

Maximal CO₂-reduktion per investerad krona för personbilar: En bred systemanalys

by Johan Kollberg



LUNDS
UNIVERSITET

Examensarbete i Energivetenskaper

Huvudhandledare: Martin Tunér

Examinator: Öivind Andersson

July 17, 2019

Version 2

Abstract

This study examines the cost efficiency of reducing carbon emissions for personal vehicles by changing from petrol to either liquid bio fuels or electric operation. Based on own simulations of fuel consumption, life cycle-emissions and -production costs are derived based on existing knowledge through previous studies. The results are finally presented as '*SEK per reduced ton of CO₂*'; a unit that expresses the required additional investment in order to reduce the carbon footprint compared to a reference petrol car. Several sensitivity analyses are then performed in order to study the effects of various parameters on the cost efficiency of reducing carbon emissions, such as a lower vehicle weight or the capacity of the battery pack of an electric vehicle. A final attempt to maximize cost efficiency is then performed to examine under which circumstances certain methods are preferable. The outcome of this study is that bio fuels based on biomass from forest industry yields the best result in terms of cost efficiency and total reduction of carbon emissions with a value of 1207 SEK per reduced ton of CO₂ for a vehicle run on HVO derived from pine oil. Maximum cost efficiency for combustion cars occurs when vehicle weights and displacement volumes are low, and driving cycles with high top speeds are chosen. After optimization of the HVO vehicle, a cost efficiency of 508 SEK per reduced ton of CO₂ were achieved.

Electric drive trains initially have low cost efficiencies compared to other alternatives with a result of 4276 SEK per reduced ton of CO₂ for operation on Swedish electricity mix. The higher cost per ton of CO₂ is mainly due to high production costs for the vehicle itself. In order to compete with the studied bio fuels, production costs of electric vehicles need to decrease by 20 to 25 % to reach the same level of cost efficiency. Choosing smaller battery packs, driving cycles with urban driving and long assumed life cycle distances however shows a large potential and improvements in the resulting cost efficiency for electric vehicles. After optimization, cost efficiencies were improved to 1570 SEK per reduced ton of CO₂.

Further work may be done by acquiring data regarding both production costs and -emissions directly from car manufacturers. Inclusion of additional life cycle phases such as maintenance or recycling are also relevant items for future studies.

Innehåll

1	Introduktion	2
1.1	Syfte	3
1.2	Frågeställningar	3
1.3	Målgrupp	3
1.4	Avgränsningar	3
1.5	Utförande	3
2	Litteraturstudie	5
2.1	Trender i transportsektorn	5
2.2	Biodrivmedel	5
2.2.1	Klimatpåverkan och klimatnytta	5
2.2.2	Resurstillgångar	6
2.3	Produktion av fordon	7
2.4	Produktion av batterier till elektriska fordon	7
2.5	Ekonomiska förutsättningar	7
2.5.1	Biodrivmedel	7
2.5.2	Elektrifiering och infrastruktur	8
2.6	Slutsatser litteraturstudie	9
3	Bred Systemanalys - Metodik	10
3.1	Systemgränser	10
3.2	Val av studerade drivlinor och bränslen	11
3.3	Avgränsningar	11
4	Standardmodell av fordon	13
4.1	Försäljningssiffror Sverige	13
4.2	Valda värden	14
5	Simulering av bränsleförbrukning	15
5.1	Data från standardmodell	15
5.1.1	Valda värden till simulering	15
5.1.2	Värmevärden för drivmedel	15
5.1.3	Exkluderade parametrar	16
5.2	Körcykel: WLTP	16
5.3	Fordonsdynamik	18
5.3.1	Effektbehov	18
5.3.2	Från effektbehov till bränsleförbrukning	19
5.4	Förbränningsmotor	20
5.4.1	Varvtal	20
5.4.2	Vridmoment	21
5.4.3	Verkningsgrad: Ottomotor	22
5.4.4	Verkningsgrad: Dieselmotor	25
5.5	Elektriskt fordon	26
5.5.1	Varvtal	26
5.5.2	Vridmoment	26
5.5.3	Verkningsgrad: Elektrisk drivlina	27
5.6	Resultat från simulering	29
5.7	Avgränsningar och felkällor för simulering	29

6	Växthusgaser - Bedömning av livscykelutsläpp	31
6.1	Bränslen	31
6.1.1	Biodrivmedel	31
6.1.2	Elektricitet	33
6.2	Produktion av fordon	34
6.2.1	Komplett fordon exklusive batterier	34
6.2.2	Batterier till elektriska drivlinor	35
7	Produktionskostnad - Bedömning av kostnad under livscykel	38
7.1	Bio- och fossila drivmedel	38
7.2	Elektricitet	38
7.3	Fordon	39
8	Resultat	41
8.1	Kronor per reducerat ton koldioxid	42
8.2	Diskussion av resultat	44
9	Känslighetsanalyser	45
9.1	Val av körcykel	45
9.2	Total körsträcka	47
9.3	Batterikapacitet och elmix i batteriproduktion	49
9.4	Produktionskostnad av biodrivmedel	51
9.5	Vikt av fordon	51
9.6	Downsizing av förbränningsmotor	53
9.7	Produktionskostnad för elektriskt fordon	54
9.8	Plug-in-Hybrid	56
10	Maximering av koldioxidreduktion per krona	58
10.1	Diskussion	61
11	Sammanfattning och slutsatser	62
11.1	Fortsatt arbete	64
A	Bilaga	68
A.1	Val av verkningsgrads-karta	68
A.2	Känslighetsanalys: Vinstmarginal i fordonsproduktion	69

Tillkännagivanden

Jag skulle först och främst vilja rikta ett tack till min handledare Martin Tunér för att ha gett mig möjligheten till att spendera denna tid på avdelningen för förbränningsmotorer. Vidare vill jag även tacka min flickvän Julia som agerat både frivilligt och ofrivilligt bollplank under hela processen. Till sist vill jag rikta ett speciellt tack till mina kollegor Erik Svensson och Nhut Lam som båda gett extremt värdefull feedback och hjälp under hela examensarbetet.

Nomenklatur

CO_2	Koldioxid
BEV	Batteribaserat Elektriskt Fordon (Battery Electric Vehicle)
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
C_d	Luftmotståndskoefficient (Coef. of drag)
C_r	Rullmotståndskoefficient (Coef. of roll)
EV	Elektriskt Fordon (Electric Vehicle)
HEV	Hybridfordon (Hybrid Electric Vehicle)
ICE	Förbränningsmotor (Internal Combustion Engine)
ICEV	Förbränningsmotorsfordon (Internal Combustion Engine Vehicle)
LIB	Litiumjonbatteri
M_v	Massa, fordon
MEP	Mean Effective Pressure
P_b	Bromsad effekt (Brake Power)
PHEV	Plug-in-hybridfordon (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
RPM	Varvtal (Revolutions Per Minute)
V_d	Slagvolym

1 Introduktion

För att möta de klimatutmaningar och miljömål vi idag står inför krävs omställningar i fordonsflottan som utgör en stor påverkan på utsläpp av växthusgaser. Av de klimatmål som i Sverige ämnas uppnås till 2020 tillhör en minskning av utsläpp av växthusgaser med 20 %, minskning av energianvändning med 20 %, andel förnyelsebar energi skall uppgå till 20 % och andelen förnyelsebar energi i transportsektorn skall uppgå till 10 %. Det sistnämnda målet är idag uppnått; men fortsatta åtgärder inom transportsektorn behövs för att uppnå mål satta längre fram i tiden, däribland en *fossiloberoende fordonsflotta*. Standarden för typ av drivlina i transportsystemet är idag förbränningsmotorn med en stor andel fossila drivmedel som bränsle med höga utsläpp av växthusgaser. Således finns det stora incitament för en fortsatt utveckling av transportsektorn.

Forskning och utveckling av förbränningsmotorer baseras idag främst på lagkrav rådande emissioner av exempelvis kväveoxid (NO_x)- och partikelutsläpp, men också på ren effektivisering i form av högre verkningsgrad. En högre verkningsgrad innebär minskad bränsleförbrukning och därmed också lägre koldioxidutsläpp. Det finns dock en övre gräns på hur effektiv en förbränningsmotor kan bli, och samtidigt finns det fundamentala nackdelar med att ha ett kraftverk på hjul. Oavsett om bränslet till en förbränningsmotor är fossilt eller förnybart kommer tillförd energi gå förlorad i form av oåtervunnen energi till bromsskivor under körning, såvida denna energi inte tas tillvara på med regenerativ bromsningsteknik. Ett alternativ till en helt förbränningsbaserad drivlina är då istället antingen helt elektriska- eller hybrida fordon som utöver potentiella nollutsläpp under drift även tar till vara på annars förlorad rörelseenergi via regenerativ bromsning. Elektriska fordon ses till följd av dessa faktorer som en av lösningarna till de klimatutmaningar vi står inför. Högre verkningsgrad, avsaknad av direkta emissioner och förnybara energikällor i elproduktion har medfört satsningar i form av statliga subventioner som idag görs med syfte att elektrifiera fordonsflottan för att minska koldioxidutsläpp. Ett hinder för en ökning av andelen elektriska fordon i fordonsflottan är däremot batteriers låga energitäthet gentemot förbränningsbaserade drivlinor, vilket traditionellt har begränsat räckvidden för elfordon. Dagens elbilar har däremot närmat sig konventionella fordon i termer av räckvidd genom en större batterikapacitet och delvis högre energitäthet. Det är däremot omdebatterat huruvida produktionen av fordonet påverkar livscykelutsläppen av växthusgaser för elektriskt drivna fordon, då dels produktionen av batterier generellt innebär energikrävande processer och dels hur det svenska elkraftssystemet behåller låga koldioxidutsläpp vid en ökad elektrifiering av fordonsflottan.

Livscykelanalys (LCA) kan tillämpas för att beräkna just utsläpp av växthusgaser under en produkts livscykel. Verktöget blir allt mer tillämpat allt efter behovet av information gällande växthusgasutsläpp ökar. En livscykelanalys för ett fordonets livscykel bör inte enbart inkludera utsläpp av växthusgaser under drift, utan även produktionen av fordonet bör inkluderas och kan bidra med en väsentlig del av fordonets totala klimatpåverkan. Detta belyses särskilt rörande elektriska fordon, där produktionen av batterier har lyfts fram som en stor faktor till växthusgasutsläpp. Som komplement till elektrisk framdrift för att reducera växthusgaser görs även satsningar för att ytterligare införa förnybara drivmedel i Sveriges fordonsflotta. Det är vedertaget att exempelvis biobränslen jämfört med fossila reducerar utsläpp av koldioxid genom koldioxidinfångning under odling, men för en komplett bild krävs också livscykelanalyser (well-to-wheel) för att studera utsläpp även under produktionen av drivmedlen.

En framtida fossiloberoende flotta kommer mest troligt inte ske på enbart en typ av drivlineteknik. Med både elektrifiering och biodrivmedel tillgängliga kan man ställa sig frågan om vilket alternativ som inte bara bidrar med störst reduktion av växthusgaser jämfört med dagens transportteknik, utan också vilket alternativ som är mest kostnadseffektivt. En frågeställning av denna typ är dock inte optimal; en lämpligare fråga är istället *hur* eller *när* det ena eller andra är att föredra, och det är just detta som denna studie ämnar att undersöka. En djupdykning kommer ske i elektrifiering och diverse biodrivmedel med mål att presentera en bred bild över vilka förutsättningar som föreligger de olika alternativen, samt att undersöka under vilka premisser det ena eller det andra är att föredra ur både praktiska och ekonomiska perspektiv.

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att studera både förbränningsmotorfordon och elektriska fordon genom en bred systemanalys. Med dagens teknik i åtanke är målet att studera potentiella reduktioner av växthusgasutsläpp under ett fordon's livscykel för två angreppssätt; elektrifiering eller byte till biodrivmedel. Målet är slutligen att undersöka produktionskostnader under livscykeln för att kunna jämföra kostnadseffektivitet mellan de olika sätten att reducera koldioxidutsläpp.

1.2 Frågeställningar

De frågeställningar som ligger till grund för arbetet är ställda enligt:

1. Hur ser mängden utsläpp av växthusgaser ut under ett fordon's livscykel?
2. Vad är kopplingen mellan utsläpp av växthusgaser och de kostnader förenade med att reducera dessa utsläpp, uttryckt i måttet 'kronor per reducerat ton CO₂'?
3. Vilka potential-/problemområden finns för olika drivlinor och bränslen för att reducera utsläpp av växthusgaser?

1.3 Målgrupp

Den målgrupp som denna studien riktar sig till består främst av yrkesverksamma inom hållbarhet för transportsektorn. Studien baseras på produktionskostnad (innan eventuella styrmedel och vinstpåslag) för att ge beslutsfattare om styrmedel en uppfattning om kostnadseffektivitet för reduktion av växthusgaser. Studien riktar sig *inte* till personer med intresse att få en bild över faktiska kostnadslägen efter att styrmedel så som moms, skatter eller subventioner inkluderats.

1.4 Avgränsningar

Avgränsningar är ett centralt begrepp inom systemanalys och livscykelanalyser. Denna studie lägger stor vikt i att vara transparent med vilka avgränsningar som utförts. Detaljerade avgränsningar beskrivs i sektioner 3.3 och 5.7.

1.5 Utförande

I syfte att underlätta läsaren och att ge en tidig överblick av rapportens innehåll, presenteras nedan en beskrivning av de olika steg som utförs under arbetet. Utförandet av denna systemanalys sker enligt följande:

Standardmodell: En standardmodell av en personbil fastställs för att ge en bild över vilka tekniska specifikationer som existerar idag rörande förbrännings- och elektriskt baserade fordon. Denna standardmodell baseras på den svenska marknaden och på de fordon med högst marknadsandelar i Sverige. Standardmodellen står sedan till grund för antaganden senare delar av studien.

Simulering av bränsleförbrukning: För att beräkna bränsleförbrukning under driftsfasen under ett fordon's livscykel, utförs en simulering av bränsleförbrukning enligt WLTP-körcykeln i MATLAB. Denna simulering görs med stöd av den standardmodell som fastställs för att möjliggöra en jämförelse mellan el- och förbränningsfordon med samma verktyg. Simuleringen möjliggör att utföra känslighetsanalyser av exempelvis vikt av fordon eller motor's slagvolym's inverkan på slutresultatet.

Utsläpp av växthusgaser: Existerande litteratur och livscykelanalyser studeras för de olika faserna för ett fordon's livscykel, såsom utsläpp från produktion av batterier eller biodrivmedel.

Produktionskostnader: Likt växthusgasutsläpp studeras litteratur rörande produktionskostnader för både produktion av fordon och produktion av bränslen.

Kronor per reducerat ton CO₂: Med en bensinbil som referens, beräknas först produktionskostnader och utsläpp av växthusgaser för fordonets livscykel. Därefter kopplas den eventuella **reduktion** av växthusgaser till en eventuell **ökning** av kostnad relativt ett referensfordonet för samtliga val av biodrivmedel eller elektricitet. Slutligen erhålls resultatet *kronor per reducerat ton CO₂* för varje alternativ jämfört med bensinbilen. Måttet beskriver hur många kronor som krävs för att reducera ett ton CO₂.

Känslighetsanalys: Känslighetsanalyser görs sedan på olika parametrar och antaganden för att studera hur stor inverkan de olika variablerna har på slutresultatet.

Maximal CO₂-reduktion per investerad krona: Slutligen kombineras olika val av parametrar för att maximera reduktionen av CO₂ per krona.

2 Litteraturstudie

Den teori som presenteras i denna inledande litteraturstudie har utförts av författaren till studien i ett tidigt stadiet av examensarbetet. Syftet är att ge en övergripande bild över dagsläget för den teknik och utvecklingspotential som berör koldioxidutsläpp och kostnader för personbilar.

2.1 Trender i transportsektorn

Den svenska transportsektorn förbrukar i dagsläget cirka 90 TWh energi. Av dessa består ungefär 14 TWh av biodrivmedel, främst dieselsättande biodrivmedel i form av framförallt HVO och en mindre mängd etanol, RME och biogas [1]. Detta motsvarar en andel på 19 % biodrivmedel i energimängd. 2020-målet om 10 % förnyelsebar energi i transportsektorn är därmed redan uppnått. Nu närmas istället målet om fossiloberoende fordonsflotta år 2030 och slutligen uppdraget att i Sverige 2050 ha en koldioxidneutral energiförsörjning utan nettoutsläpp av växthusgaser. I utredningen *Fossilfrihet på väg* från 2013, utförd av SOU (Statens Offentliga Utredningar) på uppdrag av den dåvarande regeringen presenteras resultat från ett antal utredningar om vad en sådan omställning skulle innebära och vilka förutsättningar som idag finns [2]. Utredningen menar på att det krävs samordnade åtgärder inom främst fem områden:

1. Planering och utveckling av attraktiva och tillgängliga städer som minskar efterfrågan på transporter och ger ökad transporteffektivitet
2. Infrastrukturstöd och byte av trafikslag.
3. Effektivare fordon och ett energieffektivare framförande av fordon
4. Biodrivmedel
5. Eldrivna vägtransporter

Detta examensarbete kommer främst beröra de tre sistnämnda punkterna då dessa direkt berör personbilar och de tekniska omställningar de skulle utsättas för. Flera lösningar till punkt 3 (effektivare fordon) läggs fram, bland dessa ingår bland annat hybridisering av fordon mellan förbrännings- och elektriskt baserade drivlinor. Ytterligare effektivisering via smartare körsätt (eco-driving) och lägre hastigheter benämns också som potentiella lösningar (kapitel 8 och 9) [2].

Man understryker i samma rapport att det krävs ett tydligt och långsiktigt mål med produktionskapacitet av biodrivmedel i åtanke för att kunna försörja en större andel av fordonsflottan. Då Sverige har stora resurs- och teknikmöjligheter för ett skifte till mer biodrivmedel anses potentialen vara stor. Man anser dock att nya typer av drivmedelsproduktion som baseras på avfall, biprodukter, lignin, cellulosa och hemicellulosa behöver utvecklas. Man menar också att biodrivmedel jämfört med konventionella bränslen kan innebära mer invecklade motorer, vilket får följderna att det tillämpas bättre i tunga fordon än i personbilar (kapitel 10) [2].

Som sista punkt lyfts också elektrifiering av fordonsflottan vilket innebär en minskad energianvändning genom högre verkningsgrad, noll direkta avgasutsläpp, minskat buller och minskade driftskostnader. Höga kostnader för elektriska fordon är däremot ett hinder, men med tillräckligt stöd för att på sikt driva ner kostnader för batterier och bränsleceller kan de mest kritiska kostnaderna minskas. Man nämner att kontinuerliga utvärderingar krävs alltefter teknikutveckling sker. Både mål och stöd till elektrifierande teknik bör revideras och modifieras efter behov (kapitel 11) [2].

2.2 Biodrivmedel

2.2.1 Klimatpåverkan och klimatnytta

För en övergång från fossila- till förnybara bränslen är det viktigt att inte enbart studera utsläpp från förbränning av bränslen. Hela livscykeln inklusive produktion av bränslet bör inkluderas. I en studie från 2010 utförd av Börjesson m.fl. [3] gjordes en utförlig livscykelanalys av flera svenska

biodrivmedel. I denna studie presenteras bland annat utsläpp av växthusgaser från etanol baserad både på svenskodlad vete och sockerbetor, men också RME som ett val av biodiesel. Klimatnyttan definieras som minskningen av växthusgasutsläpp relativt utsläpp från konventionell bensin eller diesel. Spannmålsbaserad etanol bedöms leda till en klimatnytta mellan 63-71 % beroende på allokeringsmetod¹ [3]. Sockerbetsbaserad produktion bedöms leda till en klimatnytta om 74-80 %. Dessa två inhemska alternativ jämförs med importerad sockerrörsbaserad etanol från Brasilien, vilken beräknas ha en klimatnytta om 77-79 %. RME beräknas medföra en klimatnytta på 53-72 % beroende på både val av allokeringsmetod och typ av biprodukter [3]. De variationer som uppstår beror på val av beräkningsmetod där tre olika metoder tillämpades; systemutvidgning, energiallokering samt ekonomisk allokering².

I en senare studie från 2016 av Börjesson m.fl. beräknas också växthusgasprestanda för fler svenskproducerade biodrivmedel [4]. Enligt denna rapport beräknas biodrivmedlen HVO från tallolja respektive bio-metanol genom förgasningprocesser från lignocellulosa medföra en klimatnytta mellan 80-95 % beroende på processdesign [4].

Det finns med stöd i ovanstående rapporter en stor potential att reducera utsläpp av växthusgaser med hjälp av biodrivmedel. Vissa alternativ innebär högre reduktioner än andra när det kommer till enbart utsläpp. Däremot kan man istället studera andra faktorer, så som att ställa frågan hur kostnadseffektiva de olika alternativen framstår i förhållande till varandra. Detta diskuteras vidare i avsnitt 2.5.1.

2.2.2 Resurstillgångar

Förutom enbart utsläpp av växthusgaser och ekonomiska faktorer bör också resurstillgångar av biomassa undersökas för en överblick över möjliga produktionsvolymerna av biodrivmedel. Sverige har goda förutsättningar för en utökning av produktionen av biodrivmedel, något som omnämns i flera rapporter [2][4][5]. Enligt Börjesson [4] skulle under 2016 års förutsättningar produktionen av biomassa kunna öka med 40 till 50 TWh i årlig produktion, vilket skulle motsvara cirka 22 till 32 TWh biodrivmedel efter omvandlingsprocesser [4]. Denna mängd biodrivmedel motsvarar ungefär en tredjedel av dagens användning av både bensin och diesel för vägtransporter. Den svenska produktionen av biodrivmedel utgörs till största delen av dels socker- eller stärkelsebaserade råvaror (främst från vete och sockerbetor) eller oljebaserade råvaror, främst HVO från tallolja [1][4].

En överblick över hur resurseffektiviteten ser ut rörande biomassa till metanol presenteras av Landälv [5]. Beroende på hur processen ser ut och vilken typ av biomassa som konverteras, ser också omvandlingsfaktorer i form av energiutbyte olika ut. Ur rapporten framgår att bio-metanol har en omvandlingsfaktor mellan 50-70 % [5]. Omvandlingsfaktor är i detta fall ett mått på hur stor andel av biomassa kan framställas till metanol, uttryckt i energiinnehåll. Slutsatsen är att potentialen för metanoltillgångar kan uppgå till 20-60 TWh/år, vilket i relation till resultaten från Börjesson placeras i samma storleksordning.

Med en uppskattad potential av biodrivmedel om minst 20-30 TWh/år enligt studerade artiklar räcker denna summa till att ersätta ungefär en tredjedel av den fossila energin som idag används i transportsektorn. Genom ytterligare effektivisering och elektrifiering kommer däremot det totala energibehovet för vägtransporter kunna minskas drastiskt, och enligt utredningen *Fossilfrihet på väg* ställs rimliga samhällsscenarion upp där energibehovet av vägtransporter kan försörjas enbart på elektricitet och svenskproducerade biodrivmedel [2].

¹Allokering innebär i livscykelanalys att fördela de totala utsläppen på olika biprodukter och processer som ingår i livscykelanalysen utöver den huvudsakliga produkten som framställs.

²För vidare information om innebörden av allokeringsmetod hänvisas läsaren till litteratur rörande livscykelanalys, exempelvis ISO-standarderna rörande livscykelanalys (ISO 14040:2006).

2.3 Produktion av fordon

Traditionellt har produktionen av fordon bortsetts från rörande koldioxidutsläpp, något som uppmärksammats av Gradin [6]. Utförda analyser över fordons utsläpp under livscykelns varierar kraftigt, och en slutsats av Gradin är att mycket vikt bör läggas vid dragning av systemgränser under livscykelanalyser. Vid en jämförelse mellan olika drivlinor (vilket detta examensarbete ämnar att göra) är det inte lämpligt att begränsa påverkan till enbart användning och drift av fordon, utan också produktion av fordonet. För att undvika icke-optimala beslut bör man nyttja livscykelanalyser i den mån det är möjligt [6].

I en rapport från 2010 av Burnham m.fl. [7] gjordes en undersökning av utsläpp av växthusgaser under de primära produktionsfaserna för ett förbränningsmotorfordon på 1532 kg, där utsläppen uppgick till 2 ton CO₂-ekvivalenter per producerat fordon. Utöver detta beräknas också energiåtgången uppgå till knappt 34 MJ per fordon. Ungefär hälften av både energiåtgång och koldioxidutsläpp sker genom materialtransformation. Värt att notera är att dessa siffror enbart rör primära produktionssteg, och är betydligt begränsade av systemgränser där flera processer exkluderats ur analysen. I en senare studie från 2016 utförd av Qiao m.fl. [8] presenteras avvikande resultat jämfört med Burnham ovan. Växthusgasutsläpp under produktion från ett förbränningsmotorfordon beräknas här uppgå till 9,2 ton CO₂-ekv per fordon. En stor skillnad i denna studie är just dragningen av systemgränser, som i denna studie även inkluderar poster så som drivsystem, transmissioner och däck. Således tycks val av systemgränser vara av högsta signifikans och är en bidragande faktor till en skillnad på närmare en faktor 5 relativt den förstnämnda studien. Detta påvisar ytterligare vikten av transparens vid presentation av resultat från en livscykelanalys.

2.4 Produktion av batterier till elektriska fordon

I samma studie från föregående avsnitt (Qiao m.fl.) beräknas dessutom utsläppen under produktion av elektriska fordon. Detta resultat uppgår till 14,6 till 14,7 ton CO₂-ekv per fordon, och motsvarar 59-60 % högre utsläpp av växthusgaser jämfört med fallet för förbränningsmotorfordonet [8]. En stor anledning till de högre utsläppen var på grund av batteriproduktion, i detta fall Litiumjonbatterier (ofta förkortat LIB) vilken är den typiska tekniken som används i elektriska fordon i dagsläget [8]. I denna rapport uppgick denna summa till 2,8-2,9 ton CO₂, motsvarande en batterivikt på ca 200 kg batterier per fordon. Detta motsvarar 19-20% av de totala emissionerna av växthusgaser under produktionsfasen [8].

I en studie utgiven 2017 av IVL [9] som berör livscykelutsläpp från Litiumjonbatterier, presenteras ett resultat där specifika utsläpp av växthusgaser uppgår till 150-200 kg CO₂-ekv/kWh batteri. Fördelat på underprocesser står batteritillverkningen i form av bearbetning för ca 50 % av emissioner av växthusgaser, där elektroderna är de mest signifikanta faktorerna. Det hävdas dock att beroende på produktionsätt och framförallt läge av produktionsanläggning medför stora variationer av resultatet. Detta beror på till stor del av den höga mängd elektricitet som används under de olika produktionsprocesserna vilket innebär stora regionala skillnader i resultat [9]. Likt produktion av fordonet självt i föregående avsnitt (2.3) varierar också här resultatet från olika livscykelanalyser avsevärt beroende på metod och dragning av systemgränser snarare än fundamentala skillnader i produktionsätt såsom elektricitetsförsörjning. Samma studie lyfter även fram resultat från tidigare livscykelanalyser som varierar med så mycket som två storleksordningar (mellan 5 till 500 kg CO₂-ekv/kWh batterikapacitet) beroende på författare, men bedömer många resultat som icke trovärdiga då de baserats på ofullständiga metoder.

2.5 Ekonomiska förutsättningar

2.5.1 Biodrivmedel

En av de viktigaste frågorna att besvara är den kostnadsökning som ett byte från konventionella till biobränslen skulle innebära. Syftet med detta examensarbete är att undersöka det mest kostnadseffektiva sättet att reducera koldioxid under en livscykel, och trots stor påvisad klimatnytta av biodrivmedel krävs

information över hur kostnader för alternativa bränslen ser ut i dagsläget.

Flera befintliga och framtida produktionsmetoder av biodrivmedel visar enligt en studie av Börjesson hög energieffektivitet, god växthusgasprestanda och rimliga produktionskostnader [4]. Vid 2016 års priser låg produktionskostnader för bensin och diesel kring 4 kr per liter. Inklusive svensk koldioxidskatt höjs denna siffra till 7 kr per liter. Då volumetriskt energiinnehåll skiljer mellan olika bränslen, duger inte prissättning per liter för en korrekt jämförelse med biodrivmedel. Istället används jämförelsemåttet *per bensinekvivalent* för en rättvisare bild³. I samma rapport från Börjesson redovisas kostnaden för brasiliansk sockerrörsetanol till 5 kr per liter bensinekvivalent (inklusive transport). Svensk spannmålsbaserad etanol beräknas ligga kring 8 kr per liter bensinekvivalent. Vidare beräknas bränslen baserade på förgasningsprocesser och lignocellulosa ligga runt en kostnad av 7-8 kr per liter bensinekvivalent för de mest kostnadseffektiva koncepten [4].

En kostnadsmodell presenteras av Landälv där produktionskostnaden för metanol placeras mellan 64-98 Euro/MWh [5], vilket motsvarar cirka 6-9 kr per liter bensinekvivalent i dagens priser. Detta ställs i relation till produktionskostnaden för fossila drivmedel som påstås ligga runt 45 Euro/MWh (4 - 4.5 kr per liter bensinekvivalent). Slutsatsen dras att en ungefärlig premie på 40-50 % krävs för metanolproduktion för att den skall få slagkraft nog att konkurrera med fossil produktion [5]. I en senare rapport från 2017 från Chalmers görs en utförlig litteraturstudie som jämför produktionskostnaden för olika e-bränslen, däribland metanol [10]. På grund av stora variationer i processkoncept och produktionsmedel varierar resultatet stort, men kostnaden för att producera metanol uppskattas till 60-400 Euro/MWh med en lägre gräns i samma nivå som Landälvs resultat. Slutsatsen dras att de e-bränslen som är mest kostnadseffektiva att producera är metan, följt av metanol [10].

2.5.2 Elektrifiering och infrastruktur

I kontrast till föregående sektion 2.5.1 som behandlar frågor kopplade till direkt användning kan istället makroekonomiska faktorer som berör en storskalig reduktion av växthusgaser undersökas. I artikeln *Energy paths for road transport in the future* ställs tre olika framtidsscenarioer upp med syfte att ge en samhällsbild över hur ett koldioxidneutralt 2050 skulle kunna se ut i Tyskland [11].

De scenarion som presenteras är fordonssektorer drivna på: *100% Elektricitet*, *100% Vätgas* och *100% E-bränslen*. Dessa scenarion ställs sedan i relation till Tysklands nuvarande energiförbrukning i transportsektorn genom att beräkna investeringskrav som skulle behövas i ett sådant skifte. År 2018 förbrukade transportsektorn totalt 560 TWh/år i form av bränsleflöden [11]. Slutsatserna drogs att vid fallet med *100% Elektricitet* skulle det totala energikravet minska till 249-325 TWh/år p.g.a. förbättrad genomsnittlig verkningsgrad. I denna siffra är bl.a. överföringsförluster i elnätet medräknade. För fallet med *100% vätgas* skulle elenergibehovet ligga mellan 502-703 TWh/år, beroende på om elektrolys skulle utföras centraliserat eller lokalt vid separata tankstationer. Vid *100% e-bränslen* låg elenergibehovet på så högt som 625-1315 TWh/år, på stor grund av en betydande mängd CO₂-separation från atmosfären [11]. Vid en ekonomisk kalkyl på vad samhällskostnaderna skulle landa i för dessa tre scenarion, föll resultaten för *100% elektricitet*, *vätgas* och *e-bränslen* på €160 – 770 md, €160 – 850 md och €0 – 230 md i respektive ordning för investeringar i infrastruktur till följd av en förändrad fordonsflotta.

Dessa kostnader skulle slutligen fördelats på fordon under användning utöver övriga uppskattade kostnader motsvara:

- 29.4 – 45.1 € per 100 km för *100% elektricitet*-scenariot.
- 29.9 – 52.8 € per 100 km för *100% vätgas*-scenariot.
- 28.4 – 45.1 € per 100 km för *100% e-bränslen*-scenariot.

³Bensinekvivalent definieras som den volym av ett annat bränsle som motsvarar samma energimängd som en liter bensin.

I en annan studie från 2018, *Impact Analysis of Mass EV adoption and Low Carbon Intensity Fuels Scenarios*, undersöks liknande scenarion [12]. Här ställs istället tre olika scenarion upp och jämförs mot ett business as usual-scenarion. Det första bygger på en nästan fullständig användning av elbilar till en grad av 90% BEV:s (Battery electric vehicle), och det andra scenariot representerar en nästan fullständig användning av bio- och e-bränslen varvid det tredje är en mix av de två förstnämnda [12]. Enligt studien visade sig att samtliga tre scenarion medförde en minskning av livscykelemissioner av växthusgaser på över 83% mellan år 2015 och 2050. Den kumulativa kostnaden för BEV-scenariot uppgick till cirka €630 md medan den uppskattades till €326 md för fallet med bio- och e-bränslen [12].

2.6 Slutsatser litteraturstudie

Flera åtgärdsområden existerar för att reducera koldioxidutsläpp från transportsektorn. Oavsett om detta sker via elektrifiering eller via byte till biodrivmedel sker detta i de många fall på en bekostnad av såväl statliga som privata ekonomiska insatser. För en objektiv jämförelse mellan olika alternativ att reducera koldioxidutsläpp krävs dock en bred undersökning med rättvisa systemgränser och med stöd från flera studier för en korrekt överblick.

Biodrivmedel väntas innebära signifikanta reduktioner av växthusgaser, men är beroende på ett råvarubestånd av biomassa utöver kostnadsintensiva processer vilket riskerar en låg lönsamhet. Viss subventionering kan behövas för en slagkraft på marknaden, då produktionskostnaden för biodrivmedel överstiger de för fossila bränslen i dagsläget.

Elektrifiering har potentialen att eliminera direkta utsläpp fullständigt, men denna reduktion av utsläpp är istället helt beroende på den regionala elmixen. En storskalig satsning i infrastruktur kan också behövas för ett byte av energislag inom trafiksektorn utöver eventuella styrmedel för en ökad lönsamhet på grund av höga produktionskostnader för elektriska fordon.

3 Bred Systemanalys - Metodik

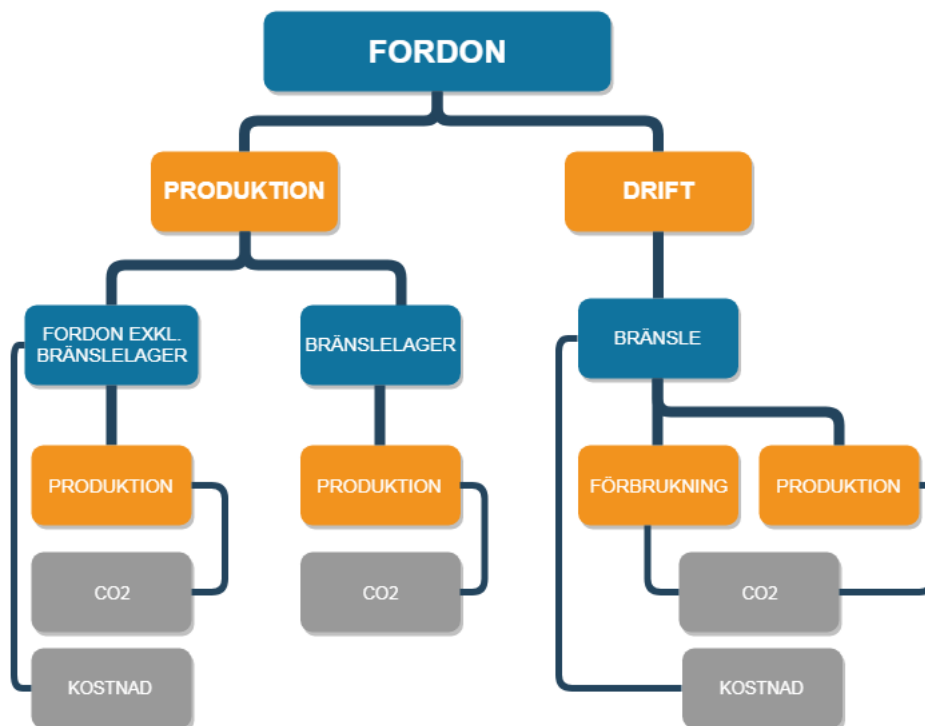
Metoden som ligger till grund för denna studie benämns som en *bred systemanalys*. Det finns idag mycket data inom berörda forskningsområden genom livscykelanalyser, men denna data är ofta specifik för just exempelvis batteritillverkning eller biodrivmedelsproduktion. Denna studie ämnar att sammanfatta existerande kunskap och tillämpa den under en hel livscykel för ett fordon i syfte att ge en bred blick av området. Denna existerande data kompletteras med egna utförda simuleringar för bränsleförbrukningar för olika drivlinor och motorer.

3.1 Systemgränser

De två påverkanskategorier som studeras i detta arbete är utsläpp av **växthusgaser** (benämnt CO₂-ekvivalenter) och **produktionskostnader**. I figur 1 ses ett processträd för inkluderade processer inom ett fordonets livscykel. Studerade delprocesser är:

- Produktion av fordon
 - Produktion av fordon inklusive drivlina
 - Produktion av bränslelager (batteri eller motsvarande)
- Drift av fordon
 - Produktion av bränsle
 - Förbrukning av bränsle

Enligt figur 1 innebär fordonsproduktion både utsläpp av växthusgaser och en produktionskostnad, medan batteritillverkning enbart innebär utsläpp av växthusgaser. Detta beror på svårigheten att särkoppla fordons- och batterikostnader för specifika fordonstillverkare. I själva verket bidrar självfallet batteritillverkning med en produktionskostnad, men denna kostnad tillskrivs fordonsproduktionen i denna studie. Slutligen medför bränsleförbrukningen både en produktionskostnad och utsläpp av växthusgaser.



Figur 1: Processträd beskrivande systemgränser och inkluderade underprocesser för det studerade fordonets livscykel.

3.2 Val av studerade drivlinor och bränslen

Tre typer av drivlinor inkluderas i denna studie. Två förbränningsmotorsfordon (ICEV, Internal Combustion Engine Vehicle) studeras; Otto- samt Dieselmotorer som båda antas kunna drivas på både fossila och biodrivmedel. Den tredje drivlinan är ett helelektriskt fordon (EV, Electric Vehicle). Val av inkluderade biodrivmedel och val av elektricitetsmix för det elektriska fordonet presenteras i tabell 1. Med dagens teknik antas en ottomotor anpassad för bensin kunna ersättas av biodrivmedlen etanol och metanol som bensinersättande drivmedel. För dieselmotorn studeras HVO och RME vilka antas kunna ersätta den fossila dieseln. Den elektriska drivlinan drivs av tre olika elmixar med varierande kraftkällor; svensk elmix, europeisk elmix samt ett motsvarande helt fossilt alternativt i form av kolkraft. Notera att samtliga val av förnybara drivmedel är biodrivmedel. Förnybara drivmedel existerar som inte räknas som biodrivmedel, exempelvis e-bränslen bestående av bland annat metanol från elektrolytprocesser. Denna studie begränsas däremot till enbart biodrivmedel.

Tabell 1: Beskrivning av val av drivlina och inkluderade bränslen i denna studie.

Bränsle	Motor	Beskrivning
1 - Bensin	Otto	Fossil råvara.
2 - Etanol (vete)	Otto	Etanol med svenskproducerad spannmål som råvara.
3 - Etanol (sockerbeta)	Otto	Etanol med svenskproducerad sockerbeta som råvara.
4 - Metanol	Otto	Bio-metanol baserad på förgasningsprocess från biomassa.
5 - Diesel	Diesel	Fossil råvara.
6 - HVO	Diesel	HVO med svenskproducerad tallolja som råvara.
7 - RME	Diesel	FAME med svenskproducerad raps som råvara.
8 - Svensk elmix	El	Svensk elmix bestående av främst vatten- och kärnkraft.
9 - Europeisk elmix	El	Europeisk elmix bestående av en mix av de flesta energikällor.
10 - Kolkraft	El	Kolkraft (pulveriserad), ~ 40 % verkningsgrad.

3.3 Avgränsningar

Två påverkanskategorier inkluderas i denna studie; **utsläpp av växthusgaser** och **produktionskostnader**. I praktiken bör fler miljöpåverkanskategorier såsom NO_x- och partikelutsläpp undersökas för en mer komplett beskrivning av miljöpåverkan från ett fordonets livscykel. På grund av dels tidsramen för detta examensarbete och dels tillgången på data, exkluderas dessa poster från denna studie. Det är därför av högsta vikt att läsaren har i åtanke att slutsatser gällande miljöpåverkan begränsas till enbart växthusgasutsläpp och produktionskostnader vilka är de mått som krävs för att besvara de frågeställningar som ställts.

Enbart *vissa biodrivmedel* studeras som bensin- och dieselsättande alternativ. Alternativt kan *förnybara drivmedel* studeras, exempelvis e-bränslen så som metanol tillverkat genom elektrolys från överskottselektricitet. Inkludering av sådan metanol skulle innebära en viss allokering av både koldioxidutsläpp och produktionskostnader från elproduktion, något som skulle öka komplexiteten och osäkerheter i resultaten avsevärt. Utöver e-bränslen exkluderas även *biogas* på grund av ökad komplexitet i både simuleringsmodellen och kostnadskalkylen. Biogas väntas däremot ha liknande klimatprestanda som studerade skogsbaserade drivmedel (HVO och metanol).

Hybrida eller plug-in-hybrida fordon inkluderas enbart som uppskattningar som en känslighetsanalys i denna studie. Ingen detaljerad modell ställs upp för en hybrid drivlina på grund av en ökad komplexitet i den simulering som utförs. Det skulle kräva dels invecklade strategier i reglerteknik för att bibehålla laddtillstånd, och dels transienta effekter då övergång mellan förbrännings- och elmotor sker.

Enbart produktion och drift av fordon studeras. Underhåll under driftsfasen exkluderas och även skrotning/avveckling av fordon exkluderas. Istället behandlas eventuellt underhåll indirekt i en känslighetssanalys genom varierande totala körsträckor (15 000 till 25 000 mil) under livscykeln vilket motsvarar den sträcka ett fordon ska kunna förväntas färdas innan omfattande underhåll skall behöva utföras.

Valet av att undersöka *produktionskostnad* istället för exempelvis *försäljningskostnad* för både bränsle och fordon motiveras med att möjliggöra ett stöd för beslutsfattare för styrmedel. Genom att exkludera styrmedel såsom koldioxid- och energiskatt ges en bild över hur kostnadseffektiva olika alternativ är utan statlig inverkan. Det medför också att resultat från denna studie *inte* bör användas i något annat syfte än att studera kostnadseffektivitet i produktion. Privata kostnader ligger utanför ramen för detta arbete.

4 Standardmodell av fordon

För att möjliggöra en jämförelse mellan el- och förbränningsbilar krävs en modell som återspeglar samma ändamål för fordonet, oavsett val av drivlina. I denna studie undersöks därför en *standardmodell* av ett fordon som specificerar bland annat vikten av fordonet för en rättvis jämförelse. Data från de mest sålda bilarna i Sverige ligger till grund för denna standardmodell.

4.1 Försäljningssiffror Sverige

Det totala antalet nyregistrerade bilar i Sverige uppgick under 2018 till strax under 354.000 fordon. Att basera en modell för hur den tekniska specifikationen för en typisk personbil ser ut kan medföra svårigheter då stora variationer i vikt, drivlina, ändamål etc. skiljer sig åt avsevärt mellan alla de fordon som nyregistrerats. Därför undersöks de mest sålda fordonen som i sin tur återspeglar marknadstrender i helhet. Andelen sålda fordon efter marknadsandelar beskrivs nedan i enlighet med statistik från BIL Sweden [13]:

Urval: Marknadsandelar av nyregistrerade personbilar i Sverige 2018.

- 6.88% - Volvo S/V90
- 4.83% - VW Golf
- 4.64% - Volvo S/V60
- 3.86% - VW Passat
- 3.76% - Volvo XC60

Urval: Marknadsandelar av nyregistrerade elbilar i Sverige 2018.

- 25.85% - Nissan Leaf
- 23.49% - Renault Zoe
- 12.48% - Tesla Model S
- 8.56% - VW E-Golf
- 8.20% - BMW i3

För en rättvis jämförelse mellan dessa två fordonsgupper krävs en beskrivning av vilka parametrar som är gemensamma för de två grupperna, och vilka som skiljer sig åt. Relevanta fordonsparametrar för de fem konventionella- samt elektriska fordonen presenteras i tabell 2 och 3 i respektive ordning.

Tabell 2: Specifikationer för topp 5 sålda **personbilar** i Sverige. Variationer kan förekomma i vikt, pris och effekt och varierar beroende på utrustningsgrad, val av motor och typ av växellåda. Siffror inom parentes avser typisk dieselbaserad drivlina kontra bensin.

Modell:	Volvo S/V90	VW Golf	Volvo S/V60	VW Passat	Volvo XC60
Marknadsandel [%]	6,88	4,83	4,64	3,86	3,76
Tjänstevikt [kg]	1800-2150	1241 (1369)	1680-2020	1450 (1517)	1766-2118
Slagvolym [liter]	2.0	1.0-1.5 (2.0)	2.0	1.8 (2.0)	2.0
Effekt [kW]	245 (140)	110	184	132 (140)	184 (140)
Kommunicerat pris från: [SEK]	409.800	209.900	327.900	273.900	358.900

Tabell 3: Specifikationer för topp 5 sålda **elbilar** i Sverige. Variationer kan förekomma i vikt, pris, effekt och lagringskapacitet och varierar beroende på utrustningsgrad av fordon.

Modell:	Nissan Leaf	Renault Zoe	Tesla Model S	VW E-Golf	BMW i3
Marknadsandel [%]	25,85	23,49	12,48	8,56	8,20
Tjänstevikt [kg]	1557	1473	2215	1615	1345-1423
Lagringskapacitet [kWh]	40	41	100	36	42
Effekt [kW]	150	41-80	362	100	125
Kommunicerat pris från: [SEK]	387.400	252.990	879.300	428.900	419.000

4.2 Valda värden

Tabell 4 visar de valda värdena som använts i denna studie. Med stöd i de svenska försäljningssiffror som presenteras i tabeller 2 och 3 baseras denna studien på kostnadsmodellen av en Volkswagen Golf, som finns som både bensin-, diesel- och elektrisk drift. Tabell 4 visar de viktigaste parametrarna som har både direkt och indirekt påverkan av resultaten CO₂-utsläpp och kostnad under livscykeln, som även de baseras på svenska försäljningstrender. Notera även att samtliga parametrar inte är baserade på den av en VW Golf/E-golf, utan är valda enligt vad som skall återspegla marknaden bäst.

De resultat som senare presenteras i sektion 8 baseras på tabell 4 om inget annat anges.

Tabell 4: Valda värden i denna studie för ett urval av parametrar som påverkar CO₂-utsläpp och kostnad under livscykel.

Parameter	Denna studie	Påverkar	
Total körsträcka	20.000 mil	Bränsleförbrukning	(ICEV, EV)
Vikt av fordon	1600 kg	Bränsleförbrukning	(ICEV, EV)
Batterikapacitet	40 kWh	Produktion fordon (CO ₂)	(EV)
Slagvolym	2.0 liter	Bränsleförbrukning	(ICEV)
Prismodell	VW Golf/E-Golf	Produktion fordon (kronor)	(ICEV, EV)

5 Simulering av bränsleförbrukning

Denna studie ämnar att jämföra förbränningsbaserade och elektriska drivlinor efter samma förutsättningar. Genom att utföra en självständig simulering skapas möjligheten att själv variera fordonparametrar såsom vikt, bränsletyp eller luftmotstånd för att undersöka deras påverkan på fordonets bränsleförbrukning och därmed också koldioxidutsläpp. Alternativet är att istället studera extern data för bränsleförbrukningar från fordon i trafik idag, men studien skulle då begränsas genom att förlora möjligheten till en känslighetsanalys. Den simulering som utförs i denna studie baseras på körcykeln WLDC och ämnar jämföra bränsleförbrukningar för både ett förbränningsbaserat- såväl som ett elektriskt fordon.

5.1 Data från standardmodell

5.1.1 Valda värden till simulering

Även om drivlinan mellan ett elektriskt och ett förbränningsbaserat fordon skiljer sig, finns det flera gemensamma parametrar som påverkar bränsleförbrukning. De parametrar som i denna studie antas vara gemensamma för ett fordon är:

- Körcykel och körmönster
- M_v , vikt av fordon
- A_v , aerodynamisk frontarea
- C_d , luftmotståndskoefficient
- C_r , rullmotståndskoefficient
- O_{hjul} , omkrets av hjul

Utöver dessa parametrar följer ett antal ytterligare parametrar för förbränningsmotorn som påverkar bränsleförbrukningen. De parametrar som inkluderas i denna modell är: **Slagvolym** (V_d), **växellåda med utväxlingsförhållanden** samt **växlingsstrategi**.

Samtliga parametrar inklusive de specifika för förbränningsmotorer grundas på den standardmodell av fordon som beskrevs i sektion 4. De valda utgångsvärdena som simuleringen utgår ifrån presenteras i tabell 5. Val av växellåda (utväxlingsförhållande) samt växlingsstrategi sker i sektion 5.4 där en detaljerad beskrivning över förbränningsmotorns specifikationer ges.

Tabell 5: Valda värden för parametrar som påverkar ett fordons bränsleförbrukning.

Parameter	Vald enhet
Körcykel	WLDC
M_v	1600 kg
A_v	2.0 m ²
C_r	0.010
C_d	0.27
O_{hjul}	2.0 m
Slagvolym ⁴ , V_d	2.0 l

5.1.2 Värmevärden för drivmedel

De studerade drivmedlen uppgår till bensen, etanol, metanol, diesel, HVO, RME samt elektricitet. Data för lägre värmevärde (LHV, Lower Heating Value) uttryckt i volumetriskt förhållande kommer användas under simuleringen för att beräkna bränsleförbrukning. I tabell 6 presenteras de valda värdena för värmevärde enligt data från Energimyndigheten [1], [14].

⁴Gäller enbart för förbränningsmotor.

Tabell 6: Valda värmevärden (LHV) för de studerade bränslena i simuleringen.

Bränsle	LHV (MJ/liter)
Bensin	32.4
Etanol	21.3
Metanol	15.8
Diesel	35.9
HVO	34.0
RME	33.1

5.1.3 Exkluderade parametrar

Värme, ventilation och luftkonditionering exkluderas ur simuleringen på grund av en ökad komplexitet och en försvårad jämförelsemodell. Däremot kan temperaturreglage i fordon uppgå till en väsentlig del av ett fordon bränsleförbrukning. Hayes uppskattar i en studie från 2011 att den maximala värmelasten för ett elektriskt fordon kunde uppgå till 6 kW extra effektbehov vid väldigt kalla förhållanden [15]. Luftkonditionering (AC) skulle enligt samma studie potentiellt kunna stå för 6 kW under varma förhållanden. Exkludering av denna post har större inverkan på elektrisk drift än på förbränningsbaserade fordon då en förbränningsmotor alstrar spillvärme som återvinns till värme i kupén.

Elektrisk utrustning så som datorer, generatorer och ECU har exkluderats ur studien på grund av en ökad komplexitet och brist på tillgänglig data för en representativ modell.

Tomgångskörning exkluderas för förbränningsbaserade drivlinor. De stopp och tomgångskörningar som körcykeln innebär antas hanteras av en start-stop-funktion på fordonet. Detta innebär att bränsleförbrukning under stillastående faser under körcykeln antas vara noll. Däremot inkluderas friktion i simuleringen som är en signifikant faktor till ökad bränsleförbrukning under delbelastning av motorn.

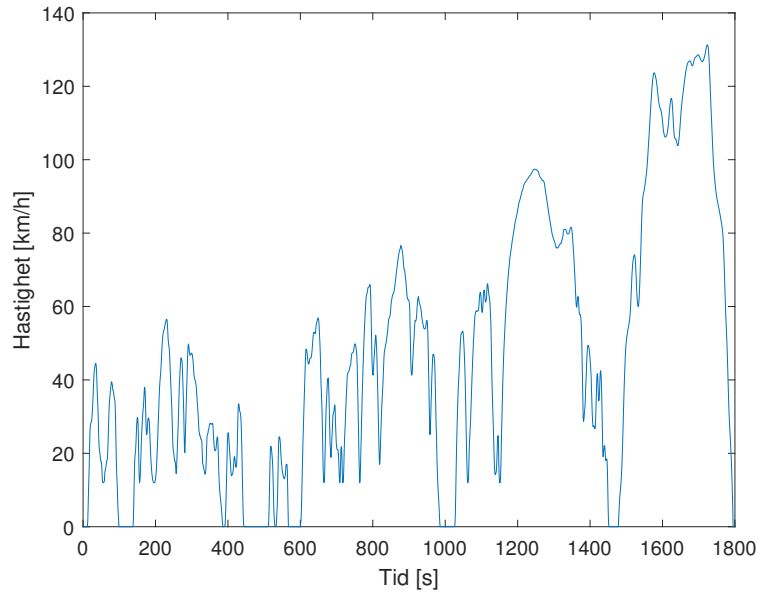
5.2 Körcykel: WLTP

Från och med september 2018 måste alla nyregistrerade bilar som säljs vara testade enligt testproceduren 'Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure' (WLTP) [16]. Detta test ersätter den tidigare 'New European Driving Cycle' (NEDC) som metod att bedöma ett fordon bränsleförbrukning och koldioxidutsläpp. Den körcykel som används under WLTP benämns WLDC (DC för Driving Cycle), och kommer ligga till grund för den körcykel som används i denna studie.

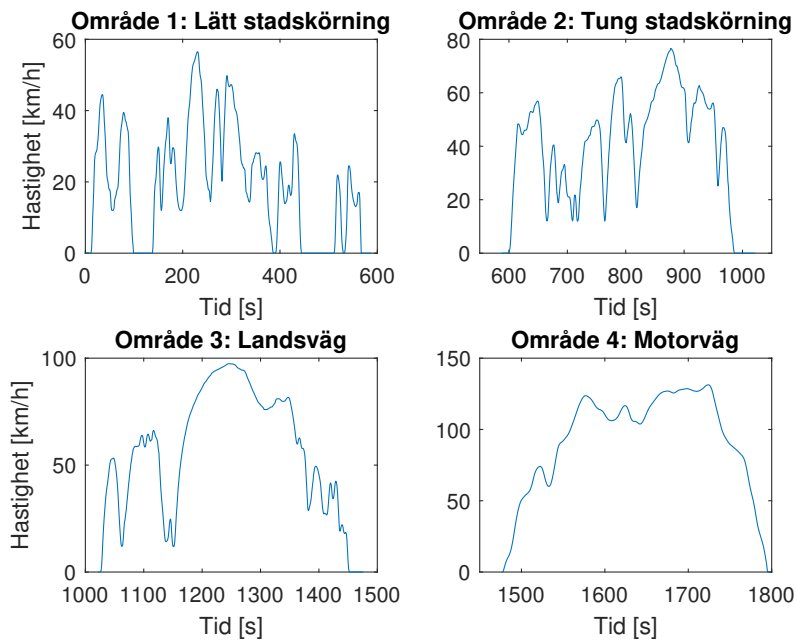
WLDC är uppdelad i fyra huvudområden som i sin tur representerar körning i tätort 52 % av tiden och landsväg 48 % av tiden. Denna studie benämner de fyra områden enligt följande:

1. Lätt stadskörning/Stadskörning 1, med maxhastighet 57 km/h
2. Tung stadskörning/Stadskörning 2, med maxhastighet 77 km/h
3. Landsväg, med maxhastighet 97 km/h
4. Motorväg, med maxhastighet 131 km/h

Körcykeln pågår under 30 minuter (1800 sekunder) och är uppdelad i sekundsintervall, resulterande i totalt 1800 datapunkter. Denna data ligger till grund till de beräkningar som kommer ske genom hela simuleringen, och som beteckning för aktuell datapunkt används **index** *i* motsvarande aktuellt tidsintervall. I figur 2 presenteras hastighetsprofilen mot förfluten tid vid körning efter körcykeln WLDC. Vidare presenteras uppdelningen av de fyra faserna i figur 3.



Figur 2: Momentana hastigheter under den 30 minuter långa körcykeln WLDC.

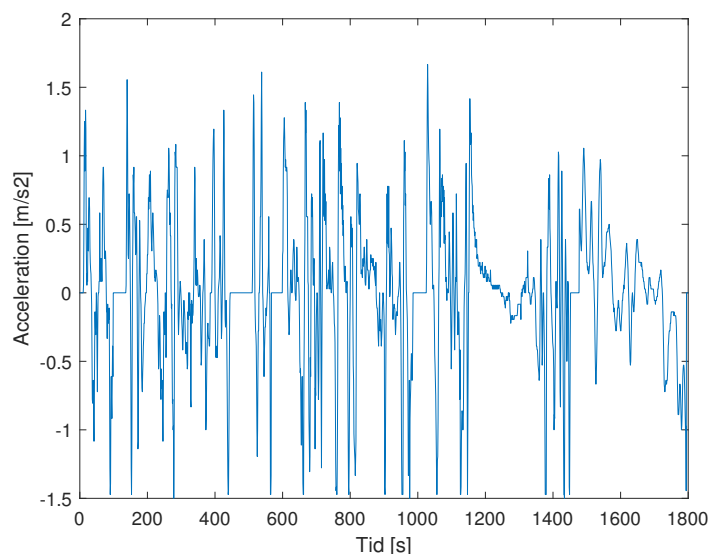


Figur 3: Momentana hastigheter för körcykeln WLDC uppdelat i de fyra faserna 'Lätt-' respektive 'Tung stadskörning', 'Landsväg' och 'Motorväg'.

En utveckling av denna körcykel görs genom att beräkna den acceleration som krävs under varje tidsintervall för att följa körcykeln. Genom ekvation 1 kan den momentana accelerationen beräknas där $a(i)$ är accelerationen i aktuell datapunkt, $v(i)$ hastigheten i aktuell punkt, $v(i + 1)$ hastigheten i nästkommande punkt och slutligen Δt som är skillnad i tid. Notera att $\Delta t = 1$ sekund för varje tidsintervall.

$$a(i) = \frac{v(i + 1) - v(i)}{\Delta t} \quad (1)$$

Figur 4 visar hur accelerationen förhåller sig till förfluten tid under körcykeln, med en maximal acceleration och retardation på cirka $\pm 1.5 \text{ m/s}^2$



Figur 4: Acceleration-tidsdiagram för WLTP-körcykeln.

5.3 Fordonsdynamik

5.3.1 Effektbehov

Ett fordons bränsleförbrukning är direkt kopplat till den energi som krävs för att driva ett fordon enligt en angiven körcykel. Den energi (och därmed effekt) som krävs för att följa körcykeln är beroende av både *hastighet* och *acceleration*, tidigare illustrerade i figurer 2 respektive 4.

Accelerationen påverkar förändringen i rörelsemängd som fordonet utsätts för, och beskrivs i ekvation 2, där m_V är vikten av fordonet, a den momentana accelerationen, v den momentana hastigheten vilka både erhålls från WLTP-körcykeln. Resultatet P_{acc} motsvarar den momentana effekt som krävs för att följa körcykeln för ett givet tidsintervall på grund av ändring i rörelsemängd.

$$P_{acc} = m_V \cdot a \cdot v \quad (2)$$

Det är inte enbart ändring av rörelsemängd som kräver bränsle, utan rull- och luftmotstånd kräver också en signifikant energimängd bränsle. Ekvation 3 beskriver sambandet mellan den effekt som krävs för att motverka dessa motstånd (P_{rull}) vilken beror på följande parametrar: C_r (rullmotståndskoefficient), m_V (vikt av fordon), g (gravitationskonstant), ρ (densitet av luft), A_V (aerodynamisk frontarea), C_d (luftmotståndskoefficient) och slutligen v , momentan hastighet som erhålls från körcykeln.

$$P_{rull} = (C_r \cdot m_V \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_V \cdot C_d \cdot v^2) \cdot v \quad (3)$$

Datan till den körcykel som studeras är inte kontinuerligt beskriven, utan som tidigare nämnt begränsad till 1800 *sekunds*-intervall indexerade som 'i'. Den metod som används i denna studie är således att tillämpa ekvationer 2 och 3 på varje enskilt element, alltså varje sekundsintervall av körcykeln.

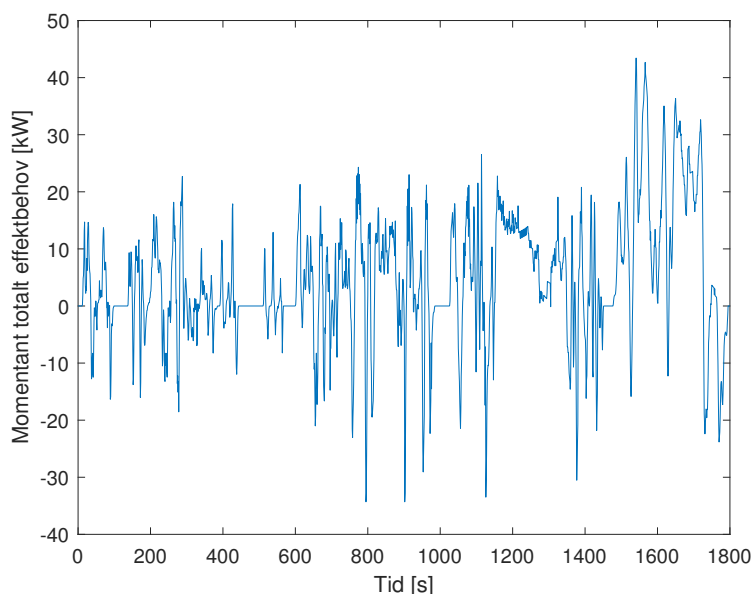
Den totala momentana effekten som krävs för att både följa körcykelns hastighet (samt att motverka rull- och luftmotstånd) är summan av de två effekterna för varje sekund under körcykeln. Uttrycket för totalt effektbehov beskrivs av ekvation 4, där i motsvarar indexering av tidsvektorn och P_b står för den bromsade effekten⁵. Inkluderat i denna modell är också friktionsförluster i drivlinan genom drivlinans verkningsgrad

⁵Bromsad effekt innebär den effekt som alstras från motor i drevet efter interna förluster i förbränningsmotorn, men exklusive övriga friktionsförluster i drivlinan.

η_{DL} . Drivlinan antar i simuleringen ha en konstant verkningsgrad om $\eta_{DL} = 93\%$, oberoende av varvtal eller last.

$$P_b(i) = \frac{P_{acc}(i) + P_{rull}(i)}{\eta_{DL}} \quad (4)$$

Baserad på dessa antaganden om effektbehov samt data från de gemensamma parametrarna för förbränningsmotorfordon och elektriska fordon, kan slutligen ett totalt effektbehov för varje tidsintervall bestämmas. Resultatet presenteras i figur 5 som beskriver det totala effektbehovet vid körning efter WLTP-körcykeln för ett fordon specificerat i sektion 5.1.1. Notera att effektbehovet till och från är negativt. Detta är på grund av den effekt som krävs av bromsar under inbromsning av fordonet. Denna energi går traditionellt förlorad i en förbränningsmotor, och kräver regenerativ bromsningsteknik för att återvinna.



Figur 5: Totalt momentant effektbehov vid körning efter WLTP-körcykeln för ett fordon specificerat i sektion 5.1.1.

5.3.2 Från effektbehov till bränsleförbrukning

Hade en drivlina existerat utan förluster och med 100% verkningsgrad, hade effektbehovet i ekvation 4 och i figur 5 motsvarat det nödvändiga bränsleflödet exakt. Däremot existerar ingen sådan drivlina, utan verkningsgraden är betydligt begränsad och starkt beroende på vilket typ av teknik av drivlina som tillämpas.

Den modell som ställs upp i denna studie görs på grunden att beräkna den *bromsade verkningsgraden* (benämnd η_b) i varje sekundsintervall. Verkningsgraden antas vara variabel och bero på två parametrar: Vridmoment och varvtal. Detta antagande görs på både den förbränningsbaserade- och elektriska drivlinan. Den bromsade verkningsgraden antas således vara en funktion av **vridmoment** (T) och **varvtal** (N) för både en förbränningsbaserad- och elektrisk drivlina, uttryckt i ekvation 5.

$$\eta_b(i) = f(T(i), N(i)) \quad (5)$$

För att erhålla en bränsleförbrukning, krävs alltså både kunskap om både vridmoment och varvtal under varje tidsintervall. Dessa två enheter tillsammans benämns som motorns *driftspunkt*. Ekvation 5 är ett samband som inte kommer beräknas självständigt i denna studie, utan kommer snarare bygga på existerande kunskap om samband mellan driftspunkt och verkningsgrad. Detta beskrivs mer i detalj i sektioner 5.4 och 5.5.

Med antagandet att η_b definieras som verkningsgraden från effekt i bränsleflöde ($P_{\text{bränsle}}$) till nyttig effekt (P_b) kan ekvation 6 nedan erhållas,

$$P_b = P_{\text{bränsle}} \cdot \eta_b \quad (6)$$

vilket ger sambandet i ekvation 7:

$$P_{\text{bränsle}} = \frac{P_b}{\eta_b} \quad (7)$$

Vidare summeras effekten i samtliga bränsleflöden ($P_{\text{bränsle}}$) för varje tidsintervall för att erhålla den totala bränsleförbrukningen (uttryckt i energienhet) som krävs under hela körcykeln genom ekvation 8. Notera att Δt är konstant = 1 sekund för samtliga värden av i .

$$E_{\text{bränsle}} = \sum_{i=1}^{1800} P_{\text{bränsle}}(i) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Slutligen kan ekvation 5, 7 och 8 utvecklas vidare till ekvation 9. Slutsatsen är att bränsleförbrukningen påverkas av tre variabler: Den momentana bromsade effekten (P_b), vridmoment (T) samt varvtalet (N).

$$E_{\text{bränsle}} = \sum_{i=1}^{1800} \frac{P_b(i) \cdot \Delta t}{\eta_b(T(i), N(i))} \quad (9)$$

Så här långt kan en förbränningsbaserad och elektrisk drivlina jämföras enligt samma modell. Fundamentala skillnader mellan de två drivlinorna existerar däremot, och kräver separata beskrivningar för både driftspunkter och verkningsgrader. Vidare utveckling sker i sektioner 5.4 och 5.5.

5.4 Förbränningsmotor

5.4.1 Varvtal

För en modell av varvtalet utnyttjas sambandet mellan att varvtal av motor och varvtal av hjul har specificerade utväxlingsförhållanden beroende på vilken växel som är aktiv. Varvtalet för hjulen står så klart i direkt relation till fordonets hastighet, vilket innebär att ett förhållande mellan motorns varvtal och fordonets hastighet kan bestämmas så länge utväxlingsprofilen är känd. Som växellåda används en 6-växlad manuell växellåda med utväxlingsförhållande enligt en Volvo V60 från 2018 års modell [17]. Hjulen antas vara 2 meter i omkrets. Utväxlingsförhållandet presenteras i tabell 7.

Tabell 7: Utväxlingsförhållanden för den använda fordonsmodellen. Baserad på en 6-växlad låda från Volvo V60 (2018) [17].

Växel	Utväxlingsförhållande
1	3.385
2	1.952
3	1.267
4	0.868
5	0.652
6	0.540
Final Drive	4.267

Vidare bestäms en växelstrategi för att variera den aktuella växeln till vilken hastighet som fordonet har. I tabell 8 presenteras i vilka hastighetsintervall som vilken växel används. Intervallen är manuellt valda av författaren till denna studie för att bibehålla varvtalet i den region där motorns verkningsgrad är som högst. Detta skall återspegla ett bränslesparande körsätt.

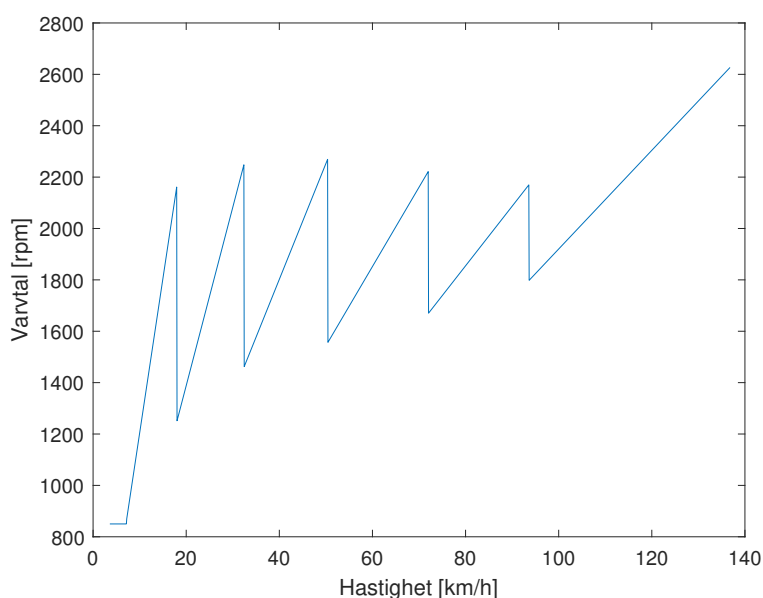
Tabell 8: Växlingsstrategi för olika hastigheter.

Hastighet (km/h)	Vald växel
Under 18	1
18 - 32	2
32 - 50	3
50 - 72	4
72 - 94	5
Över 94	6

Förhållandet mellan hastigheten av fordon och varvtal kan med denna data slutligen uttryckas enligt ekvation 10 där N är varvtalet i varv per minut [rpm], v är hastigheten [m/s], GR är utväxlingsförhållandet (Gear Ratio) för den aktuella växeln och O_{hjul} är hjulens omkrets [m].

$$N(i) = 60 \cdot \frac{v(i) \cdot \text{GR}(v)}{O_{\text{hjul}}} \quad (10)$$

Utöver detta förhållande är ett villkor definierat för hantera varvtalet vid tomgång. Varvtalet är definierat att inte understiga 850 rpm vid tomgång och låga hastigheter. En illustration av hur varvtalet enligt ekvation 10 förhåller sig till fordonshastigheter presenteras slutligen i figur 6.



Figur 6: Varvtal mot hastighet för växelprofilen definierad i ekvation 10.

5.4.2 Vridmoment

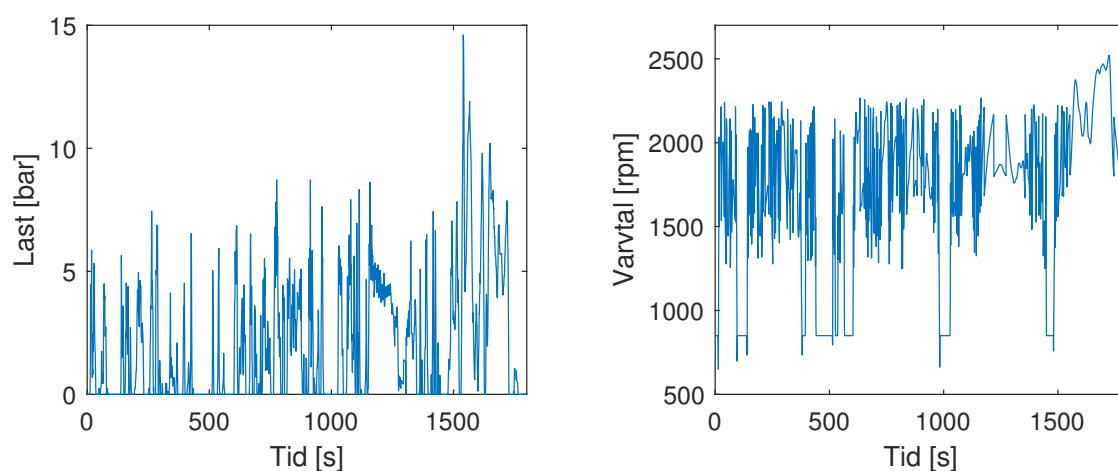
Vridmomentet bestäms utifrån den bromsade effekt (P_b) som tidigare beräknats. Vridmoment är däremot inom förbränningsmotorer ett mått som varierar beroende på motorns slagvolym, och kan medföra komplikationer vid jämförelser mellan olika motorer. Därför används i regel istället måttet 'Mean Effective Pressure (MEP)', eller *medeltryck* på svenska. Det är istället ett mått på det tryck som verkar på kolven, och är proportionellt mot vridmomentet. *Break Mean Effective Pressure (BMEP)* är det mått används i denna studie, och översätts till bromsat medeltryck på svenska. Måttet benämns också som *last* i ett mer vardagligt språk. Uttrycket för BMEP beskrivs enligt ekvation 11 och är en funktion av bland annat den bromsade effekten (P_b), slagvolym (V_d), och varvtal (N). Konstanten n_T är en korregeringsfaktor som är $= 2$ för en fyrtakts- och $= 1$ för en tvåtaktsmotor.

$$\text{BMEP} = \frac{P_b \cdot n_T}{V_d \cdot N} \quad (11)$$

Två parametrar i höger led i ekvation 11 anses variabla under drift, P_b och N . Bromsad effekt (P_b) är känt från profilen för effektbehov illustrerad i figur 5, och varvtalet (N) är känt från tidigare härledning från ekvation 10 som illustrerats i figur 6. Vidare görs antagandet att då P_b är negativt (d.v.s. då motorn inte utför något arbete) bedöms detta medföra ett $\text{BMEP} = 0$ vilket innebär motorbromsning. Med dessa antaganden kan nu BMEP bestämmas för varje tidsintervall i enligt ekvation 12:

$$\text{BMEP}(i) = \frac{P_b(i) \cdot n_T}{V_d \cdot N(i)} \quad (12)$$

All information som krävs för att beräkna samtliga driftpunkter finns nu tillgänglig. I figur 7a och 7b presenteras resultatet över hur last (BMEP) respektive varvtalet (N) resulterar vid körning efter WLTP-körcykeln.



(a) *BMEP (Last) mot tid vid körning efter WLTP-körcykeln för studiens specificerade fordon.* (b) *Varvtal mot tid vid körning efter WLTP-körcykeln för studiens specificerade fordon.*

Figur 7

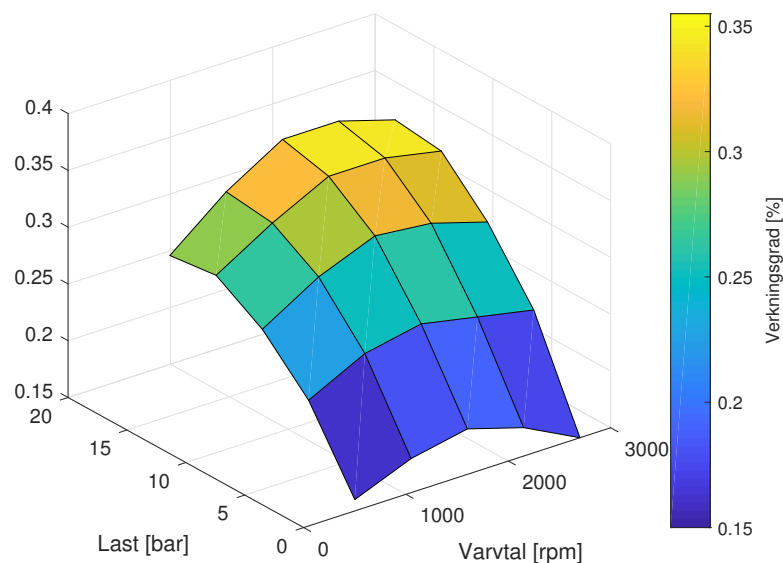
5.4.3 Verkningsgrad: Ottomotor

Med driftpunkter fastställda är det sista som krävs en beskrivning över hur verkningsgraden förhåller sig till dessa driftpunkter. En så kallad verkningsgrads-*mussla* eller *-karta*⁶ brukar användas för att beskriva ett tvådimensionellt samband mellan verkningsgrad och två parametrar, i detta fallet last (vridmoment) och varvtalet. Den modell som används i denna studie är baserad på tre SAE-artiklar som beskriver sådana kartor för bensin- respektive dieselfordon: Brusstar [18], Middleton [19] samt Naganuma [20] med utgivna årtal 2002, 2016 och 2012 i respektive ordning.

Exakt data för en sådan karta är ytterst specifik för en speciell motortyp, och varierar stort beroende på slagvolym, överladdning, ventilprofiler med mera. Målet med denna studie är att uppskatta en karta, representativ för en standardiserad motor som finns i dagens fordon som baseras på existerande kunskap. Den valda metoden som används i denna studien är att ha utgått från de tre ovannämnda artiklarna och valt 25 driftpunkter i tre olika kartor, samlade i en 5×5 -matris.

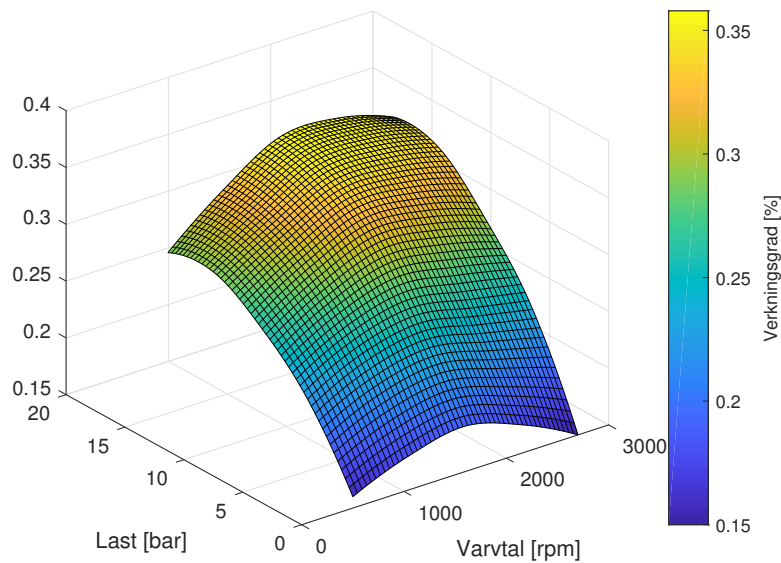
⁶Översatt från originalspråk engelska: Efficiency map

Datan är manuellt vald av författaren till denna studien, baserad på ett genomsnitt av en ottomotor med hög verkningsgrad (Middleton, 2016) och en ottomotor med låg verkningsgrad (Naganuma, 2012). Värdena till kartan är valda för att återspegla en modern bensinmotor med en relativt hög topp-verkningsgrad och en dellast-verkningsgrad vilken skall återge användning av EGR (Exhaust Gas Recirculation). Detta görs genom att anta att dellast-verkningsgraden följer en dieselmotors verkningsgrad, men med några procentenheter under dieselmotorns karta (Brusstar, 2002). Resultatet från inläsning av data presenteras i figur 8 vilken illustrerar verkningsgraden för den valda verkningsgrads-kartan som funktion av olika kombinationer av last och varvtal. Denna karta har en topp-verkningsgrad om 36 % och resulterar i en cykel-verkningsgrad om 26 % vid körning enligt WLTP-körcykeln efter den fullständiga simuleringen. Dessa värden av verkningsgrader anses återspegla en bensinmotor som finns i dagens personbilar väl. I bilaga A presenteras en utökad beskrivning av de kartor som använts, och även en känslighetsanalys över hur resultatet påverkas beroende på olika val av kartor eftersom denna karta har en stor inverkan på den resulterande bränsleförbrukningen.



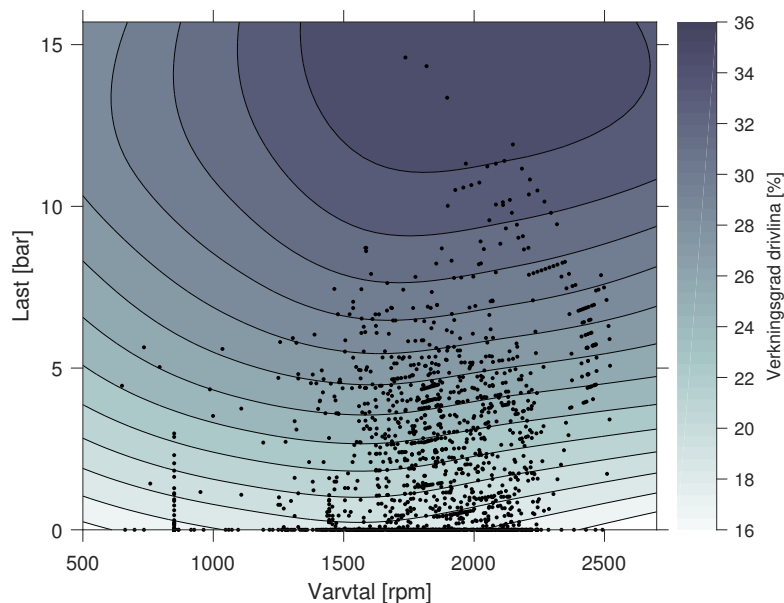
Figur 8: Illustrering av valda nivåer för verkningsgrader för den valda Otto-motorn beroende på parametrarna last (BMEP) och varvtal, benämnd som en verkningsgrads-karta.

Vidare görs en 2D-interpolering på datan från figur 8 i syfte att öka antalet datapunkter. I figur 9 presenteras en interpolerad version av den framtagna 5×5 -matrisen till en 30×30 -matris genom metoden **interp2** i MATLAB. Denna interpolation kan utökas till ännu högre upplösning, dock på bekostnad av en längre simuleringstid.



Figur 9: Den verkningsgrads-karta som illustrerats i figur 8 där MATLAB-funktionen *interp2* applicerats för att utöka antalet datapunkter från 25 till 900 stycken.

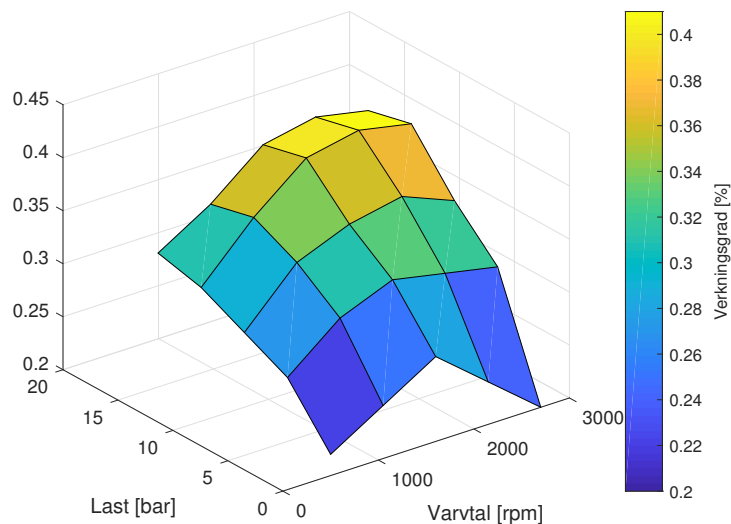
Slutligen presenteras i figur 10 samtliga 1800 driftpunkter i denna verkningsgrads-karta. Denna illustration ger en tydlig överblick av vilka verkningsgrader som är mest förekommande och hur väl motorn utnyttjas i en relativt varierad körcykel. Mycket vikt bör läggas vid att det är många faktorer som påverkar utfallet; allt från fordonsvikt, utväxlingsförhållanden, slagvolym till växlingsstrategi har stor inverkan på spridningen av dessa driftpunkter.



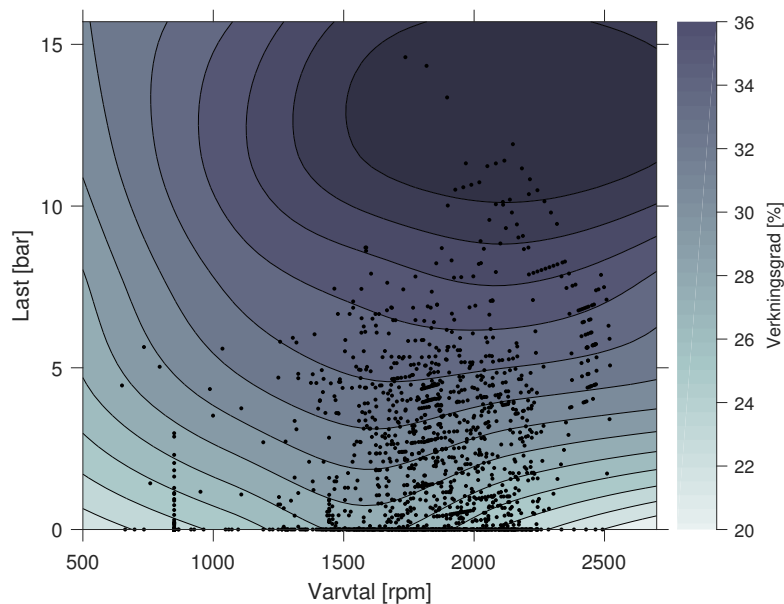
Figur 10: Samtliga driftpunkter från WLTP-körcykeln med verkningsgradskonturer för den specificerade Otto-motorn.

5.4.4 Verkningsgrad: Dieselmotor

Dieselmotorn är framtagen med samma metod som den för Ottomotorn, och baseras på en verkningsgradskarta med en toppverkningsgrad på 41 % och en cykel-verkningsgrad om 33 % vid körnings enligt WLTP-körcykeln enligt Brusstar [18]. Läsaren uppmanas till att jämföra dessa två värden med den ottomotor som studerades i föregående avsnitt, där motsvarande värden för verkningsgrader var något lägre. Denna skillnad i verkningsgrad mellan otto- och dieselmotorer är förväntad, och anses återspegla dagens motorer väl. Resultatet för verkningsgradskartan för dieselmotorn (utan interpolering) presenteras i figur 11 och driftpunkterna med verkningsgradskonturer presenteras i figur 12.



Figur 11: Valda nivåer för verkningsgrader för den valda Dieselmotorn beroende på parametrarna last (BMEP) och varvtal, benämnd som en verkningsgradskarta.



Figur 12: Samtliga driftpunkter från WLTP-körcykeln med verkningsgradskonturer för den specificerade Dieselmotorn.

5.5 Elektriskt fordon

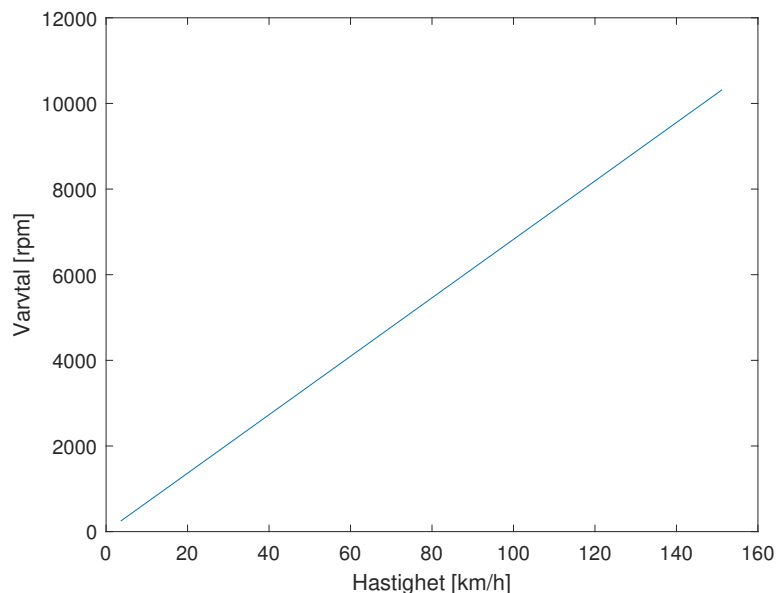
Likt förbränningsmotorn kommer också den elektriska drivlinan kräva både vridmoment och varvtal för att erhålla verkningsgraden η_b i varje driftspunkt.

5.5.1 Varvtal

Varvtalet beräknas betydligt enklare för en elbil än av en förbränningsbaserad drivlina. Anledningen är avsaknaden av en mekanisk växellåda i en typisk elbil. Således kan en förenklad version av ekvation 10 härledas, nu istället med ett konstant utväxlingsförhållande GR:

$$N(i) = 60 \cdot \frac{v(i) \cdot GR}{O_{hjul}} \quad (13)$$

Samma beteckningar råder som för ekvation 10. Samma antagande om en hjulomkrets på 2 meter råder också fortfarande, och utväxlingsförhållandet är satt till det av en Nissan Leaf, med ett final drive-förhållande på $GR = 8.19$. Det proportionella sambandet mellan varvtal och fordonshastighet från ekvation 13 illustreras i figur 13.



Figur 13: Varvtal mot fordonshastighet för elektrisk drivlina.

5.5.2 Vridmoment

Vridmoment har i kontrast till förbränningsmotorn inget behov av att mätas i någon annan enhet för att möjliggöra en jämförelse. Sambandet mellan vridmoment (T), bromsad effekt (P_b) och vinkelhastighet (ω) för en elmotor beskrivs i ekvation 14 nedan:

$$P_b = T \cdot \omega \quad (14)$$

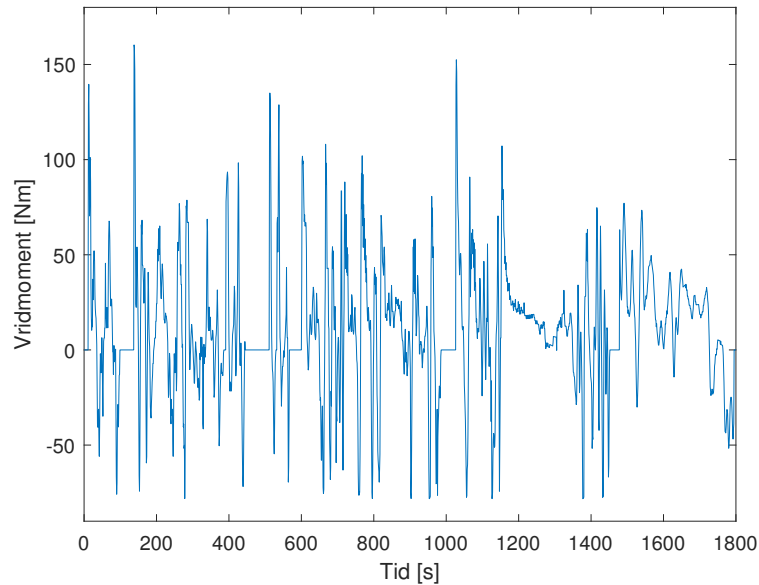
Vidare utveckling med hjälp av sambandet mellan vinkelhastighet och varvtal ($\omega = \frac{N \cdot 2\pi}{60}$) erhålls följande samband i ekvation 15:

$$T = \frac{60 \cdot P_b}{N \cdot 2\pi} \quad (15)$$

Utvecklat för varje tidsintervall resulterar i ekvation 16:

$$T(i) = \frac{60 \cdot P_b(i)}{N(i) \cdot 2\pi} \quad (16)$$

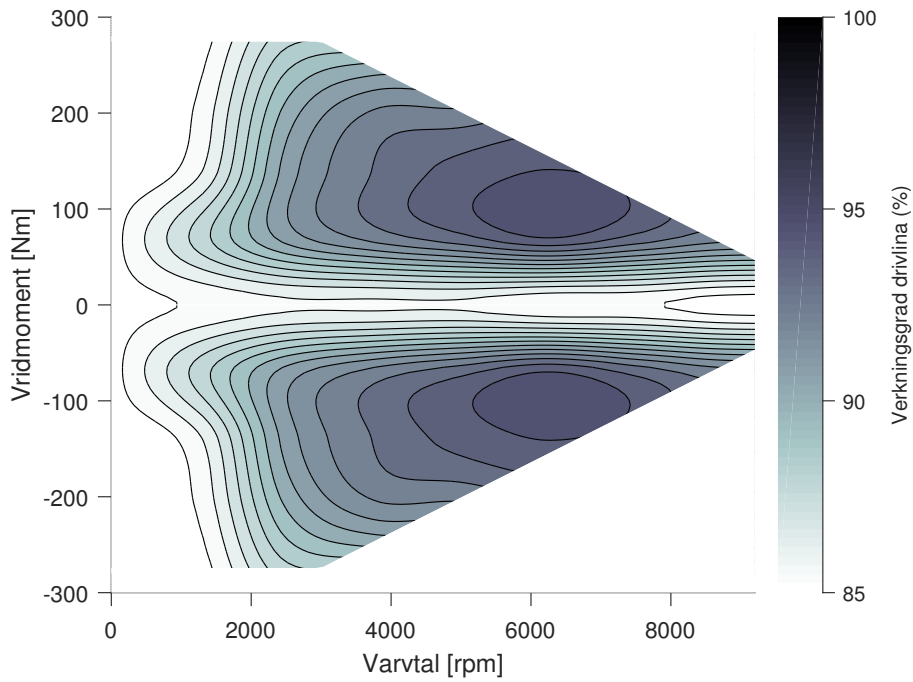
Ekvation 16 applicerat på körcykeln resulterar slutligen i figur 14 som illustrerar hur vridmomentet varierar under körcykeln.



Figur 14: Vridmoment mot tid för elmotorn uttryckt i ekvation 16.

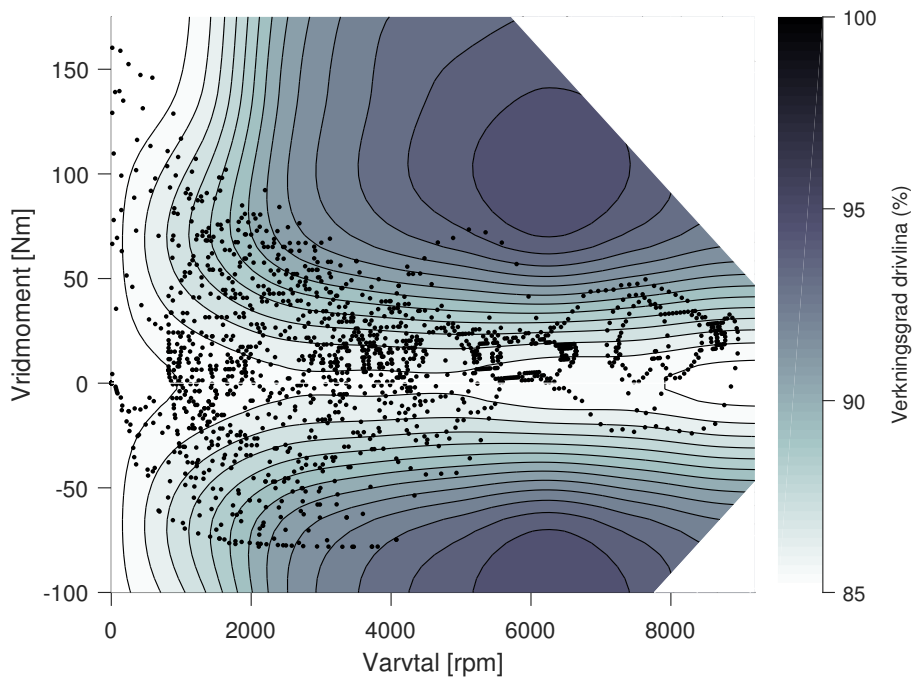
5.5.3 Verkningsgrad: Elektrisk drivlina

Verkningsgraden baseras på en Nissan Leaf. En begränsad mängd data finns tillgänglig inom området i skrivande stund, vilket har medfört att denna studie begränsats till att använda enbart den data som erhållits rörande Nissan Leaf från en studie från 2011 av Sato m.fl. [21]. Den uppskattade verkningsgrads-kartan är skapad genom att manuellt läsa in totalt 81 datapunkter från den studerade artikelns verkningsgrads-karta i en 9×9 matris. Enbart 25 datapunkter lästes in för förbränningsmotorn, men p.g.a. större behov av upplösning och breda intervall krävs fler mätpunkter för en bättre återgivning av originalbeskrivningen för den elektriska drivlinan. Resultatet presenteras i figur 15 där verkningsgraden varierar mellan 85 % till 95 %. I dessa verkningsgrader är hela drivlinans verkningsgrad inkluderad, till skillnad från förbränningsmotorn där förluster i växellåda och transmission inkluderas i ett senare skede. Notera att den valda kartan i denna studie har antagit ett linjärt maximalt vridmoment mellan 3000 och 10000 rpm, där den faktiska begränsningen är en avtagande funktion som motsvarar konstant **effekt** i samma område. Enligt ekvation 16 är då vridmomentet (T) omvänt proportionellt mot varvtalet (N). Resultatet blir att den faktiska begränsningen i vridmoment är något lägre än vad figur 15 visar i detta område.



Figur 15: Verkningsgrads-karta för den elektriska drivlinan

Slutligen presenteras samtliga 1800 driftpunkter i denna verkningsgrads-karta för den elektriska drivlinan i figur 16.



Figur 16: Verkningsgrads-karta med driftpunkter för den elektriska drivlinan.

5.6 Resultat från simulering

Tabell 9 visar de resultat som erhållits från simuleringen för framdrivning av en Otto-, Diesel- samt elmotor. Vidare presenteras också bränsleförbrukningen från de fyra separata driftsfaserna var för sig i tabell 10 för bränslena bensin, diesel och elektricitet.

Tabell 9: Resultaterande bränsleförbrukning från simulering för de studerade drivmedlen och respektive drivlinetekniker. Resultaten avser blandad körning i WLTP-körcykeln.

Bränsle	Motor	kWh per mil	Liter per mil	Cykel-verkningsgrad
Bensin	Otto	5.32	0.59	26 %
Etanol	Otto	5.32	0.9	26 %
Metanol	Otto	5.32	1.21	26 %
Diesel	Diesel	4.21	0.42	32 %
HVO	Diesel	4.21	0.45	32 %
RME	Diesel	4.21	0.46	32 %
El	El	1.12	-	80 %

Tabell 10: Resultaterande bränsleförbrukning från simulering för en Ottomotor med bensin som bränsle, Dieselmotor med diesel som bränsle samt elmotor. Resultaten avser de fyra olika driftsfaserna i WLTP-körcykeln.

Bränsle	Lätt stadskörning	Tung stadskörning	Landsväg	Motorväg	Enhet
Bensin	0.59	0.61	0.54	0.62	liter/mil
Diesel	0.41	0.43	0.39	0.46	liter/mil
El	0.77	0.87	1.02	1.48	kWh/mil

Bränsleförbrukningarna i tabeller 9 och 10 ligger till grund för de utsläpp av växthusgaser som uppstår under driftfasen av fordonets livscykel, och studeras även närmare i en senare känslighetsanalys.

5.7 Avgränsningar och felkällor för simulering

Ett verkligt fordon antas ha en bränsleförbrukning något över de resultat som simuleringen visar. Detta på grund av att flera avgränsningar är gjorda med flera signifikanta parametrar exkluderade som innebär en påverkan på bränsleförbrukningen. De resultat som presenteras i tabeller 9 och 10 är samtliga något lägre än vad som rapporteras från fordonstillverkare⁷, och styrker påståendet om att simuleringens resultat är något lågt jämfört med verkliga förhållanden.

En av de största felkällorna för simuleringen är datan för verkningsgrads-kartan. Det är de olika verkningsgraderna i respektive driftspunkt som bestämmer bränsleförbrukningen, och följderna är att denna post har stor inverkan på den resulterande bränsleförbrukningen. Istället för att basera verkningsgraden på ett antal studier genom manuell inläsning av ett antal datapunkter hade istället rådata från verkliga motorer kunnat användas.

En viktig parameter som påverkar bränsleförbrukningen är valet att exkludera extrautrustning såsom temperaturregling och luftkonditionering. Det är däremot en funktion som kräver ytterligare komplexitet. Parametrar såsom exempelvis utetemperatur, önskad kabintemperatur och värmekonduktiviteter för fordonet skulle då krävas. Denna post är troligen en av de största anledningarna till varför simuleringen

⁷Typiska värden för en Volvo V60 (bensin, 1715kg): 0.66 liter/mil, blandad körning [22]. Volkswagen E-golf (1615 kg): 1,27 kWh/mil, blandad körning [23].

visar lägre siffror än vad fordonstillverkare rapporterar.

Den friktionsmodell som fastställts som en konstant procentsats (7 % friktionsförluster i drivlina) är inte helt representativ för ett verkligt förhållande. Andelen energi som uppgår till friktionsförluster varierar beroende på både last och varvtal, och står för en signifikant andel av förluster vid framförallt låga varvtal.

För den elektriska drivlinan är den regenerativa bromsningens verkningsgrad densamma som för vid utfört arbete, d.v.s. att verkningsgraden är symmetrisk kring x-axeln. I verkligheten är inte verkningsgraden så hög vid energiåtervinning, och modellen använd i simuleringen återspeglar istället den potential som finns att hämta med regenerativ bromsningsteknik. Resultatet blir att bränsleförbrukningen för den elektriska drivlinan mest troligt är något lägre jämfört med verkliga tester.

6 Växthusgaser - Bedömning av livscykelutsläpp

I denna sektion presenteras den data som ligger till grund för de utsläpp av växthusgaser som beräknas uppstå under ett fordonets livscykel. De fyra processer som resulterar i utsläpp av växthusgaser är enligt processträdet i figur 1 **förbrukning och produktion av bränsle, produktion av fordon** samt **produktion av bränslelager**.

6.1 Bränslen

Det senaste årtiondet har medfört mycket kunskap och information om bränslen gällande utsläpp under hela livscykeln. Från att konventionellt ha mätt utsläpp från enbart förbrukning/förbränningen av drivmedel, inkluderas nu allt mer även produktionen av dessa bränslen. I termer om livscykelanalys kallas detta fenomen för *Well-To-Wheel*-analyser istället för alternativet *Tank-To-Wheel*. Well-to-wheel betyder således de utsläpp som uppstår ända från utvinning från ursprungskällan till slutlig förbrukning av drivmedlet, istället för att enbart räkna med de utsläpp fr.o.m. fordonets tank.

Målet är att presentera data för fullständiga utsläpp per energienhet bränsle. Denna storhet mäts i enheten 'gram CO₂-ekv/MJ bränsle' för flytande bränslen och 'gram CO₂-ekv/kWh' för elektricitet. De bränslen som inkluderas i denna studie är sedan tidigare sammanfattade i tabell 1.

6.1.1 Biodrivmedel

Drivmedel från biomassa som råvara är ett effektivt sätt att reducera växthusgaser genom infångning av koldioxid från atmosfären under odling. Däremot innebär inte biodrivmedel en fullständig reduktion av växthusgaser. I produktionen krävs processer som arbetsmaskiner, processomvandlingar och transporter som alla innebär eventuella utsläpp av växthusgaser. Hur de resulterande utsläppsvärdena ser ut varierar beroende på processdesign och råvara. I tabell 11 presenteras de källor till den data som används för dessa värden på växthusgasutsläpp.

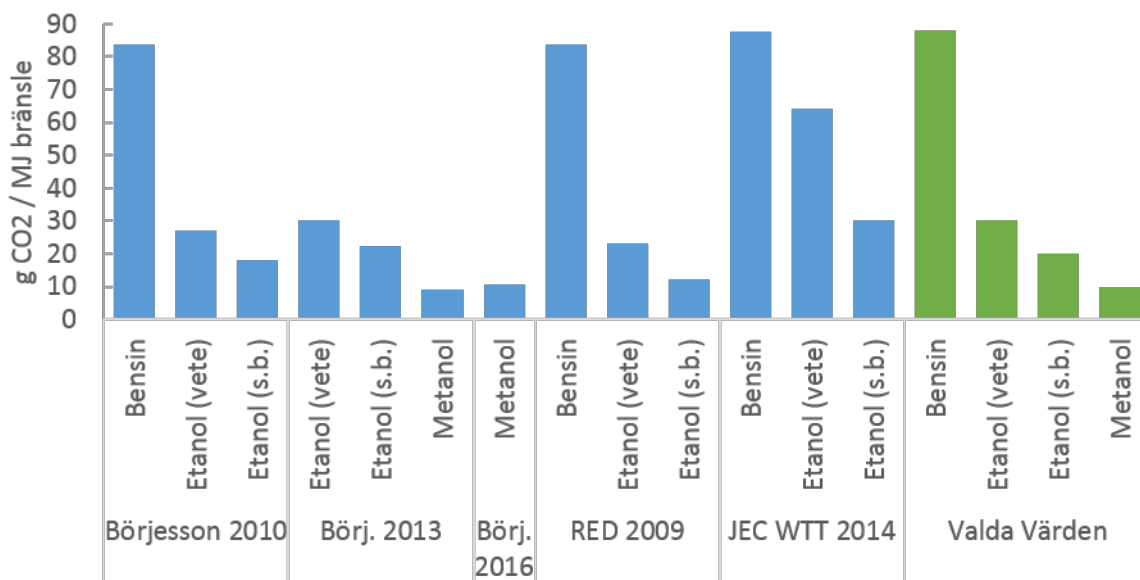
Tabell 11: Källor för insamling av data rörande växthusgasutsläpp från biodrivmedels livscykler.

Utgivare	Referensnummer
Börjesson (2010)	[3]
Börjesson (2013)	[24]
Börjesson (2016)	[4]
Energimyndigheten (2017)	[14]
RED (2009)	[25]
JRC WTT (2014)	[26]

I figur 17 presenteras den data på specifika växthusgasutsläpp (gram CO₂/MJ bränsle) för de bensinersättande biodrivmedlen etanol (på dels vete och dels sockerbeta) och bio-metanol via förgasning från skogsråvara. Resultatet är uppdelade efter författare till studien enligt tabell 11 ovan, och siffrorna avser hela livscykeln av samtliga bränslen. Slutligen visar de gröna staplarna de valda värdena som denna studie använt sig av.

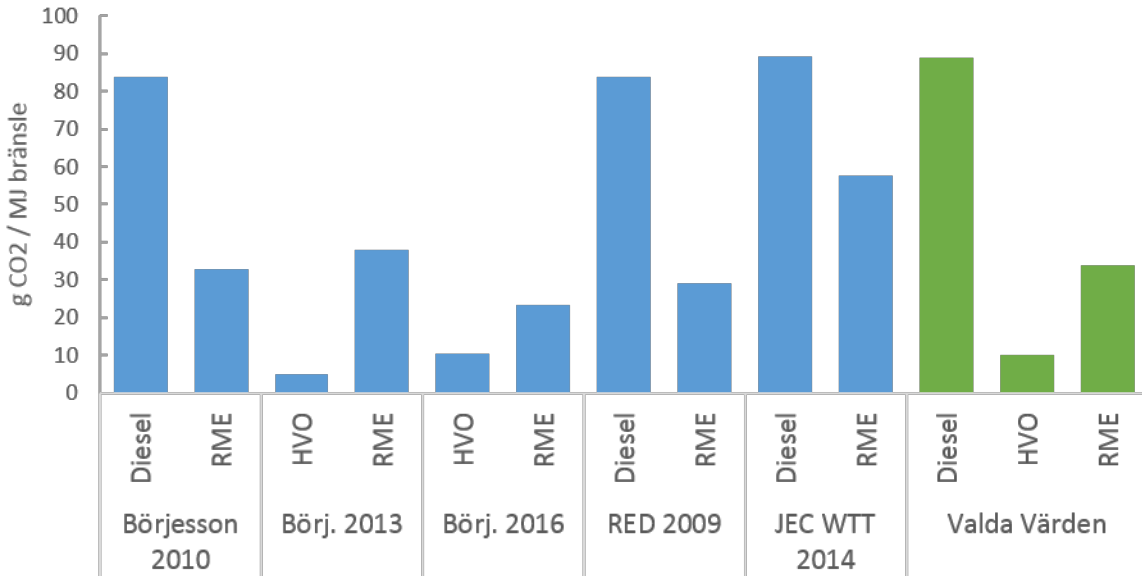
Värden avseende Börjesson (2010, 2013, 2016) varierar beroende på vilken allokeringmetod som används i livscykelanalysen. Grundfallet baseras på systemutvidgning som allokeringmetod, men energiallokering är också tillgängliga. De siffror från Börjesson som i denna studie presenteras i figur 17 är baserade på just systemutvidgning. RED visar liknande siffror som Börjessons rapport från 2010, men är inte specifika för svensk produktion. Slutligen uppvisar JEC Well-To-Tank-analys från 2014 högre värden än övriga rapporter. JECs rapport sammanfattar en mängd olika produktionsmedel, med värden mellan

50-80 gram CO₂-ekv/MJ bränsle för vetebaserad etanol. Däremot står dessa utsläpp primärt av de som uppstår under odlingsprocessen av vete vilken antas använda en stor mängd konstgödsel, vars produktion driver upp utsläpp av växthusgaser avsevärt och som dessutom innebär stora osäkerheter i rapporten. De valda värdena är baserade på svenska odlingsförhållanden, och är därmed valda primärt efter Börjessons värden.



Figur 17: Resultat av specifika växthusgasemissioner rörande biodrivmedel (bensinersättande) från från studerade artiklar. Etanol (s.b.) står för etanol baserat på sockerbeta som råvara. Hänvisning till källor redovisas i tabell 11.

Motsvarande specifika växthusgasutsläpp för de dieslersättande bränslena HVO och RME som studerats i denna studie presenteras i figur 18. Dessa bränslen visar liknande trender som de från de bensinersättande där Börjesson och RED uppvisar lägre utsläpp än JEC WTT. Också här är siffror från Börjesson baserade på systemutvidgning. Notera att data för HVO från tallolja inte finns tillgänglig från varken RED eller JEC. Detta drivmedel är en produkt med svenska förutsättningar, och datan på dess klimatpåverkan är begränsad. Återigen baseras de valda värdena främst på Börjessons siffror.



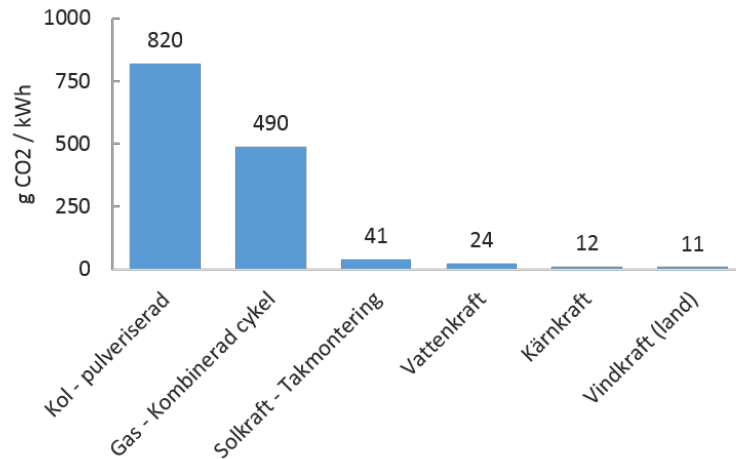
Figur 18: Resultat av specifika växthusgasemissioner rörande biodrivmedel (dieselersättande) från från studerade artiklar. Hänvisning till källor redovisas i tabell 11

Notera att för både de bensin- och dieselersättande drivmedlen att även de fossila alternativen bensin och diesel skiljer sig beroende på författare. Dessa skillnader uppstår främst under produktion och distribution av bränslet. Värdena är främst baserade på JEC för att återspegla en global oljeförsörjning.

6.1.2 Elektricitet

De specifika växthusgasutsläpp som används för elektricitet som bränsle baseras på värden från IPCC [27]. En illustration över olika energislag visas i figur 19. Inkluderade kraftslag är kolkraft (pulveriserad), naturgas (kombinerad cykel), solkraft (takmonterade solpaneler), vattenkraft, kärnkraft och till sist vindkraft på land.

Växthusgasutsläpp för elproduktion är ett väl beforskat område, där IPCC anses vara en trovärdig källa. Inom övriga områden såsom fordonsproduktion och batteriproduktion i sektioner 6.2.1 och 6.2.2 kan däremot data vara baserade med andra utsläppsvärden än de från IPCC, och en viss diskrepans kan uppstå vid jämförelser mellan olika energislag. Om inget annat omnämns, är det däremot IPCCs värden som råder i denna studie.



Figur 19: Specifika växthusgasutsläpp uttryckt i gram koldioxidekvivalenter per kWh för diverse energislag rörande elproduktion enligt IPCC [27].

Tre val av elmixar studeras som bränsle till den elektriska driften: **Svensk elmix**, **europaisk elmix** samt **kolkraft**. De specifika koldioxidutsläpp (gram CO₂ per kWh) som antagits i denna studie presenteras i tabell 12 nedan.

Tabell 12: Specifika koldioxidutsläpp från tre val av kraftkällor/elmixar som antagits i denna studie.

Elmix	Svensk elmix	Europeisk elmix	Kolkraft
g CO ₂ /kWh	50	300	820

6.2 Produktion av fordon

Likt Well-to-wheel-analyser för bränslen blir det mer och mer aktuellt att tala om klimatpåverkan från produktion av fordonet självt, något som bland annat omnämnts av Gradin [6]. I denna sektion presenteras data från ett antal studier som undersöker utsläpp av växthusgaser under produktion av såväl elektriska som konventionella fordon.

6.2.1 Komplette fordon exklusive batterier

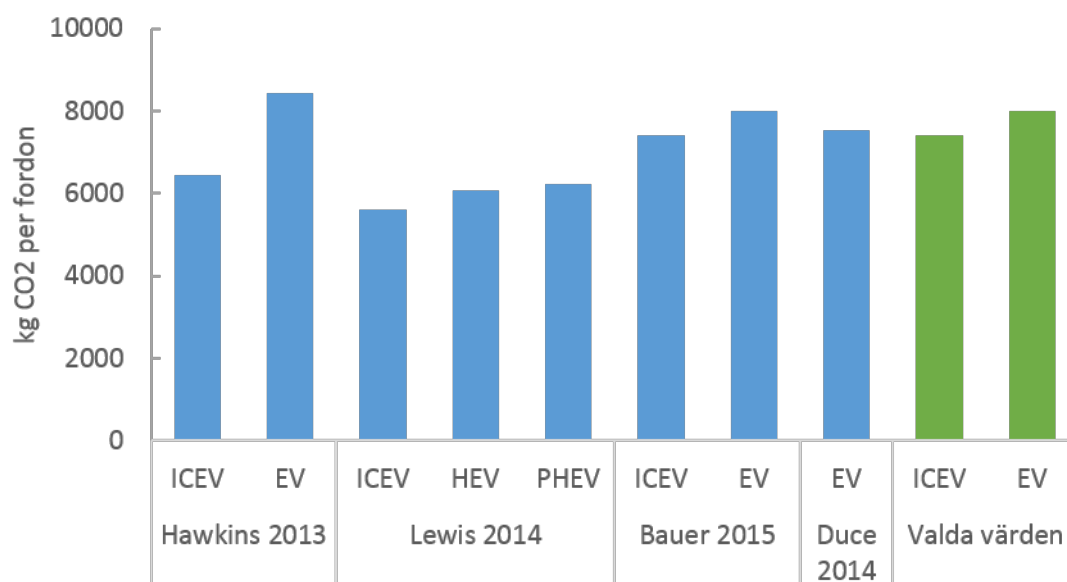
I den inledande litteraturstudien i avsnitt 2.3 påvisades vikten av tydliga systemgränser för livscykelanalyser, där de resulterande växthusgasutsläppen varierade med en faktor 5 mellan produktionen av två förbränningsmotorfordon. De livscykelanalyser som denna studie baseras på presenteras i tabell 13, där samtliga rapporter är utgivna under de senaste 6 åren.

Tabell 13: Källor för inventering av data rörande produktion av fordon exklusive batterier.

Utgivare	Referensnummer
Hawkins (2013)	[28]
Lewis (2014)	[29]
Bauer (2015)	[30]
Del Duce (2014)	[31]

I figur 20 presenteras de värden på specifika växthusgasutsläpp *per fordon* för de källor som angivits i tabell 13. Som fordon avses komplett fordon inklusive drivlina, men exklusive batterier avsedda för elektrisk drift. Hawkins studie från 2013 är transparent och konsekvent i utförande. En tydlig skillnad

finns mellan produktionen av ICEV och EV på cirka 2 ton CO₂-ekvivalenter. Läsaren bör notera att denna skillnaden inte beror på batteriproduktion (som för samtliga värden i figur 20 exkluderats ur datan) utan beror istället på fundamentala skillnader mellan de olika drivlinorna. Lewis och Bauer påvisar i kontrast till Hawkins en betydligt mindre skillnad mellan förbrännings- och elektriskt baserade drivlinor. På grund av en stor transparens och tydlig presentation av data har Bauers resultat valts som värden till denna studie. Läsaren bör notera att elektriska fordon har något högre koldioxidutsläpp än konventionella fordon för samtliga studier, detta beror till stor del på elmotorerna i drivlinan som innebär ökade utsläpp av växthusgaser jämfört med en förbränningsmotor.



Figur 20: Resultat av specifika växthusgasutsläpp rörande fordonproduktion från från studerade artiklar. Som fordon avses komplett fordon inklusive drivlina, men exklusive batterier avsedda för elektrisk drift. Hänvisning till källor redovisas i tabell 13.

6.2.2 Batterier till elektriska drivlinor

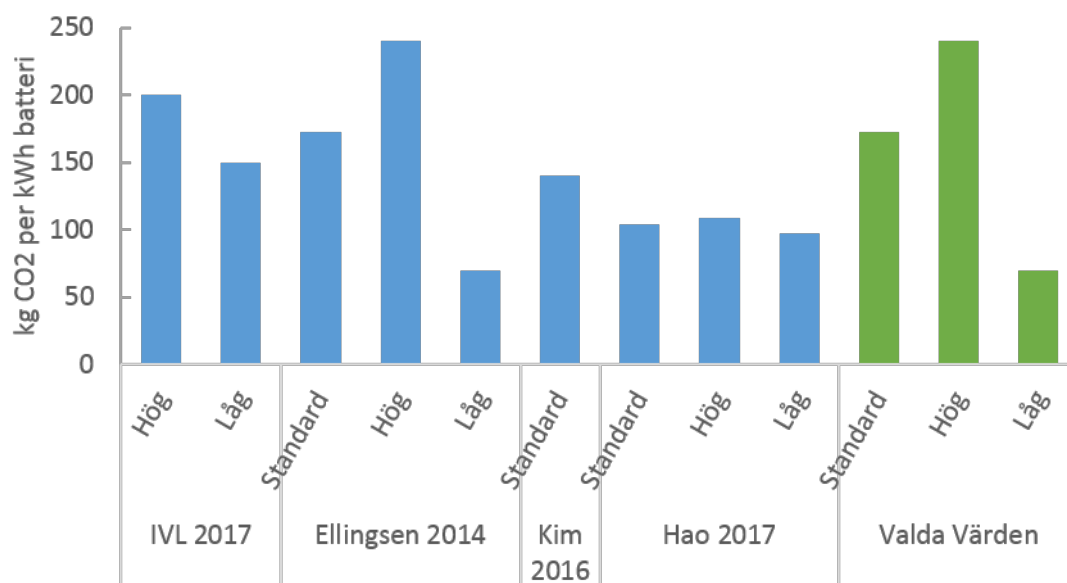
Tidigare avsnitt berörde fordonproduktion exklusive batterier för elektrisk framdrivning. På grund av batteriers något kontroversiella data rörande växthusgasutsläpp studeras denna post närmare, separat från övrig fordonproduktion. I tabell 14 presenteras de artiklar och livscykelanalyser som ligger till grund för den data som används i denna studie.

Tabell 14: Källor för inventering av data rörande batteriproduktion.

Utgivare	Referensnummer
IVL (2017)	[9]
Ellingsen (2014)	[32]
Kim et. al (2016)	[33]
Hao et. al (2017)	[34]

I figur 21 presenteras resultat från de artiklar och livscykelanalyser presenterade i tabell 14, uttryckt i 'kg CO₂-ekv/kWh batterikapacitet'. Att mäta utsläpp i denna enhet är allmänt förekommande inom batteritillverkning för att bättre kunna jämföra batteripaket med olika lagringskapaciteter. På grund av interna känslighetsanalyser och osäkerheter i data presenteras **höga** och **låga** utsläppsvärden för respektive källa med variationer i resultat i figur 21. De gröna staplarna representerar de valda värdena för denna

studie vilka baseras främst på Ellingsens livscykelanalys från 2014, och vars höga- och låga värden senare inkluderas i vidare känslighetsanalyser.



Figur 21: Resultat av specifika växthusgasutsläpp rörande batteriproduktion från studerade artiklar. Hänvisning till källor redovisas i tabell 14.

I rapporten från IVL [9] redovisas resultat från flertalet utförda livscykelanalyser genom en sammanfattande studie med självständiga känslighets- och variationsanalyser. I rapporten ges inte bara resultat av totala växthusgasutsläpp, utan också information om hur mycket varje enskild produktionsprocess bidrar med. Enligt IVL ser fördelningen av växthusgaser efter produktionsprocess ut enligt:

- Råmaterial, brytning and raffinering = 18 till 50 kg/kWh batteri
- Materialproduktion till batterikvalitet⁸ = 60 till 70 kg/kWh batteri
- Tillverkning = 70 till 110 kg/kWh batteri
- Återvinning = -12 till 15 kg/kWh batteri

I samma studie understryks också faktumet att produktionsprocesser skiljer sig avsevärt mellan olika producenter och batteritillverkare vilket innebär en stor variation i slutgiltigt resultat.

I Ellingsens rapport från 2014 undersöktes en produktionslina för ett 26.6 kWh batteripaket vars resultat var totalt 4.6 ton CO₂-ekv per batteripaket. Det motsvarar ett växthusgasutsläpp om 173 kg CO₂-ekv/kWh batterikapacitet, och är det värde som denna studie använder sig av som referensfall. Elektricitet stod för 107 av de totalt 173 kg CO₂-ekv / kWh batterikapacitet, med antagandet om att elektriciteten bestod av den lokala elmixen vilken utgjordes av 46% kol-, 33% kärn-, 15% gas-, 4.4% oljekraft, och där resterande energislag antogs förnybara. Denna elmix motsvarar ungefär den genomsnittliga elmixen i Kina. En känslighetsanalys utfördes i samma studie där kraftkällan till elektriciteten varierades mellan svensk, brasiliansk och indisk elmix. Resultatet redovisas i tabell 15. Det är dessa värden som representeras som **hög** och **låg** för 'Ellingsen 2014' i figur 21.

⁸Oversatt från engelska (originalspråk): Battery grade material production.

Tabell 15: Känslighetsanalys på val av elektricitetsförsörjning enligt Ellingsen [32].

Elmix	[g CO ₂ /kWh el]	Förändring i slutresultat	Slutligt resultat [kg CO ₂ /kWh batteri]
Sverige	50	- 58%	72
Brasilien	300	- 35%	112
Indien	1400	+ 40%	242

Slutligen bör nämnas att trots till synes stora skillnader mellan resultat från olika författare, finns det ändå stringent data gällande utvinning av råvara till batterier på cellnivå. Mycket av de skillnader som uppstår mellan olika källor uppstår under tillverkningsprocessen av batteripaketen, något som beror starkt på hur varje fabrik med tillhörande produktionsprocess ser ut. Lägsta nivåer för batteriproduktion förväntas ligga runt 70 kg CO₂-ekv/kWh batterikapacitet (likt de som från Ellingsen) vilket antas bero på brytning av råmaterial samt materialproduktion till batterikvalitet. Därför baseras denna studie på Ellingsens resultat med tillhörande känslighetsanalyser beroende på val av elmix.

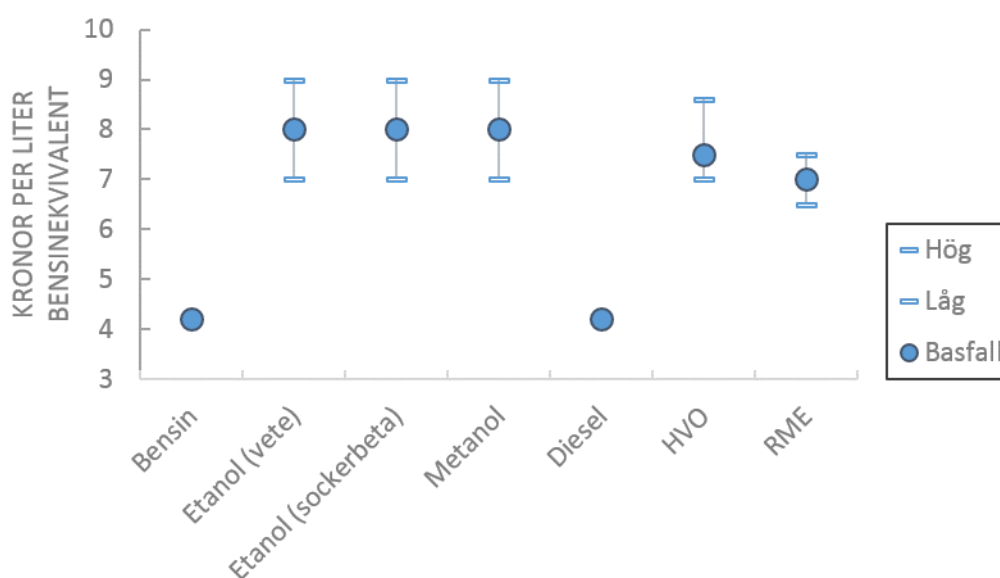
7 Produktionskostnad - Bedömning av kostnad under livscykel

Denna studie baseras på att undersöka produktionskostnader exklusive styrmedel och övriga ekonomiska subventioner och prispåslag. Produktionskostnaden delas upp i två delar: **Kostnad av fordon** samt **kostnad av bränsle**.

7.1 Bio- och fossila drivmedel

De fem studerade biodrivmedlens produktionskostnader är baserade på siffror från Börjesson [4] [24] och Landälv [5] som även omnämndes i den inledande litteraturstudien i sektion 2.

De fossila alternativen bensin och diesel antas ha en produktionskostnad av 4.2 kr per liter bensinekvivalent. De bensinersättande biodrivmedlen etanol (både baserat på vete och sockerbeta) samt metanol beräknas innebära produktionskostnader mellan 7 till 9 kr med ett förväntat värde på 8 kr per liter bensinekvivalent. De dieselerättande bränslen antas ligga strax under dessa värden, och dessutom innebära mindre osäkerheter i produktionskostnad. HVO förväntas innebära en produktionskostnad av 7.5 kr- och RME 7 kr per liter bensinekvivalent. Värt att notera är att många produktionsprocesser av biodrivmedel innebär kapitalintensiva investeringar och är starkt beroende på förväntad produktionsvolym och kostnaden för råvara.



Figur 22: Produktionskostnader för biodrivmedel med uppskattade hög- och lågvärden enligt Börjesson [4], [24] och Landälv [5].

7.2 Elektricitet

För att beräkna produktionskostnaden för elektricitet används i regel måttet 'Levelized Cost of Electricity' (LCOE). Det är ett mått där livscykelkostnader för en produktionsanläggning slås ut på samtliga producerade kilowattimmar under en anläggnings livscykel.

Fraunhofer Institut släppte 2013 en rapport med LCOE för diverse tyska kraftslag [35]. Enligt rapporten uppgick LCOE för solkraft till 78-142 öre/kWh⁹, vind (land) 45-107 och brunkol 38-53 öre/kWh, samtliga beroende på produktionsanläggning. I denna rapport inkluderas en koldioxidskatt om 5,3 Eur/ton CO₂. I en uppdaterad version från 2018 [36] rapporteras från samma utgivande organ uppdaterade siffror. I

⁹I originalrapporten uttrycks LCOE i enheten €/MWh, som översatts till måttet öre/kWh av författaren till denna studie.

denna version har kostnaden för solkraft minskat till mellan 37 och 115 öre/kWh beroende på typ av anläggning, vind (land) till mellan 40 och 82 öre/kWh. Slutligen beräknas kostnaden för brunkol öka till mellan 46 och 80 öre/kWh. En sammanfattning av kostnaderna från både 2013 och 2018 års rapport presenteras i tabell 16.

Tabell 16: LCOE uttryckt i öre/kWh för diverse kraftslag enligt Fraunhofer [35], [36].

Kraftslag	Fraunhofer 2013 [35]	Fraunhofer 2018 [36]
Solkraft	78-142	37-115
Vindkraft (land)	45-107	40-82
Brunkol	38-53	46-80

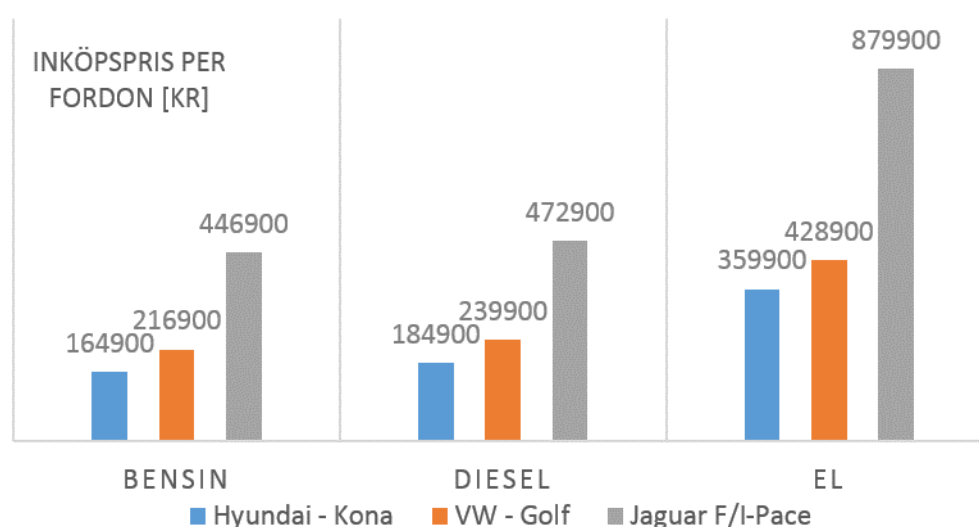
För ett nordiskt perspektiv har utöver Fraunhofers rapporter även spotpriset på den nordiska elbörsen NordPool studerats. NordPools priset har i Sverige de senaste åren haft en ökande trend, och har månadsvis överstigit 50 öre/kWh flertalet gånger [37].

Med dessa siffrorna i åtanke använder denna studien siffran **55 öre/kWh** som produktionskostnad för elektricitet, oberoende av kraftkälla.

7.3 Fordon

Att möjliggöra en jämförelse mellan produktionskostnader för olika drivlinor för samma eller liknande fordon medför svårigheter. På grund av brist på data, och en naturlig benägenhet för fordonstillverkare att inte ha officiella kostnadsnivåer för sina produktionslinjer medför detta att en del uppskattningar behöver göras.

De kostnader som används i denna studie baseras på tre olika fordonstillverkare: Hyundai, Volkswagen och Jaguar, som alla tre har en fordonsmodell med alla tre drivlinor (bensin, diesel eller el) tillgängliga som alternativ. Hyundais **Kona**, Volkswagens **Golf** alt. **E-Golf** och Jaguars **F-** alt. **I-Pace** ligger till grund för de kostnader som beräknas. De priser som kommunicerats utåt mot kund från fordonstillverkarna för varje respektive bilmodell och drivlina presenteras i figur 23.

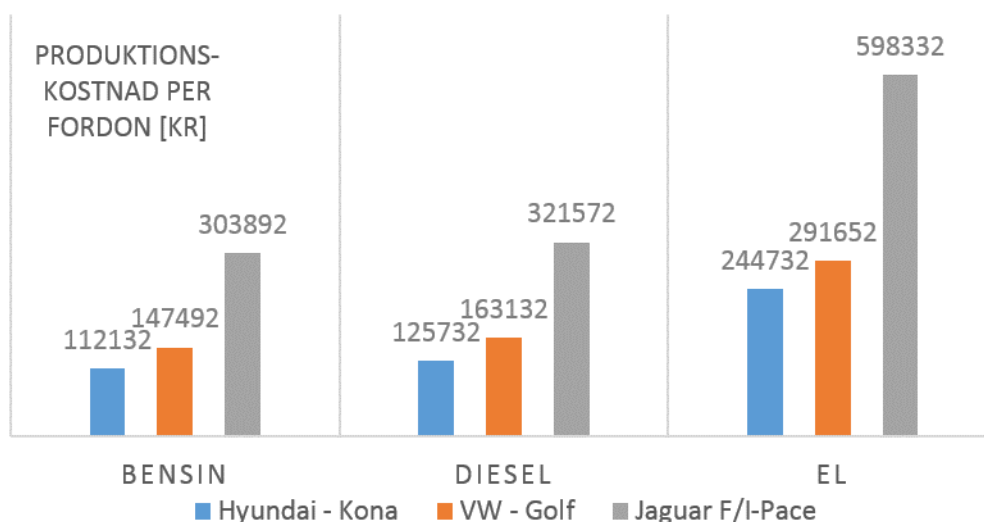


Figur 23: Uppgivna försäljningspriser från tre olika fordonstillverkare med möjligheten att välja bensin-, diesel- eller elektrisk drivlina för samma eller liknande fordonsmodell.

Den metod som tillämpas för att uppskatta produktionskostnader för dessa fordon är att från inköspriset av dessa fordon, dra av först moms och sedan en antagen vinstmarginal enligt ekvation 17. Det medför en grov uppskattning om vad fordonstillverkarens produktionskostnad uppgår till.

$$\text{Produktionskostnad} = \text{Inköspris} \times (1 - \text{Vinstmarginal}) \times \text{Momssats} \quad (17)$$

där vinstmarginalen antagits vara 15 % och momssatsen 0,8. Resultatet presenteras slutligen i figur 24, vilka siffror vidare om benämns som *produktionskostnad per/från fordon*.

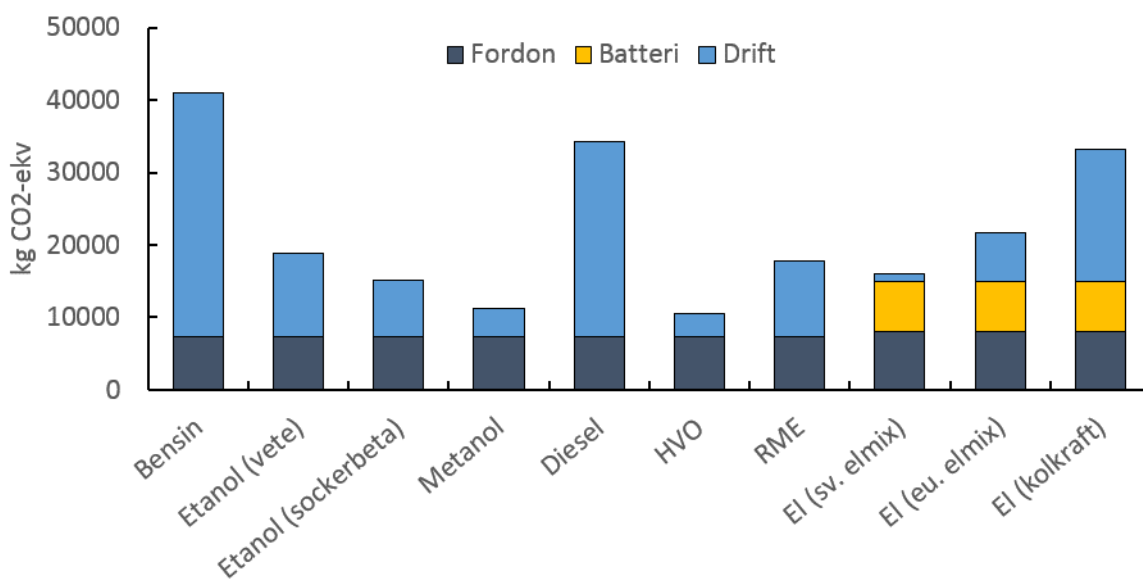


Figur 24: Uppskattning av produktionskostnaden för de tre fordonmodellerna angivna i figur 23 genom exkludering av moms och en antagen vinstmarginal om 15 % per fordon.

Vinstmarginalen för fordonstillverkare är svår att uppskatta, och förtjänar en kort diskussion. Producenter rapporterar inte produktionskostnader och vinstmarginaler för separata fordon öppet till allmänheten, men enligt uppgifter från Börse Express [38] uppgår vinstmarginalen för bilmärken som Mercedes, BMW och Audi till upp emot 10 %. Dessa siffror är däremot osäkra, och ständigt under förändring. De värden om 15 % vinstmarginal som denna studie använder sig av är valda strax över de från nämnd artikel, detta för att täcka eventuella osäkerheter. Med detta i åtanke, utförs en känslighetsanalys under bilaga A.2 för att påvisa vinstmarginalens inverkan på slutresultatet.

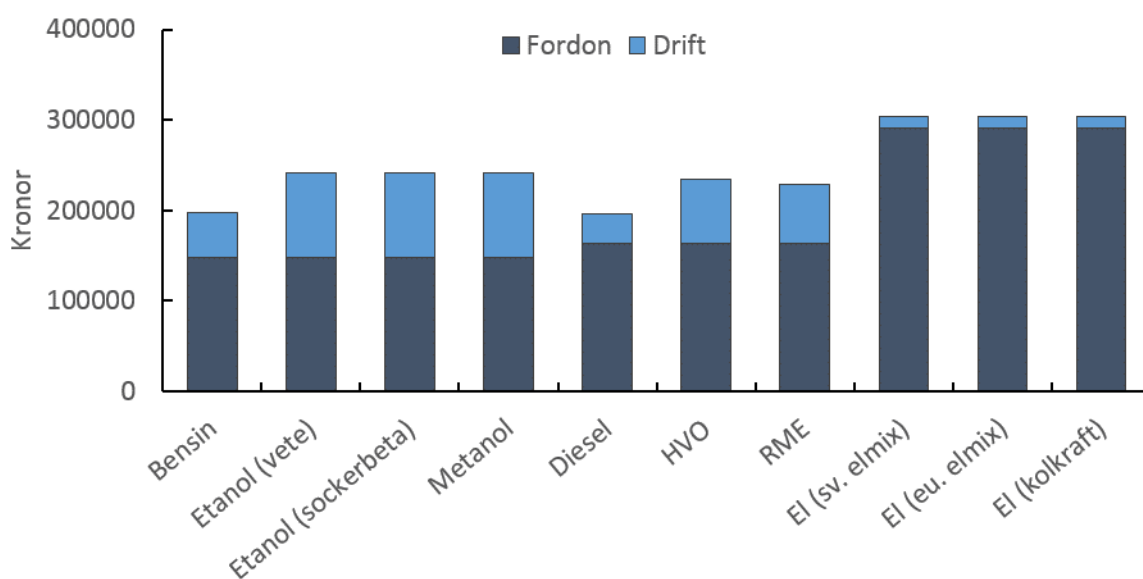
8 Resultat

Tio olika val av bränslen i tre olika drivlinor har studerats. Resultatet för livscykelutsläpp av växthusgaser för dessa tio studerade system från tabell 1 presenteras i figur 25. Resultatet baseras på ett fordon med specifikationer enligt tabell 4, där den totala körsträckan antas vara 20.000 mil under ett fordons livscykel. De bensinersättande bränslena etanol och metanol påvisar en reduktion av växthusgasutsläpp relativt bensin med 54 till 73 %. Enbart byte till diesel reducerar utsläppen med 17 % medan de dieselsättande bränslena reducerar växthusgasutsläpp med mellan 57 till 75 % relativt bensin. Slutligen medför en elektrisk drivlina en reduktion på mellan 22 till 61 %.



Figur 25: Utsläpp av växthusgaser [kg CO₂-ekv] under ett fordons livscykel för de tio studerade bränslena i respektive drivlina, definierade i tabell 1.

De resulterande produktionskostnaderna för fordon och bränsle under livscykeln presenteras i figur 26.



Figur 26: Sammanställning av produktionskostnader [kr] under ett fordons livscykel för de tio studerade bränslena i respektive drivlina, definierade i tabell 1.

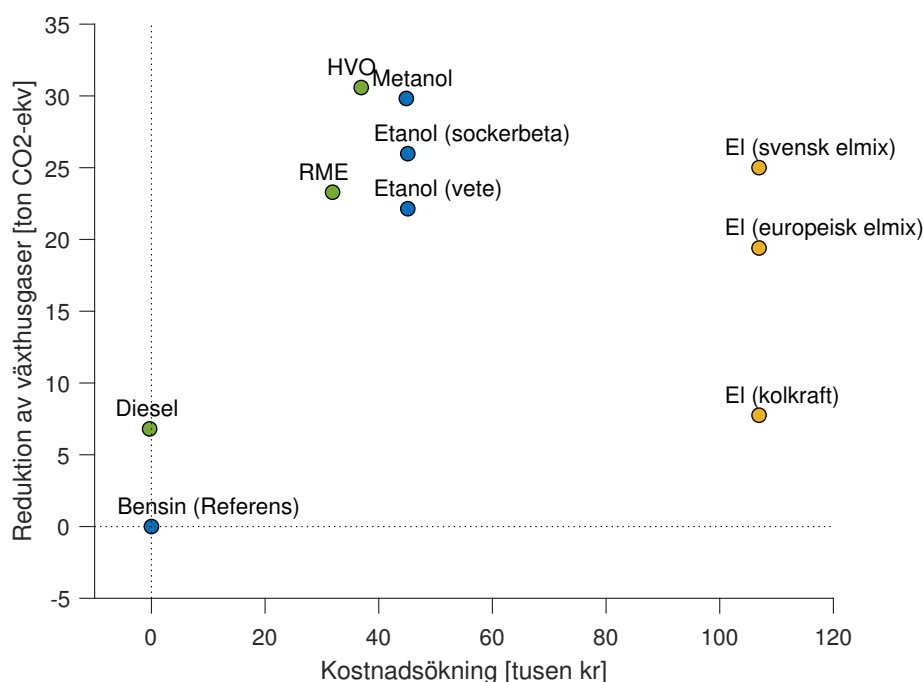
Produktionen av ett förbränningsmotorfordon inklusive drivlina innebär 7.4 ton CO₂-utsläpp. Det elektriska fordonet innebär 8.0 ton CO₂-utsläpp för fordonet inklusive drivlina, men exklusive batterier. Batteriproduktionen innebär för den elektriska drivlinan ytterligare 6.9 ton CO₂. Resterade utsläpp uppstår enligt figur 25 under driftsfasen.

Samtliga bränslen (bortsett från diesel) innebär en kostnadsökning relativt bensin. Driftskostnaden är ungefär den dubbla för biodrivmedel jämfört med dess fossila motsvarighet, och driftskostnaden för elektriska drivmedel är mycket låg jämfört med förbränningsmotorn. Istället ligger majoriteten av produktionskostnaden av den elektriska drivlinan under fordonet självt, vilken är betydligt högre än både det av bensin- eller dieselfordonet.

8.1 Kronor per reducerat ton koldioxid

Denna studie undersöker den kostnad som krävs för att reducera en viss mängd växthusgaser, detta genom måttet **'kronor per reducerat ton koldioxid'**. I avsikt att jämföra de olika alternativens reduktion av växthusgaser används ottomotorn med bensin som utgångsläge och referens mot de övriga bränslena.

Genom att jämföra den relativa *minskningen* av koldioxidutsläpp med den relativa *ökningen* av kostnader, sett under hela cykeln kommer resterande nio bränslen att jämföras mot bensinfordonets utsläpp och kostnader. Denna relativa **kostnadsökning** och **reduktion av koldioxid** presenteras i figur 27, där x-axeln representerar kostnadsökning relativt bensin, och y-axeln står för reduktion av växthusgaser relativt bensin.



Figur 27: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för de nio alternativa bränslena relativt bensin som referens.

Först konstateras att diesel medför en liten (men positiv) reduktion av växthusgaser utan att en kostnadsökning skett enligt figur 27. Livscykelkostnaden är till och med negativ då ett dieselfordons lägre bränsleförbrukning medför en billigare drift än bensin. I och med att ingen finansiell insats har krävts kommer måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' bli obegripligt. Därför exkluderas diesel ur kommande framställningar då diesel medför en 'gratis' reduktion av växthusgaser.

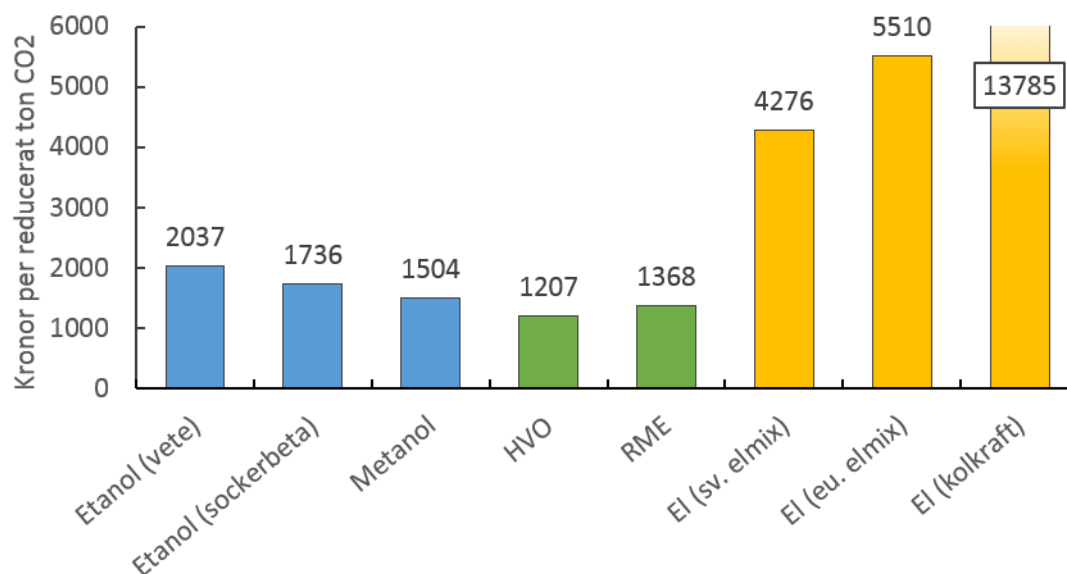
Biodrivmedlen befinner sig inom området 30 000 till 45 000 kr i kostnadsökning och 20 000 till 30 000 kg CO₂-ekvivalenter i växthusgasreduktion, där de dieselsättande bränslena (HVO, RME) innebär något lägre kostnader än de bensinsättande alternativen (etanol, metanol). Vidare innebär de elektriska drivlinorna vid en kostnadsökning om 106 000 kr och en växthusgasreduktion om mellan 9 000 och 25 000 kg beroende på kraftkälla.

Måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' härleds via de resultat som figur 27 bygger på. Måttet beskriver hur många kronor som krävs för att förhindra utsläpp av ett ton koldioxid med en bensinbil som referens. För varje drivmedel beräknas detta mått enligt ekvation 18:

$$\text{Kronor per reducerat ton CO}_2 = \frac{\text{Kostnadsökning relativt referensfall [kr]}}{\text{Koldioxidreduktion relativt referensfall [ton CO}_2]} \quad (18)$$

Detta mått är fundamentalt för denna studie, och kommer ligga till grund för kommande resultat och känslighetsanalyser.

Ekvation 18 applicerat på resultaten från drivmedlen (exklusive diesel) från figur 27 med bensin som referens erhålls de slutgiltiga resultaten som visas i figur 28.



Figur 28: Måttet *kronor per reducerat ton CO₂* för studiens studerade bränslen med en bensinbil som referens.

8.2 Diskussion av resultat

Biodiesel i form av HVO har lägst kostnad per reducerat ton CO₂ som utgångsläge. Detta beror på flera anledningar: Dieselmotorn har relativt hög verkningsgrad, driftpunkter är mer optimala i den studerade körcykeln än bensinmotorns motsvarighet, och produktionskostnader för HVO och RME är idag också låga relativt bensinersättande alkoholer. Trots en något högre fordonskostnad än ett motsvarande bensinfordon, sker besparingar under drift i form av lägre bränsleförbrukning som leder till en totalt lägre livscykelkostnad. HVO resulterar även i en större total reduktion av CO₂ än motsvarande drift på RME hade gjort. Detta beror på det högre specifika växthusgasutsläppet för RME på 30 g CO₂/ MJ bränsle, jämfört med HVO som uppgår till 10 g CO₂/ MJ.

Alkoholers kostnad per reducerat ton CO₂ är samtliga något högre än för de dieselsättande alternativen. Detta beror främst på ett sämre utnyttjande av verkningsgrads-kartan, överlag lägre verkningsgrader, men även högre produktionskostnader för bränslen än för dieselalternativen vilket slutligen resulterar i en högre bränsleförbrukning och kostnad under driftsfasen. Alkoholerna har samtliga också relativt stor variation i produktionskostnad och är stort beroende på design av produktionsprocess, vilket bidrar med en viss osäkerhet i kostnad.

Elektrisk drift har samtliga relativt höga värden på kostnaden per reducerat ton jämfört med biodrivmedel. Utsläppen av växthusgaser under livscykeln är dock i samma nivå som för samtliga biodrivmedel om svensk elmix används under drift. Den största faktorn bakom den till synes låga kostnadseffektiviteten är den höga produktionskostnaden för fordonet. Trots att elbilen innebär både låga kostnader och utsläpp under driftsfasen, förloras denna vinst till stor del av höga fordonskostnader och höga växthusgasutsläpp från batteriproduktion. Då både utsläpp och kostnader under driftsfasen redan är betydligt lägre för svensk elmix än för bensin, förespråkar detta att istället optimera fokusera på just produktionen av fordonet och undersöka vilken potential som finns för förbättring där. Detta kommer belysas särskilt i kommande känslighetsanalyser. Livscykelutsläpp av växthusgaser vid drift på el från kolkraft är ungefär de dubbla än vad svensk elmix hade inneburit, vilket innebär utsläpp i nivå med vad dieselbilen släpper ut under en livscykel.

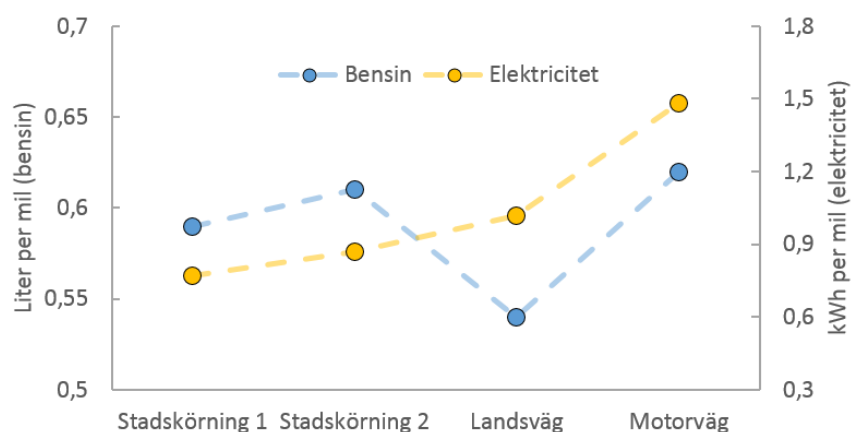
9 Känslighetsanalyser

För att skaffa sig en uppfattning om hur resultaten i sektion 8 beror på olika antaganden och variabler kan en så kallad känslighetsanalys utföras. Syftet är att variera en parameter i taget (till exempel slagvolym, val av körcykel eller batterikapacitet) och studera hur det påverkar resultatet.

Den känslighetsanalys som utförs i denna studie kommer presentera diverse parametrars inverkan på måttet *kronor per reducerat ton CO₂*, men också hur den 2-dimensionella illustration som presenterats i figur 27 förändras. Det resultat som erhållits i sektion 8 kommer benämnas som **benchmark** genomgående under känslighetsanalyserna, och inkluderas i figurer för att ge läsaren en referens att förhålla sig till. Det är alltså den relativa förändringen jämfört med benchmark-nivåerna som är av intresse.

9.1 Val av körcykel

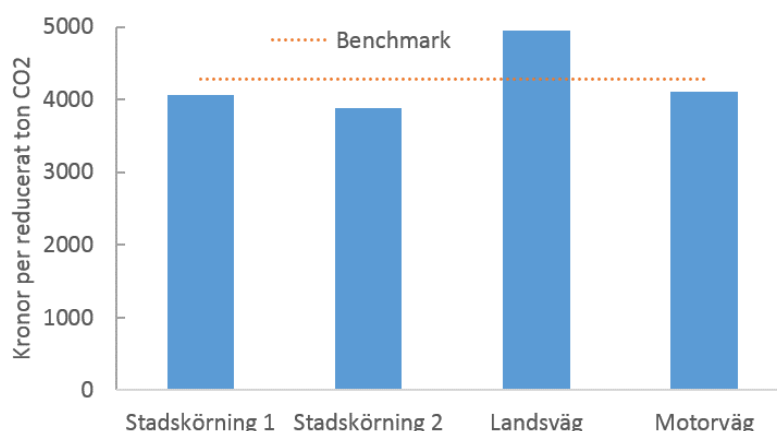
Den första känslighetsanalysen som utförts är den av val av körcykel. Genom den simulering som utförts kan bränsleförbrukningen för varje respektive fas under körcykeln uppskattas, och varierar olika beroende på om det rör sig om en elektrisk- eller förbränningsbaserad drivlina. I figur 29 presenteras bränsleförbrukningar för en bensinbil och motsvarande elbil enligt tabell 10. Blå kurva (v. axel) beskriver bränsleförbrukningen för bensinbilen och den gula kurvan (h. axel) beskriver den för elbilen.



Figur 29: Bränsleförbrukning för en bensin- och elbil beroende på val av körcykel enligt studiens simulering.

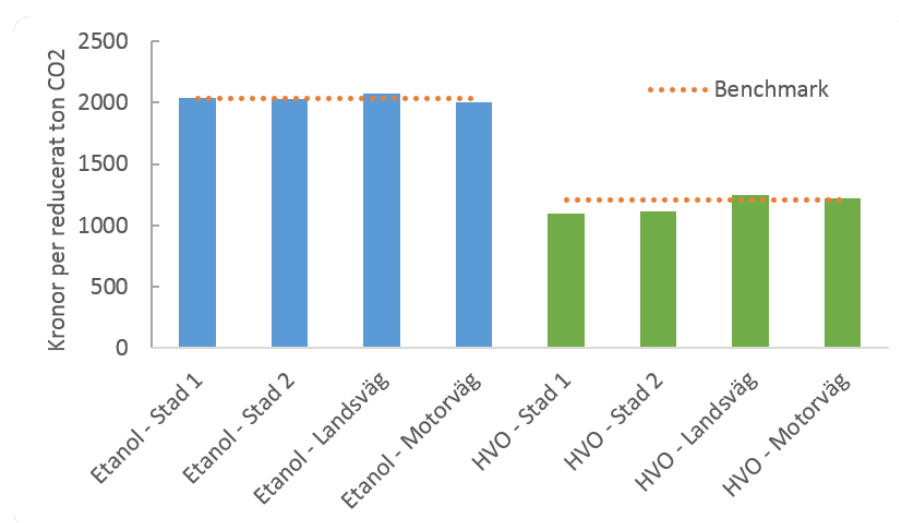
Den väsentligaste trenden för elektrisk drift är att bränsleförbrukningen ökar då körcykelns maxhastighet ökar. Elförbrukningen för motorvägskörning är cirka dubbelt så hög som elförbrukningen för lätt stadskörning. Detta är på grund av det effektbehov som krävs av luft- och rullmotstånd som är starkt beroende på hastighet, och bidrar därmed med en stor elförbrukning vid höga hastigheter. Bensinbilen påvisar av samma anledning högre bränsleförbrukningar vid motorvägskörning, men också en ökad bränsleförbrukning i stadstrafik relativt landsväg. Detta beror på främst två anledningar: Dels att driftpunkterna i motorn placeras vid låga verkningsgrader, och dels att det sker en större mängd repeterade inbromsningar och accelerationer. Det elektriska fordonet har här en stor fördel gentemot förbränningsmotorn, då elmotorn agerar generator under inbromsning vilket återvinner rörelseenergi. Detta understryker fördelen med antingen helektriska eller hybrida drivlinor med regenerativ bromsningsteknik vid körning med en stor del accelerationer och inbromsningar så som i stadstrafik.

Figur 30 visar variationen i 'kronor per reducerat ton CO₂' för ett elektriskt fordon, beroende på val av körcykel. Referensobjektet är den bilsbil med motsvarande bränsleförbrukningar presenterade i figur 29, där lätt stadskörning (el) jämförs mot lätt stadskörning (bensin), landsväg (el) jämförs mot landsväg (bensin) och så vidare.



Figur 30: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för ett elektriskt fordon beroende på val av körcykel. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för 'svensk elmix' i figur 28.

På samma sätt som för elektrisk drift visar figur 31 variationen beroende på val av körcykel för två utvalda biodrivmedel; etanol (vete) samt HVO. Dessa två biodrivmedel är valda för att skildra skillnaden mellan otto- och dieselmotorer.



Figur 31: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för bränslena etanol (vete) samt HVO beroende på val av körcykel. Benchmarknivåerna motsvarar de resultat som erhållits för 'Etanol (vete)' samt 'HVO' i figur 28.

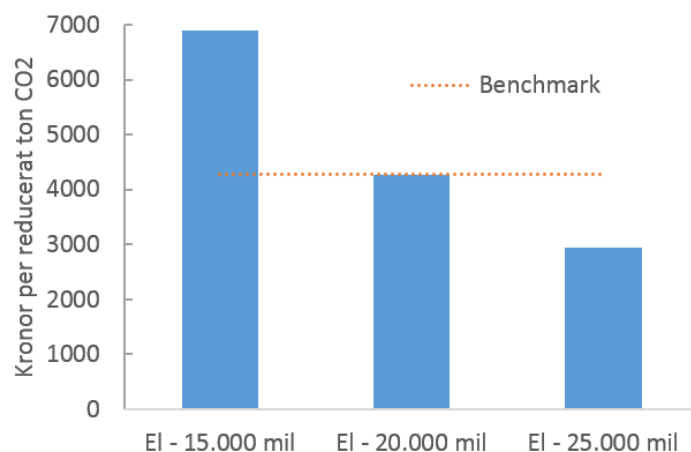
Den elektriska driften ger lägst kostnad per ton för stadskörning, och högst kostnad för landsväg enligt figur 30. Den ökning som verkar ske för landsvägskörning beror inte på att elektrisk drift är ineffektiv i detta område, utan att det är i detta område som referensen (bensinfordonet) är effektivast.

För biodrivmedel är variationen i resultatet mindre än för fallet med elektrisk drift. Drift på etanol bidrar med en försumbar skillnad, och beror på att fordonet drivs på samma typ av motor (otto). Dieselmotorn med HVO påvisar en något reducerat kostnad för stadskörning, och beror på dieselmotorns högre verkningsgrad vid låga laster vilket förekommer ofta i stadskörning.

9.2 Total körsträcka

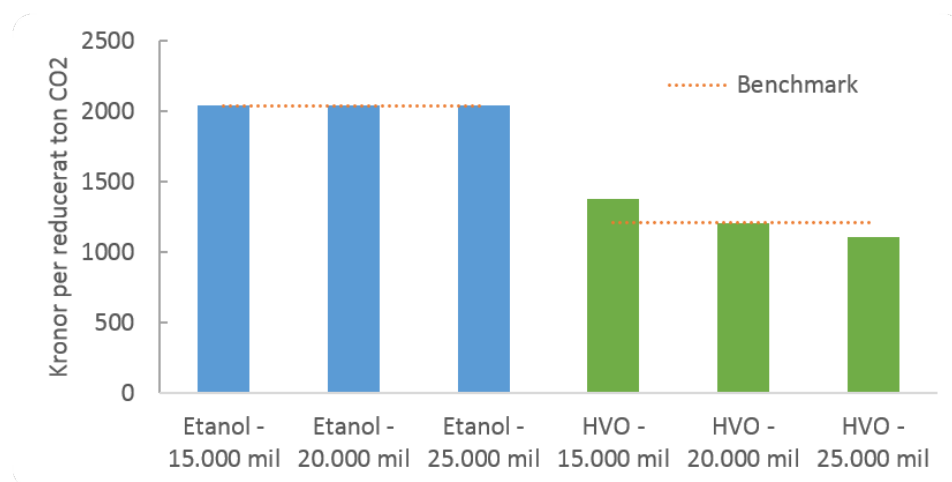
Hur lång sträcka ett fordon förväntas köra innan det anses förbrukat eller av behov av omfattande reparationer är en viktig parameter i känslighetsanalysen, och det är den totala körsträckan som avgör hur lång livscykel för fordonet är. Basfallet är initialt satt till 20 000 mil, och min- och maxvärden är valda till 15 000 respektive 25 000 mil.

Figur 32 visar variationen från känslighetsanalysen för varierad total körsträcka för ett elektriskt fordon. Benchmark är satt till fallet med 20 000 mil vilket motsvarar resultatet från figur 28 i sektion 8. Fallen 15- och 25 000 mil för den elektriska drivlinan jämförs med motsvarande körsträckor för referensfordonet drivet på bensin.



Figur 32: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för elektriskt fordon beroende på total körsträcka under livsyteln. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för 'svensk elmix' i figur 28.

Figur 33 visar motsvarande resultat från känslighetsanalysen beroende på total körsträcka för biodrivmedlen etanol (vete) samt HVO. På samma sätt är benchmarknivåer baserade på figur 28 i sektion 8 för respektive bränslen baserade på en total körsträcka om 20 000 mil.

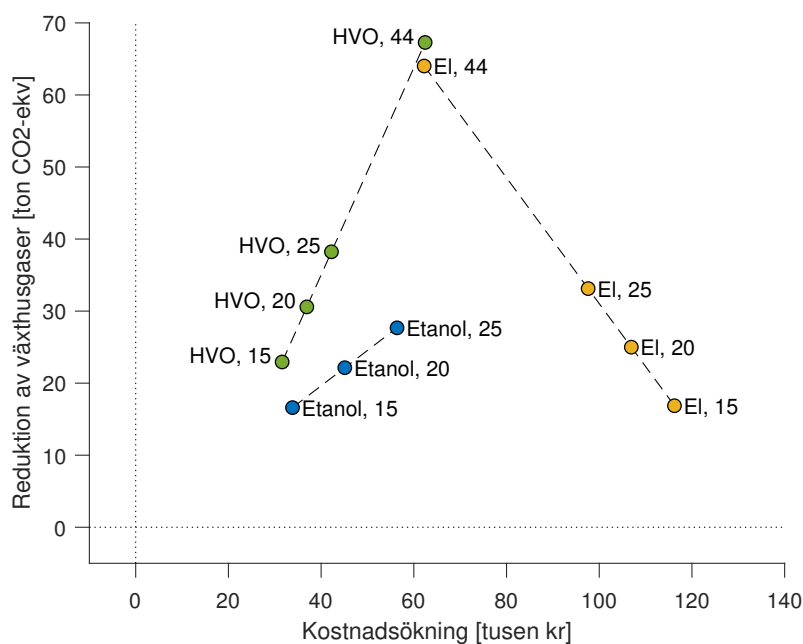


Figur 33: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för biodrivmedlen etanol (vete) samt HVO, beroende på total körsträcka under livsyteln. Benchmarknivån motsvarar de resultat som erhållits för 'Etanol (vete)' samt 'HVO' i figur 28.

Det framgår tydligt ur figur 32 att den totala körsträckan har en stor inverkan på resultatet för elektrisk drift. För biodrivmedlen i figur 33 är variationen mindre. Den elektriska driftens stora beroende förklaras med att det är produktionsfasen av fordonet som belastar ett elektriskt fordon mest angående både utsläpp av växthusgaser och kostnader. Utöver denna förklaring är också driftskostnaden betydligt lägre för elektrisk drift än för bensin som drivmedel, detta medför en dubbel positiv effekt av att förlänga körsträckan för elbilar. Dieselfordonet har en något högre produktionskostnad. Desto längre det används, desto lägre kostnad per ton CO₂.

Vidare kan man ställa sig frågan om hur dessa resultat förhåller sig i den 2d-illustration som tidigare framställts i figur 27. Figur 34 visar beroendet av etanol, HVO och svensk elmix för de körsträckor studerade i känslighetsanalysen. Även en total körsträcka om 44 000 mil är inkluderad för HVO och elektrisk drift. Genom denna framställning blir den nämnda dubbla vinsten för elektrisk drift tydlig; en längre körsträcka innebär både en ökad CO₂-reduktion och även en reduktion av den relativa kostnaden. Biodrivmedlen å andra sidan medför en ökad CO₂-reduktion, men däremot en ökad relativ kostnad jämfört med bensin.

Körsträckan om 44 000 mil för HVO och elektrisk drift påvisar den totala körsträckan som krävs för att elektrisk drift skall nå samma nivå av kostnadsökning relativt bensin som HVO; vilket även innebär att måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' är ungefär densamma för de två alternativen.

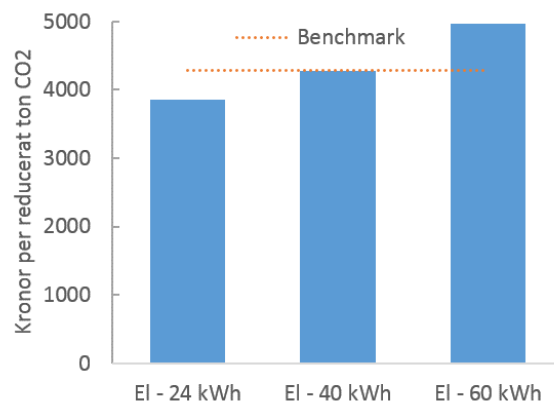


Figur 34: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för känslighetsanalysen av total körsträcka. Etiketter motsvarar bränsle med tusentals mil som total körsträcka.

9.3 Batterikapacitet och elmix i batteriproduktion

Baserat på Ellingsens studie [32] rörande CO₂-utsläpp från batteritillverkning görs två känslighetsanalyser på batterier. Dels hur stor inverkan batterikapaciteten har på slutresultatet, och dels hur stor inverkan val av elmix under batteritillverkningen har.

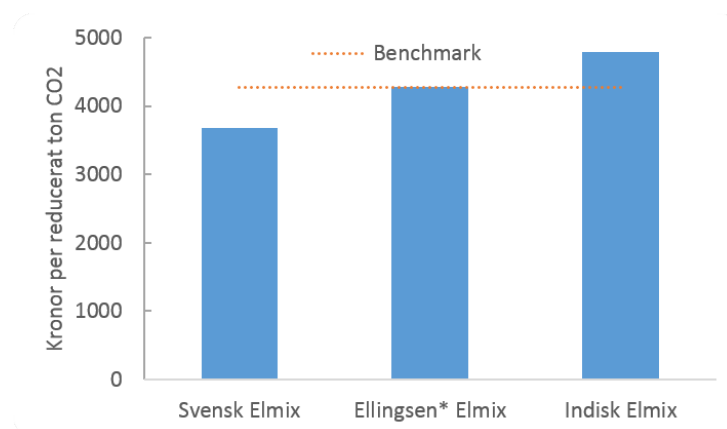
Baserat på Ellingsens resultat om 173 kg CO₂/kWh batteri, presenteras i figur 35 resultatet från tre olika val av batterikapaciteter; 24 kWh, 40 kWh samt 60 kWh. Benchmark är satt till fallet med 40 kWh vilket motsvarar resultatet från figur 28 i sektion 8.



Figur 35: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för elektriskt fordon beroende på batterikapacitet. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för 'svensk elmix' i figur 28 med en batterikapacitet på 40 kWh.

Resultatet i figur 35 berör enbart CO₂-utsläpp under batteritillverkning. Indirekt påverkar batterikapacitet även parametrar såsom bränsleförbrukning och pris, men för att isolera inverkan av växthusgaser under batteritillverkning hålls övriga parametrar konstanta. Den viktigaste trenden är att låg batterikapacitet sänker den relativa kostnaden per CO₂, då utsläppen från batteriproduktionen minskar.

Val av elmix i batteritillverkning varierar också i denna känslighetsanalys. Enligt Ellingsen medför förnybar elmix att växthusgasutsläpp blir 72 kg CO₂/kWh batteri och indisk elmix 242 kg CO₂/kWh batteri i specifika växthusgasutsläpp från batteritillverkning. Dessa siffror för en batterikapacitet på 40 kWh medför en förändring i kostnad per ton CO₂ enligt figur 36, där benchmark motsvarar resultatet från figur 28 i sektion 8.



Figur 36: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för elektriskt fordon beroende på val av elmix i batteriproduktion. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för 'svensk elmix' i figur 28.

*Tre huvudsakliga kraftslag: 46 % kol-, 33 % kärn- och 15 % naturgas-kraft, se sektion 6.2.2.

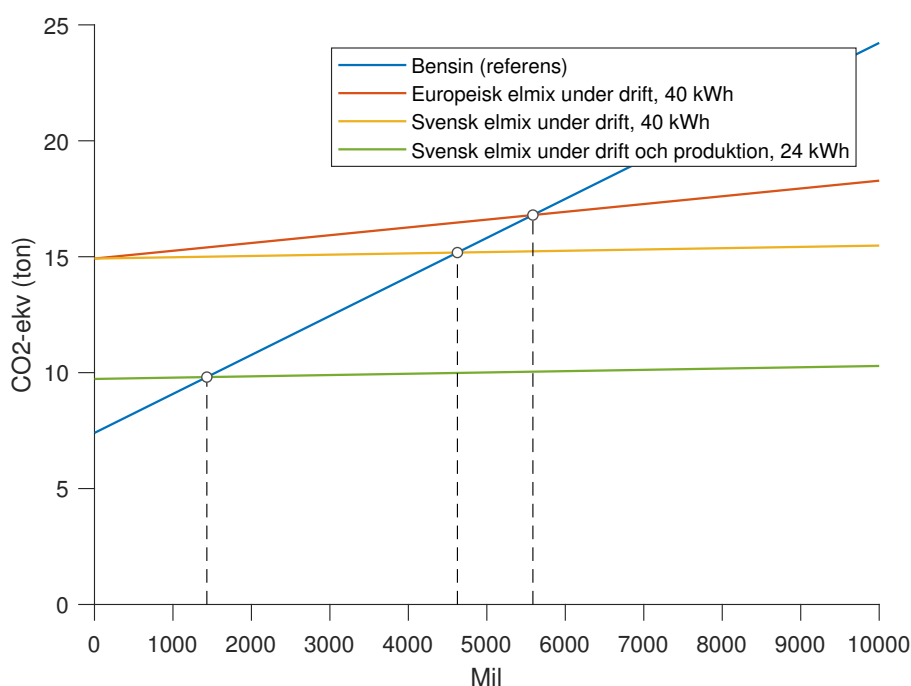
Enligt figur 36 medför förnybar elmix i batteriproduktionen att det resulterande måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' minskar med cirka 14 %. Indisk elmix med främst kolkraft bidrar istället med en ökning om 12 %.

Fullständiga värden för koldioxidutsläpp för samtliga kombinationer av elmix och batterikapaciteter presenteras i tabell 17, uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter.

Tabell 17: Koldioxidutsläpp från batteritillverkning för nio olika kombinationer av batterikapaciteter och elmix under produktion.

CO ₂ -utsläpp [kg]	24 kWh	40 kWh	60 kWh
Svensk elmix	1728	2880	4320
Ellingsen elmix	4152	6920	10380
Indisk elmix	5808	9680	14520

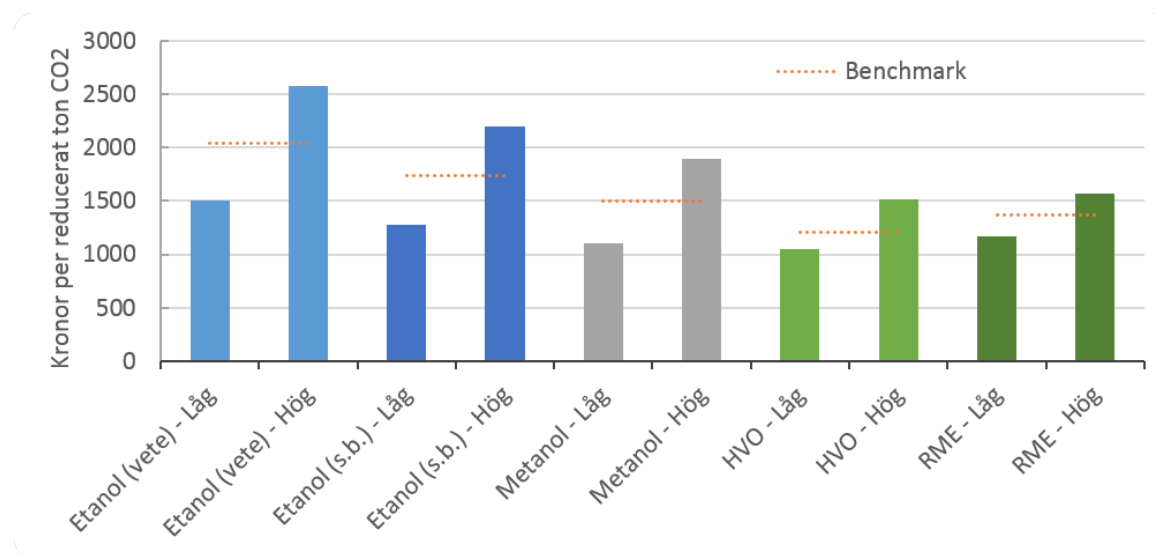
Batteripaketet är en av de främsta anledningarna till varför utsläppen av växthusgaser från en elbil är större än de från produktionen av ett konventionellt fordon. Det krävs således en viss körsträcka innan denna besparing av koldioxid har skett, vilken beror på både batterikapacitet och elmix under batteritillverkning. Figur 37 visar de kumulativa utsläppen av växthusgaser efter förlupen körsträcka för fyra scenarion. Figuren visar att en elbil med ett batteripaket på 40 kWh som körs på europeisk elmix har lägre kumulativt utsläpp av växthusgaser efter ca 5600 mil, och samma bil istället driven på svensk elmix minskar denna sträcka till 4700 mil. Vid minskning av batterikapaciteten till 24 kWh och en antagen förnybar elmix i batteriproduktion, minskar denna körsträcka till 1400 mil.



Figur 37: Illustration av hur lång körsträcka som krävs för tre val av elbilar innan de kumulativa utsläppen understiger de av ett bensindrivet referensfordon.

9.4 Produktionskostnad av biodrivmedel

Produktionskostnaden för diverse biodrivmedel är en viktig känslighetsanalys att utföra, då produktionskostnader ofta är osäkra och varierar kraftigt beroende på processdesign och råvarubestånd. I sektion 7.1 lades underlag fram för variationer för produktionskostnader för de studerade biodrivmedlen. Höga- respektive låga produktionskostnader är valda enligt värden i figur 22, och vars resultat genom en känslighetsanalys presenteras i figur 38. Benchmark är satt till fallen som motsvarar resultatet från figur 28 i sektion 8. Produktionskostnaden för den fossila bensinen som används som referens är konstant = 4.2 kr/liter.



Figur 38: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för olika val av biodrivmedel beroende på produktionskostnad per liter bensinekvivalent. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för respektive biodrivmedel i figur 28.

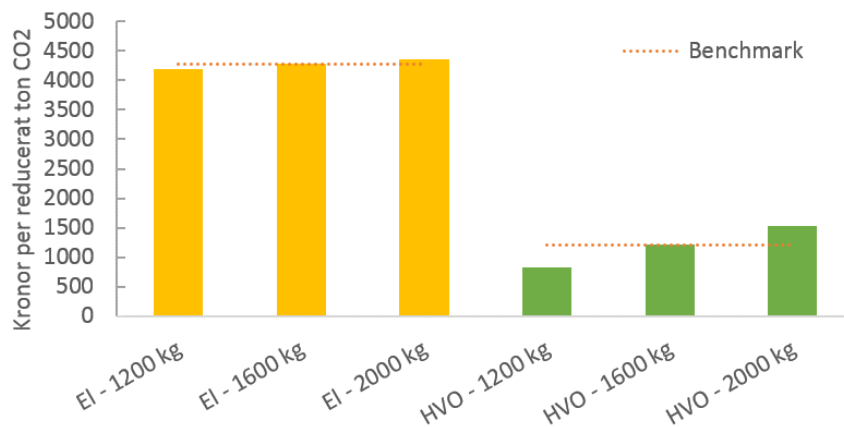
9.5 Vikt av fordon

Fordonsvikten är en parameter som främst påverkar bränsleförbrukningen, vilket är vad som studeras i denna känslighetsanalys. Vikten antas däremot inte påverka varken kostnad eller växthusgasutsläpp under fordonsproduktion för att isolera effekten av variation i bränsleförbrukning.

Tre olika vikter har studerats; utgångsläget 1600 kg med min- och maxvärden om 1200 kg och 2000 kg. De resulterande bränsleförbrukningarna för dels elektrisk drift och dels ett dieselfordon med HVO som bränsle presenteras i tabell 18. Figur 39 visar variationen av 'kronor per reducerat ton CO₂'. Båda alternativen jämförs mot en 1600 kg bensinbil som referens för samtliga fordonsvikter.

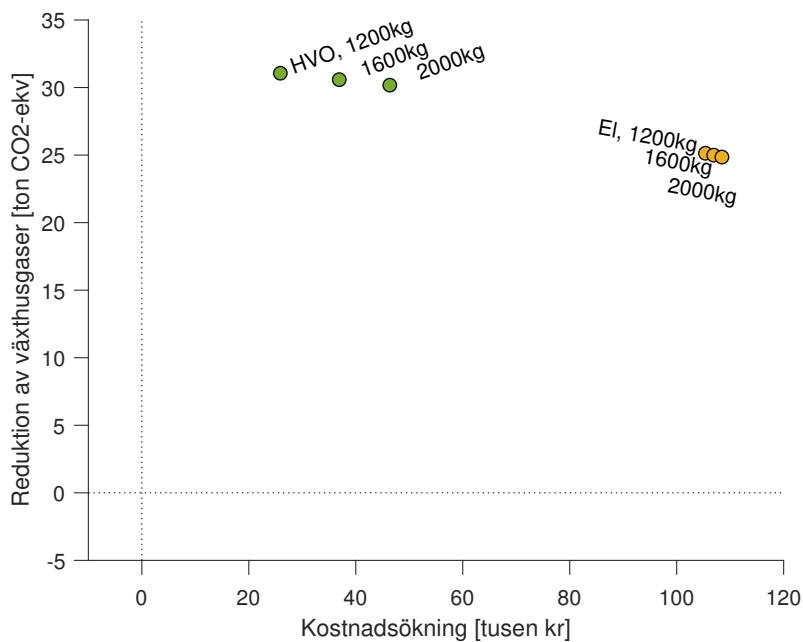
Tabell 18: Bränsleförbrukning per mil för tre val av vikter två bränslen: HVO i en dieselmotor samt elektricitet.

Bränsle	1200 kg	1600 kg	2000 kg
HVO (liter/mil)	0,38	0,45	0,51
El (kWh/mil)	0,98	1,12	1,26



Figur 39: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för ett elektriskt fordon och ett dieselfordon med HVO som bränsle beroende på fordonsvikt. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för respektive fordon i figur 28.

Fordonsvikten påverkar bränsleförbrukningen som i sin tur påverkar både kostnad och CO₂-utsläpp under livscykel. Figur 40 illustrerar hur reduktionen/ökningen av växthusgaser förhåller sig mot kostnadsminskning/ökning med utgångsvikt 1600 kg.

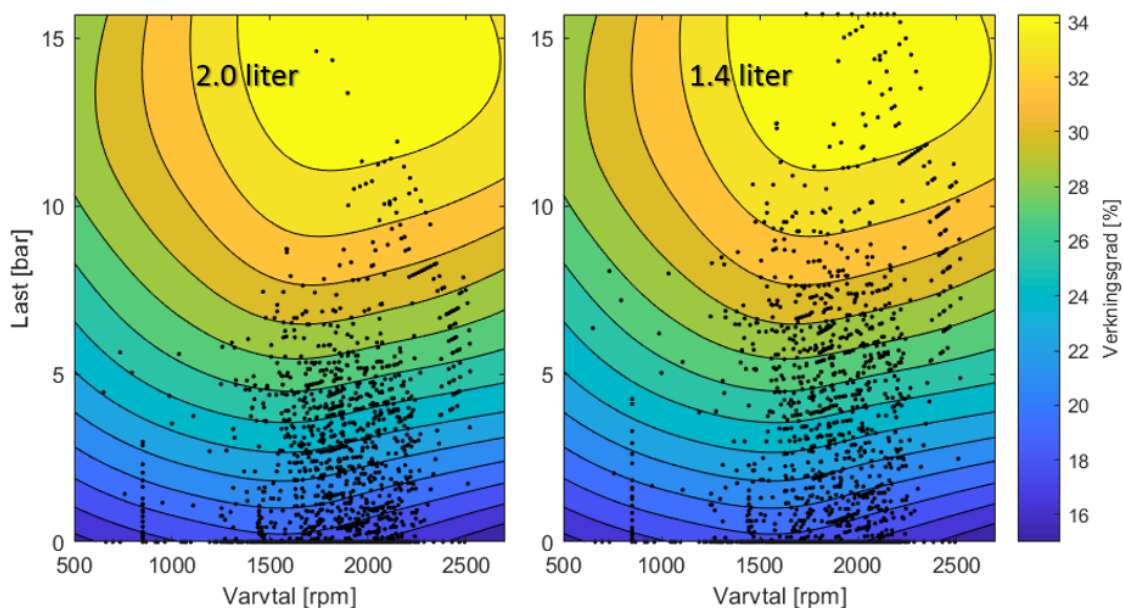


Figur 40: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för känslighetsanalysen av fordonsvikt.

9.6 Downsizing av förbränningsmotor

Downsizing kallas fenomenet att välja en motor med lägre slagvolym än tidigare för samma eller ett liknande fordon. Syftet är delvis att placera driftpunkter vid högre verkningsgrader än vad en motor med högre slagvolym hade gjort. Denna känslighetsanalys utförs genom simulering av bränsleförbrukningen för ett 1600 kg tungt fordon, och jämför två slagvolym; en motor på 1.4 liter och en med ursprungsfallet 2.0 liter. För dessa två val studeras sedan både etanol (vete) och HVO för en otto- respektive dieselmotor.

Hur driftpunkterna placeras i verkningsgrads-kartan för de två slagvolymerna illustreras i figur 41. Den lägre slagvolymen (bild t.h.) kräver en högre last i form av BMEP för att följa körcykelns hastighetsprofil. Samtliga driftpunkter placeras därför vid högre laster och därmed ökar också den genomsnittliga verkningsgraden.

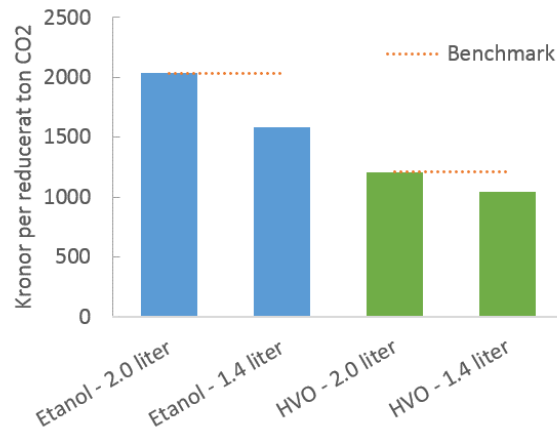


Figur 41: Driftpunkter för två val av slagvolym, 2.0 (bild t.v.) samt 1.4 liter (bild t.h.) för verkningsgrads-kartan för den studerade ottomotorn.

Den lägre slagvolymen resulterar i en lägre bränsleförbrukning för såväl otto- som för dieselmotorn. Resultande bränsleförbrukningar för etanol (ottomotor) och HVO (dieselmotor) presenteras i tabell 19. Bränsleförbrukningens inverkan på resultatet 'kronor per reducerat ton CO₂' presenteras sedan i figur 42 för dessa val av bränslen samt slagvolym.

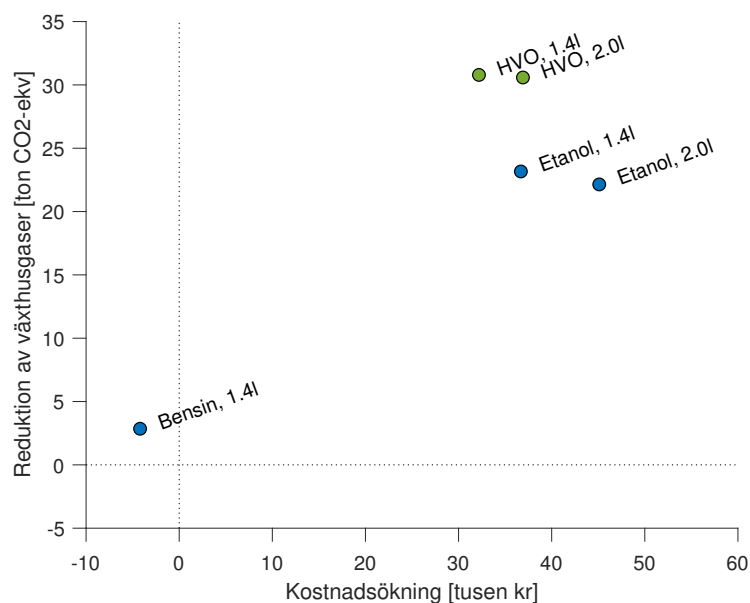
Tabell 19: Bränsleförbrukningar för diverse val av bränslen och slagvolym vid downsizing.

Bränsle och slagvolym	Bränsleförbrukning (l/mil)
Bensin, 1.4 liter	0,54
Bensin, 2.0 liter	0,59
Etanol, 1.4 liter	0,82
Etanol, 2.0 liter	0,9
HVO, 1.4 liter	0,42
HVO, 2.0 liter	0,45



Figur 42: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för bränslena etanol (vete) och HVO beroende på två val av slagvolym. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för respektive bränslen för en motor på 2.0 liter i figur 28.

Bränsleförbrukningen påverkar både kostnad och växthusgasutsläpp under livscykeln. Figur 40 illustrerar hur reduktionen av växthusgaser förhåller sig mot kostnadsökningen för en 1.4 liters motor relativt en motor på 2.0 liter för de studerade bränslena relativt referensen bensin (2.0 liter). Notera även inkludering av enbart downsizing av bensinmotorn (Bensin, 1.4l).

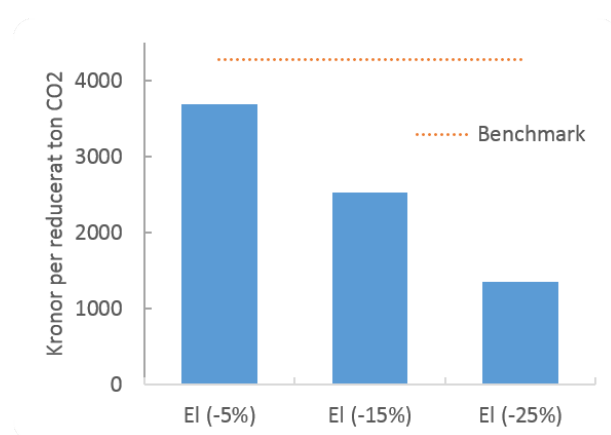


Figur 43: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för känslighetsanalysen av slagvolym för förbränningsmotorer.

9.7 Produktionskostnad för elektriskt fordon

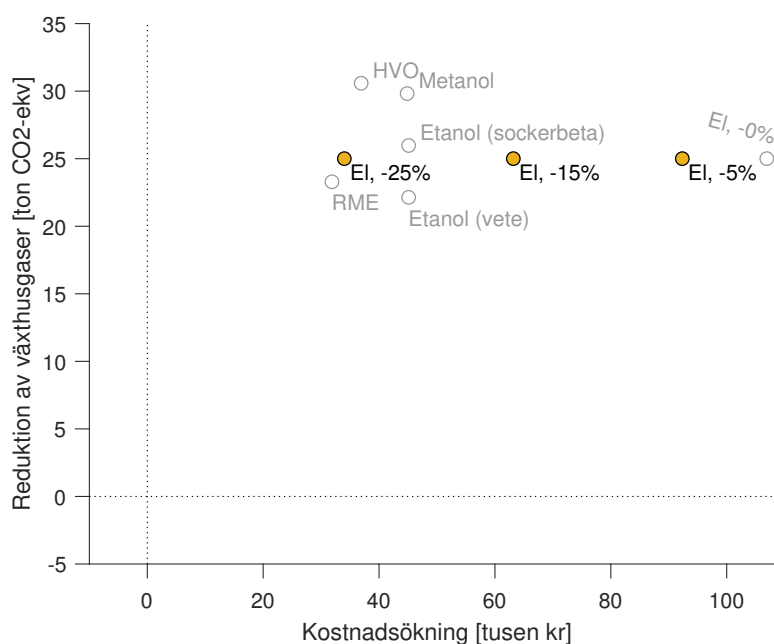
Produktionskostnaden för det elektriska fordonet inkluderas som känslighetsanalys. Tre scenarion är inkluderade i denna känslighetsanalys där produktionskostnaden minskar; -5 %, -15 % och -25 % av den ursprungliga produktionskostnaden.

Figur 44 presenterar den variation i resultatet som uppstår på grund av lägre produktionskostnad av fordonet. Benchmarknivån är satt till fallet utan någon reduktion av produktionskostnad, vilket motsvarar resultatet från figur 28 i sektion 8.



Figur 44: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för elektriskt fordon beroende på produktionskostnad för fordonet. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för respektive fordon i figur 28.

Figur 45 visar hur denna känslighetsanalys förhåller sig i den 2-dimensionella illustration som tidigare ställts upp. Här inkluderas också biodrivmedel i bakgrunden för att möjliggöra en enkel jämförelse mellan elektrisk drift och biodrivmedel.



Figur 45: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för känslighetsanalysen av produktionskostnad av elektriskt fordon.

Slutsatsen kan dras att elektrisk drift befinner sig i samma område som biodrivmedlen om reduktionen av produktionskostnad närmar sig 20 till 25 % för elbilen. Då elektriska fordon är ett relativt nytt koncept som fortfarande påvisar reduktioner av produktionskostnader understryker denna känslighetsanalys potentialen med elektriska drivlinor.

9.8 Plug-in-Hybrid

Även om det inte strikt räknas som en känslighetsanalys, ställs ett scenario här fram för att uppskatta hur resultatet från en plug-in-hybrid hade förhållit sig jämfört med resterande alternativ i denna studie. Den simulering som utförts inkluderar inte en förbränningsmotors- och elektrisk drift på en gemensam drivlina, men däremot kan de två alternativen undersökas i olika driftsfaser i körcykeln för att uppskatta bränsleförbrukningar för en hypotetisk plug-in-hybrid.

Det är sedan tidigare känt att en elektrisk drivlina är bäst lämpad för stadskörning medan en förbränningsmotor lämpas bäst för landsväg med en större andel stationära hastigheter. Med ett antagande om att körning i tätort (lätt och tung stadskörning i WLDC) sker på elektrisk drift och att körning på landsväg (landsväg och motorväg i WLDC) sker med en förbränningsmotor, kan en något optimerad bränsleförbrukning uppskattas.

För att sedan uppskatta produktionskostnaden av fordonet används prisnivåer för två fordon på marknaden som existerar i både ren elektrisk drift, men även som plug-in-hybrid. Hyundai Ioniq [39] och Kia Niro [40] används som referenser, som båda finns som alternativen hybrid, plug-in-hybrid eller ren elektrisk drift. Både Hyundai Ioniq plug-in och Kia Niro plug-in har en batterikapacitet på 8.9 kWh. Kostnaden för en Ioniq plug-in är 15 % lägre än en Ioniq EV, på kostnadsnivåerna 319.900 – respektive 374.900 kr inklusive moms. Kia Niro (plug-in) har ett pris på 304.900 kr som jämförs med helelektriska e-Niro på 444.900 kr. vilket motsvarar en 32 % lägre kostnad för plug-in-hybriden. Med dessa prisnivåer i åtanke uppskattas den plug-in-hybrid som undersöks i denna studie ha en 25 % lägre produktionskostnad än det helelektriska fordon som studerats genom hela denna studie. Sammanfattningsvis har den plug-in-hybrid som utformas i denna studie specifikationer enligt tabell 20.

Tabell 20: Antaganden om parametrar för uppskattningen av resultatet från en plug-in-hybrid.

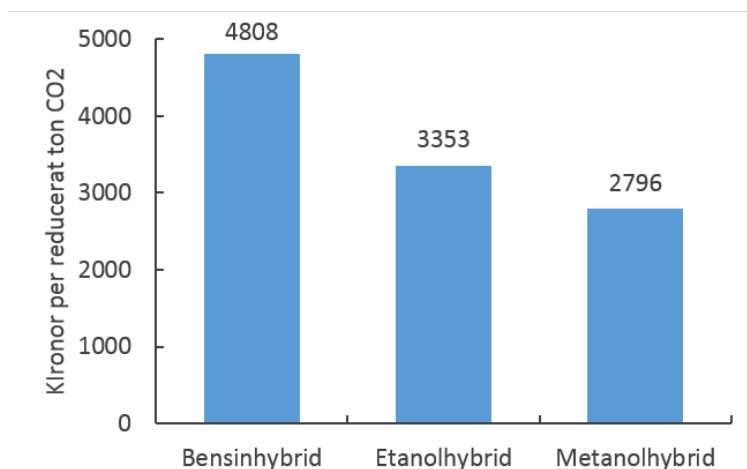
Parameter	Värde	Påverkar
Total körsträcka	20.000 mil	Bränsleförbrukning
Slagvolym	1.4 liter	Bränsleförbrukning
Vikt av fordon	1600 kg	Bränsleförbrukning
Batterikapacitet	8.9 kWh	Produktion fordon (CO ₂)
Produktionskostnad	219.000 kr (75 % av EV)	Produktion fordon (kronor)

Plug-in-hybriden antas ha en otto-motor, och därmed kan bränsleförbrukningar simuleras för tre bränslen: Bensin, etanol och metanol. Resulterade bränsleförbrukningar i form av både flytande bränslen och elektricitet presenteras i tabell 21. Det bör nämnas att denna simulering inte är optimal, då den regenerativa bromsningen ej används för fallet då förbränningsmotorn körs, d.v.s. under landsväg och motorväg. Betydliga mängder bromsenergi finns tillgänglig att återvinna i dessa körfaser, men tappas genom denna förenklade simulering.

Tabell 21: Bränsleförbrukningar från simulering av en plug-in-hybrid med elektrisk drift vid körning i tätort och drift av förbränningsmotor på landsväg.

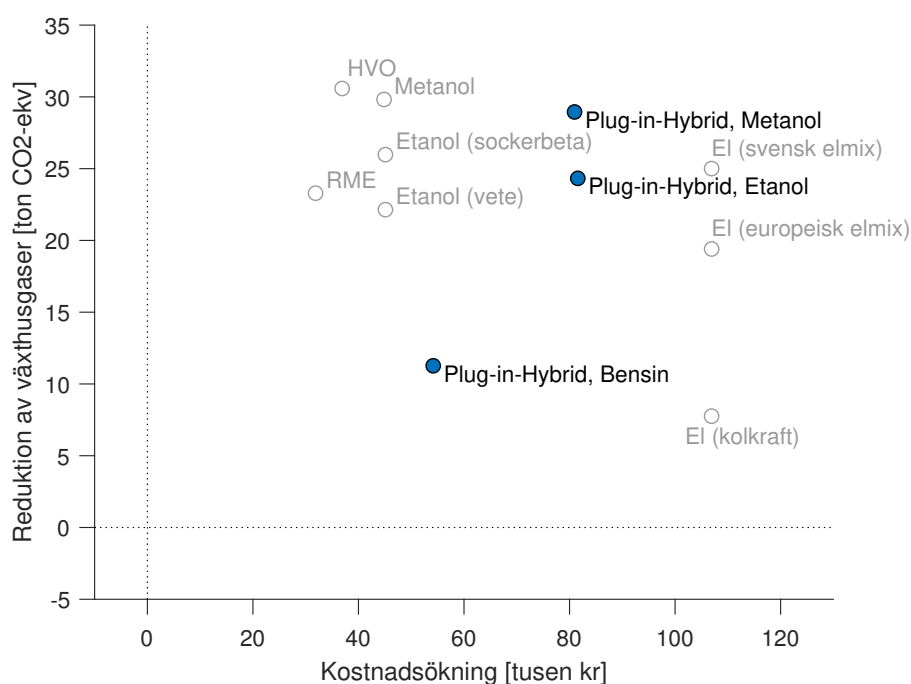
Val av bränsle	Liter per mil	kWh (el) per mil
Bensin	0,35	0,28
Etanol	0,54	0,28
Metanol	0,72	0,28

Inverkan på måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' presenteras i figur 46. Referensobjektet är densamma som för de ursprungliga resultaten i sektion 8, d.v.s. en bensindriven bil på 1600 kg, 2.0 liter slagvolym och en total körsträcka om 20 000 mil. Elektriciteten antas vara svensk elmix.



Figur 46: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för maximering av CO₂-reduktionen per krona för tre val av bränslen i en uppskattad plug-in-hybrid. Valen av optimeringsparametrar visas i tabell 22.

Den resulterande 2d-illustration som tidigare framställts presenteras i figur 47, med de ursprungliga resultaten från sektion 8 markerade i bakgrunden för att ge läsaren en referens att förhålla sig till.



Figur 47: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för maximering av CO₂-reduktionen per krona för tre val av bränslen i en uppskattad Plug-in-Hybrid. Valen av optimeringsparametrar visas i tabell 22.

10 Maximering av koldioxidreduktion per krona

För att maximera kostnadseffektiviteten av att reducera koldioxid, används resultaten i sektion 8 som utgångsläge. De känslighetsanalyser som senare utförts i sektion 9 ger sedan riktlinjer om vilka åtgärder som krävs för att öka kostnadseffektiviteten. Från dessa känslighetsanalyser kan följande slutsatser dras:

- En ökad körsträcka förbättrar kostnadseffektiviteten för både elektrisk drift och för dieselmotorn, där störst inverkan fås på elektrisk drift.
- Stadskörning med elektrisk drift bidrar med en betydelsefull förbättring relativt bensin. Dieselmotorn ser även en mindre förbättring i stadstrafik, om än mindre än den av el.
- Batterikapaciteten har stor inverkan på utsläpp av växthusgaser, där låg batterikapacitet med förnyelsebar el medför höga reduktioner av CO₂.
- Högre/lägre fordonsvikt påverkar direkt bränsleförbrukning avsevärt för både förbränningsfordon och elektriska fordon. Däremot är påverkan på måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' försumbar för elektrisk drift.
- Downsizing påverkar direkt bränsleförbrukningen, vilket vidare innebär en signifikant inverkan på både utsläpp av CO₂ och kostnad under driftsfasen för förbränningsfordon.
- Produktionskostnaden av biodrivmedel har stor inverkan på kostnaden under driftsfasen.
- Produktionskostnaden för elbilen har mycket stor inverkan på resultatet, då produktionskostnaden av just fordonet står för en större andel av hela livscykelns kostnad jämfört med förbränningsmotorer.

För biodrivmedel önskas således ett fordon som har en lång total körsträcka, med både lägre vikt och lägre slagvolym jämfört med bensinbilen. Dessa åtgärder minskar därmed den total bränsleförbrukningen som står för en stor del av både utsläpp av växthusgaser och produktionskostnad. Med ett antagande om en låg produktionskostnad för bränslet kan därefter kostnadseffektivitet öka ytterligare.

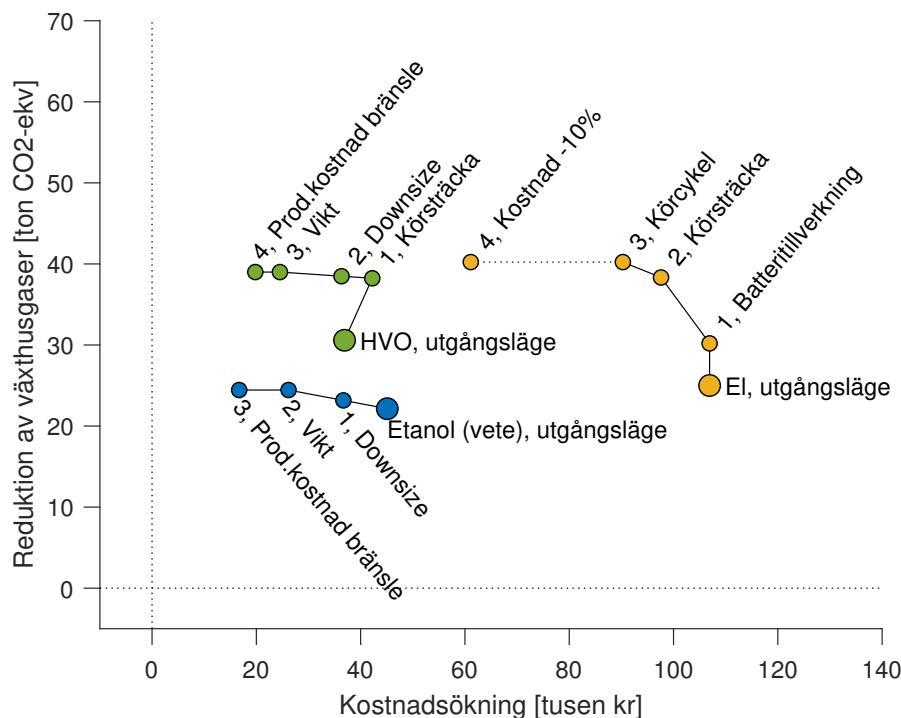
För elektrisk drift önskas en förnyelsebar elmix i drift, men även under tillverkningen av batteripaketet medför förnyelsebar el stor inverkan. En låg batterikapacitet påverkar dessutom resultatet avsevärt. Vi vill anta en lång körsträcka, samt även anta användning enligt stadskörning. Ett antagande om en kostnadsminskning görs även för att uppskattningsvis motsvara den besparing i kostnad som skett på grund av lägre batterikapacitet. Vidare utveckling av detta antagande sker under diskussion i sektion 10.1.

De val av drivmedel som studeras och optimeras i denna sektion är **HVO** som dieselsättande bränsle till förbränningsmotor, **etanol (vete)** som bensinersättande bränsle, och slutligen **svensk elmix** till en elektrisk drivlina. Genom att steg för steg optimera en parameter i taget, kan man följa inverkan på både den 2d-illustration som tidigare presenterats och även måttet 'kronor per reducerat ton CO₂'. I tabell 22 presenteras de optimeringar som utförts samt i vilken följd de gjorts.

Tabell 22: Val av åtgärder för att optimera måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för tre studerade bränslen och drivlinor.

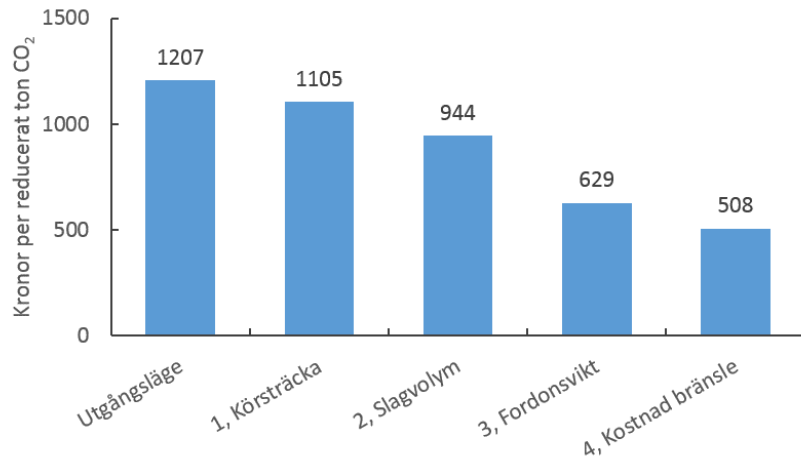
Val av åtgärd	Beskrivning	Ursprungsvärde	Nytt värde
HVO			
1, Körsträcka	Ökning av den totala körsträckan.	20.000 mil	25.000 mil
2, Slagvolym	Minskning av slagvolymen	2.0 liter	1.4 liter
3, Fordonsvikt	Minskning av fordonsvikten	1600 kg	1200 kg
4, Kostnad bränsle	Antaget lägre värde för biodrivmedel	7.5 kr/l b-ekv	7.0 kr/l b-ekv
Etanol (vete)			
1, Downsize	Minskning av slagvolymen.	2.0 liter	1.4 liter
2, Fordonsvikt	Minskning av fordonsvikten	1600 kg	1200 kg
3, Kostnad bränsle	Antaget lägre värde för biodrivmedel	8.0 kr/l b-ekv	7.0 kr/l b-ekv
Elektrisk drivlina			
1, Batteritillverkning	Minskning av kapacitet + förnybar el	Ellin. elmix, 40 kWh	Sv. elmix, 24 kWh
2, Körsträcka	Ökning av den totala körsträckan	20.000 mil	25.000 mil
3, Körcykel	Drift enligt 'Tung Stadskörning'	Blandad körning	Tung stadskörning
4, Kostnad -10%	Produktionskostnad för fordon	291.000 kr	262.000 kr

Resultatet av de optimeringar som valts enligt tabell 22 presenteras i figur 48, som visar hur utgångspunkterna för HVO, Etanol (vete) och Svensk elmix förflyttar sig i den 2d-illustration som tidigare framställts.

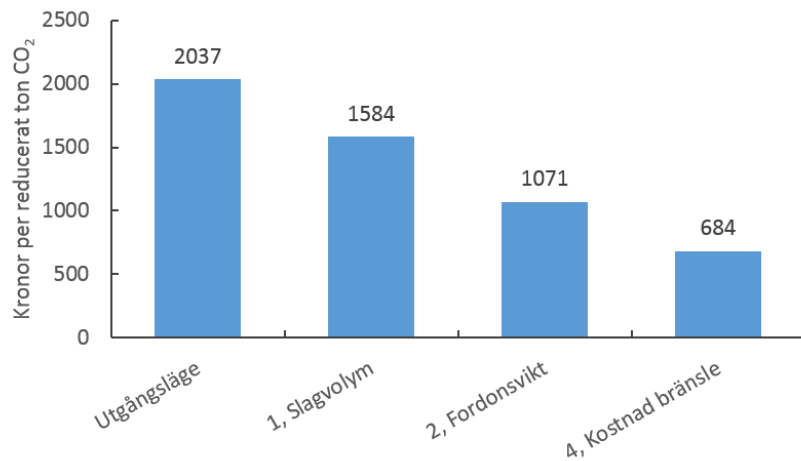


Figur 48: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för maximering av CO₂-reduktionen per krona för tre val av bränslen. Valen av optimeringsparametrar presenteras i tabell 22.

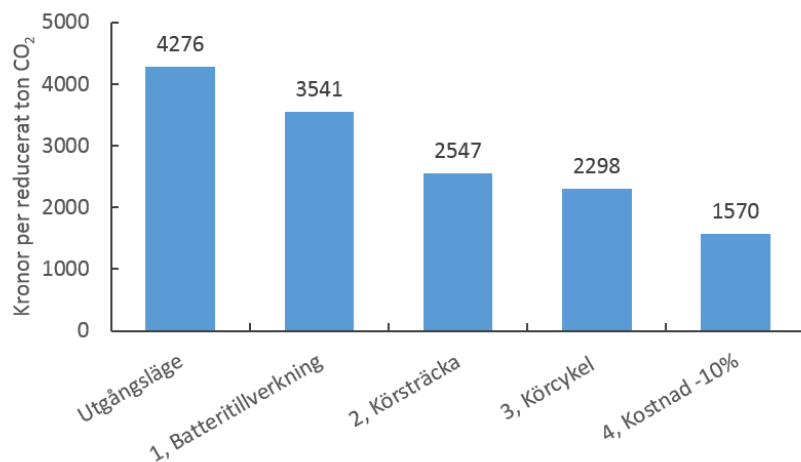
Hur måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' påverkas i varje enskilt steg presenteras slutligen för de tre drivmedlen HVO, Etanol (vete) och Svensk elmix i figurer 49, 50 respektive 51.



Figur 49: Optimering av måttet *kronor per reducerat ton CO₂* för HVO som bränsle, enligt åtgärder presenterade i tabell 22.



Figur 50: Optimering av måttet *kronor per reducerat ton CO₂* för etanol (vete) som bränsle, enligt åtgärder presenterade i tabell 22.



Figur 51: Optimering av måttet *kronor per reducerat ton CO₂* för svensk elmix som bränsle, enligt åtgärder presenterade i tabell 22.

10.1 Diskussion

Biodiesel i form av HVO har lägst kostnad per reducerat ton CO₂ som utgångsläge. Detta beror på flera anledningar: Dieselmotorn har relativt hög verkningsgrad, driftpunkter är mer optimala i den studerade körcykeln än bensenmotorns motsvarighet, och produktionskostnader för HVO och RME är idag också låga relativt bensinersättande alkoholer. Detta medför däremot också att förbättringspotentialen är något begränsad jämfört med andra alternativ. Figur 49 visar resultatet från optimeringen av HVO, där den totala körsträckan har en mindre men klart märkbar inverkan på resultatet. Vidare påverkar optimering av slagvolym och fordonsvikt resultatet ytterligare, medan en lägre produktionskostnad för bränslet har en mindre inverkan.

Alkoholer i form av etanol hade högst kostnad per reducerat ton CO₂ som utgångsläge för samtliga brännbara bränslen. Genom att däremot välja en mindre slagvolym och att minska fordonsvikten, nära halverar man måttet 'kronor per reducerat ton CO₂'. I enbart åtgärden att reducera slagvolymen från 2.0 liter till 1.4 liter bidrar detta steg med en reduktion av kronor per ton CO₂ med 32 % för etanol medan samma åtgärd för HVO bidrar med en reduktion om 15 %. Detta understryker vikten av att välja rätt motor till rätt ändamål, speciellt för ottomotorer. Utöver detta uppvisar både etanol och metanol en specifik potential för alkoholer som saknas hos bränslen som HVO och RME, nämligen en betydligt högre cylinderkylning än bensen vilket i sin tur kan höja verkningsgraden och minska bränsleförbrukningen. Detta omnämns under val av verkningsgrads-kartan i bilaga A.1.

Elektrisk drift hade utan tvekan högst kostnad per reducerat ton CO₂ som utgångsläge, men uppvisar istället en stor potential. En klimatsmart batteritillverkning har betydelsefull inverkan på resultatet, där bäst resultat fås med låga batterikapaciteter och förnybar elmix i batteriproduktionen. Detta är däremot en faktor som går emot dagens trend, nämligen att elbilar säljs med allt större batterikapacitet då efterfrågan på en lång räckvidd ökar. De resultat som tas fram i denna studie bör kunna styrka argument för att hitta och undersöka andra medel av att öka räckvidd eller minska behovet av räckvidd, exempelvis elektrifierade vägar eller automatisk snabbladdning.

Vidare förbättras också resultatet för elektrisk drift genom långa körsträckor. Som tidigare nämnt finns det en dubbel vinning i att köra på el istället för bensen; både driftskostnad och utsläpp är lägre vid drift på förnyelsebar el. Detta innebär att när väl fordonet är producerat (med både kostnads- och utsläppsintensiva processer) bör fordonet användas så länge som möjligt för att maximera reduktionen av växthusgaser.

En ytterligare faktor som bör understrykas är att elektrisk drift inte innebär några direkta emissioner under drift, vilket är en stor potential för att ersätta trafik i tätort med elektrisk drift. Det är oftast i tätort där oskyddade trafikanter vistas som även utsätts för partikelutsläpp. Det råkar även vara så att det är i just tätortskörning som elektrisk drift uppvisar bäst resultat vid ett ersättande av bensenbilar genom regenerativ bromsningsteknik, vilket ytterligare ökar argumentet för att elektrifiera tätortstrafik.

Slutligen är produktionskostnaden för fordonet en av de största faktorerna som inverkar på resultatet 'kronor per reducerat ton CO₂' för elbilar. Den statliga utredningen *Fossilfrihet på väg* [2] som tidigare omnämndes i litteraturstudien i sektion 2 ger ytterligare stöd för detta påstående, nämligen att det är de höga produktionskostnaderna för elbilar som utgör den största utmaningen för ekonomisk hållbarhet. Från utgångsläget krävs enligt känslighetsanalysen i sektion 9.7 en reduktion av produktionskostnad för elbilar på cirka 20 till 25 % för att nå samma kostnadseffektivitet som biodrivmedel. Denna kostnadsreduktion sammanfaller med de siffror som är antagna som produktionskostnaden för en plug-in-hybrid, vars lägre kostnad beror på stor del av lägre batterikapacitet. Dagens trend mot allt större batterikapaciteter går i stor del hand i hand med att priset av batterier minskar, och därmed kan man också anta att vid lägre batterikapacitet att även kostnaden för fordonet självt bör minska. Produktionskostnadens beroende av batterikapacitet är däremot exkluderat ur denna studie, men uppskattas grovt i denna optimering med den kostnadsminskning om -10 % som inkluderats som det sista optimeringssteget. Detta motsvarar en besparad kostnad om 1800 Kronor per kWh batterikapacitet.

11 Sammanfattning och slutsatser

Detta examensarbete undersöker kostnadseffektiviteten av att reducera koldioxidutsläpp från personbilar genom att ersätta bensindrift med antingen biodrivmedel eller byte till en elektrisk drivlina. Det är den relativa ökningen av produktionskostnad och minskning av koldioxidutsläpp som studerats närmare, och som slutligen uttryckts i måttet 'kronor per reducerat ton CO₂'.

Bränsleförbrukning för en bensen-, diesel- och elbil har simulerats i MATLAB, vilket möjliggör att studera hur parametrar såsom fordonsvikt eller körcykler inverkar på bränsleförbrukningen. Slutsatserna från simuleringen är att det finns stor potential att tillämpa rätt fordon till rätt ändamål. Åtgärder såsom att minska fordonsvikt medför inte helt oväntat en lägre bränsleförbrukning, där en minskning från 1600 till 1200 kg innebar en 16 % lägre bränsleförbrukning för en dieselbil. Även slagvolymen av motorn varierades, där en minskning av slagvolymen från 2.0 till 1.4 liter för samma fordon medförde en reduktion av bränsleförbrukningen med 7 %. En kombination av både lägre vikt och en mindre slagvolym resulterade slutligen i en 20 % lägre bensinförbrukning. Samma åtgärder utfördes även på ett fordon med ottomotor, där motsvarande åtgärder om en lägre vikt och lägre slagvolym innebar reduktioner om 13 % respektive 9 %, med en total reduktion om 20 % vid en kombination av de två åtgärderna. Att vidare tillämpa olika drivlinor i olika körcykler påvisar även en tydlig skillnad mellan förbränningsmotorer och elektrisk drift. Elektriska drivlinor har en stor fördel vid körning i tätort, då regenerativ bromsning medför en energiåtervinning vid repetitiva inbromsningar såsom i tätortstrafik. Simuleringen visade att drift på motorväg resulterade i en två gånger så hög bränsleförbrukning som för drift i tätort för en elektrisk drivlina, med bränsleförbrukningar om 1.48 respektive 0.77 kWh per mil enligt WLTP-körcykeln. Blandad körning innebar en bränsleförbrukning om 1.12 kWh per mil. Detta kan ställas i relation till en ottomotor, som vid drift på bensen medförde bränsleförbrukningar om 0.62 liter per mil vid motorvägskörning och 0.59 liter per mil i tätort, där blandad körning innebar en bränsleförbrukning om 0.59 liter per mil. Variationen är därmed betydligt större för ett elektriskt fordon.

Avseende produktionen av fordonet innebär elektriska fordon mer koldioxidutsläpp än konventionella förbränningsfordon. Detta beror främst på batteripaketet, som i denna studie innebär utsläpp om 6920 kg CO₂-ekvivalenter för ett batteripaket på 40 kWh. Detta kan ställas i relation till utsläppen från produktionen av resten av fordonet som är på storleksnivån 7400 till 8000 kg CO₂-ekvivalenter per fordon, beroende på val av drivlina. Utsläppen från batteritillverkning har däremot stor möjlighet att reduceras. Lägre batterikapaciteter och förnyelsebar elmix under tillverkning kan medföra en reduktion från 6920 till 1728 kg CO₂ vid en reduktion av batterikapacitet från 40 till 24 kWh och om batterierna dessutom produceras med förnyelsebar el.

För kostnadseffektiviteten som undersökts genom måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' baseras initiala resultat på ett 20 000 mil och bränsleförbrukningar enligt den simulering som utförts. Dieselbilar drivna på HVO från tallolja och svenskproducerad RME framstår som kostnadseffektivast, då HVO och RME resulterar i värden på 1207 respektive 1368 kronor per reducerat ton CO₂. Låga bränsleförbrukningar och låga produktionskostnader för biodrivmedlen är förklaringar till denna kostnadseffektivitet. Bensinersättande alkoholer (metanol & etanol) resulterar i värden om 1504 till 2037 kronor per reducerat ton CO₂, och medför generellt högre värden än dieselmotorn på grund av högre bränsleförbrukningar och högre produktionskostnader för bränslet. Slutligen innebär en elektrisk drivlina som drivs på svensk elmix under livscykeln en kostnadseffektivitet om 4276 kronor per reducerat ton CO₂. Vid ett antagande om att elen istället producerats via kolkraft, landar resultatet i 13 786 kronor per reducerat ton CO₂. Den låga kostnadseffektiviteten som elektrisk drift resulterar i beror till stor del på höga produktionskostnader för fordonet självt. För att nå samma kostnadseffektivitet som biodrivmedlen krävs en minskning av elbilens produktionskostnad på 20 till 25 % (förutsatt svensk elmix).

För att maximera kostnadseffektiviteten för de studerade alternativen utfördes även ett antal känslighetsanalyser. Syftet var att identifiera vilka parametrar och antaganden som hade störst inverkan på resultatet. En slutsats i att optimera bränsleförbrukningar var att konventionella fordons driftsfas hade betydligt större inverkan på resultatet än elektriska drivlinor försedda med svensk elmix. Elektricitet från svensk elmix innebär idag både låga koldioxidutsläpp och låga produktionskostnader, vilket innebär att bränsleförbrukningen i stort sett är försumbar jämfört med den kostnad som krävs för att producera fordonet. Bränsleförbrukningen för förbränningsfordon är i motsats högst relevant, då det är just den ökade produktionskostnaden för biodrivmedel som innebär en livscykel med högre kostnad än motsvarande drift på bensen. För att maximera kostnadseffektiviteten för förbränningsfordon krävs således låga fordonsvikter i samband med låga slagvolymmer anpassade till ändamålet för att reducera bränsleförbrukningen. För elektriska fordon är en viktig parameter istället antagandet om total körsträcka. I och med att produktionen av fordonet belastas med både höga kostnader och utsläpp (och driftsfasen istället innebär *låga* kostnader och utsläpp) innebär detta att när en elbil väl är producerad bör den användas länge som möjligt. Att vidare tillämpa fordonet i tätortstrafik där regenerativ bromsningsteknik används i större utsträckning, kan kostnadseffektiviteten förbättras ytterligare. Vidare spelar batteripaketet stor roll och väljes optimalt med små kapaciteter och med förnyelsebar elmix under tillverkning.

Efter optimering av tre val av bränslen: HVO, etanol (vete som råvara) och elektrisk drift på svensk elmix, kunde kostnaden per reducerat ton CO₂ minimeras. För HVO antogs en längre körsträcka och en lägre vikt och slagvolym antogs. Vidare antogs även en låg produktionskostnad för bränslet vilket slutligen resulterade i en reduktion från 1207 till 508 kronor per reducerat ton CO₂. Motsvarande åtgärder för etanol innebar en minskning från ursprungsfallet 2037 till 684 kronor per reducerat ton CO₂. Slutligen optimerades den elektriska driften med en längre antagen körsträcka. Vidare antogs elbilen ersätta en bensinbil i tätortstrafik, utöver att batteripaketet antogs vara tillverkat genom förnyelsebar el och med en lägre kapacitet. Vid ett antagande om en 10 % lägre produktionskostnad för fordonet genom den lägre batterikapaciteten resulterade slutligen dessa val i en reduktion från 4276 till 1570 kronor per reducerat ton CO₂.

Flera parametrar har en roll i *om* eller *när* det ena alternativet är bättre än det andra. Enligt denna studie finns flera fördelar med att tillämpa elektrisk drift framförallt i tätort: Det är då den regenerativa bromsningstekniken kommer väl till pass, det är även då avsaknaden av partikelutsläpp är att föredra, men framförallt är det till detta ändamål som lång räckvidd inte är nödvändig. Detta får till följd att batterikapaciteten kan hållas låg, och koldioxidutsläpp kan minimeras under batteriproduktionen. Med samma omvända argument tillämpas biodrivmedel lämpligast i tyngre trafik. Det är stationära körcykler som är optimala för bränsleförbrukningen för såväl otto- som dieselmotorer. Tung drift på elektricitet fordrar även en större batterikapacitet, som både sker på bekostnad av koldioxidutsläpp och produktionskostnad. Angående kostnadseffektivitet är även biodrivmedel idag billigare per ton CO₂ tack vare möjligheten att använda sig av konventionella, billiga fordon.

Slutligen kommer en framtida *fossiloberoende fordonsflotta* mest troligt inte bestå av enbart biodrivmedel eller elektricitet, utan av en kombination av de två. Ändamålet som ett fordon skall uppfylla är ett transportbehov, och bara genom att göra smarta val som är väl anpassade till ändamålet kommer man uppnå en maximal kostnadseffektivitet. Med det sagt kan man fråga sig om en bil existerar som är *bra* för miljön. Det mest kostnadseffektiva valet man kan göra är att förändra transportbehovet och välja bort bilen från första början.

11.1 Fortsatt arbete

Som framtida forskningsområde rekommenderas starkt att undersöka ett större urval av bränslen. Exempel på bränslen är:

- E-bränslen från elektrolys.
- Gasformiga bränslen, både förnybara och icke förnybara. Exempelvis metan/biogas och vätgas.
- Övriga biodrivmedel såsom biogas eller etanol och metanol med andra produktionsprocesser än vad som studerats i detta arbete.
- Icke-svenskproducerade biodrivmedel.

En mer utvecklad simuleringsmodell än den i denna studie är även nödvändig. Fokus bör då ligga i att ha en mer detaljerad motormodell som möjliggör en dynamisk modell för vilket bränsle som används, med hänsyn till exempelvis parametrar såsom förångningsenergi (latent of vaporisation) eller redan förgasade bränslen som kan påverka motorns verkningsgrad. Även en större undersökning av olika körcykler är av intresse för att fånga skillnader mellan olika drivlinor och bränslen.

Produktionskostnader i denna studie är i stor utsträckning uppskattade från försäljningspriser av fordonstillverkare. Att istället basera produktionskostnader för framförallt fordonen själva på *faktiska* produktionslinjer vore betydligt mer rättvisande.

Slutligen finns mycket att hämta i att utöka systemgränserna gällande de olika livscykel-faserna. Poster såsom återvinning eller underhåll har en mindre (men på sikt betydelsefull) inverkan på slutresultatet, men har exkluderats i denna studie. Att ställa upp en mer fullständig livscykel i kommande studier kan öka reliabiliteten av dessa arbeten.

References

- [1] Energimyndigheten. *Energiläget 2017*. Sverige, 2017.
- [2] Thomas B Johansson. “Fossilfrihet på väg”. In: *Stockholm, Sweden: Ministry of Enterprise, SOU 2013* (2013).
- [3] Pål Börjesson, Linda Tufvesson, and Mikael Lantz. *Livscykelanalys av svenska biodrivmedel*. Avdelningen för miljö-och energisystem, Institutionen för teknik och samhälle, Lunds tekniska högskola, 2010.
- [4] P. Börjesson. *Dagens och framtidens hållbara biodrivmedel - I sammandrag*. Sweden: f3 Centre, 2016.
- [5] Ingvar Landälv. “Methanol as a renewable fuel—a knowledge synthesis”. In: *The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, Sweden* (2017).
- [6] Katja Tasala Gradin. “The importance of system boundaries for environmental assessment of vehicles”. PhD thesis. KTH Royal Institute of Technology, 2016.
- [7] JL Sullivan, A Burnham, M Wang, et al. *Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing*. Tech. rep. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2010.
- [8] Qinyu Qiao, Fuquan Zhao, Zongwei Liu, Shuhua Jiang, et al. “Comparative study on life cycle CO2 emissions from the production of electric and conventional vehicles in China”. In: *Energy Procedia* 105 (2017), pp. 3584–3595.
- [9] Mia Romare and Lisbeth Dahllöf. “The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-Ion batteries”. In: *Stockholm. Zugriff am 23* (2017), p. 2017.
- [10] Selma Brynolf, Maria Taljegard, Maria Grahn, and Julia Hansson. “Electrofuels for the transport sector: a review of production costs”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), pp. 1887–1905.
- [11] Goericke D. Gutzmer P. *Energy paths for road transport in the future*. Frankfurt: FVV Prime Movers. Technologies, 2018.
- [12] N. Powell. *Impact Analysis of Mass EV Adoption and Low Carbon Intensity Fuels Scenario*. CONCAWE, Environmental Science for European Refining, 2018.
- [13] BIL Sweden. *Definitiva nyregistreringar under 2018*. Sverige, 2019.
- [14] Energimyndigheten. *Drivmedel 2017 redovisning av uppgifter enligt drivmedelslagen och hållbarhetslagen*. Sverige, 2017.
- [15] John G Hayes, R Pedro R De Oliveira, Sean Vaughan, and Michael G Egan. “Simplified electric vehicle power train models and range estimation”. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*. IEEE. 2011, pp. 1–5.
- [16] WLTPfakta.se. *WLTP FAKTA*. 2019. URL: <http://wltpfakta.se/> (visited on 03/10/2019).
- [17] Volvo Car Sverige AB. *Tekniska Data*. 2019. URL: <https://www.media.volvocars.com/se/sv-se/models/v60/2017/specifications> (visited on 04/08/2019).
- [18] Matthew Brusstar, Mark Stuhldreher, David Swain, and William Pidgeon. “High efficiency and low emissions from a port-injected engine with neat alcohol fuels”. In: *SAE Transactions* (2002), pp. 1445–1451.
- [19] Robert J Middleton, Omnaath Guptha Harihara Gupta, Han-Yuan Chang, George Lavoie, et al. *Fuel efficiency estimates for future light duty vehicles, part a: Engine technology and efficiency*. Tech. rep. SAE Technical Paper, 2016.

- [20] Kaname Naganuma, Jeroen Vancoillie, Louis Sileghem, Sebastian Verhelst, et al. *Drive cycle analysis of load control strategies for methanol fuelled ICE vehicle*. Tech. rep. SAE Technical Paper, 2012.
- [21] Yoshinori Sato, Shigeaki Ishikawa, Takahito Okubo, Makoto Abe, et al. *Development of high response motor and inverter system for the Nissan LEAF electric vehicle*. Tech. rep. SAE Technical Paper, 2011.
- [22] Volvo Cars. *Motoralternativ för Volvo V60*. 2019. URL: <https://www.volvocars.com/se/bilar/modeller/v60/specifikationer/motorer> (visited on 04/09/2019).
- [23] Teknikens Värld. *Provkörning av Volkswagen E-Golf*. 2017. URL: <https://teknikensvarld.se/provkorning-av-volkswagen-e-golf-2-479878/> (visited on 04/09/2019).
- [24] Pål Börjesson, Joakim Lundgren, Serina Ahlgren, and Ingrid Nyström. “Dagens och framtidens hållbara biodrivmedel”. In: *Underlagsrapport från f3 till utredningen om fossilfri fordonstrafik. Rapport f3 13* (2013).
- [25] Europäiska Unionen. “Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC”. In: *Official Journal of the European Union* 5 (2009), p. 2009.
- [26] Robert Edwards, Jean-François Larivé, David Rickeard, and Werner Weindorf. “Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context”. In: *JRC technical reports* (2014).
- [27] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2014.
- [28] Troy R Hawkins, Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman. “Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles”. In: *Journal of Industrial Ecology* 17.1 (2013), pp. 53–64.
- [29] Anne Marie Lewis, Jarod C Kelly, and Gregory A Keoleian. “Vehicle lightweighting vs. electrification: life cycle energy and GHG emissions results for diverse powertrain vehicles”. In: *Applied Energy* 126 (2014), pp. 13–20.
- [30] Christian Bauer, Johannes Hofer, Hans-Jörg Althaus, Andrea Del Duce, et al. “The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework”. In: *Applied energy* 157 (2015), pp. 871–883.
- [31] Andrea Del Duce, Marcel Gauch, and Hans-Jörg Althaus. “Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories inecoinvent version 3”. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21.9 (2016), pp. 1314–1326.
- [32] Linda Ager-Wick Ellingsen, Guillaume Majeau-Bettez, Bhawna Singh, Akhilesh Kumar Srivastava, et al. “Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack”. In: *Journal of Industrial Ecology* 18.1 (2014), pp. 113–124.
- [33] Hyung Chul Kim, Timothy J Wallington, Renata Arsenault, Chulheung Bae, et al. “Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: a comparative analysis”. In: *Environmental science & technology* 50.14 (2016), pp. 7715–7722.
- [34] Han Hao, Zhexuan Mu, Shuhua Jiang, Zongwei Liu, et al. “GHG Emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China”. In: *Sustainability* 9.4 (2017), p. 504.

- [35] Christoph Kost, Johannes N Mayer, Jessica Thomsen, Niklas Hartmann, et al. “Levelized cost of electricity renewable energy technologies”. In: *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE* 144 (2013).
- [36] Christoph Kost, Shivenes Shammugam, Verena Jülch, Huyen-tran Nguyen, et al. “Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien”. In: *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE* (2018).
- [37] NordPool. *Market Data*. 2019. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/SE/> (visited on 03/25/2019).
- [38] Börse Express. *Study: Ferrari makes 69 000 euros profit per car*. 2018. URL: <https://www.boerse-express.com/news/articles/studie-ferrari-macht-69-000-euro-gewinn-pro-auto-39013> (visited on 04/10/2019).
- [39] Hyundai. *Hyundai IONIQ plug-in*. 2019. URL: <https://www.hyundai.se/bilar/ioniq-plug-in> (visited on 04/15/2019).
- [40] Kia. *Niro Plug-in Hybrid*. 2019. URL: <https://www.kia.com/se/nya-bilar/niro-plugin-hybrid/upptack/> (visited on 04/15/2019).
- [41] Martin Tuner. *Review and benchmarking of alternative fuels in conventional and advanced engine concepts with emphasis on efficiency, co 2, and regulated emissions*. Tech. rep. SAE Technical Paper, 2016.

A Bilaga

A.1 Val av verkningsgrads-karta

Tre verkningsgrads-kartor ligger till grund för de värden som valts. Tabell 23 visar verkningsgrader och källor till de kartor som studerats.

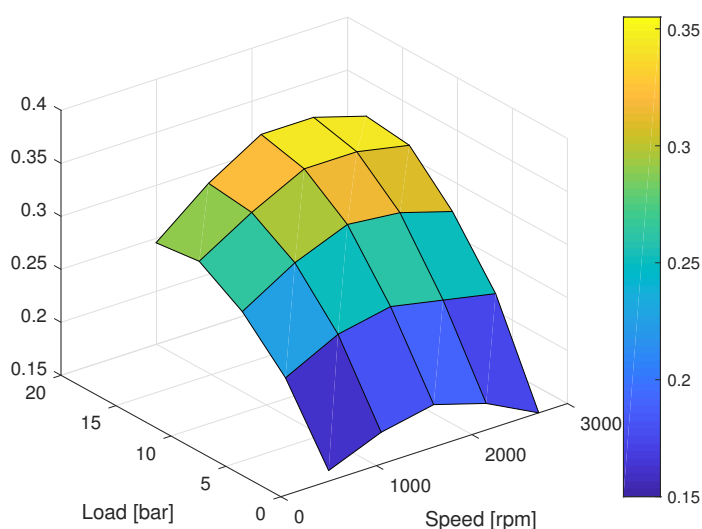
Tabell 23: Val av studerade verkningsgrads-kartor.

Karta nummer:	Topp-verkningsgrad	Cykel-verkningsgrad	Källa
1.	32 %	19 %	[20]
2.	36 %	26 %	Egna värden
3.	37 %	32 %	[19]
4.	41 %	33 %	[18]

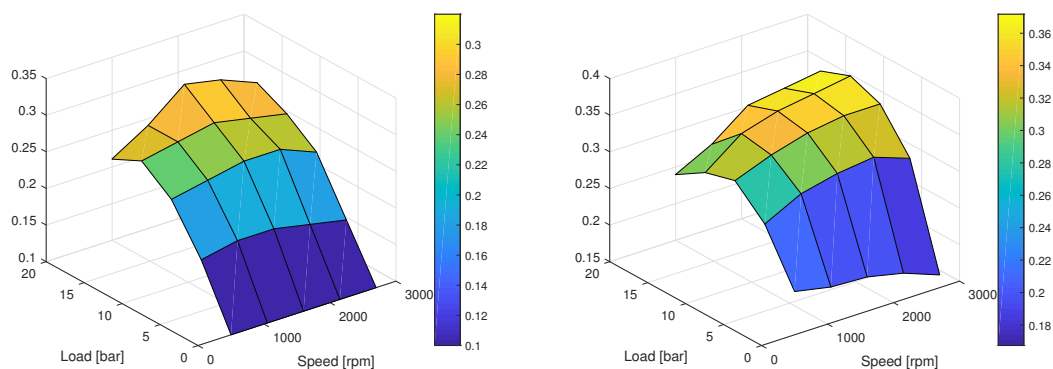
Karta nummer 1 i tabell 23 representerar en äldre modell av bensinmotor, utan EGR eller andra medel att reducera pumpförluster vid delbelastning. Med en genomsnittlig verkningsgrad på 19 % motsvarar detta en äldre bensinmotor som används på vägarna idag.

Karta nummer 3 representerar en modern bensinmotor med turboladdning, EGR och som kan köras på alkohol (metanol användes i studien vilken kartan baseras på). Alkohol som bränsle innebär en ökad cylinderkyllning relativt bensin, och möjliggör ett högre kompressionsförhållande innan knockning uppstår. Kompressionsförhållande har en betydande inverkan på verkningsgrad, och därmed även bränsleförbrukningen [41]. En cykel-verkningsgrad på 32 % motsvarar en betydligt bättre dellast-verkningsgrad än den äldre modellen och ligger i nivå med de dieslbilar som säljs idag.

Den använda kartan som studerades under arbetets gång (nummer 2) har av författaren till denna studie uppskattats vara en motor mellan dessa två alternativ vilka bedöms stå för ett lägre respektive högre värde på verkningsgrad idag. Nästan lika hög topp-verkningsgrad som den moderna kartan och förbättrad dellast-verkningsgrad (genom exempelvis EGR) relativt den äldre modellen, gör att denna mapp får representera en 'standard' bensinmotor på dagens sålda bensinbilar. I figur 52 och 53 visualiseras de tre olika valen för verkningsgrads-kartor, och resultatet av simuleringen av de tre presenteras i tabell 24.



Figur 52: Vald verkningsgrads-karta för denna studie. I tabell 23 motsvarar detta karta nummer 2.



(a) Vald verkningsgrads-karta för motorn med **låg** verkningsgrad. I tabell 23 motsvarar detta karta nummer 1. (b) Vald verkningsgrads-karta för motorn med **hög** verkningsgrad. I tabell 23 motsvarar detta karta nummer 3.

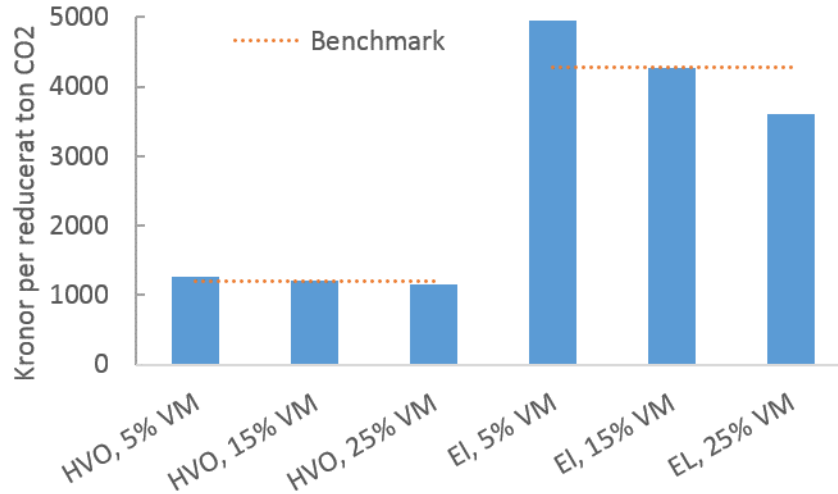
Figur 53

Tabell 24: Resultat av bensinförbrukning uttryckt i liter per mil för de olika valen av verkningsgradsmapp.

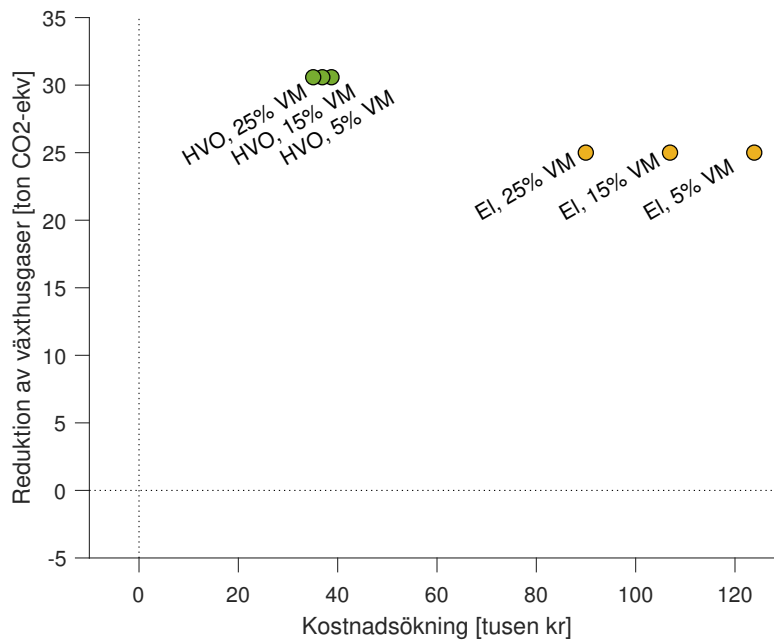
Val av mapp	Liter per mil
Basfall (Karta 2)	0,59
Karta 1	0,81
Karta 3	0,49

A.2 Känslighetsanalys: Vinstmarginal i fordonsproduktion

Den vinstmarginal som antagits för att kunna erhålla produktionskostnad för fordon är 15 % genomgående under studien. Antaganden om 5 % och 25 % vinstmarginal har antagits i denna känslighetsanalys, vars resultat presenteras i figurer 54 och 55. En tydlig trend uppmärksammas att den elektriska driften har stort beroende på den antagna vinstmarginalen. Detta är på grund av den elektriska driftens kostnader, som nästan enbart består av fordonskostnaden och i väldigt liten utsträckning kostnad för bränsle. Dieselfordonets något högre produktionskostnad än ottomotorn medför också ett svagt beroende av vinstmarginalen, än om lägre än det som för ett elektriskt fordon.



Figur 54: Känslighetsanalys av måttet 'kronor per reducerat ton CO₂' för bränslet HVO samt ett elektrisk fordon beroende på antagande om vinstmarginal. Benchmarknivån motsvarar det resultat som erhållits för 'HVO' och 'svensk elmix' i figur 28.



Figur 55: Reduktion av växthusgaser mot kostnadsökning för känslighetsanalysen av vinstmarginal.