängd på 45 år och en annuitetsränta på 5 %. Annuitetskostnaden divideras med CO_2-reduceringen som baseras på de modellerade CO_2-utsläppen för diesel- och bensinbilar idag och år 2060. I tabell 20 visas kostnaden per ton reducerat CO_2.

Tabell 20: Beräknad kostnad per ton reducerat CO_2 för elbilar, infrastruktur för region E39

Statens investeringskostnad 2015 [MNOK]	**Annuitetskostnad [MNOK/år]**	**Kostnad per ton reducerat CO_2 [NOK/ton]**
4915	277	649

5.3.2 Bränslecellsbilar

I tabell 21 beräknas kostnaden per ton reducerat CO_2 vid införande av bränslecellsbilar. Den totala kostnaden för att upprätta en tankningsinfrastruktur som består av 1 100 tankstationer och kan tillgodose 1.76 miljoner fordon är 1.5 MDEUR vilket motsvarar 850 EUR per bränslecellsbil eller 7157 NOK per bränslecellsbil [99]. Antagandet görs att alla registrerade bilar i region E39:e övergår till bränslecellsbilar. Antalet registrerade bilar i regionen hittas i tabell 7. Kostnaden för infrastrukturen vid området E39:an vid en övergång till bränslecellsbilar kan då uppskattas enligt ekvation 16 med kostnaden per bil som är cirka 7157 NOK, antalet bilar är 869 525 st och kostnaden blir 6.2 MDNOK.

Annuitetskostnaden beräknas utifrån den uppskattade totala kostanden på samma sätt som för elbilar och mängden CO_2 som släpps ut från referensfallet med bensin- och dieselfordonen från tabell 18.

Tabell 21: Beräknad kostnad för införande av tankningsinfrastruktur fram till 2060

Investeringskostnad för område kring E39:an 2005 [MNOK]	**Annuitetskostand [MNOK/år]**	**Kostnad per ton reducerat CO_2 [NOK/ton]**
6223	350	822

5.3.3 Elvägar

I tabell 22 presenteras de beräknade kostnaderna för komponenterna till de olika elvägsteknikerna. Det har även inkluderats en kostnad på 5.57 MNOK för utbyggnad av den elektriska infrastrukturen. Kostnaderna är beräknade för elektrifiering i båda riktningarna och är omräknade från svenska till norska kronor med en faktor 0.87 [61] och är baserad på ett medelvärde över de senaste 10 åren. Annuitetskostnaden är beräknad på en livslängd på 40 år och en annuitetsränta på 5 %. Det ska observeras att inga installationskostnader är medräknade för de system som kräver en skena i vägen, dock för kontaktledningar. Ingen hänsyn har tagits till ytterligare kostnader som läggs på fordonet då de förväntas tjänas in på grund av lägre driftskostnader, inga underhållskostnader har heller bektats.

För att beräkna kostnaden per ton reducerat CO_2 har ett medelvärde per år räknats fram från de modellerade CO_2-utsläppen mellan år 2020 och år 2060. Annuitetskostnaden för de olika teknikerna har sedan dividerats med den besparade mängden CO_2 per år. Kostnaderna i tabell 22 kan jämföras med kostnaderna för CO_2-infångning som beräknas till 300-600 NOK/ton i dagsläget men beräknas kunna gå ner till 150-300 NOK/ton till år 2030 [62].

Procentsatserna beskriver som nämnt i kapitel 3.4.2 de två olika alternativen för induktion. Antingen installera kraftfullare segment på cirka 35 % av vägen eller så kan mindre kraftfulla segment installeras längs hela vägen.

Tabell 22: Beräknad kostnad per ton reducerat CO_2 för elvägar

	Kostnad per km [MNOK]	**Total investering [MNOK]**	**Annuitetskostnad [MNOK/år]**	**Kostnad per ton reducerat CO_2 [NOK/ton]**
Kontaktledningar	14.3	15 300	890	1309
Elskena i vägbanan				
- Alstom	13.5	14 500	850	644
- Elonroad	14.3	15 300	890	675
- Elways	9.9	10 700	710	538
Induktion 35 %	36.9	39 600	2300	1744
Induktion 100 %	54.3	58 300	3400	2578

5.3.4 Fordonståg

Som nämnts i kapitel 3.5 skulle införandet av fordonståg medföra en kostnad på 2 000 EUR per fordon för teknik, 2 500 EUR per chaufför för utbildning och 300 EUR i årsavgift, vilket i norska kronor motsvarar cirka 16 800 NOK, 21 050 NOK respektive 2 500 NOK. För att beräkna hur långt fordonen måste köras för att investeringen ska tjänas in har dagens bränsleförbrukning samt dagens bränslepriser använts [63]. Det har gjorts separata beräkningar för bensin- och dieselbilar samt lastbilar. En viktad bränslereducering har beräknats ur figur 9 med 11.3 % för alla personbilar och 10 % för tunga lastbilar. Det har räknats med att lastbilschaufförerna utbildas men inte personbilsförarna.

Tabell 23: Beräknad körsträcka för att tjäna in investeringen i fordonståg

	Investering [NOK]	**Bränslepris [NOK/l]**	**Besparing per mil [NOK]**	**Break-even miltal [mil]**
Personbil - *Bensin*	16 800	15.82	1.31	12 800
Personbil - *Diesel*	16 800	14.30	0.82	20 500
Personbil - *E85*	16 800	10.42	0.55	30 500
Tung lastbil	37 850	14.30	6.98	5 400

Kostnaderna för en bensinbil kräver som man kan se i tabellen en körsträcka på 12 800 mil för att man ska nå breakeven. Det motsvarar ca 35 kilometer om dagen baserat på en livslängd om 10 år. Som tidigare nämnts så är den genomsnittliga körsträckan per dag cirka 50 kilometer. Det blir alltså lönsamt för personbilar som kör på bensin men inte för diesel och E85 i dagsläget. Den största vinsten finns dock att hämta inom den tunga fordonssektorn som kör betydligt längre sträckor än personbilar.

5.3.5 Sammanställning av kostnadsanalys

I tabell 24 presenteras en sammanställning av resultaten för kostnaden per ton reducerat CO_2 för att förenkla jämförelse av de olika fordonsteknikerna.

Tabell 24: Sammanställning av NOK/ton CO_2 för de olika teknikerna

Teknik	**[NOK/ton CO_2]**
Elbilar	649
Bränsleceller	822
Elvägar	
- Kontaktledningar	1 309
- Elskena	538-675
- Induktion	1 744-2 578

I tabellen ovan kan ses att induktion utmärker sig som den helt klart dyraste tekniken. Det beror på att det är en av de mest obeprövade teknikerna med ovissa kostnader för komponenterna som kan minska i framtiden. Det kan också ses att elbilar och elskena i vägen är de två billigaste alternativen och kostar ungefär lika mycket per ton reducerat CO_2. Notera att i tabellen har inte hänsyn tagits till alla kostnader tillhörande varje teknik.

5.4 Energiåtgång och energiproduktion

Den årliga energiproduktionen för en landbaserad 1 MW HAWT med en medelvindhastighet på 7 m/s uppskattas vara 2.4 GWh [121]. I tabell 19 kan ses att den årliga energiförbrukningen längs vägen, om man bara kör med elbilar, kommer att vara 3.25 TWh år 2060. För att producera denna energi med enbart vindkraft skulle detta enligt våra beräkningar innebära en installation av 1 355 MW, en kostnad på cirka 17 603 MNOK. Om man däremot antar att det är möjligt att placera vindturbiner i samtliga fjordar där det ännu är aktuellt med broanläggning, och summerar deras årliga energiproduktion skulle detta enligt våra beräkningar endast täcka 9.6 % av den årliga energiåtgången för E39:an år 2060 vid en total elektrifiering.

Med utgång att en solcellspanel genererar 150 kWh/m^2 och vikt på 15 kg/m^2 [73], som nämnts i 4.2.1 innebär det en yta på 21.68 km^2 och totalvikt på 325 250 ton vid en energiåtgång på 3.25 TWh år 2060. Kostnaden för att integrera solcellspaneler i brokonstruktion för att täcka denna energiåtgång kommer enligt våra beräkningar att ligga mellan 44 450-63 966 MNOK. Det är tio gånger dyrare än om man istället skulle placera dem på marken (se tabell25 [123]. Den potential från solenergi i fjordarna beräknas endast täcka 11.8 % av 3.25 TW.

Eftersom vätgas år 2060 i den här studien beräknas produceras med el är det av intresse att titta på vilka kostnader det skulle medföra om bränslecellsfordon implementeras. Enligt våra beräkningar uppskattas energiåtgången med vätgas som drivmedel vara 4.32 TWh (se tabell 19). Kostnaderna för att producera denna energi med samma solcellspaneler som beskrivs i stycket ovan, monterade på mark, redogörs i tabell 25. Beroende på det geografiska området och att solstrålingen skiljer sig kommer kostnaderna variera.

Tabell 25: Kostnaden för att täcka energiåtgången längs E39:an med solcellspaneler på mark [123]

Stad	**NOK/kWh**	**NOK/m^2**	**MNOK, el**	**MNOK, vätgas**
Trondheim	1	206	4456	5919
Bergen	2	252	5464	7258
Kristiansand	1	188	4066	5400

Kostnaderna för solceller på monterade på broar som kan ses i tabell 12 är nästan dubbelt så dyrt jämfört med på mark. För vindkraftverk är det tre gånger billigare att installera vindturbiner på land jämfört med att installera de i en brokonstruktion, detta utan någon hänsyn till några markkostnader.

6 Diskussion

Om fordonen på E39:an fortsätter att drivas med fossila bränslen kommer koldioxidutsläppen enligt våra beräkningar att öka med cirka 50 % till år 2020 och med 91 % till år 2060 relativt idag. Det kommer troligtvis bli svårt för Norge att nå sitt mål att minska koldioxidutsläppen med inom transportsektorn med 2.5-4 Mton CO_2-ekvivalenter till år 2020 [126] om utsläppen längs E39:an ökar med med 0.4 Mton CO_2 tills dess. Detta är en indikation på att de behöver minska sitt användande av fossila bränslen inom transportsektorn.

I beräkningar för framtiden har vi antagit att hela fordonsflottan bytts ut till ett av de framtagna alternativen för fordonstekniker och bränslen för att kunna göra en jämförelse mellan dessa utifrån kostnad och potentialen att producera bränslet i regionen. Egentligen tror vi att det kommer bli en blandning av de olika alternativen eftersom olika alternativ lämpar sig bäst i olika situationer och för olika fordon. Dessutom skulle konkurrens med andra sektorer begränsa användandet av t.ex. biobränsle i transportsektorn. Det innebär såklart att ett verkligt framtidsscenario istället skulle resultera i en blandning av siffrorna presenterade i tabell 19.

Det finns flera tekniker och bränslen som skulle minska koldioxidutsläppen inom transportsektorn med 100 % och kostnaderna för dessa varierar. En övergång till biobränslen kommer inte kräva några större investeringar förutom i nya produktionsanläggningar i och med att det inte kommer krävas några större förändringar i infrasturkturen eller i fordonen. Om elvägar skulle byggas för hela sträckan skulle det kosta mellan 9.9-54.3 MNOK/km beroende på vilken teknik som väljs. Utöver dessa kostnader tillkommer även kostnaden för installation. De olika teknikerna är endast tillämpbara för vissa fordonskategorier vilket också behöver tas i beaktning. För bränslecellsbilar blir den uppskattade kostnaden per bil 7 157 NOK för att upprätta en infrastruktur. Denna kostnad innefattar endast själva infrastrukturen och motsvarande siffra för elbilar är 5 652 NOK. Det innebär att de ekonomiska aspekterna hos elbilar för tillfället är fördelaktiga i förhållande till bränslecellstekniken, i synnerhet för konsumenten där priset för elbilen i dagsläget ligger på en lägre nivå. Norges mål att uppnå 50 000 elbilar inom fordonsflottan har nåtts fortare än väntat. Nu är det sagt att delar av subventionerna ska dras in vilket kombinerat med att antalet elbilar fortsätter att öka, minskar den årliga statliga kostnaden per bil framöver. Beroende på vilken av elteknikerna som väljs läggs kostnaden på olika parter. För en elbil läggs en del av kostnaden på fordonstillverkaren och därmed användaren och en del på staten. Det kan innebära svårigheter vid implementering då inköpspriset för konsumenten ökar. Det går dock att lösa med subventioner, vilket skulle öka kostnaden för staten och därmed skattebetalarna. Även om kostnaden för investeringen i vägen skulle tas av staten kan ytterligare stimulanser krävas för att få folk att använda tekniken fullt ut.

Efter en övergång till el fram till år 2060 skulle energiförbrukningen i regionen öka med drygt 3 TWh. Jämfört med den totala elförbrukningen i regionen i dagsläget, som är 57 TWh [57], är det en väldigt liten del och motsvarar en ökning med endast 5 %. Det är tänkbart att kunna kompensera för den ökade energiförbrukningen i regionen med förnybara källor.

För att sätta in kostnaderna för de framtida fordonsteknikerna och bränslena i ett verkligt perspektiv har vi valt att jämföra dessa med den redan befintliga och i viss mån använda tekniken med koldioxidinfångning. På så sätt kan man se var de kan löna sig mest att minska utsläppen. I resultaten syns att kostnaderna för CO_2-infångning är lägre än för de flesta fordonsteknikerna och bränslena, som presenterats i denna rapport, i dagsläget och kostnaden antas bli ännu lägre längre fram. Dock finns en viktig skillnad att beakta, koldioxidinfångningen berör inte transportsektorn i dagens läge utan är endast tillämpbar inom energi- och industrisektorn. Detta är en faktor Norge kommer att behöva ta hänsyn till när de bestämmer var de vill lägga sitt fokus för att minska sina koldioxidutsläpp.

6.1 Framtida tekniker

När det gäller de framtida scenarion som tagits fram finns det många osäkerhetsfaktorer, då det är svårt att förutse teknikutvecklingen i framtiden. Vi har utgått från befintliga rapporter där olika framtida fordonstekniker och bränslen presenteras. Det är därmed möjligt att några av dessa fordonstekniker kommer bli kommersiellt användbara om ett antal år medan andra aldrig når den stora markanden. En sammanställning av de framtagna alternativens för- och nackdelar presenteras i tabell 26.

Tabell 26: Fördelar och nackdelar med framtida fordonstekniker och bränslen

	Fördelar	**Nackdelar**
Plug-in-hybrid (el och biobränsle)	• Får en högre verkningsgrad på förbränningsmotorn • För korta sträckor används endast elmotorn • Batteriet laddas vid inbromsningar • Koldioxidneutral med biobränsle	• Blir tyngre då det krävs två motorer och ett batteri • För tunga fordon blir lastvikten mindre
Elbilar med batteri	• Har en hög verkningsgrad • Väldigt tyst • Koldioxidneutral	• Tar lång tid att ladda • För att klara av att driva tunga fordon blir batteriet väldigt stort och tungt
Kontaktledningar	• Välbeprövad teknik	• Ej tillämpbar för personbilar
Elskena i vägbanan	• Tillämpbar för alla typer av fordon • Uppskattas vara billig att installera	• Fara med likström • Is och snö kan vara ett problem
Induktion	• Påverkas inte av is och snö • Tillämpbar för alla typer av fordon • Ingen synlig teknik	• Okänd påverkad av ökad magnetisk strålning • Dyrt att installera • Mycket tyngd läggs på fordonet
Bränslecell	• God räckvidd hos bränslecellsbilar • Vattenånga som enda avgasemission • Koldioxidneutral	• Dyr teknik • Infrastruktur och vätgastankstationer måste byggas ut • Produktion av vätgas från fossila bränslen • När vätgas kommer i kontakt med syre bildas det knallgas
Biobränsle	• Lösning för alla fordonstyper • Kan lätt användas i dagens förbränningsmotorer och infrastruktur • Koldioxidneutral	• Konkurrens med andra energisektorer • Konkurrens med livsmedel
Fordonståg	• Kräver ingen ombyggnad av befintlig infrastruktur • Stor besparing för liten kostnad • Kan tillämpas på alla drivmedel	• Obeprövad teknik • Utveckling återstår

Utifrån tabell 26 är det tydligt att det inte är självklart vilken av de framtida alternativen som är den bästa. För- och nackdelarna varierar mellan de tunga och lätta fordonen, därför är en kombination av olika tekniker möjlig. Dock skulle det innebära att olika infrastrukturer byggs ut. Vilken teknik eller

vilka tekniker som blir donimernade beror även av hur utvecklingen ser ut i övriga Europa och världen.

För de tunga fordonen är det svårt att endast utnyttja batteri varför en kombination mellan el- och en förbränningsmotor är ett bra alternativ för att även nå avlägsna platser. Att elektrifiera de större vägarna skulle göra att endast ett litet batteri krävs. När det gäller de olika elvägsteknikerna är det svårt att peka på vad som kommer att bli det mest troliga alternativet, fördelarna skiljer sig mellan de olika systemen. Induktion kan dock rimligen uteslutas i dagsläget då kostnaden i förhållande till vinsten är mycket hög eftersom även verkningsgraden minskar. För de konduktiva systemen är kostnaden på fordonen ganska lika medan den största skillnaden är installationskostnaden för tekniken. I samband med nybyggnation är det dock en effekt som spelar mindre roll. För personbilar är vinsterna med att köra på elvägar små då batteritekniken kan hantera majoriteten av de bilresor som görs. Den fördelen som kan ses är att kostnaden som läggs på fordonet minskar, då batteriet som står för en stor del av kostnaden kan vara mindre. Alltså är det de tyngre fordonen som har störst behov av elektrifierade vägar vilket gör att kontaktledningar kan vara ett bra alternativ trots att endast tunga fordon kan dra nytta av dem.

Som sagt är det möjligt att övergå helt till elbilar då batterierna inte får samma tyngd som för de tunga fordonen. En nackdel är att det kan ta lång tid att ladda batteriet. Bränslecellsbilar kan då vara ett alternativ, räckvidden är god och tankningen sker på ett sätt som liknar det för fossila bränslen. Problemet med bränsleceller är framställningen av vätgas som är kostsam samt att mycket utveckling återstår. Det enklaste alternativet i dagsläget skulle vara att köra på biobränsle då det endast kräver små modifikationer för att kunna använda det i samma förbränningsmotorer som för fossila bränslen. I dagsläget ser det ut att vara möjligt att driva hela fordonsflottan på biobränslen år 2060, men som tidigare nämnts i tabellen är en nackdel att det kan uppstå konkurrens om biomassan med andra sektorer. Därför är det troligt att all biobränsle som produceras inte kommer att användas till transportsektorn [127]. Det skulle därför vara lämpligt att prioritera biobränsle till de tunga lastbilar eftersom de, enligt våra beräkningar, står för ungefär hälften av de totala utsläppen. Detta trots att de i genomsnitt endast utgör 13 % av den totala ÅDT:n längs E39:an.

Hybridtekniken kan också vara ett sätt att hantera långa laddtider för batteriet vid längre körsträckor. Hybridfordon klarar de korta sträckorna på endast el, men på de längre sträckorna använder de en förbränningsmotor. För de tunga lastbilarna kommer hybridtekniken resultera i extra tyngd vilket medför mindre lastvikt. Detta innebär att det inte är ett fördelaktigt alternativ för tunga hybridlastbilar ur logistik- och transportsynpunkt då det inte kommer vara kostnadseffektivt med såpass tunga fordon. Man hade dock kunnat använda hybridtekniken tillsammans med en elväg eftersom batteriet då inte behöver vara lika tungt. För bussar är hybridtekniken redan idag tillämpad inom stadstrafiken. Det kommer antagligen vara där man främst använder sig av hybridtekniken eftersom den gör störst nytta vid många start och stopp då man utnyttjar elmotorns fördelar.

Utöver de olika sätten att framdriva fordonen kan energiförbrukningen minskas ytterligare genom att köra i fordonståg. Detta är också något som troligen kommer bli mest tillämpat för de tyngre fordonen då det ger en större vinst för dessa då reduktionen är procentuell och de använder mest energi. Utifrån beräkningarna i denna studie för dagens läge skulle det vara lönsamt för tunga fordon, men vid en elektrifiering som skulle minska bränslekostnaden är det inte säkert att det blir ekonomiskt lönsamt. Dock finns även andra fördelar, som att lastbilschaffuörerna inte behöver stanna för att ta sin vila, vilket också behöver räknas in.

I vårt arbete har de nya teknikerna behandlats på en lokal nivå inom Norge och specifikt för E39:an. För att användningen av de nya teknikerna ska kunna nyttjas till fullo krävs ett beslut på högre nivå. Valet av en ny teknik kommer baseras mycket på åt vilket håll utvecklingen kommer att gå i resten av

världen och i synnerhet i EU. Om Norge till exempel väljer att elektrifiera E39:an kommer det kunna ställa till problem om inte resten av EU också gör det med samma teknik då de flesta tunga transporterna går igenom flera länder eftersom de då inte kan utnyttja just de elvägarna. Detta gäller även för de andra teknikerna och bränslena då de för att kunna bli gångbara bland annat kräver en global infrastruktur. Dessutom behöver de bli billigare för att kunna konkurrera med den traditionella bensin- och dieselmotorn. För att uppnå detta behövs mer forskning och utveckling samt politiska beslut.

6.2 Energi- och bränslepotential i regionen

Ett ökat elbehov och minimerade CO_2-emissioner ställer krav på utvecklingen och utnyttjandet av förnybara energikällor. Det är däremot väldigt svårt att förutse hur teknikutvecklingen och kostnaden för dessa kommer att se ut i framtiden vilket ger utrymme för uppskattning.

Om man ser till den knappa ökningen av elförbrukningen i regionen vid en övergång till total elektrifiering finns det potential i området för att täcka den med vindkraftverk på land. Bortsett från distributionsförluster i elnätet och energiförluster mellan mottagaren och givaren innebär detta en installation av 1355 MW vindkraft. Under 2014 kunde vindkraftverken i Norge leverera upp till 2 TWh [64] och Norges- vassdrags og energidirektorat, NVE, utreder 1 527.5 MW vindkraft just nu i region E39 [121]. Det finns alltså möjlighet att det år 2060 finns tillräckligt med vindkraftverk i regionen samt att tekniken utvecklats ytterligare och turbinerna är effektivare. Dessutom har inte potentialen för havsbaserad vindkraft undersökts i området och borde rimligtvis undersökas i vidare studier. Vindkapaciteten i fjordarna är däremot inte tillräcklig för att producera 3.25 TWh och integrerade vindturbiner är nästan dubbelt så dyrt som landbaserade.

Med utgång från dagens teknik och de få fördelarna som finns med att integrera vindturbiner i brokonstruktioner i förhållande till att placera dem på land är det troligt att det inte är lönsamt att integrera dem i broarna. Däremot finns det all möjlighet till en utvecklad och effektiviserad teknik för vindkraft i framtiden samt en kostnadsreducering som följd av ökad produktion. I så fall förutsätts det att man redan i planeringsskedet har för avsikt att integrera turbinerna för att i projekteringsskedet kunna räkna på det. Att i efterhand bygga in och installera vindturbiner kan ingenjörsmässigt vara en utmaning och kostnadsmässigt bli dyrt. Detta eftersom fördelarna med integrerade vindturbiner är att utnyttja befintliga delar av konstruktionen, till exempel pelarna.

Att med dagens teknik och priser satsa på solenergi för att försörja en elektrifierad väg kommer vara betydligt mer kostsamt jämfört med vindkraftverk och kräva mycket area. I den södra delen av Norge, där solenergi har billigast produktionskostnad, är solenergi på land tre gånger så dyrt i jämförelse med produktionskostnaden för vindkraftverk. I beräkningarna har vi bortsett från att jämföra energiproduktion/m^2 för vindkraftverk och solcellspaneler vilket kan vara intressant med hänsyn till markkostnaden som tillkommer för en vindkrafts- eller solcellspark.

För potentialen av biobränsle tror forskare att Norge år 2020 kommer att ha potentialen till cirka 6 TWh bioenergi med den biomassan som finns idag. De tror även att de år 2060 kommer att ha ytterligare en potential på 5.9 TWh bioenergi med alger som biomassa. Man behöver dock ta i beaktning att algforskningen idag ligger på ett väldigt tidigt stadium och att den potentialen forskarna förutspår till år 2060 är väldigt osäker. Det finns en möjlighet att det finns en större potential men också att man kanske inte kommer att kunna utnyttja speciellt stor del av den teoretiska potentialen som finns. Man kan använda bioenergin till både bränsle-, el- och värmeproduktion. Detta är en diskussion i Norge för om man väljer att använda bioenergin till att producera värme minskar man värmeproduktionen med

fossila bränslen jämfört med att minska användingen i transportsektorn. Frågan är då var man gör störst koldioxidreduktion till lägst kostnad, när man använder biomassan för att producera värme eller för att producera bränsle. Dessutom måste man ta i beaktning vilka andra alternativ som finns för att minska CO_2-utsläppen. Det är till exempel inte möjligt att minska utsläppen genom koldioxidinfångning i transportsektorn vilket det är inom den stationära sektorn och industrin.

6.3 Koldioxidemissioner i framtiden

Det kan vid en första anblick, av olika anledningar, verka konstigt att påstå att hela E39:an kan bli koldioxidfri vid en övergång till el, biobränsle eller vätgas. Speciellt för biobränsle då vi vet att det vid förbränningstillfället av biobränsle släpps ut CO_2 i atmosfären. Som det ser ut idag är det vedertaget att man, i liknande analyser som i denna rapport, använder sig av nollutsläpp för biobränslen eftersom den koldioxiden ingår i jordens naturliga kolkretslopp. Man utgår från att växterna vid odlingen har fångat in lika stor mängd CO_2 som släpps ut vid förbränningstillfället. Därför känns det motiverat att anta att biobränslerna är koldiodixneutrala trots de tillfälliga utsläppen.

Vid beräkning av utsläpp från elbilar är ett av de främsta argumenten mot att räkna med nollutsläpp att elproduktionen i världen och Norge idag inte är 100 % klimatneutral. Dessutom kommer en övergång till en helt elektrifierad fordonsflotta kräva att elproduktionen expanderar men tack vare bestämmelserna inom EU ETS kommer en ökad elproduktion inte leda till ökade utsläpp. Eftersom utsläppen inom energi- och industrisektrorerna är reglerade kommer de att ligga på samma nivå oavsett om elfordonen tar över marknaden eller inte. Det i sig leder till en annan fördel och det är att även transportsektorn, i alla fall till en viss del, skulle kunna hamna under utsläppsrättstaket vilket den inte gör idag. En annan aspekt är att det vid själva körtillfället inte blir några utsläpp från ett elfordon.

Kopplingen mellan väte och CO_2-emissioner i framtiden kommer dels avgöras av hur fort vätedrivna produkter kommer in på den breda marknaden och dels på vilket sätt vätet kommer produceras, se avsnitt 3.3.2. Att anta att utsläppen för vätgasdrivna bränslecellsfordon är noll är kanske lite mer uppenbart, framför allt då man i framtiden räknar med att kunna framställa vätgas genom elektrolys av vatten som år 2050 förutspås vara den dominerande framställningsmetoden i Europa och som drivs av elektricitet. Produktionen av elektricitet är i Norge i stort sett helt fri från CO_2-emissioner vilket gör elektrolys till ett lämpligt val av framställningsmetod. Vägen dit kommer sannolikt behöva en övergångsfas där väteproduktionen sker genom ångreformering av naturgas eller kolförgasning. Båda produktionsmetoder ger CO_2-utsläpp och bör då användas med koldioxidinfångning. Övergångsfasen förutspås pågå fram till ungefär år 2050. Efter det förutspås det ha upprättats en infrastruktur som kan försörja hela Norges efterfrågan på väte och väteproduktionen kommer vara fri från CO_2-utsläpp. De eventuella utsläpp som uppstår som en följd av båda presenterade produktionssätten hamnar, precis som elektriciteten, under EU ETS utsläppstak.

6.4 Begränsningar i projektet

Parallellt med framtagandet av modellen har vi gjort litteraturstudier med fokus på nya tekniker inom fordonsindustrin och energisektorn. Detta har inneburit svårigheter eftersom det inte alltid funnits publicerade rapporter inom alla områden. Det har därför varit till stor nytta att flera personer som är i framkant inom sina forskningsområden varit behjälpliga och svarat på frågor. Att det inte alltid funnits flera forskningsrapporter utgivna inom vissa områden skapar också en osäkerhet eftersom det kan ligga egna värderingar och åsikter bakom resultaten. Beroende på hur frågeställningen är formulerad varierar resultaten. När det är företag som ligger bakom är det också lätt att de är partiska i frågan. Dessutom kan

det vara värt att fundera kring huruvida ÅDT:n faktiskt kommer att öka så pass mycket som den idag uppskattats göra.

6.4.1 Modellen

I ett tidigt skede av projektet bestämde vi oss för att göra en egen beräkningsmodell för bränsleförbrukningen eftersom en körning i en extern modell innebar att parametrar för exempelvis motor, varvtal och växel skulle finnas med. Detta var parametrar som inte var tillgängliga för bilarna på E39:an. Det ansågs heller inte nödvändigt att använda oss av en så komplex modell för att kunna uppfylla syftet med vår rapport. Målet med modellen är att kunna få fram storleksordningen på CO_2-emissionerna i dagsläget och framtiden och då anser vi att den framtagna modellen är tillräckligt noggrann. Bränsleförbrukningen i l/mil har varit en bra parameter att få ut ur modellen eftersom den har kunnat jämföras med den statistiska undersökningen för att se att beräkningarna i modellen har varit rimliga.

De krafter vi valde att ta hänsyn till är rullmotståndet, luftmotståndet, gravitationskraften och accelerationskraften eftersom dessa har stor inverkan på energiåtgången för ett fordon och är relativt lätta att modellera. Vi tog inte hänsyn till att det går åt mindre energi när en bil retarderar eftersom det ansågs för komplext att modellera och därför överflödigt i våra beräkningar. F_{motor} användes för att kompensera de konstanta verkningsgraderna. Den är anpassad för att vara optimal för personbilar men användes på samma sätt för alla fordonskategorier eftersom det var en stor osäkerhet hur den skulle förändras för övriga fordonskategorier. Detta anses befogat eftersom det gav rimliga resultat vid användande av F_{motor}. Modellen ger inte en korrekt bild av verkligheten men det hade krävts mer kunskap och fler parametrar, exempelvis varvtal och effekt på olika motorer, för att ge en mer rättvis bild.

I modellen har en konstant acceleration antagits för att förenkla beräkningarna. Skillnad har dock gjorts för de olika fordonskategorierna eftersom de tyngre fordonen inte accelererar lika snabbt som en personbil. Accelerationskraften kan ha blivit för liten för vissa sträckor då accelerationssträckan varit längre än delsträckan som kraften är kopplad till. Dessutom har vi i modellen alltid utgått från hastighetsbegränsningen på vägen.

Parametrarna för beräkning av rullmotståndskoefficienten är tagen från VTI:s rapport. De beror bland annat av lufttemperaturen och som referenstemperatur används 8° Celcius. Det är troligt att detta inte riktigt är fallet längs E39:an, vilket ger en viss skillnad i resultat men då inte bättre data funnits att tillgå har vi använt oss av detta.

6.4.2 Kostnadsberäkningar

Kostnaderna per ton reducerat CO_2 baseras på en linjärisering av utsläppen mellan år 2020 och år 2060. Detta kan ses som en uppskattning då det är troligt att utsläppen inte kommer öka linjärt. I CO_2-utsläppen för 2060 är även en ökning av verkningsgraden på 0.7 % för en förbränningsmotor per år medräknad. Det kan ifrågasättas om denna ökning kommer fortsätta i samma takt fram till år 2060. Om verkningsgraden inte skulle öka i denna takt skulle den framräknade siffran för de totala CO_2-utsläppen fram till år 2060 öka och därmed skulle kostnaden per ton reducerat CO_2 minska. Dock baseras antalet bilar inom området på dagens siffror, dessa förväntas öka vilket skulle göra att kostnaden per ton reducerat CO_2 istället ökar.

Att ingen hänsyn tagits till installationskostnaderna för elvägar beror på att den är väldigt svår att uppskatta samt att det inte funnits angivet i någon av de studerade rapporterna. Dock är det en av de största skillnaderna mellan de olika teknikerna och är klart värt att undersöka närmare vid en implementering.

Det är även stor skillnad mellan att exempelvis bygga om en väg endast för att elektrifiera den, eller att som i fallet med E39:an ha tillfälle att utvärdera den möjligheten i samband med nybyggnation. Kostnaden för arbetet vid nybyggnation blir troligen något högre men priset för komponenterna är densamma oavsett, varför vi ansåg den jämförelsen vara mer relevant.

Många av de rapporterna vi använt oss av som rör kostnader för elvägar kommer från svenska källor. Vi har gjort försök att ta fram en omräkningsfaktor genom att använda kostnaderna för att bygga vägar i Norge kontra bygga vägar i Sverige. Det visar sig dock att på grund av att det skiljer sig mycket i de geotekniska förhållandena skiljer sig kostnaderna med en faktor 4-5 vilket verkar orimligt mycket. Dessutom behöver inte undergrunden i en väg förändras utan det är endast de översta lagrena som påverkas vilket gör att prisskillnaden inte blir lika stor. Komponenterna kommer att kosta ungefär lika mycket i båda länderna, enda skillnaden kan vara de olika värdena på valuta. En annan påverkande faktor kan också vara skillnaden i löneläget för de som ska utföra arbetet. Dock har vi valt att bortse från detta då det finns studier som visar på att kostnaderna för att bygga exempelvis vindkraftverk är snarlika i de båda länderna. Dessutom så är kostnadsberäkningarna som är framtagna för de olika teknikerna så osäkra i sig, att en eventuell skillnad mellan länderna troligen skulle vara mindre än andra faktorer.

Att säga att alla personbilar i region E39 skulle övergå till att vara elbilar eller bränslecellsbilar är att räkna i överkant. En alternativ metod var att använda energiåtgången med avseende på ÅDT:n vi använt i beräkningsmodellen för att beräkna antalet fordon i region E39 år 2060. Det generade dock olika antal fordon beroende på vilken teknik som observerades. Det visade sig dock att medelvärdet mellan antalet elbilar och bränslecellsbilar var ungefär detsamma som det antalet registrerade personbilarna i regionen. För att kunna göra en rimlig jämförelse mellan teknikerna användes enbart kostnaden för införandet av infrastrukturen kopplad till de olika teknikerna och även att samma antal fordon skulle tillgodoses av infrastrukturen. Kostnaden för infrastrukturen ansåg vi vara den kostnad där minst fluktuation kommer ske i perspektivet mellan år 2015 och 2060. Då inköpspriset för elbilar och bränslecellsbilar kommer att sjunka kommande år enligt prognoser [94] [98].

För vindturbiner har det varit lättare att jämföra kostnaden per producerad kWh för varje installerad MW. Vid beräkningarna för vindturbiner på broarna har man utgått från en 2.3 MW:s turbin och räknat om kostnaden per MW. Siffrorna för landbaserade vindturbiner utgår från att turbinen är 1 MW:s turbin.

6.5 Rekommendationer för fortsatt arbete

Det arbete vi utfört har som tidigare nämnts haft en tydligt definierad tidsram. Det har gjort att vi inte kunnat gå så djupt in på varje område. Denna rapport kan användas för att få en överskådlig bild av det olika alternativen som finns, för att sedan på egen hand gå in mer i detalj och utreda de specifika områdena. I avgränsningarna finns de övergripande förenklingarna vi gjort presenterade, medan de mer områdesspecifika finns omtalade i diskussionen.

Förslag på vidare arbete:

- Titta närmare på skillnaden i installationskostnader för olika typer av elvägar
- Mer specifik utredning för lämpliga platser för påkoppling till befintligt elystem gällande elektrifiering.
- Titta på andra förnybara källor att utvinna energi från, exempelvis vågkraft och havsbaserad vindkraft.
- Undersöka kostnader för produktion av biobränsle.

7 Slutsatser

I denna studie har vi kommit fram till att:

- Med dagens fordonsflotta blir, de med modellen beräknade CO_2-emissionerna cirka 0.832 Mton på ett år.
- För framtidsscenarierna blir koldioxidutsläppen längs E39:an med fordon som endast drivs med fossila bränslen och låg inblandning av biobränsle:
  - år 2020: 1.244 Mton CO_2 vilket är en ökning med nästan 50 % jämfört med idag
  - år 2060: 1.587 Mton CO_2 vilket är en ökning på 91 % jämfört med idag
- Energiförbrukningen längs E39:an kommer öka fram till 2060 på grund av den förutspådda ökningen av trafikflödet. Detta kommer ske trots effektivare förbränningsmotorer. Den beräknade energiåtgången för nutiden och framtiden är:
  - idag: 2.95 TWh (exklusive färjor)
  - år 2020 med enbart fossila bränslen: 3.93 TWh, exklusive färjor
  - år 2060 med enbart fossila bränslen: 5.85 TWh
  - år 2060 med framtida fordonstekniker och bränslen: 3.25 - 5.42 TWh beroende på vilken teknik som används. Det innebär en minskning på mellan 7.4 och 44 % jämfört med om bara fossila bränslen med låginblandning av biobränsle skulle användas.
- Oasvett vilken av de framtida fordonsteknikerna eller bränslen som implementeras minskar CO_2-utsläppen jämfört med idag. De framtagna scenarierna innebär en implementering av en sorts fordonsteknik eller bränsle för hela fordonsflottan. Vi tror inte att det kommer ske på detta sätt utan att det troligen kommer vara en blandning av olika fordonstekniker och bränsle i den framtida fordonsflottan.
- Kostnaden per ton reducerat CO_2 för elvägarna är mellan 538-2 578 NOK, för elbilar 649 NOK och för vätgasdrivna bränslecellsbilar 822 NOK.
- Potentialen för produktion av biobränsle från biomassa år 2020 förväntas ha en teoretisk potential att driva hela fordonsflottan år 2060. Det kan även tillkomma biomassa från alger som medför en större teoretisk potential men det återstår fortfarande mycket forskning innan storskalig produktion är möjlig. Det är därför svårt att förutspå exakt hur detta kommer att se ut år 2060. Man måste även ta hänsyn till konkurrensen med andra sektorer vilket gör att det är osäkert hur stor andel som kan komma att användas inom transportsektorn.
- I Norge är solenergi mycket dyrare än vindkraft. Vid integrering i brokonstruktion är kostnaden i förhållande till energiproduktionen för båda teknikerna väldigt hög jämförelsevis med installering på mark. För vindkraftverk är inte vindkapaciteten i fjordarna tillräckligt stor för att det ska vara lönsamt med integrering. Verkningsgraden på solcellspaneler är låg och panelerna kostsamma överlag.
- Energiåtgången längs med E39:an år 2060 är tio gånger större än den potentialen som kan fås från vind- och solenergi i fjordarna. Det finns däremot potential att generera elen på mark i region E39 för att täcka den förväntade energiåtgången längs vägen.
- Detta kandidatarbete har hanterat ett väldigt komplext problem med väldigt många okända variabler. Det är omöjligt att veta hur Norge kommer att se ut år 2060 och har därför behövt göra

antaganden baserade utlåtanden från personer som besitter stor kunskap inom sina områden. Teknikutvecklingen så långt fram i tiden är oförutsägbar eftersom den kan påverkas av en mängd olika faktorer såsom politik, ekonomisk tillväxt och resurstillgångar.

Referenser

Bildreferenser

[1] *File:Brake specific fuel consumption.svg*. [Hämtad 2015-05-04]. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brake_specific_fuel_consumption.svg.

[2] Donald MacArthur Menahem Anderman Fritz R. Kalhammer. *Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, Cost, and Availability*. Juni 2000.

[3] *Vad är en bränslecell?* [Hämtad 2015-04-07]. URL: http://fy.chalmers.se/~f1xjk/FysikaliskaPrinciper/Projekt/Projekt30/vadar.html.

[4] *HYDROGEN PRODUCTION: ELECTROLYSIS*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis.

[5] Viktoria Swedish ICT. *Slide In-teknik för kontinuerlig överföring av energi till elektriska fordon. Slide-in Electric Road System, Inductive project report, Phase 1*. Scania CV, Volvo GTT. Edition 1.05.16.1. Okt. 2013.

[6] Industrial Electrical Engineering Mats Alaküla Professor. *Powering All Electric Road Transports*. PowerPoint presentation.

[7] Arturo Davila. *Report on Fuel Consumption*. Projekt 233683 SARTRE. Jan. 2013.

[8] *Rotor med horisontalaxel*. [Hämtad 2015-05-01]. URL: http://www.umu.se/utbildning/program-kurser/program/?code=TYCEN.

[9] *Rotor med vertikalaxel*. [Hämtad 2015-05-01]. URL: http://www.planetenergy.co.uk/windtubines.htm.

Internetkällor

[10] Stian Reklev. *Norway's parliament approves 2030 emissions plan, backs climate law*. [Hämtad 2015-04-13]. Mars 2015. URL: http://carbon-pulse.com/norways-parliament-approves-2030-emissions-plan-backs-climate-law/.

[11] *Ferjefri E39*. [Hämtad 2015-02-04]. URL: http://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/ferjefriE39.

[12] *Future infrastructures*. [Hämtad 2015-02-04]. URL: http://wp.portal.chalmers.se/e39/sv/hem/.

[13] *Trafikkmengde (ÅDT) per 2013.08.06*. [Hämtad 2015-03-02]. Aug. 2013. URL: http://www.vegdata.no/tag/nvdb/.

[14] *Registrerte kjøretøy, etter kjøringens art og drivstofftype*. [Hämtat 2015-02-04]. URL: https://www.ssb.no/statistikkbanken/selectout/print.asp?FileformatId=2&Queryfile=20152493201426718 6RegKjoretoy2&PLanguage=0&MainTable=RegKjoretoy2&potsize=72.

[15] *Klasse C1 (lett lastebil)*. [Hämtad 2015-02-26]. Maj 2013. URL: http://www.vegvesen.no/Forerkort/Om+forerkort/Hva+har+jeg+lov+a+kjore/Lett+Lastebil+%28klasse+C1+og+C1E%29.

[16] *Energiinnehåll, densitet och koldioxidemission*. [Hämtad 2015-03-03]. URL: http://spbi.se/blog/faktadatabas/artiklar/berakningsmodeller/.

[17] *Disel Engines and Gasoline Engines*. [Hämtad 2015-03-03]. URL: http://www.isuzu.co.jp/world/technology/clean/diesel_gasoline02.html.

[18] *Energy account and energy balance, 2012-2013*. [Hämtad 2015-05-17]. URL: http://www.ssb.no/en/energi-og-industri/statistikker/energiregn/aar/2014-11-05.

[19] *Registrerte kjøretøy, 2013*. [Hämtad 2015-02-04]. April 2014. URL: http://ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/bilreg/aar/2014-04-25?fane=tabell&sort=nummer&tabell=173339.

[20] *Hitta din nästa bil. Och gör din bästa affär.* [Hämtad 2015-02-12]. URL: http://www.bilstart.se/bilfakta#SearchText=volkswagen&k=2&ft=0-1&cm=43-44.

[21] *Bilsvar - sök bil*. [Hämtad 2015-02]. URL: http://www.bilsvar.se/sv/Sok-bil/.

[22] *Karlsberg uthyrning*. [Hämtad 2015-02]. URL: http://www.karlbergs.nu/fordonsfakta.phtml.

[23] *Bioetanol E85 og E100*. [Hämtad 2015-05-09]. URL: http://www.vegvesen.no/Kjoretoy/Eie+og+vedlikeholde/Kjoretoy+og+drivstoff/Bioetanol.

[24] *Grønn Bil*. [Hämtad 2015-05-04]. URL: http://www.gronnbil.no/.

[25] Stefan Nilsson. *Volvos hybridlastbilar utvärderade*. [Hämtad 2015-04-14]. Maj 2013. URL: http://miljofordonsyd.se/2013/05/volvos-hybridlastbilar-utvarderade/.

[26] Ulo. *Norge stöst på Volvohybrider*. [Hämtad 2015-05-04]. URL: http://www.bussmagasinet.se/2013/10/norge-storst-pa-volvohybrider/.

[27] Hanne Hattrem. *(VG Nett) Volvo har inngått avtale med Nettbuss om levering av tolv hybridbusser i Norge.* [Hämtad 2015-05-04]. URL: http://www.vg.no/forbruker/bil-baat-og-motor/bil-og-miljoe/naa-kommer-hybridbussene/a/590714/.

[28] *MEDDELANDE FRÅN KOMMISSIONEN TILL EUROPAPARLAMENTET, RÅDET SAMT EUROPEISKA EKONOMISKA OCH SOCIALA KOMMITTÉN En EU-strategi för rena och energieffektiva fordon*. [Hämtad 2015-03-03]. URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC0186&from=EN.

[29] *Battery, Performance, and Drive options*. [Hämtad 2015-03-12]. URL: http://www.teslamotors.com/models.

[30] *BERÄKNINGAR*. [Hämtad 2015-05-13]. URL: http://www.teslamotors.com/sv_SE/charging#/calculator.

[31] *Lätt att ladda – enkelt att köra elbil*. [Hämtad 2015-05-15]. URL: http://www.vattenfall.se/sv/foretag-laddning-av-elbil.htm.

[32] *Hur snabbt laddar man?* [Hämtad 2015-15-15]. URL: http://elbilslandet.se/sa-funkar-det.html.

[33] Sarah J. Gerssen-Gondelach. André P.C Faaij. *Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term*. [Hämtad 2015-05-04]. Aug. 2012. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312007069#.

[34] *Tesla, Panasonic Cement Their Vow To Build A Gigafactory*. URL: http://www.forbes.com/sites/uciliawang/2014/07/31/tesla-panasonic-are-officially-partners-on-the-road-to-build-a-gigafactory/.

[35] *Panasonic Plans Big Investment in Tesla Battery Plant*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://www.wsj.com/articles/panasonic-plans-big-investment-in-tesla-battery-plant-1412656008.

[36] *Grønn Bil*. [Hämtad 2015-05-04]. URL: http://www.gronnbil.no/ladbarebiler/?zr=1&region=0&p=t&lat=65.16500897619129&lng=12.938616699218755&z=4&y=2015&m=3&ct=elbil&ts=q&lang=no_NO&flist=.

[37] *Road traffic volumes, 2014*. [Hämtad 2015-05-16]. URL: http://ssb.no/en/klreg/.

[38] *Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refueled with hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain)*. [Hämtad 2015-05-05]. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114008131.

[39] *Vad är en bränslecell?* [Hämtad 2015-04-07]. URL: http://fy.chalmers.se/~f1xjk/FysikaliskaPrinciper/Projekt/Projekt30/vadar.html.

[40] *HYDROGEN PRODUCTION PROCESSES*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-processes.
[41] *HYDROGEN PRODUCTION: COAL GASIFICATION*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification.
[42] *HYDROGEN PRODUCTION: ELECTROLYSIS*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis.
[43] *Lagring och distribution*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://www.vatgas.se/fakta/produktion.
[44] *HYDROGEN PRODUCTION: NATURAL GAS REFORMING*. [Hämtad = 2015-05-18]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming.
[45] *PURIFIERS PF 2000*. [Hämtad 2015-05-05]. URL: http://www.idroenergy.it/inglese/purificatori_ing.html.
[46] *PDC-4-800-3500*. [Hämtad 2015-05-05]. URL: http://www.pdcmachines.com/diaphragm-compressors/applications/.
[47] *Registered vehicles, 2014*. [Hämtad 2015-05-15]. URL: http://ssb.no/en/transport-og-reiseliv/statistikker/bilreg/aar/2015-03-25?fane=tabell&sort=nummer&tabell=220839.
[48] *Elektrisitet, årstal, 2013*. [Hämtad = 2015-06-05]. URL: http://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitetaar.
[49] *NVE Vindkraftverk*. [Hämtad 2015-04-10]. URL: http://gis3.nve.no/link/?link=vindkraftverk.
[50] Transportstyrelsen. *Körtider, raster och vilotider*. [Hämtad 2015-03-19]. URL: http://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Yrkestrafik/Kor--och-vilotider/KOrtider-raster-och-vilotider/.
[51] *Om biogass*. [Hämtad 2015-05-09]. URL: http://www.biogassostfold.org/?page_id=177.
[52] *Posten bygger eget biogass-anlegg*. [Hämtad 2015-04-06]. URL: http://www.nrk.no/ostlandssendingen/posten-satser-pa-biogass-1.10886661.
[53] *Biodiesel*. [Hämtad 2015-05-09]. URL: http://www.vegvesen.no/Kjoretoy/Eie+og+vedlikeholde/Kjoretoy+og+drivstoff/Biodiesel.
[54] *Hur mycket koldioxid medför din elanvändning?* [Hämtad 2015-05-11]. Aug. 2012. URL: http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Miljo-och-klimat/Klimatpaverkan/Hur-mycket-koldioxid-medfor-din-elanvandning/.
[55] *Sustainability criteria*. [Hämtad 2015-05-02]. URL: https://ec.europa.eu/energy/node/73.
[56] *EU:S HÅLLBARHETSSYSTEM FÖR BIODRIVMEDEL OCH FLYTANDE BIOBRÄNSLEN*. [Hämtad 2015-05-13]. URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/?uri=uriserv:OJ.C_.2010.160.01.0008.01.SWE.
[57] *Nettoforbruk av elektrisk kraft i alt, prioritert og uprioritert, etter forbrukargruppe og fylke*. [Hämtad 2015-03-25]. URL: http://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitetaar/aar/2015-03-25?fane=tabell&sort=nummer&tabell=222038.
[58] multiconsult. *Vindkraft. Teknologi*. [Hämtad 2015-05-05]. URL: http://www.fornybar.no/vindkraft/teknologi#top.
[59] *Fakta om vindkraft. Energi och teknik*. [Hämtad 2015-05-13]. URL: http://www.powervast.se/sv/Ovriga-sidor/Power-Vast/Power-Vast/Om-vindkraft/Energi-och-teknik/.
[60] Svensk solenergi. *Fakta om solenergi*. [Hämtad 2015-04-20]. URL: http://www.svensksolenergi.se/fakta-om-solenergi.
[61] *NOK per 1 SEK*. [Hämtad 2015-05-07]. URL: http://www.xe.com/sv/currencycharts/?from=SEK&to=NOK&view=10Y.

[62] *NOK per 1 SEK*. [Hämtad 2015-05-13]. URL: http://www.xe.com/sv/currencycharts/?from=USD&to=NOK&view=10Y.
[63] *Drivstoffpriser*. [Hämtad 2015-05-16]. URL: https://www.statoil.no/no_NO/pg1334073608508/private/milesDrivstoff/Priser.html.
[64] *Vindkraftprosjekter i Norge*. [Hämtad 2015-05-17]. URL: http://www.vindportalen.no/vindkraft-i-norge/prosjekter-til-behandling.aspx.

Litteratur

[65] R.K. Pachauri Core Writing Team och L.A. Meyer (eds.) *CLIMATE CHANGE 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
[66] D. Qin G.-K. Plattner M. Tignor S.K. Allen J. Boschung A. Nauels Y. Xia V. Bex Stocker T.F. och P.M. Midgley (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge, United Kingdom och New York, USA: Cambridge University Press.
[67] Olle Ellevset. *Coastal Highway Route E39*. Jan. 2012.
[68] Øyvind L. Nilsen, Mattias Stridh och Erik Spilsberg. *Ferjefri E39 Trafikkberegninger Fase 1*. Statens vegvesen, Vegdirektoratet, maj 2014.
[69] Maria Grahn. *Cost-effective fuel and technology choices in the transportation sector in a future carbon constrained world*. Energi och Miljö, Chalmers, 2009.
[70] Viktoria Swedish ICT. *Slide In-teknik för kontinuerlig överföring av energi till elektriska fordon. Slide-in Electric Road System, Conductive project report, Phase 1*. 1.04.16.1. Volvo GTT, Scania CV, okt. 2013.
[71] Viktoria Swedish ICT. *Slide In-teknik för kontinuerlig överföring av energi till elektriska fordon. Slide-in Electric Road System, Inductive project report, Phase 1*. 1.05.16.1. Scania CV, Volvo GTT, okt. 2013.
[72] Lars Åkesson SP. *Technology Survery for renewable energy Integrated to bridge constructions. Wind energy*. 107. Statens Vegvesen, april 2012.
[73] Peter Kovacs SP Peter Wahlgren. *Technology Survery for renewable energy Integrated to bridge constructions. Solar energy*. 108. Statens Vegvesen, april 2012.
[74] T.K. Sandaker S.O.Simonsen J. Solli E.Sæta E.B.Thorsen Norconsult. *Technology Survery for renewable energy Integrated to bridge constructions. Wind solar wave and tidal*. 110. Statens Vegvesen, april 2012.
[75] Espen Borgir Christophersen Rambøll. *Technology Survery for renewable energy Integrated to bridge constructions. Wind solar wave and tidal*. 112. Statens Vegvesen, april 2012.
[76] *Veg- og gateutforming. Håndbøker i Statens vegvesen*. 2014.
[77] Ulf Hammarström m. fl. *Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions*. Febr. 2012.
[78] Thomas Lundberg, Leif Sjögren och Mika Gustafsson Anita Ihs. *Vägytans makrotextur och dess variation Vägytemätning med mätbil*. ISSN 0347-6030. Febr. 2011.
[79] Mehrdad Ehsani m. fl. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design*. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2005.
[80] Örjan Larsson Blue Institute. *Ladda för nya marknader - Elbilens konsekvenser för elnät, elproduktionen och servicestrukturer*. ISBN: 978-91-86517-00-7. ISSN: 1651-355X. VINNOVA - Verket för Innovationssystem, febr. 2010.
[81] Jenny Gode m. fl. *Miljöfaktaboken 2011. Uppskattade emissionsfaktorer för bränslen, el, värme och transporter*. ISSN 1653-1248. 101 53 Stockholm: VÄRMEFORSK Service AB, april 2011.

[82] Frode Brunvoll och Jan Monsrud. 33. Statistisk sentralbyrå, 2013.
[83] Peter J. Sturm. *EMISSIONS AND FUEL CONSUMPTION FROM HEAVY DUTY VEHICLES*. ISBN-10: 3-902465-48-4. Graz University of Technology, Institute for Internal Combustion Engines och Thermodynamics, 2005.
[84] Tony Sandberg. *Heavy Truck Modeling for Fuel Consumption Simulations and Measurements*. Division of Vehicular Systems, Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2001.
[85] Daniel Macias. *Estimation of Fuel Consumption for Real Time Implementation*. KTH Electrical Engineering, 2012.
[86] Eric Bibeau och Tom Molinski Caixia Yang. *Fuel consumption model for buses considering bus route and passenger load variations*. PowerPoint presentation. University of Manitoba, Manitoba Hydro, 2012.
[87] Tomas Kåberger och Helen Lindblom. *Analys av marknaderna för etanol och biodiesel*. Juni 2011.
[88] ”Grønn Bil. Prosjektrapport 2013”. I: (2013).
[89] J-F. Larivé och J-C. Beziat R. Edwards. *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. ISBN 978-9279-21395-3. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy och Transport, juli 2011.
[90] Julia Hansson och Maria Grahn. *Utsikt för förnybara drivmedel i Sverige*. IVL Svenska Miljöinstitutet AB, febr. 2013.
[91] *Konsekvenserna av en utvidgad elcertifikatmarknad. Bilaga 1 - Förutsättningar i respektive land*. Diarenummer: N2003/9037/ESB. Energimyndigheten.
[92] Norges ingenjör och teknologorganisation. *The Norwegian scenario and action plan presented by NITO Future Climate - Engineering solutions*. Aug. 2009.
[93] Hans Antonson och Jan Wenäll Christina Stave Annelie Carlson. *Kunskapssammanställning över introduktionen av elbilar*. VTI, 2014.
[94] *Rapidly falling costs of battery oacks for electric vehicles*. nature climate change, mars 2015.
[95] Gröna Bilister. *Elbilslandet – en sann Norgehistoria*. Sept. 2012.
[96] T.Nørbech K.Pütz. *The way ahead for hydrogen in transport in Norway. Which lessons can be learned from the successful implementation of battery electric vehicles?* Organisation for Economic Co-operation och Development, 2012.
[97] J. Matthey PLC. *Fuel cell and hydrogen in Norway*. Fuel cells today, jan. 2013.
[98] Raffaele Liberali. *HYWAYS. the European Hydrogen Roadmap*. European Commission, 2008.
[99] *Recommendati ons to the Norwegian Government for the implementation of hydrogen as transportation fuel in Norway. Which lessons can be learned from the successful implementation of battery electric vehicles?* NorWays, 2009.
[100] Commissioner for Science Janez Potočnik och Research. *World Energy Technology Outlook – WETO H2*. 2006.
[101] NITIDOR. *Hydrogen-Oxygen high-pressure generator & more...* Autodesk - Clean Tech Partner, 2014.
[102] N.Lymberopoulos C.N.Christodoulou G.N.Karagiorgis E.Zoulias E.Varkaraki. *A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS*. Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Pikermi, Frederick Research Center (FRC), Nicosia, 2006.
[103] Norges vassdrags-og energidirektorat. *ENERGY IN NORWAY*. 2013.
[104] Industrial Electrical Engineering Mats Alaküla Professor. *Powering All Electric Road Transports*. PowerPoint presentation. Lund University Tech Specialist, AB Volvo.
[105] Trafikverket. *Fria rummet*. Maj 2004.
[106] Elsäkerhetsverket Socialstyrelsen och Strålsäkerhetsmyndigheten Arbetsmiljöverket Boverket. *Magnetfält och hälsorisker*. 2009.

[107] *Nettutviklingsplan 2013. Nasjonal plan for neste genarasjon kraftnett*. Statnett, 2013.
[108] Arturo Davila. *Report on Fuel Consumption*. 13.0 FINAL. Projekt 233683 SARTRE. Jan. 2013.
[109] Arturo Davila. *Report on Infrastructure and Environment*. 10.0 FINAL. Projekt 233683 SARTRE. Okt. 2012.
[110] Naturvårdsverket. *Naturvårdsverkets författningssamling. Naturvårdsverkets föreskrifter om utsläpp till luft av svaveldioxid, kväveoxider och stoft från förbränningsanläggningar med en installerad tillförd effekt på 50 MW eller mer;* ISSN 1403-8234. Okt. 2002.
[111] Lene Liebe och Tale Halsør. *Bærekraftig biodrivstoff. - et avgjørende klimatiltak*. [sidor 11-14]. ZERO, 2010.
[112] Anna Aldén. *LBG - Flytande Biogas*. ScandinavianBiogas, nov. 2010.
[113] Mark Broses och Scott Sannes. *Compressed Natural Gas and Compressed Biogas. An Overview of the Technology, Economics and Project Development Process*. Dec. 2012.
[114] Klima og forurensningsdirektoratet. *Underlagsmateriale til tverrsektoriell biogass strategi*. 2013.
[115] Per Kristian Rørstad och Magnus Killingland Anne Marit Melbye. *Bioenergi i Norge*. ISBN 978-82-410-0990-7. Norges vassdrags- og energidirektorat, 2014.
[116] Carla S Jones och Stephen P Mayfield. ”Algae biofuels: versatility for the future of bioenergy”. I: *Current Opinion in Biotechnology* 23 (2012).
[117] Ole Jacob Broch Roger Richardsen Jorunn Skjermo Kjell Inge Reitan Aleksander Handå Silje Forbord. *Utredning om dyrking og anvendelse av tare, med spesiell fokus på bioenergi i nordområdene*. SINTEF Fiskeri og havsbruk AS, juli 2009.
[118] Jenny Gode m. fl. *Miljövärdering av el ur ett systemperspektiv. En vägledning för hållbar utveckling.* IVL Svenska Miljöinstitutet AB, dec. 2009.
[119] *Miljövärdering av el - med fokus på utsläpp av koldioxid*. Elforsk. 2011.
[120] Andreas Lendle och Malorie Schaus. ”Sustainability Criteria in the EU renewable energy Directive: Consistent with WTO rules? ICTSD Project on WTO Jurisprudence and Sustainable Development”. I: (sept. 2010).
[121] B. Fladen K.E. Stensby S. K. Mindeberg. *Kostnader ved produksjon av kraft og varme*. 1. Norges vassdrags- og energidirektorat, febr. 2011.
[122] Fritjof Salvesen Liv Bjørhovde Rindal. *Solenergi for varmeformål – snart lønnsomt?* 10. Norges vassdrags- og energidirektorat, dec. 2008.
[123] Monica Berner. *Kostnadsstudie, Solkraft i Norge 2013. Systempriser og energikostnader*. Enova SF, okt. 2013.
[124] *Subproject. Energy*. Statens Vegvesen, dec. 2012.
[125] Energimyndigheten. *Solceller. Informationsbroschyr om att producera el med hjälp av solceller*. 2009.
[126] *Summary in English: Report No. 34 to the Storting - Norwegian climate policy*. Norwegian Minsitry of the Environment. 2006.
[127] *Sektoranalyse for transport: Klimakur 2020 – tiltak og virkemidler for å nå norske klimamål mot 2020*. Statens vegvesen. Mars 2010.

Muntliga källor

Sven B. Andersson, Docent, Tillämpad Mekanik, CTH, mars 2015
Mario Plos, Docent, Bygg- och miljöteknik, CTH, mars 2015
Lars Mårtensson, Docent, Miljödirektör Volvo Lastvagnar, april 2015
Mats Alakula, Professor, Lunds Universitet, mars 2015
Dan Zethraeus, Grundare Elonroad, mars 2015
Lennart Spante, Vattenfall Research and Development AB, mars 2015

A MATLAB-modell för energiflödet längs E39

```
%% Konstanter for personbil

m=1500;                 % [kg] fordonets massa
tvar_area=2.28;         % [m^2] vinkelrat mot fardriktning
Cd = 0.29;
J = 2;                  % [kg*m^2]
r = 0.314;              % [m]
P_const = 1500;         % [W] Konstant last, aircond osv
tire=4;                 % antal dack pa fordonet
andel_fordon=0.847;     % andel av adt:n som ar personbilar
DvDt=2;                 % [m/s^2]

% Rullmotstand:
%For personbilar  hamtade fran VTI:s rapport
Cr00=0.00912;       %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr1=0.0000210;      %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr2=0.00172;        %fran tabell 5.3 pa s.50
CrTemp=1.03e-4;     %fran tabell 3.1 pa s.34

%% Konstanter for latta lastbilar

m = 4300;               % [kg] fordonets massa
tvar_area = X;          % [m^2] vinkelrat mot fardriktning
Cd = X;
J = X;                  % [kg*m^2]
r = 0.314;              % [m]
P_const = X;            % [W] Konstant last, aircond osv
tire = 4; %6;           % antal dack pa fordonet
andel_fordon = 0.153;   % andel av adt:n som ar latta lastbilar
DvDt=1.75;              % [m/s^2]

%For personbilar  hamtade fran VTI:s rapport
Cr00=0.00912;       %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr1=0.0000210;      %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr2=0.00172;        %fran tabell 5.3 pa s.50
CrTemp=1.03e-4;     %fran tabell 3.1 pa s.34

%% Konstanter for tunga lastbilar

m = 40000;              % [kg] fordonets massa
tvar_area = X;          % [m^2] vinkelrat mot fardriktning
Cd = X;
J = X;                  % [kg*m^2]
r = 0.491;              % [m]
P_const = X;            % [W] Konstant last, aircond osv
tire = 12;              % antal dack pa fordonet
andel_fordon = 0.88;    % andel av adt:n som ar tunga lastbilar
DvDt=1;                 % [m/s^2]

%For lastbilar  hamtade fran VTI:s rapport
Cr00=0.00414;      %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr1=0.0000158;     %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr2=0.00102;       %fran tabell 5.3 pa s.50
CrTemp=3.00e-5;    %fran tabell 3.2 pa s.35

%% Konstanter for bussar
```

```
m = 21000;                % [kg] fordonets massa (medelvikt)
tvar_area = X;            % [m^2] vinkelrat mot fardriktning
Cd = X;
J = X;                    % [kg*m^2]
r = 0.491;                % [m]
P_const = X;              % [W] Konstant last, aircond osv
tire = 6;                 % antal dack pa fordonet
andel_fordon = 0.12;      % andel av adt:n som ar bussar
DvDt=1;                   % [m/s^2]

%For lastbilar  hamtade fran VTI:s rapport
Cr00=0.00414;       %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr1=0.0000158;      %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr2=0.00102;        %fran tabell 5.3 pa s.50
CrTemp=3.00e-5;     %fran tabell 3.2 pa s.35

%% Konstanter for hybridbil

m=1650;               % [kg] fordonets massa
tvar_area=2.28;       % [m^2] vinkelrat mot fardriktning
Cd = 0.29;
J = 2;                % [kg*m^2]
r = 0.314;            % [m]
P_const=1500;         % [W] Konstant last, aircond osv.
tire=4;               % antal dack pa fordonet
andel_fordon=0.85;    % andel av adt:n som ar hybridbilar
DvDt=1;               % [m/s^2]

% Rullmotstand:
% For personbilar  hamtade fran VTI:s rapport
Cr00=0.00912;         %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr1=0.0000210;        %fran tabell 5.3 pa s.50
Cr2=0.00172;          %fran tabell 5.3 pa s.50
CrTemp=1.03e-4;       %fran tabell 3.1 pa s.34

%% For varje delstracka, for alla fordon

dens_luft=1.3947;     % [kg/m^3]
g=9.81;               % [m/s^2] gravitation
andel_adt=1;          % andel av adt:n som kor i en riktning
T=8;                  % [grader celcius]
mj=tire*J/r^2;        % [kg]
macc=m+mj;            % [kg]

data=xlsread('Modell_data_soder_till_norr_150410.xlsx', 2); % NUTID
%data=flipud(data);
v=data(:,10)/3.36;                % [m/s] hastighet
hojd_start=data(:,4);             % [m]
hojd_slut=data(:,5);              % [m]
langd=data(:,3);                  % [m]
hojd=hojd_slut-hojd_start;        % ANDRA! slut-start = uppifran och ned,
                                  % start-slut=nedifran och upp
%hojd=hojd_start-hojd_slut;
farja=data(:,1);

iri=data(:,8);
mpd=data(:,9);

andel_tunga=data(:,7)/100;        % andel av de tunga fordonen
```

```
andel_latta=1-data(:,7)/100;    % andel av de icke tunga fordonen

%-------------------------------------------------------------------------
%---------------------------------- ANDRA !!! ----------------------------------
%-------------------------------------------------------------------------
adt=data(:,6).*(andel_latta)*andel_adt*andel_fordon;   % ANDRA OM TUNGA FORDON!
%-------------------------------------------------------------------------
%-------------------------------------------------------------------------

for i=1:length(data(:,1))
    if(farja(i)==1)%-------------------------------------------------
        v(i)=0;
        langd(i)=0;
        F_g(i)=0;
        E_g(i)=0; E_rull(i)=0; E_acc(i)=0; E_motor(i)=0; E_luft(i)=0;
    else %----------------------------
        % Hastighet, tung lastbil eller buss
        if(tung && v(i)>80/3.6)
            v(i)=80/3.6;
        end

        % Gravitation:
        lutning_rad(i)=atan(hojd(i)/langd(i));  % radianer, atan=arctan
        if (lutning_rad(i)>0.0981)              % 5.7 graders lutning, 10%
            lutning_rad(i)=0.0981;
        elseif (lutning_rad(i)<-0.0981)
            lutning_rad(i)=-0.0981;
        end
        E_g(i)=(m*g*sin(lutning_rad(i)))*langd(i); % [J]

        % Rullmotstand:
        Cr0= Cr00 + CrTemp*(5-T);
        rrc = Cr0 + iri(i)*v(i)*Cr1 + mpd(i)*Cr2;
        E_rull(i)=(rrc*m*g)*langd(i); % [J]

        % Luftmotstand:
        E_luft(i)=(dens_luft*((v(i)^2)/2)*tvar_area*Cd)*langd(i); % [J]

        % Accelerationskraft:
        if(i>1 && v(i-1)<v(i) && langd(i)~=0) % acceleration for att
                                              % hastigheten pa vagen andras
            tid=(v(i)-v(i-1))/DvDt;
            acc_langd=v(i-1)*tid+(DvDt*tid^2)/2;
            E_acc(i)=macc*DvDt*acc_langd;
        else
            E_acc(i)=0;
        end

        % E motor
        E_motor(i)=(0.04*(v(i)*3.6)^2-10*v(i)*3.6+ 700)*langd(i); % [J]
        %E_motor(i)=0;

    end % end "if farja" ---------------------------------------------

    % Tid
    if(v(i)==0)
        t(i)=0;
    else
        t(i)=langd(i)/v(i); %[s]
    end
```

```
    % Energi och effekt
    E_en_bil(i)=E_g(i)+E_rull(i)+E_luft(i)+E_acc(i)+E_motor(i);
    if(E_en_bil(i)<0)
        E_en_bil(i)=0;
    end

    % Summering for varje delstracka
    if(langd(i)==0||t(i)==0)
        E_en_bil(i)=0;
        P_bil(i)=0;
        P_tot(i)=0;
        E_tot(i)=0;
    else
        P_bil(i)=(E_en_bil(i)/t(i))+P_const;     % [W] per bil och stracka
        P_tot(i)=P_bil(i)*adt(i);                % [W] per stracka
        E_tot(i)=P_tot(i)*(t(i)/3600);           % [Wh] per stracka
    end

end

%Tiden, energiforbrukningen och effekten for en kategori att kora E39
t_tot=sum(t)/3600;                       % [h] total kortid for E39
%-----------------------------------------
P_bil_tot = sum(P_bil);                  % [W] Effekten for en bil langs hela E39
%-----------------------------------------
P_tot_all = sum(P_tot);                  % [W] Effekten for alla bilar av
                                         % fordonstypen att kora hela E39, i en riktning
%-----------------------------------------
E_tot_all = sum(E_tot);                  % [Wh] Energin for alla bilar av
                                         % fordonstypen langs hela E39
%-----------------------------------------
E_ar_ena_rikt=(E_tot_all*365)/10^12;     % [TWh] Energin per ar for hela
                                         % strackan for en fordonskategori i en riktning
%-----------------------------------------
```

B MATLAB-modell för bränsleförbrukning och koldioxidemissioner

```
% Beraknar parametrar
% Bioetanol
HV_sbio = 5900; % [kWh/m3]
rho_bio = 790; % [kg/m3]
k_bio = 0; % [kg CO2/l]

% Biodiesel
HV_sbiod = 9150; % [kWh/m3]
rho_biod = 884; % [kg/m3]
k_biod = 0; % [kg CO2/l]

HV_sbensin = 9100; % [kWh/m3]
rho_bensin = 750; % [kg/m3]
k_bensin = 2.36 ; %[kg CO2/l]

HV_sdiesel = 9800; % [kWh/m3]
rho_diesel = 815; % [kg/m3]
k_diesel = 2.54; % [kg CO2/l]

bio_bensin = 0.011; % andel inblandad bioetanol i bensin
bio_diesel = 0.047; % andel inblandad biodiesel i diesel

HV_bbensin = HV_sbensin*(1-bio_bensin) + HV_sbio*bio_bensin;
HV_bdiesel = HV_sdiesel*(1-bio_diesel) + HV_sbiod*bio_diesel;

rho_bbensin = rho_bensin*(1-bio_bensin) + rho_bio*bio_bensin;
rho_bdiesel = rho_diesel*(1-bio_diesel) + rho_biod*bio_diesel;

k_bbensin = k_bensin*(1-bio_bensin) + k_bio*bio_bensin;
k_bdiesel = k_diesel*(1-bio_diesel) + k_biod*bio_diesel;


%% Bransleforbrukning, parametrar

% Verkningsgrad
n_bensin = 0.275;       % Bensin 25-30 %
n_diesel = 0.375;       % Diesel 35-40 %
n_tlastbil = 0.43;      % Diesellastbilar 0.43
n_hybrid = 0.45;        % Hybrid (5-10% mer an diesel)
n_bio = 0.375;          % Biodiesel, dieselmotor

% Lower Heating Value [kWh/kg]
HV_bensin = HV_bbensin/rho_bbensin;
HV_diesel = HV_bdiesel/rho_bdiesel;
HV_bio = HV_sbiod/rho_biod;         % Endast biodiesel

% Specific Fuel Consumption [kg/kWh]
Sfuel_bensin = 1/(n_bensin*HV_bensin);
Sfuel_diesel = 1/(n_diesel*HV_diesel);
Sfuel_tlastbil = 1/(n_tlastbil*HV_diesel);
Sfuel_hybrid = 1/(n_hybrid*HV_bio);
Sfuel_bio = 1/(n_bio*HV_bio);

%% Hastigheten
v=v*3600;       % omvandlar hastigheten till [m/h]
%% Forbranningsmotor Bensin och Diesel, personbil
```

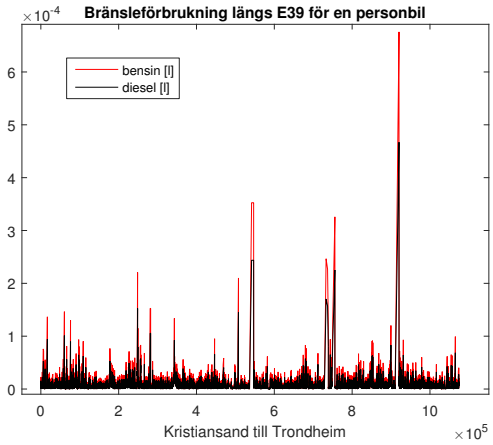
```
P = P_tot'./10^3; % Power [kW] (vektor)
% P = P_bil'./10^3; % Power [kW] for per mil

% Bransleforbrukning [m3]
for i = 1:12983
    if(v(i)~=0)
        % 55 % bensin bilar, 45 % diesel bilar
        Q_bensin(i) = (P(i).*Sfuel_bensin.*langd(i))./(rho_bbensin.*v(i));
        Q_diesel(i) = (P(i).*Sfuel_diesel.*langd(i))./(rho_bdiesel.*v(i));
        v_ej_noll=v(i);
    else
        Q_bensin(i) = 0;
        Q_diesel(i) = 0;
        v_noll=0.000000;
    end
end
% Bransleforbrukningen i [l]
Q_tot_bensin = 0.55*sum(Q_bensin)*10^3;
Q_tot_diesel = 0.45*sum(Q_diesel)*10^3;

% Bransleforbrukningen i [l/mil] om man kor med P_bil
Q_bensin_mil = (sum(Q_bensin)*10^3)/(sum(langd)/10^4);
Q_diesel_mil = (sum(Q_diesel)*10^3)/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg]
CO2_bensin = Q_bensin.*k_bbensin;
CO2_diesel = Q_diesel.*k_bdiesel;
CO2_tot_bensin = Q_tot_bensin*k_bbensin;
CO2_tot_diesel = Q_tot_diesel*k_bdiesel;

%% Forbranningsmotor Diesel, latt lastbil

% Power [kW]
P_llastbil = P_tot'/10^3;
%P_llastbil = P_bil'/10^3; %for per mil

% Bransleforbrukning [m3]
for i = 1:12983
    if(v(i) ~= 0)
        Q_llastbil(i) = (P_llastbil(i).*Sfuel_diesel.*langd(i))./(rho_bdiesel.*v(i));
    else
       Q_llastbil(i) = 0;
    end
end

%Bransleforbrukningen i [l]
Q_tot_llastbil = sum(Q_llastbil)*10^3;

%Bransleforbrukningen i [l/mil] vid anvandning utav P_bil
Q_llastbil_mil = Q_tot_llastbil/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg]
CO2_llastbil = Q_llastbil.*k_bdiesel;
CO2_tot_llastbil = Q_tot_llastbil*k_bdiesel;


%% Forbranningsmotor diesel, tung lastbil
% Power [kW]
P_tlastbil = P_tot'/10^3 ;
```

```
%P_tlastbil = P_bil'/10^3 ; % for per mil

% Bransleforbrukning [m3]
for i = 1:12983
    if(v(i) ~= 0)
        Q_tlastbil(i) = (P_tlastbil(i).*Sfuel_tlastbil.*langd(i))./(rho_bdiesel.*v(i));
    else
       Q_tlastbil(i) = 0;
    end
end

%Bransleforbrukningen i [l]
Q_tot_tlastbil = sum(Q_tlastbil)*10^3;

%Bransleforbrukningen i [l/mil] anvander P_bil
Q_tlastbil_mil = Q_tot_tlastbil/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg]
CO2_tlastbil = Q_tlastbil.*k_bdiesel;
CO2_tot_tlastbil = Q_tot_tlastbil*k_bdiesel;

%% Forbranningsmotor diesel, buss
% Power [kW]
P_buss = P_tot'/10^3;
% P_buss = P_bil'/10^3; % for per mil

% Bransleforbrukning [m3]
for i = 1:12983
    if(v(i) ~= 0)
        Q_buss(i) = (P_buss(i).*Sfuel_diesel.*langd(i))./(rho_bdiesel.*v(i));
    else
       Q_buss(i) = 0;
    end
end

% Bransleforbrukning [l]
Q_tot_buss = sum(Q_buss)*10^3;

%Bransleforbrukningen i [l/mil] anvander P_bil
Q_buss_mil = Q_tot_buss/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg]
CO2_buss = Q_buss.*k_bdiesel;
CO2_tot_buss = Q_tot_buss*k_bdiesel;

%% Forbranningsmotor, Hybridbilar

% Power [kW]
P =  P_tot'/10^3;
% P =  P_bil'/10^3; % for per mil

% Bransleforbrukning [m3]
for i = 1:12983
    if(v(i) ~= 0)
        Q_hybrid(i) = (P(i).*Sfuel_hybrid.*langd(i))./(rho_biod.*v(i));
        Q_hybrid(i) = 0;
    end
end
% Bransleforbrukning [l]
Q_tot_hybrid = sum(Q_hybrid)*10^3
```

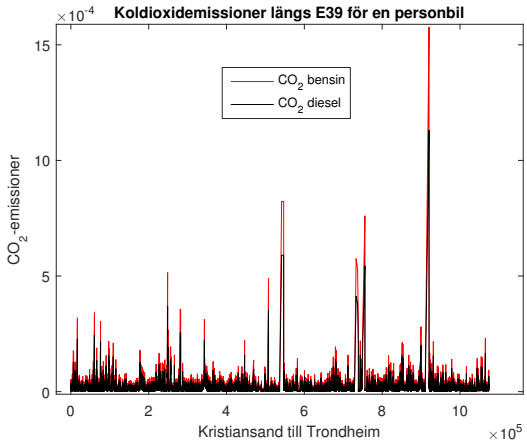
```
%Bransleforbrukningen i [l/mil] anvander P_bil
Q_hybrid_mil = Q_tot_hybrid/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg] = 0 ty k_bio =0
CO2_hybrid = Q_hybrid.*k_bio;
CO2_tot_hybrid = Q_tot_hybrid*k_bio;

%% Forbranningsmotor, biobransle

% Power [kW]
P = P_tot'./10^3;
% P = P_bil'./10^3; % for per mil

% Bransleforbrukning [l]
for i = 1:12983
    if(v(i) ~= 0)
        Q_bio(i) = (P(i).*Sfuel_bio.*langd(i))./(rho_biod.*v(i));
    else
        Q_bio(i) = 0;
    end
end
% Bransleforbrukning [l]
Q_tot_bio = sum(Q_bio)*10^3;

%Bransleforbrukningen i [l/mil] anvander P_bil
Q_bio_mil = (Q_tot_bio)/(sum(langd)/10^4);

% Koldioxidemissioner [kg] (kommer bli 0 da k_bio=0)
CO2_bio = Q_bio.*k_bio;
CO2_tot_bio = Q_tot_bio*k_bio;
```

C Resultat per delsträcka

Bränsleförbrukningen och koldioxidutsläppen per delsträcka för en bil som kör längs E39:an presenteras i figur 17 och 18.

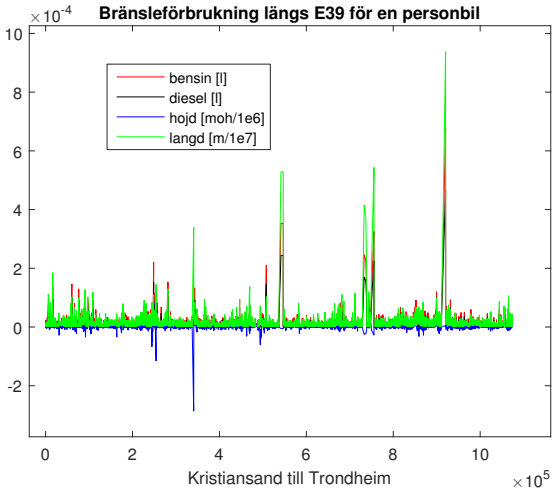


Figur 17: Bränsleförbrukning för en personbil längs sträckan



Figur 18: CO_2-emissioner för en personbil längs sträckan

I figur 19 presenteras bränsleförbrukningen för en personbil, höjden och längden över varje sträcka. Där kan ses att dessa följer varandra väldigt bra. Bränsleförbrukningen, per sträcka, ökar då det är kuperad terräng eller långa sträckor.

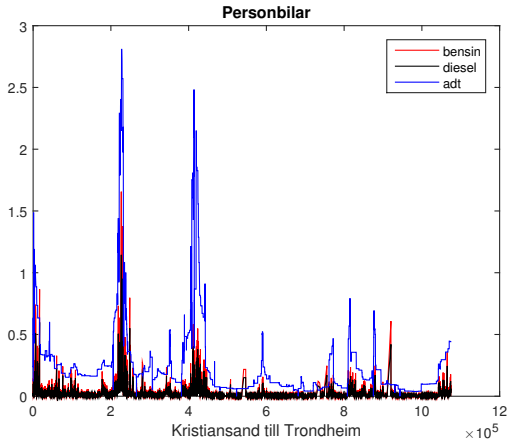


Figur 19: Bränsleförbrukningen för en personbil relaterat till höjdskillnaden och längden på varje delsträcka

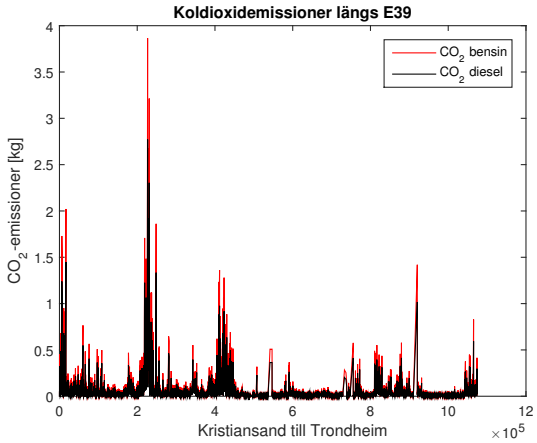
I figur 20 presenteras bränsleförbrukningen för alla bilar längs sträckan. Man kan här se att den totala bränsleförbrukningen beror på storleken i ÅDT och på hur stor bränsleförbrukningen är för varje bil på sträckan. Det kan noteras i figur 17 att det finns en avvikande topp vid ca 90 mil där ÅDT:n är relativt låg medan den totala bränsleförbrukningen har en topp. Att det blir ett avvikande värde där beror på att bränsleförbrukningen för varje bil är mycket högre på den sträckan i jämförelse med alla andra sträckor. Detta beror på att den avvikande sträckan är väldigt lång. Snittlängden på sträckorna är 82 m men denna

sträcka där förbrukningen inte matchar med ÅDT är cirka 9400 m. Det gör att det går åt väldigt mycket energi för att driva en bil längs sträckan och den totala bränsleförbrukningen för alla bilar blir då också väldigt hög. Det finns andra sträckor som också avviker relativt mycket från snittlängden och dessa är mellan 1000 och 9000 m vilket alltså är uppemot 109 gånger längre än snittsräckan. Detta ger därför toppar i bränsleförbrukningen längs sträckan som inte överensstämmer med topparna i ÅDT.

Koldioxidutsläppen som visas i figur 21 är proportionella till bränsleförbrukningen vilket är naturligt eftersom en ökad bränsleförbrukning leder till ökade koldioxidutsläpp.

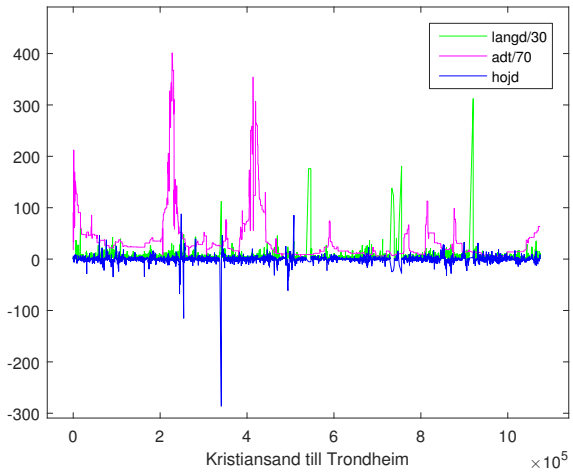


Figur 20: Totala bränsleförbrukningar för personbilarna längs sträckan



Figur 21: Totala CO_2-emissioner för alla personbilar längs sträckan

För att lättare kunna se samband mellan de olika topparna för bränsleförbrukningarna i plottarna för personbilarna har ÅDT:n, längden och höjdskillnaden för varje delstäcka plottats separat, se figur 22. I figuren har de olika parametrarna skalats på olika sätt för att passa in i samma figur. Därför kan man inte relatera storleksordningen mellan parametrarna men för syftet att hitta förklaringar till avvikande värden räcker det att kunna jämföra ÅDT:n, höjden och längden relativt sig själva. Huvudsaken är att kunna urskilja toppar och dalar.



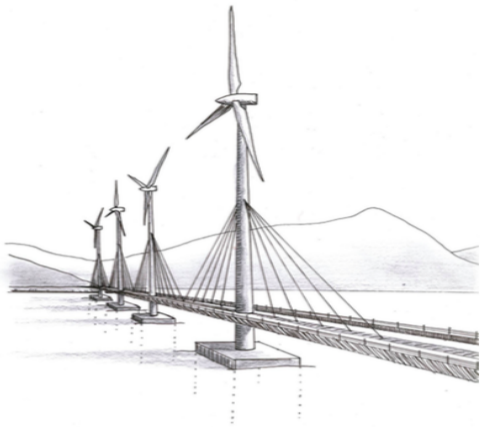
Figur 22: ÅDT:n, längden och höjdskillnaden för varje delstäcka (med olika skalningar)

D MATLAB-modell för koldioxidutsläpp från färjorna

```
distans = [8, 23.58, 5.1, 2.09, 4.25, 11.35, 5.5]; % [km]
turer = [88, 65, 68, 68, 79, 66, 64]; % [antal/dygn]
branslefor = [20.5, 25.2, 15.8, 17.2, 14.0, 17.0, 16.5]; % [kg/km]
bransle = [1, 1, 2, 2, 2, 1, 2]; % LNG=1, Diesel=2
% ferjornr=[3116 4436 6429 10155 10675 11217];

tot_branslefor = distans.*turer.*branslefor; %[kg/dygn]

HV = [13, 11.9]; % [kWh/kg] [LNG, diesel] Heating Value
k = [201, 269].*10^(-3); %[kg/kWh] [LNG, diesel] CO2-emissionsfaktorn

for i=1:7
    if(bransle(i)==1)
        CO2_ferje(i) = tot_branslefor(i)*k(1)*HV(1); %[kg/dygn]
    else
        CO2_ferje(i) = tot_branslefor(i)*k(2)*HV(2); %[kg/dygn]
    end
end
```

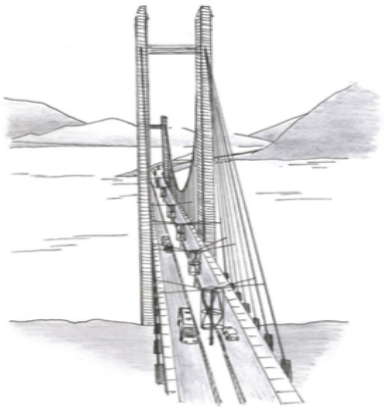
E Vindkraftverk integrerade i brokonstruktion

Figur 23: Integrerade HAWT på hängbro

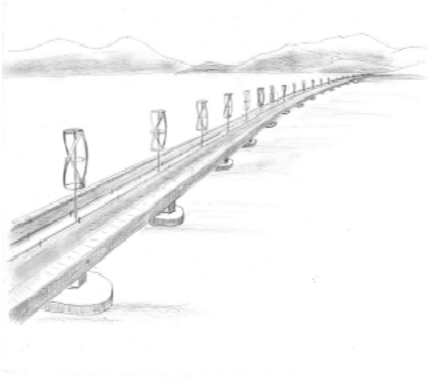


Figur 24: Integrerad HAWT på pontonbro

Figur 25: Integrerade HAWT på pontonbro



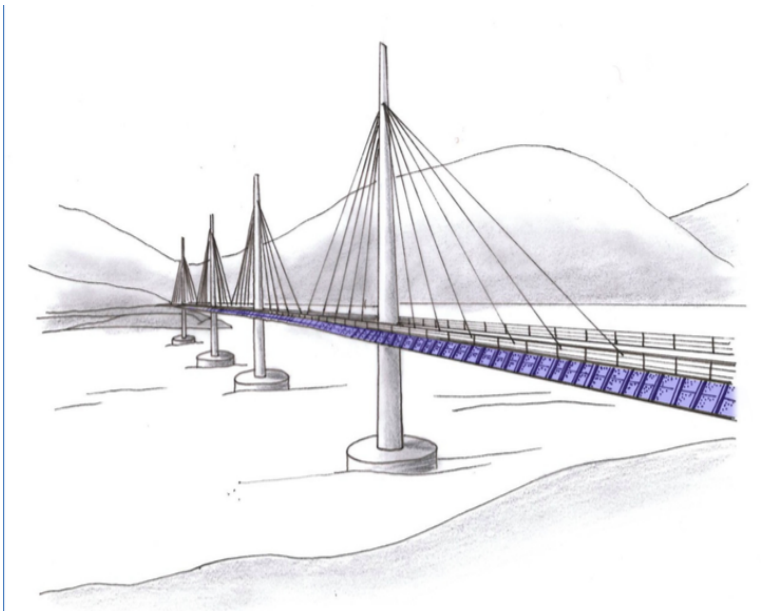
Figur 26: Integrerade VAWT på hängbro



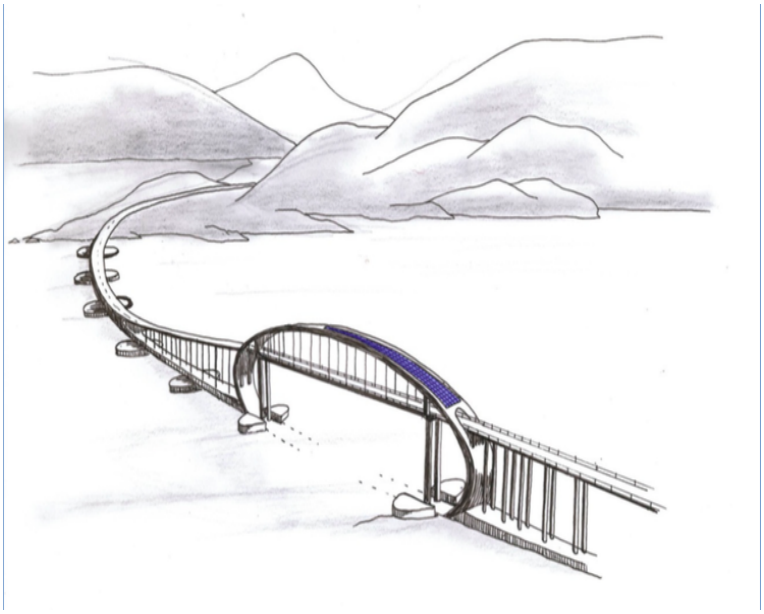
Figur 27: Integrerad VAWT i pontonbro

Bilderna är tagna från Norconsults subprojekt om vind- och solenergi [74].

F Solpaneler monterade på brokonstruktion



Figur 28: Solpaneler monterade på bro i Halsafjord



Figur 29: Solpaneler monterade på ark på pontonbro

Bilderna är tagna från Norconsults subprojekt om vind- och solenergi [74].

G Arbetsfördelning

Utöver den arbetsfördelningen som beskrivs i tabell 27 nedan är punkterna nedan något som gäller den allmänna arbetsfördelningen.

- På de kapitel och avsnitt som det inte finns någon referens till har alla varit delaktiga i och bidragit till i sådan grad att huvudförfattare varit svårt att urskilja.
- Alla har bidragit med redaktionella ändringar så som förbättringar av texten både språkmässigt och med strukturen.

Tabell 27: Arbetsfördelning

	Ansvarsområden och bidrag till problemlösning, syntes och analys	**Huvudansvarig författare av avsnitt**
Lovisa	Skapande av och beräkningar med modellen	Kapitel 2, avsnitt 5.1, 5.2
Evelin	Skapande av och beräkningar med modellen samt litteraturstudie och analys av olika synsätt på elproduktion	Kapitel 2, avsnitt 3.7.1, 5.1, 5.2
Simon	Litteraturstudier, analys och kostnadsberäkningar för elektrifiering av väg, hybridlastbilsteknik samt fordonståg	Avsnitt 3.1, 3.4, 3.5, 5.3
Vania	Litteraturstudier, analys och kostnadsberäkningar för vind- och solenergi integrerade i brokonstruktioner samt jämförelse med installation på mark	Kapitel 4, avsnitt 5.4
David	Litteraturstudier, analys och kostnadsberäkningar för elbilar, vätgasdrivna fordon och bränsleceller	Avsnitt 3.2, 3.3, 3.7.3, 5.3
Sabina	Skapande av och beräkningar med modellen , litteraturstudier och analys för personhybridtekniken och biobränsle i regionen	Kapitel 2, avsnitt 3.1, 3.7.2 3.6, 5.1, 5.2