

Slutrapport

BILTRAFIKENS KLIMATPÅVERKAN PÅ VÄG MOT KLIMATNEUTRALITET

April 2022

Göran Berndes, Daniel Johansson, Johannes Morfeldt
Chalmers Tekniska Högskola

Julia Hansson, Sofie Hellsten
IVL Svenska Miljöinstitutet

FÖRNYBARA DRIVMEDEL OCH SYSTEM 2018-2021

Ett samverkansprogram mellan Energimyndigheten och
f3 Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel

FÖRORD

Detta projekt har genomförts inom ramarna för samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system, projektnummer 50434-1. Projektet har finansierats av Energimyndigheten och f3 – Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel.

Energimyndigheten arbetar på regeringens uppdrag med energiomställningen till ett modernt, hållbart, fossilfritt välfärdssamhälle och stödjer forskning om förnybara energikällor, smarta elnät och framtidens fordon och bränslen.

f3 är en nätverksorganisation som fokuserar på utveckling av miljömässigt, ekonomiskt och socialt hållbara förnybara drivmedel. f3 finansieras gemensamt av centrets parter och Västra Götalandsregionen. Chalmers Industriteknik fungerar som värd för centret. Kansliet vid f3 utgör programkansli för samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system. (se www.f3centre.se)

Detta projekt genomförs av Chalmers Tekniska Högskola och IVL Svenska Miljöinstitutet. Vi är tacksamma för den input till våra analyser som vi fått från en rad olika aktörer (t ex fordonstillverkare, bränsleproducenter, myndigheter, skogsindustri, och andra forskare) i olika sammanhang. Här vill vi särskilt nämna Simon Davidsson Kurland som deltog i studien kring biltrafikens växthusgasutsläpp (Morfeldt et al., 2021) och Hans Petersson, David Ellison, Alex Appiah Mensah, Gustaf Egnell, Mattias Lundblad, Tomas Lundmark, Anders Lundström, Johan Stendahl, och Per-Erik Wikberg som deltog i studien om hur olika skogsbruksstrategier påverkar klimatet och - omvänt - hur klimatförändringarna kan komma att påverka den svenska skogen (Petersson et al., 2022).

Denna rapport ska citeras enligt följande:

Berndes, G., Hansson, J., Hellsten, S., Johanson, D. & Morfeldt, J. (2022) *Biltrafikens klimatpåverkan på väg mot klimatneutralitet*. Rapport nr FDOS 49:2022. Tillgänglig på <https://f3centre.se/sv/samverkansprogram/>

SAMMANFATTNING

För att nå uppsatta mål för minskade växthusgasutsläpp i Sverige måste vägtrafikens utsläpp minska betydligt. En ökad elektrifiering och användning av biodrivmedel har pekats ut som viktiga strategier. Målet med projektet som sammanfattas i denna rapport är att klargöra hur Sveriges klimatpåverkan beror på hur olika teknologier och system, relaterade till biltrafiken, utvecklas.

Vi har modellerat och analyserat växthusgasutsläpp och temperaturpåverkan av den svenska biltrafiken för ett antal scenarier där vägen till klimatneutralitet i varierande grad baseras på elektrifiering av bilparken, biodrivmedelsanvändning (med en övergång mot skogsbaserade biodrivmedel) och en minskning av biltrafiken. Vi beskriver påverkan på den globala uppvärmningen på kort och lång sikt, samt hur uppvärmningen beror på om koldioxidutsläppen härrör från fossila bränslen eller biomassa.

Metoden inkluderar scenarier för utvecklingen kring biodrivmedel och elektrifiering samt associerade koldioxidutsläpp i ett livscykelperspektiv, modellering av den svenska bilparkens förändring över tid, analyser av kolbalanser i den svenska skogssektorn, och en klimat- och kolcykelmodell. Växthusgasutsläpp från produktion och användning av bilar, el och bränslen beaktas, och även hur användning av skogsråvaror för biodrivmedelsproduktion påverkar mängden kol som finns lagrad i skog och skogsprodukter, eftersom detta har betydelse för klimatpåverkan. Känslighetsanalyser visar hur utfallet beror på faktorer som elsystemets egenskaper och formerna för skogsbruket.

Resultaten visar att både biodrivmedelsanvändning och ett förbud av förbränningsmotorer i nybilsförsäljningen kan ge betydande bidrag till att minska de fossila koldioxidutsläppen i Sverige. Effekten av ett förbud, i form av minskande fossila koldioxidutsläpp, bromsas av trögheter kopplat till omsättningen av bilparken. Att öka elektrifieringstakten är fördelaktigt även i fallet där koldioxidutsläppen från den globala biltillverkningen minskar relativt långsamt. Ett förbud mot försäljning av bilar med förbränningsmotorer år 2030 är inte tillräckligt för att nå de nationella politiska målen för transportsektorn och ett ännu tidigare förbud är sannolikt svårt att genomföra. Därför behövs också andra styrmedel eller regleringar, exempelvis krav på inblandning av biodrivmedel och andra icke-fossila drivmedel, i linje med den reduktionsplikt som finns.

Påverkan på den globala medeltemperaturen av att använda fossila bränslen och biobränslen från den svenska skogen skiljer sig åt. Temperaturökningen är ungefär linjärt relaterad till kumulativa koldioxidutsläpp från användningen av fossila bränslen, vilket i allmänhet inte är fallet för biogena koldioxidutsläpp från biobränsleanvändning (t ex biogena koldioxidutsläpp ifrån avgasrör). Vidare har koldioxidutsläpp från fossila energisystem en temperaturpåverkan som fortgår i många hundratals år efter att utsläppet har ägt rum, vilket inte gäller generellt för de biogena koldioxidutsläppen från biobränsleanvändningen eftersom bioenergisystem inte påverkar den globala kolcykeln på samma sätt som fossila energisystem. Temperaturpåverkan av biobränslen beror i stället på hur biomassa-användning för energiändamål påverkar mängden kol som finns lagrad i ekosystem och i biobaserade produkter (utöver den temperaturpåverkan som sker till följd av biobränslets livscykelutsläpp av fossil CO₂ och andra växthusgaser).

I den utsträckning biomassa-användningen i stort påverkas av en framväxande bioenergimarknad kan det också vara relevant att beakta hur detta påverkar andra substitutionsmönster än de som är direkt associerade med bioenergianvändningen. Detta har dock inte beaktats i den här studien.

SUMMARY

Achieving the Swedish national climate and transport sector targets requires that greenhouse gas (GHG) emissions from road traffic be significantly reduced in the coming decades. Vehicle electrification and biofuel use, along with reduced car travel, have been identified as important strategies. The aim of the project summarized in this report is to clarify how GHG emissions and temperature impacts of Swedish car travel, depend on how different technologies and systems, related to car travel, develop during the transition towards the targets. We present GHG emissions and temperature impacts in the short and long term, and show how global warming depends on (i) whether carbon dioxide (CO₂) emissions originate from the use of fossil fuels or biofuels; and (ii) what type of biomass is used to produce the biofuels.

The modelling and analyses are based on (i) scenarios for car travel, electrification of the car fleet, biofuel use, and decarbonization of energy systems and product supply chains; (ii) modelling of vehicle turnover in the Swedish car fleet; (iii) modelling of biomass production and carbon balances in the Swedish forest sector; and (iv) modelling of atmospheric GHG concentrations and associated global mean temperature. GHG emissions from the production and use of cars, electricity and fuels are considered, and also how carbon storage in forests and forest products is influenced by forest biomass use for biofuel production. Sensitivity analyses are made to clarify how the outcome depends on factors such as forest management practices and GHG emissions from electricity systems.

The results show that both the use of biofuels and a ban on internal combustion engines in new car sales (to achieve faster electrification) can make a significant contribution to reducing fossil CO₂ emissions in Sweden. The effectiveness of a ban, in reducing fossil CO₂ emissions, is limited by the car fleet turnover rate. Increasing the rate of electrification is beneficial even if CO₂ emissions from global car production decrease relatively slowly. A ban in 2030 is not sufficient to achieve the transport sector targets and an earlier ban is likely difficult to implement. Therefore, other policy instruments or regulations are also needed, such as emissions reduction obligation quota in road transportation requiring fuel suppliers to reduce GHG emissions of gasoline and diesel through blending with biofuels and other non-fossil fuel alternatives.

The global mean temperature increases approximately linearly with cumulative CO₂ emissions from the use of fossil fuels. This is not generally the case for biogenic CO₂ emissions from biofuel use (i.e., biogenic CO₂ emissions from cars running on biofuels) since bioenergy systems have a different influence on the global carbon cycle than fossil fuels. Furthermore, while CO₂ emissions from fossil fuel use causes warming for hundreds of years after the emissions have taken place, the temperature impact of biogenic CO₂ emissions from biofuel use depends on how the biofuel system affects the carbon storage in ecosystems and in other biobased products.

Biomass use to produce biofuels for transport can affect biomass use and substitution patterns in other sectors, which in turn affect GHG emissions in these other sectors. However, such indirect effects have not been considered in this study.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	8
2	METOD.....	9
2.1	MODELLERING AV BILTRAFIKENS UTSLÄPP AV FOSSIL KOLDIOXID OCH ANDRA VÄXTHUSGASER	9
2.2	BIODRIVMEDELSSYSTEMET, SKOGSSEKTORNS KOLBALANSER OCH PÅVERKAN PÅ ATMOSFÄRENS VÄXTHUSGASKONCENTRATIONER	13
2.3	KOLDIOXIDUTSLÄPPENS PÅVERKAN PÅ DEN GLOBALA MEDELTEMPERATUREN.....	17
3	RESULTAT.....	25
3.1	BILTRAFIKENS UTSLÄPP AV FOSSIL KOLDIOXID OCH ANDRA VÄXTHUSGASER.....	25
3.2	BILTRAFIKENS PÅVERKAN PÅ DEN GLOBALA MEDELTEMPERATUREN	30
4	SLUTSATSER OCH AVSLUTANDE DISKUSSION	38
	REFERENSER	40

1 INLEDNING

Sverige har som långsiktigt mål att inte orsaka några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045, för att därefter uppnå netto-negativa utsläpp. Att förändra vägtrafiken är en kritisk del av omställningen. I Sverige står transporter för cirka en tredjedel av Sveriges växthusgasutsläpp och 90 % av transportutsläppen är kopplade till vägtransporter. Sverige har också ett mål om att minska transportutsläppen med 70 % mellan 2010 och 2030, inklusive en ambition att nå en fossilbränsleoberoende transportsektor till 2030.

De politiska målen diskuteras flitigt och även strategier för att nå målen, men däremot inte hur olika utvecklingsvägar mot målen bidrar till den globala uppvärmningen. Det finns därmed ett behov av att ta fram kunskap om biltrafikens klimatpåverkan under de kommande decennierna, då en omställning mot kraftigt minskad klimatpåverkan genomförs och där elektrifiering och ökad användning av biodrivmedel förväntas vara centrala åtgärder.

Projektet som redovisas i denna rapport har syftat till att klargöra hur biltrafikens koldioxidutsläpp och bidrag till den globala uppvärmningen beror på utveckling och utformning av de tekniker och system som behövs för att nå de ovan nämnda politiska målen. Vi har modellerat och analyserat koldioxidutsläppen och uppvärmningsbidraget från den svenska biltrafiken för ett antal scenarier där vägen till klimatneutralitet i varierande grad baseras på elektrifiering av bilparken och biodrivmedelsanvändning.

När det gäller inhemsk biodrivmedelsproduktion har vi valt att fokusera på skogliga biodrivmedel. Växthusgasutsläpp från produktion och användning av bilar, el och drivmedel beaktas, och även påverkan på mängden kol som finns lagrad i skogen och i skogsprodukter, eftersom detta har betydelse för biodrivmedlens klimatpåverkan. Känslighetsanalyser visar hur utfallet beror på faktorer som elsystemet, utfasningstakt för bensin- och dieseldrivna bilar, och val av biomassa för biodrivmedelsproduktion.

Metodansatsen är tänkt att ge en lättförståelig beskrivning av hur elektrifiering av den svenska bilparken tillsammans med ökad användning av biodrivmedel påverkar koncentrationen av växthusgaser i atmosfären och därigenom den globala uppvärmningen på kort och lång sikt, samt hur uppvärmningen beror på om koldioxidutsläppen härrör från fossila bränslen eller biodrivmedel. Vi hoppas att projektet därigenom bidrar till att öka förståelsen för hur olika vägar mot klimatneutralitet påverkar den globala uppvärmningen.

2 METOD

2.1 MODELLERING AV BILTRAFIKENS UTSLÄPP AV FOSSIL KOLDIOXID OCH ANDRA VÄXTHUSGASER

Vi kvantifierar den svenska biltrafikens fossila koldioxidutsläpp¹ med hjälp av en bilparksmodell (som används för att modellera och analysera effekten av tekniktrender och olika styrmedel på bilparkens utveckling) och framåtblickande LCA (prospective life cycle assessment) som används för att bedöma miljöpåverkan av framväxande teknologier och system som i dagsläget befinner sig i olika faser av utveckling och marknadsintroduktion. I denna studie utgör elbilar och skogliga biodrivmedel sådana framväxande teknologier och vi analyserar hur den svenska biltrafikens fossila koldioxidutsläpp över tid påverkas av utvalda styrmedel gällande användning av biodrivmedel och införandet av ett förbud mot att sälja nya bilar med förbränningsmotorer i Sverige. Nedan ges en översiktlig beskrivning av modeller och antaganden som görs, vilka beskrivs mer utförligt i Morfeldt et al. (2021).

De fossila koldioxidutsläppen beräknas utifrån simuleringar av bilresebehov och bilparkens egenskaper över tid, tillsammans med scenarier för hur koldioxidutsläpp från biltillverkning samt produktion och användning av el och drivmedel förändras över tid. Biogena koldioxidutsläpp ingår i det ständigt pågående utbytet av kolatomer mellan atmosfären och biosfären, vilka hanteras separat i rapporten och alltså inte ingår i denna kvantifiering av biltrafikens koldioxidutsläpp. Den funktionella enheten för analysen definieras som svensk personbilstrafik och tidsperioden för modelleringen är 2020 till 2060.

De fossila koldioxidutsläppen från svenska biltrafiken inkluderar följande:

- utsläpp från avgasröret (även kallat ”tank-to-wheel” dvs. tank-till-hjul) som sker i Sverige,
- bränslerelaterade utsläpp (även kallat ”well-to-tank” dvs. källa-till-tank) som inkluderar produktion av fossila bränslen och biodrivmedel samt även produktion av el som används för laddning av elbilar och laddhybrider,
- fordonsrelaterade utsläpp, som inkluderar fordons- och batteritillverkning med tillhörande leveranskedjor.

El produceras och handlas huvudsakligen inom nordiska, och potentiellt europeiska, marknader, men el som används för laddning av elbilar antas komma från det svenska elnätet. Utsläpp från fordonstillverkning och produktion av fossila drivmedel sker till övervägande delen utomlands eftersom fordon, fordonskomponenter och råoljan till de fossila drivmedlen antas vara importerade, baserat på att drivmedlen (främst råoljan) och majoriteten av de bilar som säljs i Sverige tillverkas

¹ Resultat presenteras och diskuteras för enkelhetens skull i termer av koldioxid där vi gör en distinktion mellan fossil och biogen koldioxid. Utsläpp av andra växthusgaser än koldioxid beaktas dock implicit för biodrivmedlen genom att de emissionsfaktorer för mixen av biodrivmedel som Energimyndigheten rapporterar anges i koldioxid-ekvivalenter. Endast koldioxidutsläpp beaktas för övriga produkter och aktiviteter som analyseras eftersom koldioxidutsläppen bedöms helt dominera temperaturpåverkan för dessa.

utomlands och för de som tillverkas i Sverige kommer stora delar av råvarorna från internationella marknader.

De biodrivmedel som i dagsläget används i Sverige är i stor utsträckning importerade eller baserade på importerad råvara (SCB, 2020), men vi studerar effekten av en förändring mot att biodrivmedlen i högre grad produceras i Sverige baserat på biomassa från skogen. Biomassabehovet för biodrivmedelsproduktion beräknas genomgående utifrån antagen genomsnittlig omvandlingseffektivitet på 50% (energibasis). Beräkningarna av den svenska biltrafikens fossila koldioxidutsläpp görs för två olika scenarier gällande koldioxidutsläppen från biltillverkning samt produktion och användning av el- och drivmedel. Scenarierna benämns ”Global klimatomställning” och ”Nuvarande klimatpolitik” och är till stor del baserade på de globala scenarierna ”Sustainable development” och ”Stated policies” som utvecklades för internationella energimyndighetens rapport *World Energy Outlook 2019* (IEA 2019). Scenariot ”Stated Policies” speglar nuvarande styrmedel och uttalade mål medan ”Sustainable Development” illustrerar en möjlig utveckling där skärpta klimatåtgärder leder till att den genomsnittliga globala temperaturhöjningen inte överstiger 1,8°C och att nettonollutsläpp uppnås år 2070.

2.1.1 Simuleringar av fordonsflottans omsättning och fordonsegenskaper

Bilparkssimuleringarna tar hänsyn till nuvarande bilflotta samt ingående och utgående flöden av bilar, vilka beror av försäljning, bilarnas livslängd, import, export och avregistrering. Tabell 1 visar andelen laddningsbara bilar av nybilsförsäljningen år 2020 och 2030, med och utan förbud. I fallet där förbud införs 2030 antas andelen laddningsbara bilar i nybilsförsäljningen öka linjärt till att nå 100% vid förbudsåret. Andelen av försäljningen av nya laddningsbara bilar som består av laddhybrider minskar till noll år 2030 då nybilsförsäljningen till 100% utgörs av rena elbilar.

Tabell 1. Andel av laddningsbara bilar vid försäljning av nya bilar 2020 och 2030 i scenarierna.

	2020	2030 Inget förbud	2030 Förbud år 2030
Laddningsbara bilar	31 %	39 %	100 %
Varav laddhybrider	70 %	50 %	0 %
Varav elbilar	30 %	50 %	100 %

Utan ett förbud ökar försäljningen av nya laddningsbara bilar i den takt som krävs för att nå kraven gällande koldioxidutsläpp per km (Regulation 2019/631, se European Commission, 2019b) och inga andra styrmedel antas påverka försäljningen. Andelen av försäljningen av nya laddningsbara bilar som består av laddhybrider uppskattas i detta fall till 50% år 2030. Andelen laddningsbara bilar (och andelen laddhybrider vs. elbilar) i nybilsförsäljningen antas ligga kvar på samma nivå 2030–2060 utifrån antagandet att EU-regleringen inte revideras. Om kostnaden för elbilar vid 2030 skulle vara lägre än bilar med förbränningsmotorer skulle andelen laddningsbara bilar av nybilsförsäljningen kunna fortsätta öka men detta har vi alltså bortsett från här eftersom vi vill tydliggöra de möjliga effekterna av nuvarande styrmedel.

In- och utflöden till bilflottan, i kombination med befintliga bilflottans egenskaper, bestämmer totala energianvändningen och koldioxidutsläppen från avgasröret samt övriga livcykelutsläpp för bränslen och fordon.

Tabell 2 sammanfattar antaganden med avseende på fordonsegenskaper för år 2020 och 2030. Exempelvis antas elbilar vara tre gånger mer energieffektiva än bilar med förbränningsmotor år 2020, men energianvändningen per km antas minska mindre för elbilar fram till 2030. Bilbatteriernas storlek är i linje med IEA:s (2020) uppskattningar för 2030. Laddhybrider antas använda elmotorn halva körsträckan år 2020 och utnyttjandegraden antas öka linjärt till 0,8 år 2030. Att de fordons-specifika koldioxidutsläppen (från avgasröret) för laddhybrider minskar relativt drastiskt beror på en kombination av högre batteri-utnyttjandegrad och lägre energianvändning per km.

Tabell 2. Sammanfattning av antagna genomsnittliga fordonsegenskaper för år 2020 och 2030 (under verkliga körförhållanden).

	2020	2030
Fordon med förbränningsmotor		
Fordonsspecifika koldioxidutsläpp (från avgasröret)	173 g CO ₂ per km	127 g CO ₂ per km
Energianvändning	669 Wh per km	492 Wh per km
Laddhybrider		
Fordonsspecifika koldioxidutsläpp (från avgasröret)	87 g CO ₂ per km	25 g CO ₂ per km
Energianvändning	446 Wh per km	259 Wh per km
Batteristorlek	12 kWh	12 kWh
Utnyttjandegrad	0,5	0,8
Elbilar		
Energianvändning	223 Wh per km	201 Wh per km
Batteristorlek	75 kWh	75 kWh

2.1.2 Känslighetsanalys: förbudsår, framtida resebehov och biodrivmedelsanvändning

I huvudscenariot som analyseras ("Medium" i Tabell 3) antas följande: (i) andelen biodrivmedel ökar linjärt till 59 % år 2030, i linje med den antagna reduktionsplikten för biodrivmedel i Sverige (Energimyndigheten, 2019; Regeringen, 2020b). Efter 2030 ligger biodrivmedelsandelen kvar på 2030-nivån; (ii) förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor införs år 2030 (Regeringen, 2020a); och (iii) att framtida resebehov speglar nuvarande politik och prognoser för ekonomisk utveckling samt prognoser för befolkningstillväxt och bränsleprisförändringar utvecklade av olika statliga myndigheter i Sverige.

I känslighetsanalysen varieras förbudsår, biodrivmedelsanvändningens omfattning och framtida resebehov enligt beskrivningen i Tabell 3. Resebehovet ingår i känslighetsanalysen eftersom styrmedel och teknikutveckling bedöms både kunna öka bilresandet (exempelvis självkörande bilar) och minska bilresandet (exempelvis skatteökningar) över tid. Resultat från känslighetsanalysen presenteras i slutet av avsnitt 3.1.

Tabell 3. Scenarier som beaktas i känslighetsanalyserna som diskuteras i sin helhet i Morfeldt et al. (2021).

	Låg	Medium	Hög
Förbudsår	2025	2030	2040
Resebehov	-20 % år 2040	Basprognos	+20 % år 2040
Biodrivmedelsanvändning	Konstant på 2020-nivån	Andelen biodrivmedel i bensin och diesel ökar linjärt från 23% år 2019 till 59 % år 2030, i linje med den antagna reduktionsplikten för biodrivmedel till 2030. Inblandningsnivån ligger sedan kvar på 2030-nivå	Andelen biodrivmedel ökar linjärt från 2030, till 71% år 2040 och 100 % år 2065

2.1.3 Utsläpp från elproduktionssystemet och fordonscykeln

Koldioxidintensiteten för den el som används för laddning av elbilsbatterierna är inledningsvis 29 g CO₂/kWh (endast direkta utsläpp), vilket motsvarar den nuvarande genomsnittliga svenska elmixen (Naturvårdsverket, 2019; Energimyndigheten, 2020a) och minskar linjärt till 2045 då den når 0 g CO₂/kWh.

De två scenarier som har utvecklats för att undersöka betydelsen av klimatåtgärder utanför Sverige är baserade på de två scenarierna som utvecklades för *World Energy Outlook 2019* (IEA 2019). Koldioxidintensiteten för elproduktion utanför Sverige tas direkt från IEA (2019). Den är i båda scenarierna inledningsvis 550 g CO₂/kWh år 2020 och minskar därefter till 350 g CO₂/kWh för ”Nuvarande klimatpolitik” och till 91 g CO₂/kWh för ”Global klimatomställning” år 2040. Detta är betydligt högre än den svenska nivån. I ”Nuvarande klimatpolitik” ligger koldioxidintensiteten därefter kvar på 2040-nivån (350 g CO₂/kWh), medan den fortsätter att minska i ”Global klimatomställning” och når 0 g CO₂/kWh år 2070. Utöver koldioxidintensiteten som redovisas här för svensk och global elmix tillkommer uppströms utsläpp för respektive typ av elproduktion i elmixen och respektive omvärldsscenario. Övriga data är baserade på andra källor och harmoniserade med IEA-scenarierna. Exempelvis beräknas fordonscykelns utsläpp med hjälp av GREET® 2 – Version 2019 (Argonne National Laboratory, 2020), som har anpassats till scenariomodellering för att kunna uppskatta utsläppen från fordonscykeln över tid beroende på vilket omvärldsscenario som antas.

Utsläpp relaterade till materialproduktion och biltillverkning antas ske samma år som bilen säljs och utsläpp relaterade till skrotning antas ske samma år som bilen tas ur bruk. Materialåtgången baseras på GREET® (1507 kg för bilar med förbränningsmotor, 1765 kg för laddhybrider och 1571 kg för elbilar) ligger ganska nära genomsnittet för en bil med förbränningsmotor i Sverige (år 2018) på 1530 kg (European Environment Agency, 2020). Genomsnittliga bilstorleken i Sverige ökar för närvarande (Naturvårdsverket, 2019) men utveckling av lättviktsmaterial kan hålla nere viktökningen. Vi antar därför att materialåtgången (viktmässigt) är konstant, medan materialsammansättningen i bilen förskjuts mot högre andelar aluminium och plast.

2.1.4 Utsläpp från drivmedelscykeln

Emissionsfaktorerna för bränslecykeln uppskattas baserat på Jing et al. (2020) och Masnadi et al. (2018) för fossila bränslen. Växthusgasutsläppen för biodrivmedel baseras på vägda genomsnittliga livscykelutsläpp för biodrivmedel som används i Sverige under 2019, som rapporterats till Energi-myndigheten (2020b) av svenska bränsleleverantörer, med undantag för skogsbaserad Fischer-Tropsch diesel som baseras på Europeiska rådet (2009).

Den genomsnittliga utsläppsnivån för dagens biodrivmedel ($69 \text{ g CO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}$) antas vara konstant i "Nuvarande klimatpolitik". I "Global klimatomställning" antas en ökande andel av biodrivmedlen bestå av Fischer-Tropsch-diesel med lägre växthusgasutsläpp och den genomsnittliga utsläppsnivån antas minska till $18 \text{ g CO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}$ år 2060 (logistisk kurva). För att undvika dubbelräkning inkluderas inte biogena koldioxidutsläpp från förbränningen av biodrivmedel i bilarna, eftersom dessa koldioxidutsläpp hanteras separat.

De globala genomsnittliga livscykelutsläppen för utvinning av råoljan som används för att producera bensin och diesel antas vara konstanta ($35 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$) i båda scenarierna. De globala genomsnittliga utsläppen från raffinering antas vara konstanta ($25 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$) i "Nuvarande klimatpolitik". I "Global klimatomställning" antas utsläppen från raffinering minska till hälften år 2060 (logistisk kurva) baserat på (Jing et al., 2020; Masnadi et al., 2018).

2.2 BIODRIVMEDELSSYSTEMET, SKOGSSEKTORNS KOLBALANSER OCH PÅVERKAN PÅ ATMOSFÄRENS VÄXTHUSGASKONCENTRATIONER

2.2.1 Biodrivmedelssystemets klimatpåverkan

Utöver att biodrivmedelssystemet är associerat med utsläpp av fossil koldioxid och andra växthusgaser (avsnitt 2.1) så påverkar produktion och användning av biodrivmedel klimatet genom sin påverkan på mängden kol som finns lagrad i vegetation och mark, samt i biobaserade produkter (det biogena kollagret). Denna påverkan sker genom att (i) biomassaproduktion inom jord- och skogsbruket påverkar balansen mellan upptaget av koldioxid via fotosyntesen och avgången som sker genom bränder, respiration och förmultning av dött organiskt material; (ii) kol förs bort från skog och jordbruksmark när biomassa skördas och används som råvara för biodrivmedelsproduktion; och (iii) det tillförs mindre kol till det biogena kollagret när biomassa används för biodrivmedelsproduktion istället för produktion av andra mer långlivade produkter. Nettoflödet av kolatomer från det biogena kollagret till atmosfären (nettoutsläppen) varierar över tid och kan vara positivt eller "negativt" (dvs. det binds in mer koldioxid i vegetation och mark, samt biobaserade produkter, än vad som avgår).

2.2.2 Skogsbruksscenarier

Som redan nämnts fokuserar vi i denna studie på biodrivmedel som produceras av biomassa från den svenska skogen. Data gällande det svenska skogsbrukets biomassaproduktion och kolbalanser har tagits fram inom en parallellt genomförd studie (Petersson et al., 2022) som undersöker hur olika skogsbruksstrategier påverkar skogens kollager och skogsavverkning i Sverige, samt deras potential att minska den globala uppvärmningen. I studien undersöks också hur framtida avverkningsnivåer kan komma att påverkas av klimatförändringar.

Studien omfattar den del av Sveriges totala skogsareal som klassas som tillgänglig för skogsbruk med avverkningar, omkring 27 miljoner hektar (Mha). All sådan skog var dock inte föremål för avverkningar i studien. Omkring 4 Mha undantogs pga. låg produktivitet och ytterligare omkring 3 Mha undantogs pga att den var skyddad, formellt eller via frivilliga avsättningar. Med dessa undantag var alltså omkring 20 Mha skog tillgänglig för skogsbruk med avverkningar. Denna areal var föremål för skogsbruk i basscenariot (Maximum potential harvest) och i tre andra scenarier där avvikelser från basscenariot studerades.

Basscenariot simulerades för att efterlikna förutsättningarna inom svenskt skogsbruk som Skogsstyrelsen har angivit för perioden 2000–2009 och baserades på tidigare scenarioanalyser (Lundblad, 2018) som gjordes i samband med arbetet att ta fram svensk bokföringsrapport för brukad skogsmark inklusive skoglig referensnivå, som rapporterades in till Klimatkonventionen (UNFCCC).

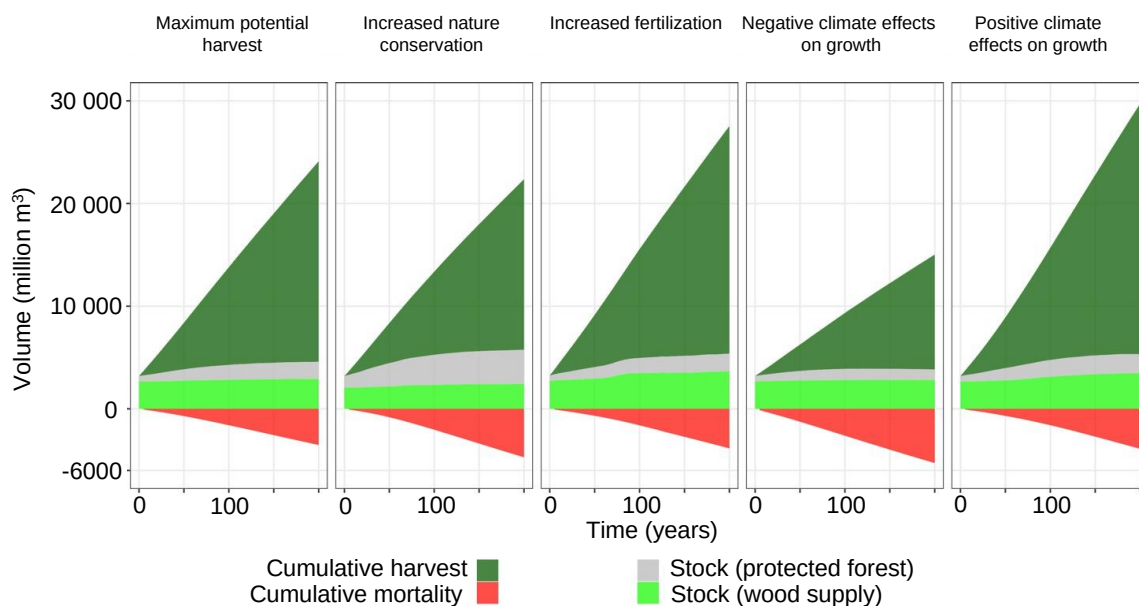
Ett scenario inriktades på att modellera effekten av skogsbruksåtgärder som syftar till att öka skogstillväxten genom skogsgödsling (enligt gällande riktlinjer vilket avser en gödsling med standardgiva ca 10 år före avverkning) med årlig omfattning motsvarande 1% av skogsarealen (Increased fertilization). Två andra scenarierna inriktades på att modellera möjliga positiva och negativa effekter av klimatförändringarna på skogstillväxten, baserat på IPCC RCP 4.5 (Negative climate effects on growth och Positive climate effects on growth). Slutligen ingick ett scenario där ytterligare 3,7 Mha undantogs från skogsbruk, vilket innebär att den totala arealen tillgänglig skog som undantogs från skogsbruk i detta fall uppgick till 11,3 Mha (Increased nature conservation).

I alla fem scenarierna modelleras högsta hållbara avverkningsnivån, vilket motsvarar den årliga tillväxten minus naturlig avgång. Ingen stubbskörd förekom i scenarierna men ungefär 10 TWh grenar och toppar (grot) skördades årligen. Modelleringarna görs med hjälp av den empiriska modellen Heureka RegWise. För ytterligare information om studien hänvisas till (Petersson et al., 2022).

2.2.3 Biomassa och kolbalanser i de olika scenarierna

Figur 1 visar den modellerade utvecklingen i de fem scenarierna när det gäller (i) kumulativ mängd stamved som tas ut ur skogen via avverkningar; (ii) stamved som finns i skyddad skog och i skog som brukas för skörd; samt (iii) kumulativa mängden stamved som förloras genom självgallring, alltså att skogen utglesas på naturlig väg genom att träd dör för att de står för nära och utkonkurrens av andra, vanligen större träd.

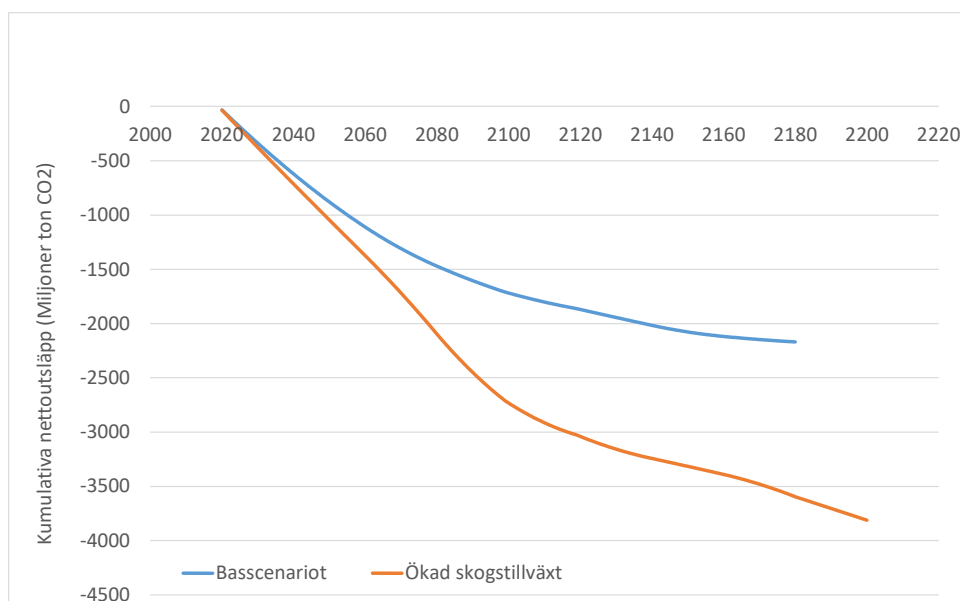
Biomassan som tas ut ur skogen används i skogsindustrin som producerar skogsprodukter. Dessa produkter utgör tillsammans ett lager av biogena kolatomer. Men Figur 1 visar alltså inte hur storleken på detta kollager växer, utan visar endast kumulativa mängden stamved som avverkas över tid och som används för produktion av skogsprodukter. Storleken på det biogena kollagret som består av skogsprodukter bestäms av inflödet av nyproducerade skogsprodukter, deras livslängd samt hanteringen av produkterna när de har tjänat ut (återvinning, deponi, förbränning med eller utan energiåtervinning). Skogssektorns totala biogena kollager är summan av det kol som finns lagrat i skogen (levande biomassa, markkol, förna, stubbar och död ved) och i skogsprodukter.



Figur 1. Utvecklingen för de fem olika studerade scenarierna, som beskrivs i löpande text, när det gäller den kumulativa mängden stamved som tas ut ur skogen via avverkningar (Cumulative harvest), stamved som finns i skyddad skog och i skog som brukas för skörd (Stock (Protected forest) respektive Stock (Wood supply)), samt kumulativ självgallring (Cumulative mortality). Simulering från 2010. Diagrammen är baserade på Petersson et al., 2022.

Figur 2 beskriver förändringen av mängden kol som finns lagrad i skogssektorns biogena kollager i två av scenarierna som visas i Figur 1, dels basscenariot (*Maximum potential harvest*) och dels scenariot där skogstillväxten ökar som följd av skogsgödsling (*Increased fertilization*). Kurvorna i Figur 2 pekar stadigt nedåt eftersom de årliga nettoutsläppen av biogen koldioxid till atmosfären är "negativa", dvs. varje år binds det in mer koldioxid i skog och skogsprodukter än vad som avgår till atmosfären. Ökningen av mängden kol i det biogena kollagret motsvaras dock inte av en exakt lika stor minskning av mängden kol (i form av koldioxid) i atmosfären eftersom takten i det globala upptaget av koldioxid i hav och skogar minskar något när mer kol lagras in i det "svenska" kollagret.

Vi kommer använda dessa två scenarier när vi senare jämför den svenska biltrafikens temperaturpåverkan med den temperaturpåverkan som följer av att skogsbruket och produktionen av olika skogsprodukter påverkar mängden kol som finns lagrad i skog och skogsprodukter och därmed påverkar koldioxidhalten i atmosfären.



Figur 2. Kumulativa nettoutsläpp av biogen koldioxid till atmosfären i två av de fem scenarier som visas i Figur 1, dels basscenariot (*Maximum potential harvest*) och dels scenariot där skogstillväxten ökar som följd av skogsgödsling (*Increased fertilization*). Negativa utsläpp innebär en ökning av mängden kol som finns lagrad i skog och skogsprodukter

2.2.4 Substitutionseffekter

Atmosfärens växthusgashalter beror också på de substitutionseffekter som uppstår när olika skogsprodukter används, alltså att utsläppen av växthusgaser förändras när skogsprodukterna ersätter andra produkter som exempelvis cement, stål, petroleumbaserad plast och fossila bränslen. Svenska skogsprodukter kan också ersätta andra biobaserade produkter som produceras av andra bioråvaror. Ett exempel är cellulosebaserade textilier som kan ersätta bomull.

Uppskattningar av substitutionseffekter varierar pga. osäkerheter när det gäller substitutionsmönster och de växthusgasutsläpp som är associerade med dels skogsprodukterna och dels produkterna som ersätts (Leskinen et al., 2008; Cowie et al., 2021, Howard et al., 2021). Osäkerheten vad gäller substitutionseffekter påverkar dock inte vår studie eftersom vi specificerar både *substitutionsmönster*, via våra scenarier (t ex att en viss mängd biodrivmedel blandas in i bensin och diesel) och bilparksmodelleringar, och *växthusgasutsläpp* som är kopplade till olika produkter, exempelvis utsläpp från batteritillverkning, elproduktion, eller oljeutvinning och raffinering till bensin och diesel.

Å andra sidan beaktar vi inte att den skogsråvara som används för produktion av biodrivmedel till svenska bilar hade kunnat användas för produktion av andra skogsprodukter vars användning hade resulterat i större/mindre substitutionseffekt och därmed en annan temperaturpåverkan. Denna begränsning gäller inte bara för skogsråvara och biodrivmedel utan gäller generellt, exempelvis skulle el och metaller som används för produktion av bilbatterier ha kunnat användas för andra syften som i sin tur skulle ha haft en annan temperaturpåverkan. I avsnitt 2.3.2 beskrivs vidare hur temperaturpåverkan av olika slags biomassaanvändning modelleras.

2.3 KOLDIOXIDUTSLÄPPENS PÅVERKAN PÅ DEN GLOBALA MEDEL-TEMPERATUREN

2.3.1 Klimat- och kolcykelmodell

Koldioxidutsläppens påverkan på den globala medeltemperaturen modelleras utgående ifrån klimatmodellen FaIR 2.0.0 (Leach et al., 2021) och senaste utvärderingsrapporten från IPCC:s arbetsgrupp 1 (Smith et al., 2021). För modelleringarna som presenteras i denna rapport använder vi två separata ansatser som i fortsatta analyser kommer att integreras.

Två olika kolcykelmodeller används. För globala utsläppsscenarier använder vi kolcykelmodulen i klimatmodellen FaIR 2.0 som är en så kallad ”reduced complexity climate model” (Leach et al., 2021), på svenska ”förenklad klimatmodell”. Takten som atmosfäriska koldioxidkoncentrationen avtar med efter ett givet koldioxidutsläpp representeras av en icke-linjär impulsresponsfunktion som tar hänsyn till hur historiska utsläpp påverkar upptag i haven och biosfären såväl som hur den globala medeltemperaturen påverkar kolsänkornas effektivitet. Trots att modellansatsen är relativt enkel har den visat sig effektivt efterlikna storskaliga 3-dimensionella jordsystemmodeller (Millar et al., 2017; Jenkins et al., 2018; Leach et al., 2021; Smith et al., 2018; Smith et al., 2021), inklusive de som ingick i modelljämförelsestudien CMIP6 (Leach et al., 2021).

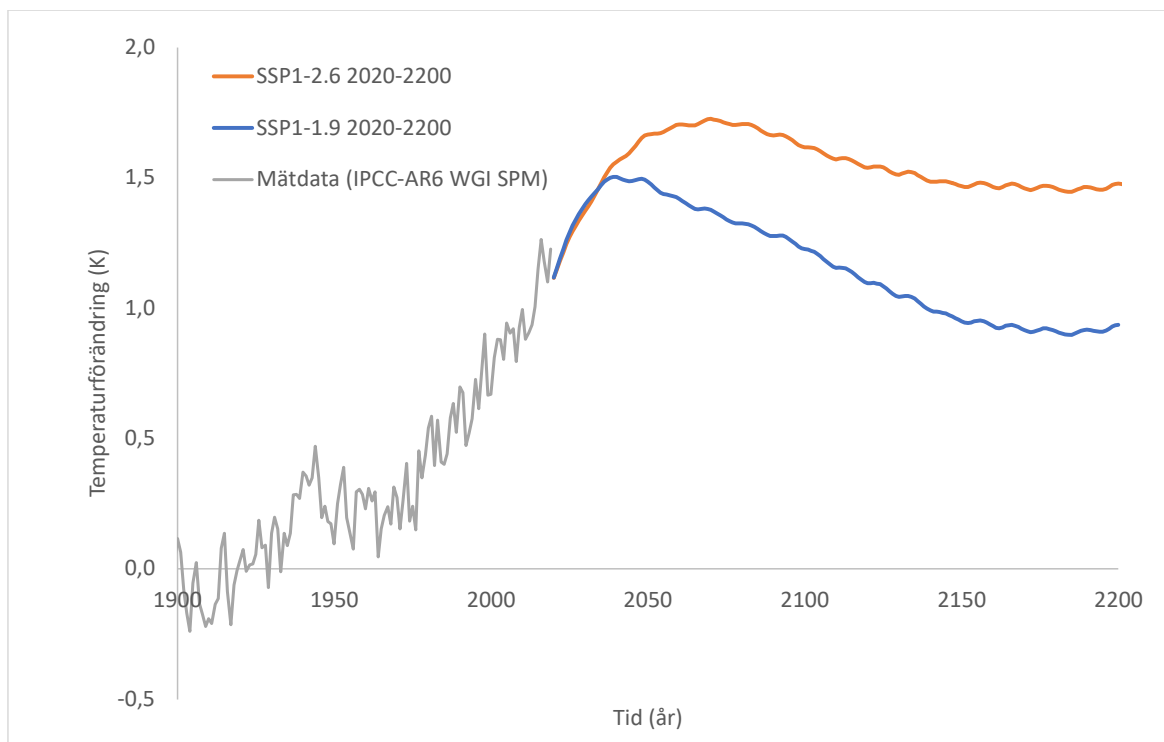
För att beräkna klimatpåverkan av utsläppen från det svenska systemet använder vi en linjäriserad variant av modellen som fungerar väl så länge vi inte får stora förändringar i CO₂ koncentrationen; ovan nivåer som är i linje med en global uppvärmning på två grader över den förindustriella nivån. Modellen drivs med exogent definierade koldioxidutsläpp som i vår studie hämtas från olika källor. De globala utsläppen under perioden 1750–1849 kommer från projektet ”Reduced Complexity Model Intercomparison Project” (RCMIP) (Nicholls & Lewis, 2021); för perioden 1850–2020 är de hämtade från Global Carbon Budget-projektet (Friedlingstein et al., 2020), medan utsläppen för perioden 2021–2100 är från de fem SSP:erna (dvs. Shared Socioeconomic Pathways) som inkluderas i ”Summary for Policy Makers” från den sjätte utvärderingsrapporten från IPCC första arbetsgrupp (IPCC, 2021).

För att beräkna påverkan på global medeltemperatur av globala utsläpp används sambandet mellan påverkan på koldioxidkoncentration och effektiv strålningsdrivning (effective radiative forcing) från FaIR (Leach et al., 2021). För beräkningen av temperaturpåverkan av utsläppen inom Sverige använder vi en linjäriserad variant baserad på IPCC sjätte utvärderingsrapport (Forster et al., 2021). För båda kolcyklerna använder vi en energibalansmodell som ger en uppskattning av hur den globala medeltemperaturen påverkas av förändringar i halten av växthusgaser baserat på IPCC:s senaste utvärderingsrapport (Smith et al., 2021; Forster et al., 2021).

2.3.2 Temperaturpåverkan av fossila och biogena koldioxidutsläpp

Modelleringen av de fossila och biogena koldioxidutsläppens temperaturpåverkan utgår i princip ifrån scenarier med globalt sett ambitiösa utsläppsminskningar, i linje med SSP1-1.9 och SSP1-2.6 i IPCC:s sjätte utvärderingsrapport. Figur 3 visar den globala temperaturökningen fram till år 2100 i dessa scenarier. Som synes når temperaturen en topp och sjunker därefter. Detta beror på en ökande användning av metoder för infångning och lagring av atmosfärisk koldioxid som – i kombination med åtgärder för att stadigt minska samhällets koldioxidutsläpp – resulterar i att vi från mitten

av seklet fångar in mer koldioxid än vi släpper ut, vilket leder till minskande koldioxidkoncentration i atmosfären. Därmed börjar också den globala medeltemperaturen att sjunka.



Figur 3. Förändring av den globala medeltemperatur 1900 - 2200, där framtida temperaturförändring är konsekvensen av framtida koncentrationer av växthusgaser i atmosfären i de mest ambitiösa scenarierna (SSP1-1.9 och SSP1-2.6) som användes för klimatmodellering och forskning kopplat till IPCC:s sjätte utvärderingsrapport.

Temperaturpåverkan av växthusgasutsläpp som vi presenterar i denna rapport kan förstås som en påverkan som leder till en liten avvikelse från den globala temperaturförändring som genereras av SSP1-1.9 och SSP1-2.6. Vi beskriver alltså hur växthusgasutsläpp och koldioxidinbindning som härleds till den svenska biltrafiken och skogsbruket leder till en marginell avvikelse (ökning eller minskning) från temperaturkurvorna i Figur 3.

Här nedan ges en förklaring av varför det är viktigt att hålla isär fossil och biogen koldioxid när påverkan på den globala uppvärmningen modelleras. Först ges en beskrivning av påverkan på den globala medeltemperaturen av att använda samma mängd (i energitermer) fossila bränslen och biomassa för energiändamål. Därefter beskriver vi också sambandet mellan kumulativa fossila och biogena koldioxidutsläpp och temperaturförändringar. För att beskriva den långsiktiga temperaturpåverkan och tydliggöra skillnaden mellan fossila och biogena koldioxidutsläpp visar vi resultat fram till år 2200. Sammanfattningsvis visar vi följande:

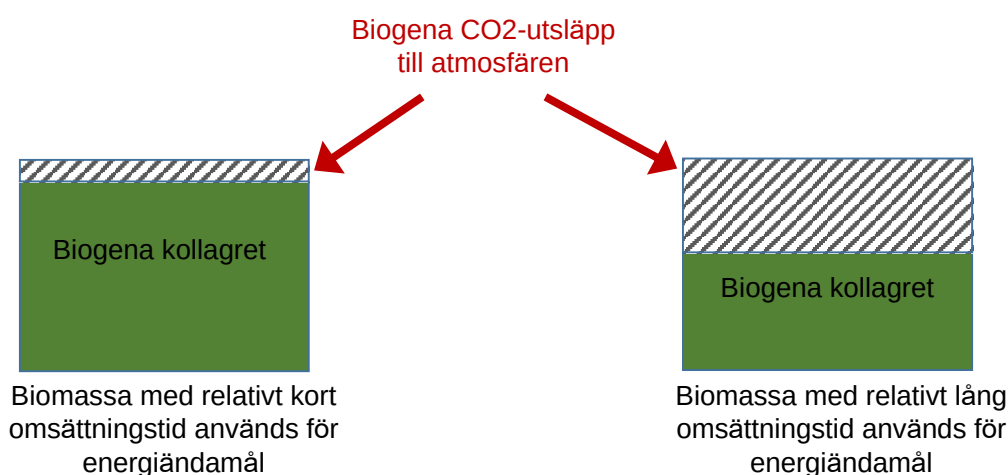
- Temperaturökningen är ungefär linjärt relaterad till kumulativa koldioxidutsläpp från användningen av fossila bränslen, men är i allmänhet inte linjärt relaterad till kumulativa biogena koldioxidutsläpp från biobränsleanvändning.

- Utsläppen av fossil koldioxid har en temperaturpåverkan som fortgår i hundratals år efter att utsläppen ägde rum, vilket inte gäller generellt för biogena koldioxidutsläpp från bioenergisystem eftersom dessa även är associerade med koldioxidinlagring via fotosyntesen.

Temperaturpåverkan av biobränsleanvändning bestäms alltså inte av omfattningen av biogena koldioxidutsläpp som sker vid själva biobränsleanvändningen (t ex biogena CO₂-utsläpp från bilarnas avgasrör), utan av hur användningen av biomassa för att producera biobränslen påverkar det biogena kollagret (dvs. mängden kol som finns lagrad i ekosystem och i biobaserade produkter). En varaktig minskning av det biogena kollagret motsvarar kumulativa nettoutsläpp av biogen koldioxid till atmosfären som orsakar en linjärt relaterad temperaturökning, i likhet med kumulativa utsläpp av fossil koldioxid. Omvänt leder en ökning av det biogena kollagret till en temperaturminskning som resultat av det motsvarande kumulativa nettoupptaget av koldioxid från atmosfären.

Figur 4 illustrerar hur förändringarna i det biogena kollagret beror på nedbrytningstiden för biomassan om den inte används för energiändamål (biomassans omsättningstid). När biomassan används som energiråvara förändras flödet av kolatomer mellan biosfären och atmosfären genom att kolatomerna i biomassan pga. bioenergianvändningen avgår tidigare till atmosfären. Storleken på biomassans omsättningstid bestämmer hur stor denna förändring blir och därmed hur det biogena kollagret påverkas. Ju längre omsättningstiden är desto mer minskar det biogena kollagret när biomassan används för energiändamål.

Om exempelvis avverkningsrester som bryts ner långsamt i skogen används för produktion av bi drivmedel som sedan används i personbilar, skulle minskningen av det biogena kollagret bli större än om samma mängd avverkningsrester med kortare nedbrytningstid används (*allt annat lika*). Eftersom temperaturförändringen är linjärt relaterad till förändringen av det biogena kollagret, innebär detta att användningen av biomassa med längre omsättningstid orsakar mer uppvärmning.



Figur 4. Illustration av hur förändringen i det biogena kollagret, som sker när biomassa med olika omsättningstid används som energiråvara, beror på biomassans omsättningstid, dvs. den genomsnittliga tiden som det biogena kolet skulle ha lagrats utanför atmosfären om biomassan inte hade använts för energiändamål, eftersom detta påverkar storleken på det biogena kollagret när en jämvikt råder (dvs när lika mycket CO₂ binds in i biosfären via fotosyntesen som det avgår från biosfären till atmosfären via respiration och förbränning).

Figur 4 illustrerar som sagt betydelsen av biomassans omsättningstid, men även andra faktorer påverkar hur det biogena kollagret förändras som konsekvens av biomassauttag från skogen. Exempelvis pekar studier på att uttag av stubbar (som har ganska lång omsättningstid) i vissa sammanhang kan leda till ökad skogstillväxt vilket påverkar det biogena kollagret positivt (de Jong et al., 2018) och därmed motverkar förlusten av kol ur det biogena kollagret som stubbskörd innebär. Det är också viktigt att poängtera att det är svårt att bedöma hur specifika inslag i skogsbruket påverkar den långsiktiga utvecklingen när det gäller skogens kollager.

Scenarier för bränsleanvändningen

Vi modellerar temperaturpåverkan för två fall där koldioxidutsläppen skiljer sig åt. I båda fallen växer utsläppen linjärt mellan 2020 och 2040. I det ena fallet ligger sedan utsläppen kvar på samma nivå fram till 2200. I det andra fallet minskar utsläppen linjärt från 2080 tills de når noll år 2100. För båda dessa fallen modellerar vi temperaturpåverkan för fem olika "bränsleprofiler" för att beskriva skillnaden i temperaturpåverkan av att använda lika mycket (i energitermer) kol, naturgas och biobränsle för energiändamål². Inget av fallen inkluderar koldioxidinfångning och lagring utan all koldioxid som bildas när kol, naturgas och biobränsle används hamnar omedelbart i atmosfären.

När det gäller biobränslen modellerar vi temperaturpåverkan för tre olika bränsleprofiler där mixen av skogsråvaror som används skiljer sig åt med avseende på den genomsnittliga "omsättningstiden" (10, 30 och 50 år). Omsättningstiden bestäms av (i) nedbrytningstakten för de skogsråvaror som skulle ha lämnas kvar i skogen om de inte hade använts som råvaror för biodrivmedelproduktion och (ii) livslängden för produkterna som skulle ha producerats av råvaror inom skogsindustrin om dessa inte hade tagits i anspråk för biodrivmedelproduktion. Exempelvis bygger modelleringen av skogliga kolbalanser som beskrivs i avsnitt 2.2 på en genomsnittlig årlig nedbrytningstakt på 4,6% för stubbar och 15% för grot om dessa lämnas kvar i skogen vid avverkningar. När det gäller skogsprodukter varierar deras genomsnittliga livslängd avsevärt, från något enstaka år (t ex hushållspapper) till kanske över hundra år (t ex konstruktionsvirke i hus). Kollagringstiden i produkter beror också på hanteringen av produkterna när de har tjänat ut, exempelvis materialåtervinning, avfallsförbränning eller att produkterna läggs på en deponi.

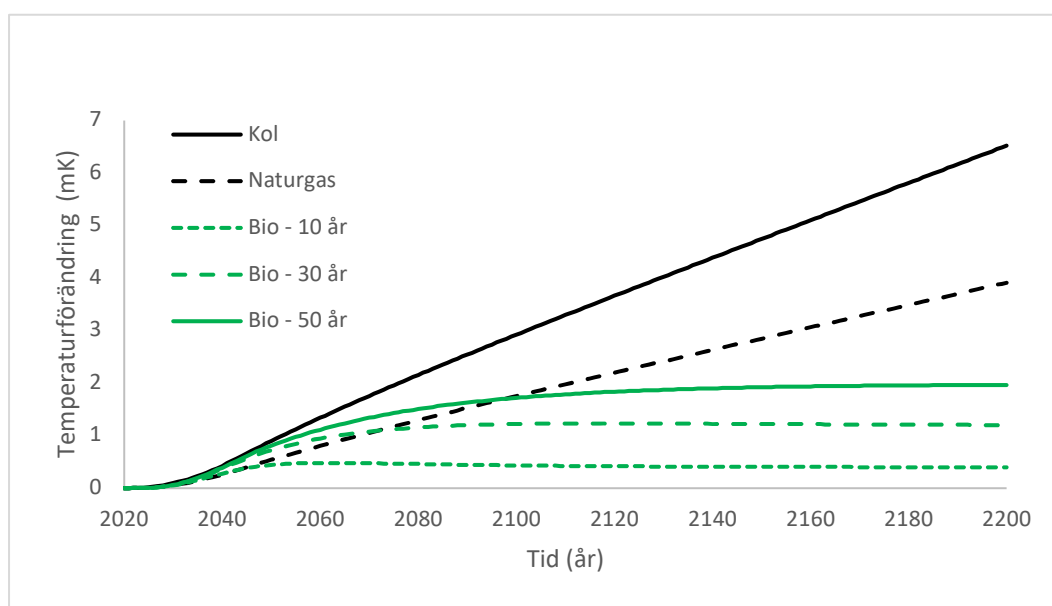
En råvarumix med kort omsättningstid består huvudsakligen av (i) avverkningsrester, sågspån, bark, svartlut och andra restflöden inom skogsindustrin, som annars eldas upp eller bryts ner relativt snabbt; och (ii) massaved och restflöden inom industrin som används för att producera papper och andra produkter med relativt kort användningsfas och som därefter eldas upp eller bryts ner relativt snabbt. En råvarumix med lång omsättningstid består i högre grad av (i) avverkningsrester som bryts ner relativt långsamt i skogen, t ex stubbar och kvarlämnade stammar och (ii) vedråvara och restflöden inom skogsindustrin som annars används för att producera skogsprodukter med relativt lång användningsfas (t ex plankor och träskivor som används i hus) och/eller att kolatomerna hålls kvar inom produktpoolen via materialåtervinning (t ex biobaserad plast och vissa pappersprodukter). Biomassans nedbrytningstakt beror på klimat- och andra omgivningsfaktorer, vilket innebär att samma typ av biomassa bryts ner långsammare i norra än i södra Sverige.

² Kolhalten i bränslena sätts till 28, 25 och 15 g C/MJ för biomassa, kol respektive naturgas.

Presentation av påverkan på den globala medeltemperaturen

Här nedan i Figur 5 och Figur 6 beskrivs hur temperaturpåverkan av extra koldioxidutsläpp skiljer sig åt beroende på utsläppsprofilen (dvs. om utsläppen sker under en begränsad tidsperiod eller fortgår under hela scenarioperioden) och om utsläppen härrör från användning av kol, naturgas eller biobränslen från olika sorters bioråvara. Figuren baseras på de ovan beskrivna scenarierna och syftar till att tydliggöra betydelsen av utsläppsprofil och bränsletyp, vilket kan underlätta förståelsen för figuren i resultatavsnittet där vi beskriver temperaturpåverkan av den svenska biltrafiken, som varierar beroende på utformning av dels styrmedel och dels utvecklingen när det gäller växthusgasutsläpp kopplat till produktion och användning av bilar, el och bränslen.

Figur 5 visar temperaturförändringen i fallet där extra bränsleanvändning och därmed extra årliga koldioxidutsläpp tillkommer 2020 och växer linjärt fram till 2040 för att därefter ligga kvar på 2040-nivån ända fram till år 2200 (biogena koldioxidutsläpp i grönt och fossila koldioxidutsläpp i svart). I detta fall leder användningen av fossila bränslen till att temperaturen ökar linjärt med ackumulerade fossila koldioxidutsläpp. Däremot avstannar uppvärmningen som orsakas av biogena koldioxidutsläpp och stabiliserar på olika nivåer beroende på biomassans omsättningstid. Som synes innebär en kortare omsättningstid att uppvärmningseffekten blir lägre och att temperaturökningen stabiliserar på en viss nivå tidigare, vilket beror på att det biogena kolkvirket stabiliserar på en ny jämviktsnivå snabbare.



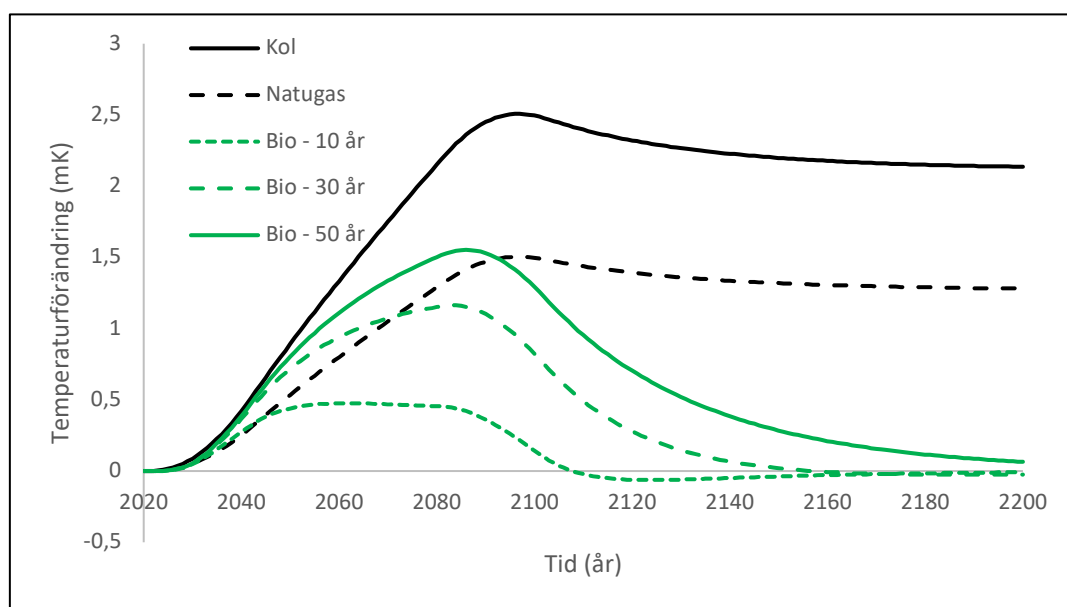
Figur 5. Påverkan på den globala medeltemperaturen när extra årliga samma energimängd fossilkol, naturgas och biomassa med olika omsättningstid (10, 30 och 50 år) används årligen under perioden 2020–2200. Användningen startar 2020 och växer linjärt fram till 2040 för att därefter ligga kvar på 2040-nivån ända fram till år 2200. Gröna linjer motsvarar biogena koldioxidutsläpp och svarta linjer motsvarar fossila koldioxidutsläpp.

Figur 5 ger också en bild av hur substitutionseffekten (här uttryckt i termer av förändrad temperaturpåverkan) varierar beroende på vilket bränsle som används och vilket bränsle som blir ersatt;

förändringen ges av skillnaden mellan två kurvor i diagrammet. Som synes minskar uppvärmningen i princip omedelbart när biobränslen och naturgas används i stället för kol. Användning av naturgas kan minska uppvärmningen mer i närtid än biomassa med lång omsättningstid, men biomassa med kort omsättningstid är bättre än naturgas även på kort sikt. På längre sikt är biomassa bättre än både kol och naturgas, även i fallet där biomassa med lång omsättningstid används.

Figur 6 visar temperaturförändringen i det andra fallet där extra årliga koldioxidutsläpp tillkommer 2020 och växer linjärt fram till 2040, för att därefter ligga kvar på 2040-nivån fram till 2080 då de minskar igen (linjärt) ner till noll år 2100. Som framgår är uppvärmningsbidraget från fossilbränsleanvändning fram till 2100 nästan detsamma år 2200, alltså hundra år efter att de fossila bränslena fasades ut (konsekvenserna är mycket mer långsiktiga, men detta visas inte här). Temperaturpåverkan av bioenergianvändningen sjunker i stället mot noll i en takt som beror på biomassans omsättningstid. Om biobränslen används i stället för fossilbränslen under en begränsad tidsperiod blir den långsiktiga globala uppvärmningen alltså entydigt lägre.

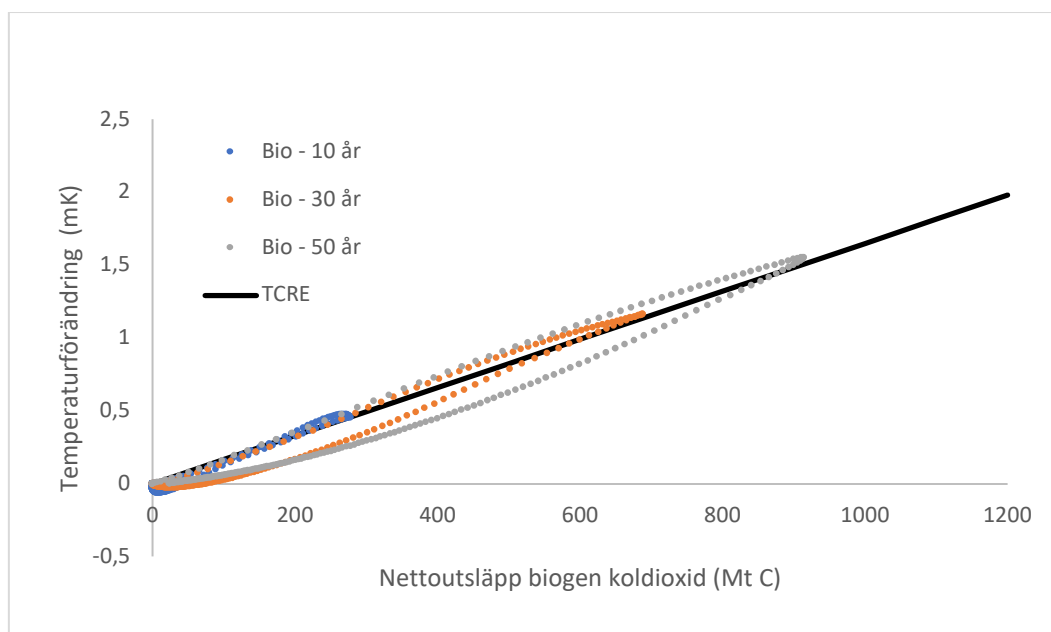
Figur 6 ger också perspektiv på användningen av naturgas som "övergångsbränsle" vid utfasning av kol: denna strategi resulterar i en långsiktig uppvärmningseffekt som förvisso är mindre än för kol men likväl betydande.



Figur 6. Påverkan på den globala medeltemperaturen när samma energimängd fossilkol, naturgas och biomassa med olika omsättningstid (10, 30 och 50 år) används årligen under perioden 2020–2200. Användningen startar 2020 och växer linjärt fram till 2040, för att därefter ligga kvar på 2040-nivån fram till 2080 då de minskar igen (linjärt) ner till noll år 2100. Gröna linjer motsvarar biogena koldioxidutsläpp och svarta linjer motsvarar fossila koldioxidutsläpp.

Temperaturförändringen i fallet med extra bränsleanvändning under en begränsad period (som visas i Figur 6) illustreras också i Figur 7. Här visas bara effekten av biobränsleanvändning och i stället för tiden visar X-axeln biogena koldioxidutsläpp motsvarande minskningen i mängden kol i det biogena kolkollet. Detta för att tydliggöra det nästan linjära och reversibla förhållandet mellan

mängden kol i det biogena kollagret och temperaturförändringen. Utvecklingen över tid beskrivs här av de tre punktserierna som alla utgår från nedre vänstra hörnet (år 2010) och där varje prick motsvarar ett steg framåt i tiden.



Figur 7. Illustration av det nästan linjära och reversibla förhållandet mellan mängden kol i det biogena kollagret och temperaturförändringen. Diagrammet visar utvecklingen i fallet där extra bio-bränsleanvändning sker under perioden 2020 - 2100, alltså precis samma utveckling som visas i Figur 6. X-axeln visar nettoutsläpp av biogen koldioxid som innebär motsvarande minskning av mängden kol i det biogena kollagret. Utvecklingen över tid fångas upp av punktserierna som utgår ifrån nedre vänstra hörnet (år 2010), när en vändpunkt (år 2100) och närmar sig åter startpunkten framåt slutet av perioden (år 2200). Varje prick motsvarar ett steg framåt i tiden. I figuren visas också den linjära relationen mellan utsläpp av fossil koldioxid och den globala medeltemperaturen som kallas Transient Climate Response to Cumulative carbon Emissions (TCRE).

Som synes ökar den globala medeltemperaturen i det närmaste linjärt med minskningen av mängden kol i det biogena kollagret, fram till en vändpunkt nås (år 2100). Vändpunkten sammanfaller med att det extra bränslebehovet upphör, alltså tidpunkten då uttag av att extra biomassa för bioenergi upphör och det biogena kollagret börjar öka igen. Temperaturen minskar i takt med att det biogena kollagret ökar och linjerna närmar sig åter startpunkten framåt slutet av perioden (år 2200), då det biogena kollagret är tillbaka på ungefär samma nivå som 2010 och bidraget till uppvärmning i det närmaste har upphört.

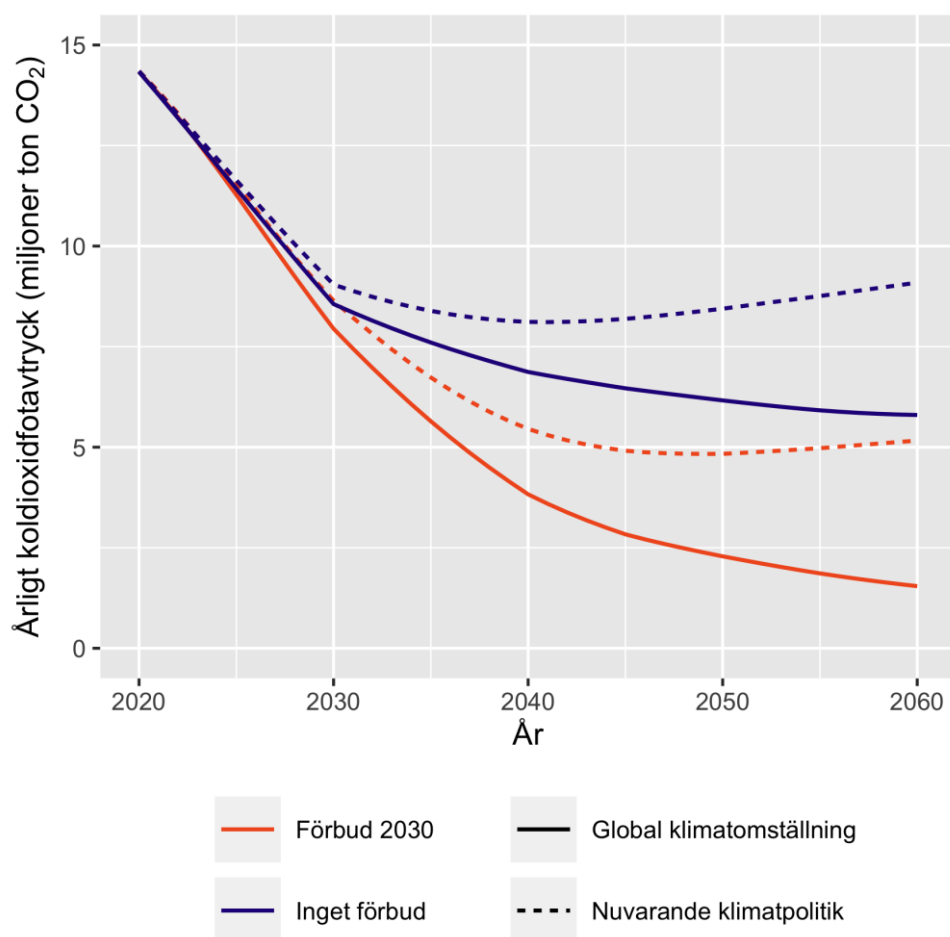
Modelleringen som ger resultaten ovan utgår från antagandet att efterfrågan på bioenergi inte leder till några andra förändringar inom skogssektorn än att en viss mängd biomassa tas i anspråk för energiändamål. Detta är en förenkling som görs för att tydliggöra (i) hur fossila bränslen och biobränslen skiljer sig åt vad gäller temperaturpåverkan och (ii) hur temperaturpåverkan av samma sorts biobränsle kan skilja sig åt beroende på vilken sorts biomassa som används som råvara i biobränsleproduktionen.

I analyserna ovan fokuserade vi på biomassans omsättningstid, men som nämnts har även andra faktorer en inverkan på hur det biogena kollagret förändras som följd av ökande uttag av biomassa för energiändamål. Om skogsbruket förändras som följd av en växande efterfrågan på bioenergi kan detta leda till att kolinbindningen i skogen förändras och även att produktionen av olika skogsprodukter förändras. Detta leder då till en förändring av det biogena kollagret. Om det biogena kollagret ökar pga. förändrat skogsbruk så motverkar detta minskningen som orsakas av biomassauttag för energiändamål. På detta sätt kan ökad biomassaanvändning för energiändamål vara förknippad med ökande biogena kollager som orsakar en nedkylning, vilket förstärker klimatnyttan av att använda biomassa för energiändamål i stället för fossilbränslen.

3 RESULTAT

3.1 BILTRAFIKENS UTSLÄPP AV FOSSIL KOLDIOXID OCH ANDRA VÄXTHUSGASER

Figur 8 visar biltrafikens årliga utsläpp av fossil koldioxid och andra växthusgaser, dels för fallet där det inte införs något förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotorer (lila linjer) och dels för fallet där ett förbud införs 2030 (röda linjer). Inblandning av biodrivmedel sker enligt Medium-scenariot (Tabell 3). Skillnaden mellan de heldragna och streckade linjerna illustrerar hur mycket lägre utsläppen blir om koldioxidutsläppen som är associerade till produktionen av bilar, batterier och drivmedel minskar i linje med scenariot "Global klimatomställning" (streckade linjer) i stället för "Nuvarande klimatpolitik" (heldragna linjer).



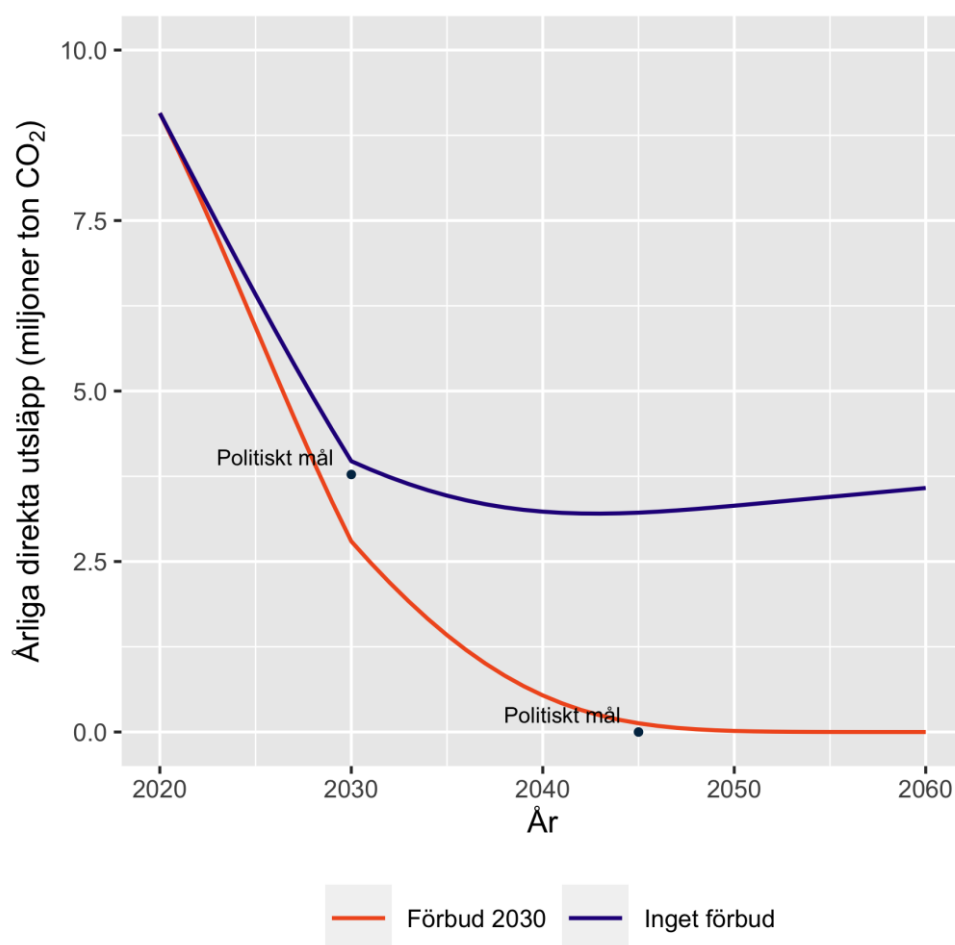
Figur 8. Biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid och andra växthusgaser 2020–2060, med och utan förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030, för de två scenariofallen "Nuvarande klimatpolitik" (som speglar nuvarande styrmedel) och "Global klimatomställning" (som speglar en värld där klimatåtgärder vidtas och nettonollutsläpp uppnås år 2070). Här ingår utsläpp kopplat till produktion och användning av bilar och bränslen (inkl. produktion av el för laddning av elbilar). Inblandning av biodrivmedel enligt Medium-scenariot (Tabell 3).

De lila linjerna visar alltså utvecklingen utan ett förbud. I detta fall fortgår elektrifieringen av bilparken i den takt som krävs för att bilparken skall klara kraven på koldioxidutsläpp per km samtidigt som inblandningen av biodrivmedel i bensin och diesel ökar i linje med den antagna reduktionsplikten för biodrivmedel fram till 2030 för att sedan ligga kvar på 2030-nivån. Som synes börjar utsläppen i "Nuvarande klimatpolitik" att öka igen framåt 2040, vilket beror på växande trafikvolym. Skälet till att biltrafikens utsläpp fortsätter att minska i "Global klimatomställning" är att utsläppen kopplat till produktionen av bilar, batterier och drivmedel minskar mer i detta scenario.

De orange linjerna visar biltrafikens fossila koldioxidutsläpp när förbudet införs 2030. Även i detta fall bryts utvecklingen mot minskande utsläpp pga. ökande trafikvolym i scenariot "Nuvarande klimatpolitik", men förändringen är inte lika markant som i fallet utan förbud. I scenariot "Global klimatomställning" minskar dock utsläppen hela perioden fram till 2060 pga. minskande produktionsutsläpp.

Effekten av ett förbud är förstås ännu större om vi bara beaktar de fossila koldioxidutsläppen från bilarnas avgasrör, som minskar till noll framåt 2050 (Figur 9). Även utan ett förbud minskar utsläppen från avgasrören kraftigt fram till 2030 pga. inblandningen av biodrivmedel som även här ökar i linje med den beslutade reduktionsplikten fram till 2030. Efter detta år hålls inblandningsnivån konstant och utsläppen minskar i långsammare takt fram till år 2042. Därefter börjar utsläppen i stället att öka pga. den ökande trafikvolymen och en minskande takt vad gäller energieffektiviseringar i bilparken (Figur 9).

Av resultaten som visas i figurerna Figur 8, Figur 9 men även Figur 12 (som visar fossila koldioxidutsläpp från bilarnas avgasrör 2020-2060 för olika introduktion av biodrivmedel och olika tidpunkt för förbudet mot förbränningsmotorer) kan det konstateras att ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor sannolikt kommer att bidra avsevärt, men att även biodrivmedel behövs för att vi skall nå målet för svenska inrikestransporter år 2030 och det övergripande nettoll-målet för 2045, speciellt om vi inte får ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor eller om det fördröjs till senare än 2030. Vidare, en strategi baserad på endast ett förbud skulle troligtvis inte räcka för att minska bilarnas utsläpp av fossil koldioxid med 70 % till 2030 (jämfört med 2010), speciellt eftersom det kommer att vara svårt att införa ett förbud tidigt (t ex 2025).

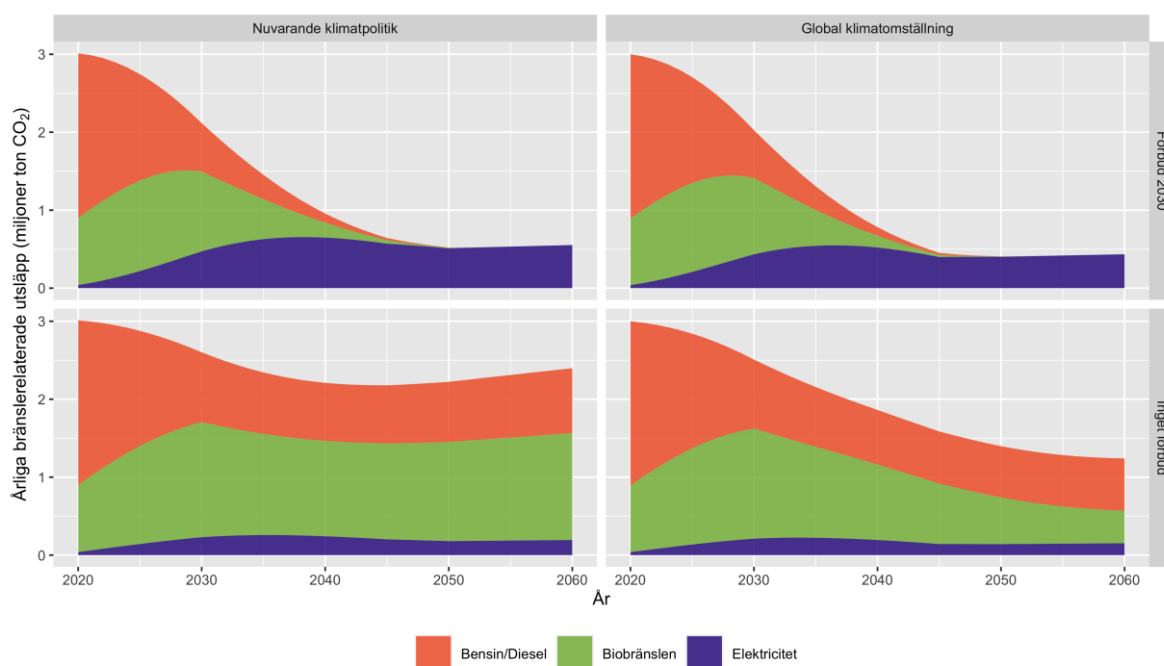


Figur 9. Utsläpp av fossil koldioxid från bilarnas avgasrör 2020–2060, med och utan förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030. Målet för den svenska transportsektorn till 2030 motsvarar en minskning av de årliga utsläppen med 70 % jämfört med 2010 och det politiska målet till 2045 motsvarar en minskning till noll, båda målnivåerna indikeras med punkter i figuren. Inblandning av biodrivmedel enligt Medium-scenariot (Tabell 3).

Om ett förbud mot försäljning av bilar med förbränningsmotorer införs minskar förstås drivmedelsanvändningen inom den svenska bilparken i takt med att bilar med förbränningsmotorer fasas ut och därmed minskar även de fossila koldioxidutsläppen kopplat till produktion av drivmedel för Sveriges bilpark (Figur 10). Det är som synes liten skillnad i produktionsutsläpp mellan scenarierna "Nuvarande klimatpolitik" och "Global klimatomställning" (där det senare har något lägre utsläpp särskilt i fallet utan förbud), vilket beror på att utvecklingen mot drivmedel med lägre koldioxidutsläpp vid produktionen ("Global klimatomställning") får en ganska liten påverkan på totala utsläppen när bilar med förbränningsmotor fasas ut och allt mindre drivmedel används. Att det även är liten skillnad när det gäller utsläpp kopplat till laddning av elbilarnas batterier beror på att elproduktionen i Sverige redan från början orsakar låga koldioxidutsläpp.

I fallet utan förbud är skillnaden mellan scenarierna betydligt större (nedre diagrammen i Figur 10). Som synes består skillnaden huvudsakligen i minskande utsläpp för biodrivmedelsproduktion, vilket beror på den ökande andelen Fischer-Tropsch-diesel i biodrivmedelsmixen i scenariot "Global klimatomställning".

Utsläppen kopplat till bilproduktionen ökar inledningsvis snabbt om det införs ett förbud (Figur 11) eftersom tillverkningen av batterier som behövs för laddhybrider och elbilar ökar kraftigt. På längre sikt beror utvecklingen på om den globala utvecklingen är i linje med "Nuvarande klimatpolitik" eller "Global klimatomställning". I "Nuvarande klimatpolitik" ökar utsläppen för biltillverkningen stadigt under hela scenarioperioden medan den minskar i "Global klimatomställning" och når 2060 ungefär samma nivå som i fallet utan förbud.



Figur 10. Fossila koldioxidutsläpp från drivmedelsproduktion och batteriladdning 2020–2060, med (övre bilder) och utan (nedre bilder) förbud mot förbränningsmotorer 2030, för de två scenariefallen "Nuvarande klimatpolitik" (som speglar nuvarande styrmedel) och "Global klimatomställning" (som speglar en värld där klimatåtgärder vidtas och nettonollutsläpp uppnås år 2070). Inblandning av bio-drivmedel enligt Medium-scenariot (Tabell 3).



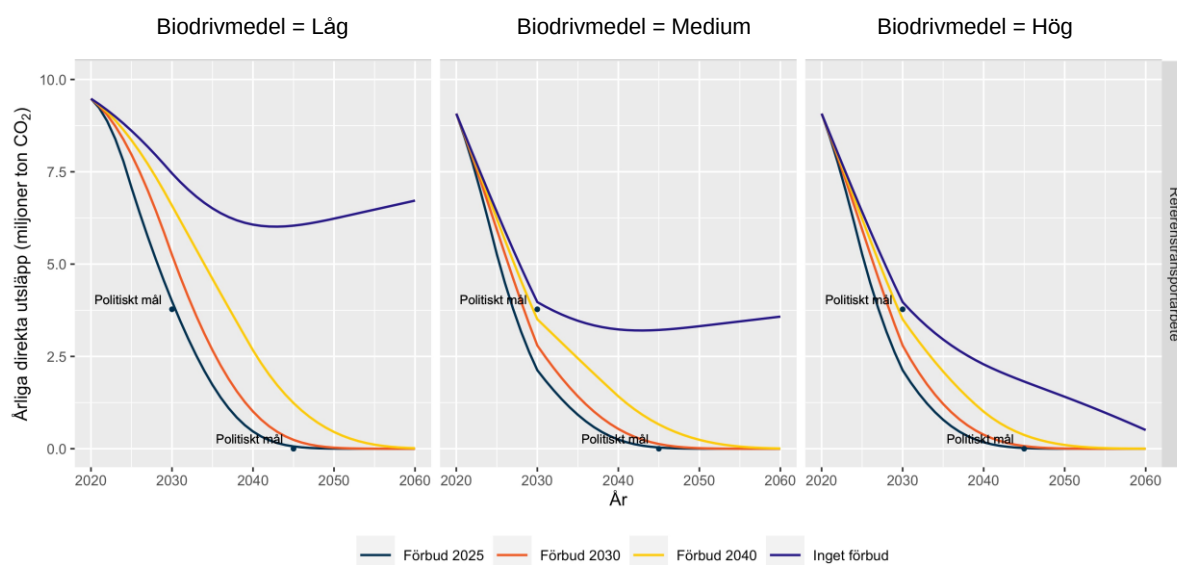
Figur 11. Fossila koldioxidutsläpp från biltillverkning 2020–2060, med och utan förbud mot förbränningsmotorer 2030, för de två scenariefallen "Nuvarande klimatpolitik" (som speglar nuvarande styrmedel) och "Global klimatomställning" (som speglar en värld där klimatåtgärder vidtas och netto-nollutsläpp uppnås år 2070). ICEV = bilar med enbart förbränningsmotorer, PHEV = laddhybrider och BEV = rena elbilar. Inblandning av biodrivmedel enligt Medium-scenariot (Tabell 3).

Figur 12 visar hur de fossila koldioxidutsläppen från bilarnas avgasrör förändras vid basprognosen för det framtida bilresandet i Sverige, beroende på dels reduktionspliktens utformning och dels på vilket år som förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotorer införs. Om användningen av biodrivmedel antas vara konstant på nuvarande nivåer (Låg i Tabell 3) skulle som synes endast ett förbud 2025 vara i linje med 70 %-målet. Om förbudet införs senare nås inte målet. Omvänt, enbart biodrivmedelspolitiken fram till 2030 räcker inte för att nå 70% minskning mellan 2010 och 2030. Sannolikt behövs alltså en kombination av de båda strategierna för att minska biltrafikens fossila koldioxidutsläpp i en omfattning som gör det möjligt att nå antagna politiska mål, speciellt med tanke på att det är svårt att förbjuda försäljning av nya bilar med förbränningsmotorer redan år 2025.

Samtidigt visar Figur 12 att ambitiösa styrmedel för ökad användning av biodrivmedel i kombination med ett tidigt förbud mot försäljning av bilar med förbränningsmotor skulle kunna minska bilarnas utsläpp mer än 70% fram till 2030. Den vägledande nivån för 2045, som ska vara nära noll, uppnås endast genom att kombinera ett tidigt förbud (år 2025 eller 2030) med ökande biodrivmedelsanvändning åtminstone fram till 2030 (Medium och Hög i Tabell 3).

En annan slutsats, som kan dras utifrån de känslighetsanalyser som har gjorts (vilka diskuteras i sin helhet i Morfeldt et al., 2021), är att de kumulativa utsläppen av fossil koldioxid som är associerade med produktion av elbilar och batteriladdning i alla de analyserade fallen är mindre än de kumulativa utsläppen från drivmedelstillverkning och från bilarnas avgasrör som skulle ha skett om det inte hade införts ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor. Sverige är gynnat

av att den inhemskt producerade elen som används för batteriladdning orsakar låga utsläpp av fossil koldioxid. Men även om europeisk elmix används för laddning och elen som används vid fordons-tillverkning orsakar 50% högre utsläpp än i grundfallet, skulle ett förbud leda till mindre kumulativa utsläpp av fossil koldioxid.

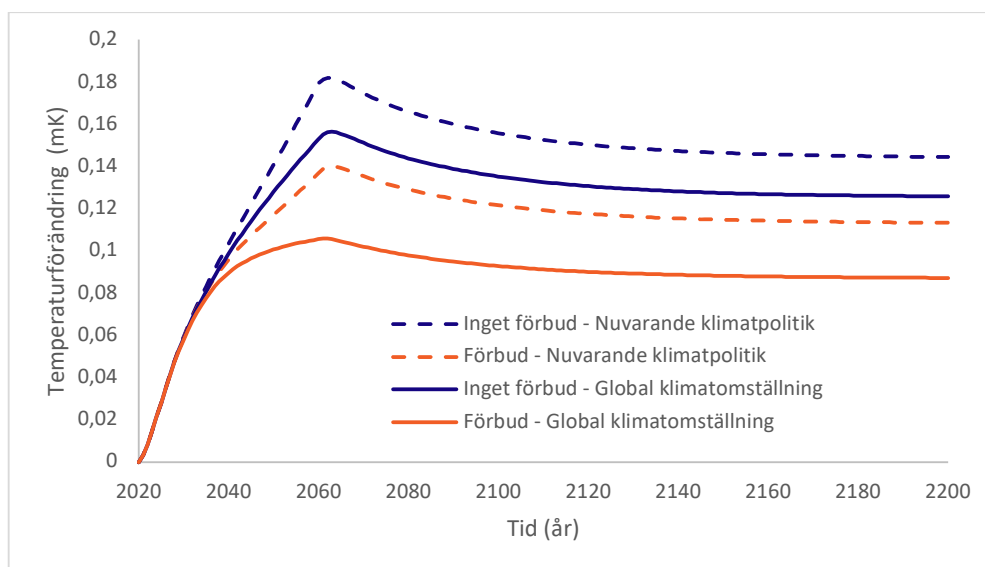


Figur 12. Fossila koldioxidutsläpp från bilarnas avgasrör 2020-2060. Diagrammen belyser effekterna av tidpunkten för ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotorer och andelen biodrivmedel som används (Låg, Medium och Hög i Tabell 3). Det vägledande politiska målet till 2030 motsvarar en minskning av de årliga utsläppen med 70 % jämfört med 2010 och det vägledande politiska målet till 2045 motsvarar att nollutsläpp. Målnivåerna visas med punkter i diagrammen.

3.2 BILTRAFIKENS PÅVERKAN PÅ DEN GLOBALA MEDELTEMPERATUREN

3.2.1 Temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossila koldioxidutsläpp under omställningen fram till 2060

I Figur 13 visas temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid under perioden 2020–2060, dvs. utsläppen kopplat till produktion och användning av bilar och bränslen, inklusive produktion av el för laddning av elbilar (visas i Figur 8). I alla fyra fallen som visas ökar inblandningen av biodrivmedel i bensin och diesel linjärt från 23% år 2019 till 59 % år 2030, i linje med den antagna reduktionsplikten för biodrivmedel till 2030, och ligger sedan kvar på denna nivå fram till 2060. Biogen koldioxid beaktas inte här, utan biodrivmedlens temperaturpåverkan är i Figur 13 kopplat till utsläpp av fossil koldioxid som är associerade med biodrivmedlen.



Figur 13. Temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060 (som visas i Figur 9), med och utan förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030, för de två scenariofallen ”Nuvarande klimatpolitik” (som speglar nuvarande styrmedel) och ”Global klimatomställning” (som speglar en värld där klimatåtgärder vidtas och nettonollutsläpp uppnås år 2070). Utsläpp kopplat till produktion och användning av bilar och bränslen (inkl. produktion av el för laddning av elbilar) ingår, men biogena kolbalanser beaktas inte här. Inblandning av biodrivmedel enligt Medium-scenariot (Tabell 3).

Fossila koldioxidutsläpp efter 2060 beaktas inte i något scenario eftersom vi fokuserar på omställningsperioden fram till 2060. Däremot beaktas i nästa avsnitt de nettoutsläpp av biogen koldioxid fram till 2200 som kan härledas till produktion och användning av biodrivmedlen fram till 2060.

Den streckade lila kurvan i Figur 13 visar temperaturpåverkan utan ett förbud mot förbränningsmotorer och för scenariot ”Nuvarande klimatpolitik”, där koldioxidutsläppen från biltillverkning samt produktion och användning av el- och drivmedel förändras i enlighet med nuvarande styrmedel/mål. I detta scenario säljs laddningsbara bilar fram till 2030 i den takt som krävs för att nå kraven gällande koldioxidutsläpp per km och ligger därefter kvar på 2030-nivå. Den streckade lila kurvan kan användas som en referens. En jämförelse med övriga kurvor ger en bild av hur den svenska biltrafikens temperaturpåverkan förändras om det införs ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor 2030 och/eller om koldioxidutsläppen från biltillverkning samt produktion och användning av el- och drivmedel minskar som följd av skärpta klimatåtgärder som leder till att den genomsnittliga globala temperaturhöjningen inte överstiger 1,8°C och att nettonollutsläpp uppnås år 2070 (Global klimatomställning).

Som syns i Figur 13 skiljer sig temperaturpåverkan i scenarierna alltmer fram till 2060 och det är tydligt att både elektrifieringen av bilparken och en generell utveckling mot lägre koldioxidutsläpp inom tillverkningsindustrin och energisektorn bidrar till att begränsa biltrafikens temperaturpåverkan. Efter 2060 finns en långsamt avtagande uppvärmningseffekt som beror på att koldioxid som släpps ut fram till 2060 finns kvar i atmosfären under lång tid, vilket illustrerades också tidigare i Figur 5.

I Figur 13 visas uppvärmningen som orsakas av utsläpp fram till 2060. Men lutningen på kurvorna år 2060 ger en indikation av hur uppvärmningen skulle utvecklas vidare direkt efter detta år, som följd av biltrafikens fortsatta utsläpp. Det är som synes en stor skillnad mellan scenarierna i detta avseende och speciellt mellan referens-scenariot (streckad lila linje) med brant fortsatt uppvärmning och det mest ambitiösa omställningsscenariot (heldragen orange linje) där uppvärmningen i det närmaste har planat ut. Denna fortsättning kan även utläsas ur Figur 8: i det mest ambitiösa omställningsscenariot är de årliga utsläppen nere på ganska låga nivåer 2060 och fortsätter att avta, medan utsläppen i referens-scenariot är betydligt högre och fortsätter att öka.

3.2.2 Temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens när nettoutsläpp av biogen koldioxid kopplat till biodrivmedel beaktas

I detta avsnitt beskriver vi den svenska biltrafikens temperaturpåverkan när även påverkan av biodrivmedelsproduktion på det biogena kollagret beaktas. I alla tre fall som visas i Figur 14 införs förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och omvärldsutvecklingen motsvarar scenariot Global klimatomställning. Biltrafikens temperaturpåverkan består alltså av (i) temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060 som beskrivs av den röda heldragna linjen i Figur 13; och (ii) temperaturpåverkan av nettoutsläppen av biogen koldioxid 2020–2200 som härrör från biodrivmedelsanvändningen 2020–2060. Vi visar resultat endast för fallet där bioråvarans omsättningstid är 30 år eftersom diagrammen annars skulle bli svårlästa. Samtidigt bör det poängteras att en stor del av dagens biodrivmedel kommer från annat än skog och har en mycket kort omsättningstid. När det gäller skogsråvara är det nästan uteslutande råvaror med kort omsättningstid som används i dagsläget (avverkningsrester, sågspån, bark, svartlut, etc.

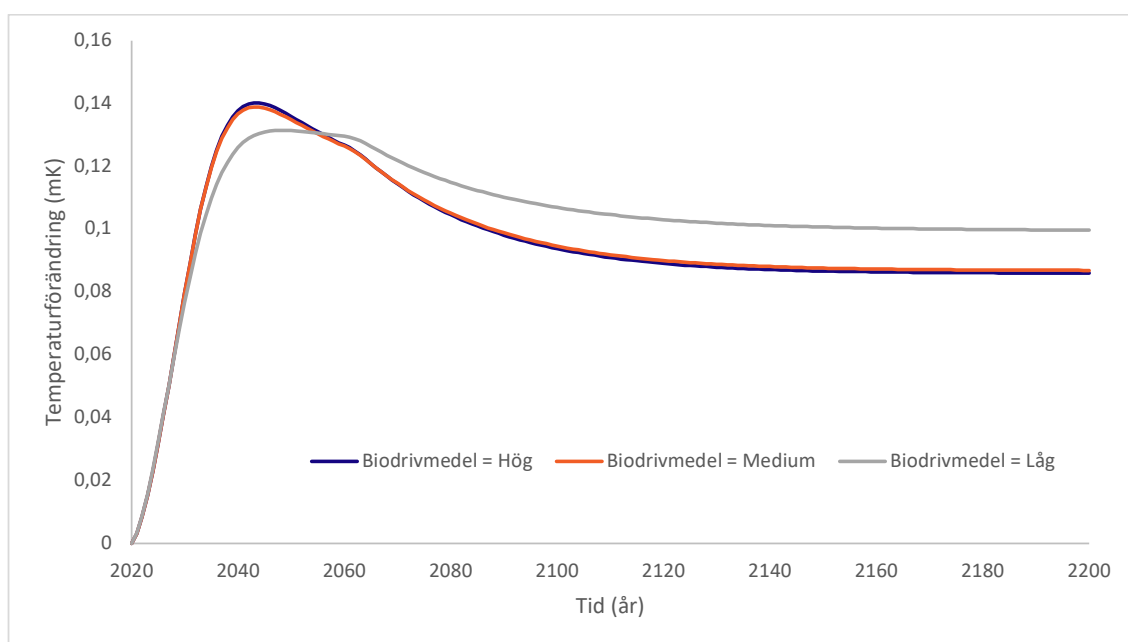
De tre scenarierna för biodrivmedelanvändningen är desamma som redovisas i Figur 12: (i) biodrivmedelsandelen ligger på 2020-nivån (23%) fram till 2060; (ii) andelen ökar linjärt till 59 % år 2030 (i linje med den antagna reduktionsplikten) och ligger sedan kvar på 2030-nivån fram till 2060; och (iii) andelen ökar till 59% år 2030 och ökar sedan linjärt i en takt som skulle leda till att alla drivmedel år 2065 är 100% biobaserade.

Eftersom ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor införs år 2030, avtar drivmedelsanvändningen ganska fort efter 2030. Därmed blir effekten av olika inblandningsgrad för biodrivmedel inte så stor på längre sikt, speciellt inte för de två fallen där inblandningsgraden förändras på samma sätt fram till 2030. Men skillnaden mellan utsläpp av fossil och biogen koldioxid framgår ändå genom jämförelsen med det tredje scenariot där biodrivmedelsandelen ligger kvar på 2020-nivån fram till 2060. Som syns i Figur 14 leder en större inblandning av biodrivmedel till högre global medeltemperatur under den tidigare delen av perioden och till lägre global medeltemperatur under den senare delen av perioden.

Den högre uppvärmningen i tidigare delen av perioden speglar minskningen av det biogena kollagret som följer av att användningen av bioråvara (med 30 års omsättningstid) för produktion av biodrivmedel tidigarelägger utsläppen av biogen koldioxid till atmosfären, jämfört med om bioråvaran inte hade använts för detta ändamål.

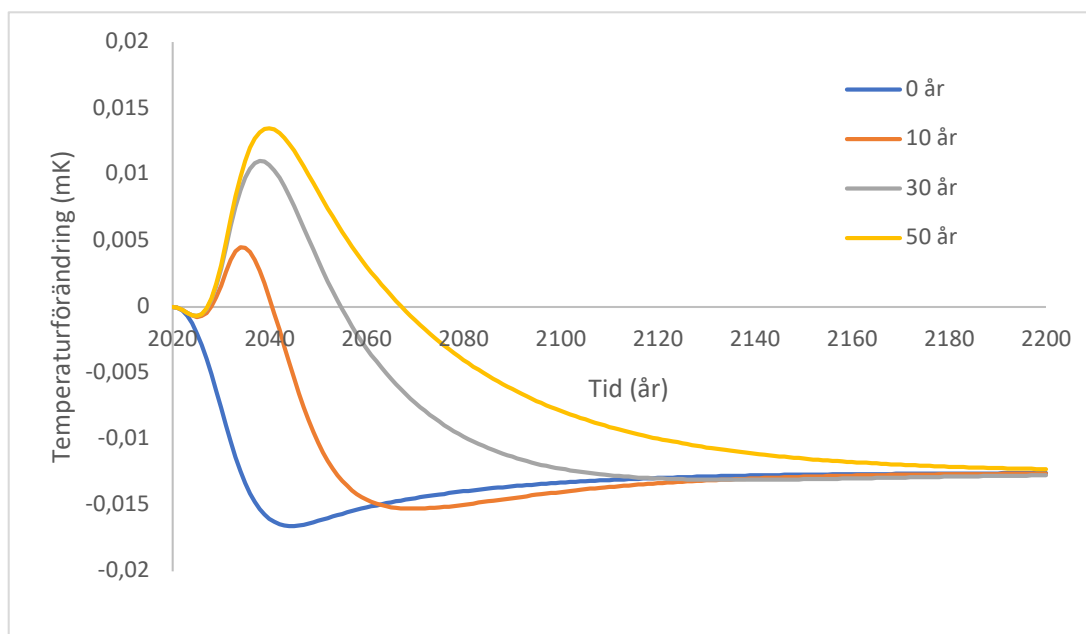
Den lägre uppvärmningen på längre sikt beror på att de kumulativa fossila koldioxidutsläppen är lägre när inblandningsgraden för biodrivmedel är högre; den uppvärmning som sker pga. biodrivmedelsanvändningen stabiliseras efter ett antal år och sjunker sedan tillbaka mot noll igen när biogena koldioxidutsläpp från användning av biodrivmedel upphör 2060 (alltså samma förlopp som i Figur 6).

Den kvarvarande uppvärmningen, som avtar långsamt, härrör från utsläppen av fossil koldioxid fram till 2060 och dessa utsläpp är alltså högst när inblandningen av biodrivmedel ligger kvar på 2020-nivån fram till 2060.



Figur 14. Temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060 (visas i Figur 8), samt nettoutsläpp av biogen koldioxid 2020–2200 som följd av biodrivmedelsanvändning 2020–2060 enligt scenarierna i Tabell 3 (Hög, Medium och Låg). Uppvärmningseffekten visas för fallet med förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och omvärldsutveckling enligt scenariot Global klimatomställning. Biogena kolbalansen modelleras för fallet där bioråvarorna som används har en genomsnittlig omsättningstid på 30 år.

Figur 15 kompletterar Figur 14 genom att visa hur temperaturpåverkan av att öka biodrivmedelsandelen i bensin och diesel fram till 2030 i linje med reduktionsplikten, och därefter ligga kvar på 2030-nivån (59%) fram till 2060, beror på omsättningstiden för biomassan som utgör råvara för biodrivmedelsproduktionen. Alla bioråvarorna antas år 2020 ha en omsättningstid på 0 år, dvs. kolatomerna i bioråvarorna hamnar i atmosfären samma år som biomassan skördas. Användningen av bioråvara antas därefter gradvis förändras (linjärt) så att den genomsnittliga omsättningstiden för råvarumixen från år 2030 är den som anges för de olika graferna i diagrammet (dvs varierar från 0 till 50 år). Liksom i Figur 14 införs ett förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotorer år 2030, vilket innebär att biodrivmedelsanvändningen avtar ganska fort efter 2030. Omvärldsutvecklingen motsvarar scenariot Global klimatomställning.



Figur 15. Figuren visar hur temperaturpåverkan av ökad reduktionsplikt beror på omsättningstiden för bioråvaran som används för biodrivmedelsproduktion. Temperaturpåverkan visas för fallet med förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och där reduktionsplikten ökar från 2020 års nivå till den planerade nivå 2030 och därefter ligger kvar på 2030-nivå fram till 2060. Bioråvarorna antas år 2020 ha en omsättningstid på 0 år, dvs. kolatomerna i bioråvarorna hamnar i atmosfären samma år som biomassan skördas. Användningen av bioråvara antas därefter gradvis förändras (linjärt) så att den genomsnittliga omsättningstiden för råvarumixen från år 2030 är den som anges för de olika graferna i diagrammet (dvs. varierar från 0 till 50 år).

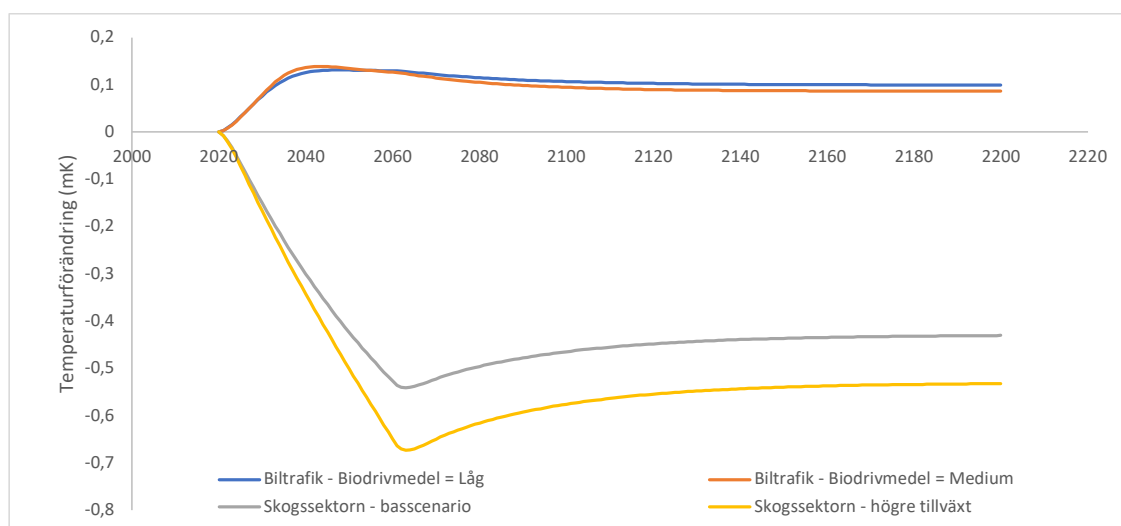
Som syns i Figur 15 ökar uppvärmningen på kort sikt om biomassa med en omsättningstid på 10 år eller mer används för biodrivmedelsproduktionen. Men efter en tid avtar uppvärmningseffekten och efter ytterligare tid är effekten av biodrivmedelsinblandningen en nedkylning (jämfört med fallet utan reduktionsplikt). Tiden fram till avtagande uppvärmningseffekt och till nedkylning varierar beroende på bioråvarornas omsättningstid. På lång sikt konvergerar linjerna i Figur 15 allt eftersom temperaturpåverkan som följer av biodrivmedelssystemets påverkan på det biogena kolkretslaget går mot noll. Den kvarvarande nedkylningen motsvarar den uppvärmning som undviks på grund av att biodrivmedlen substituerade fossila drivmedel.

Notera att diagrammet i Figur 15 har en annan skala på Y-axeln än diagrammet i Figur 14; temperaturpåverkan skiljer sig ungefär en faktor 10. I jämförelse med biltrafikens totala temperaturpåverkan är alltså betydelsen av bioråvarans omsättningstid inte så stor i en situation där elektrifieringen av fordonsparken leder till ganska snabbt minskande användning av biodrivmedel. Dock har vi här inte beaktat att en del bioråvaror som användes för biodrivmedelsproduktion hade kunnat användas för produktion av andra skogsprodukter med högre eller lägre substitutionseffekter än den som erhålls när biodrivmedel blandas in i bensin och diesel.

3.2.3 Temperaturpåverkan av den svenska biltrafiken i jämförelse med skogssektorn

I Figur 16 visas temperaturpåverkan av dels den svenska biltrafikens, dels den svenska skogssektorn, genom den koldioxidinbindning och lagring som sker i skog och skogsprodukter. Närmare bestämt visas följande:

- Temperaturpåverkan av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060 (Figur 8), samt nettoutsläpp av biogen koldioxid 2020–2200 som följd av biodrivmedelsanvändning 2020–2060. Temperaturpåverkan visas för två av fallen som visas i Figur 14. I båda fallen införs förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och omvärldsutvecklingen följer scenariot Global klimatomställning, men användningen av biodrivmedel skiljer sig åt. I ena fallet ökar inblandning av biodrivmedel i bensin och diesel i linje med den antagna reduktionsplikten för 2030 (59%) och därefter ligger inblandning kvar på 2030-nivå fram till 2060. I det andra fallet ligger biodrivmedelsandelen kvar på 2020-nivån (23%) fram till 2060. Bioråvarorna som används för biodrivmedelsproduktion antas ha en genomsnittlig omsättningstid på 30 år.
- Temperaturpåverkan av den koldioxidinbindning som sker i skog och skogsprodukter fram till 2060, i de två scenarier som visas i Figur 2, alltså basscenariot *Maximum potential harvest* som efterliknar förutsättningarna inom svenskt skogsbruk som Skogsstyrelsen har angivit för perioden 2000–2009 och scenariot *Increased fertilization* där skogstillväxten ökar som följd av skogsgödslin med årlig omfattning motsvarande 1% av skogsarealen.

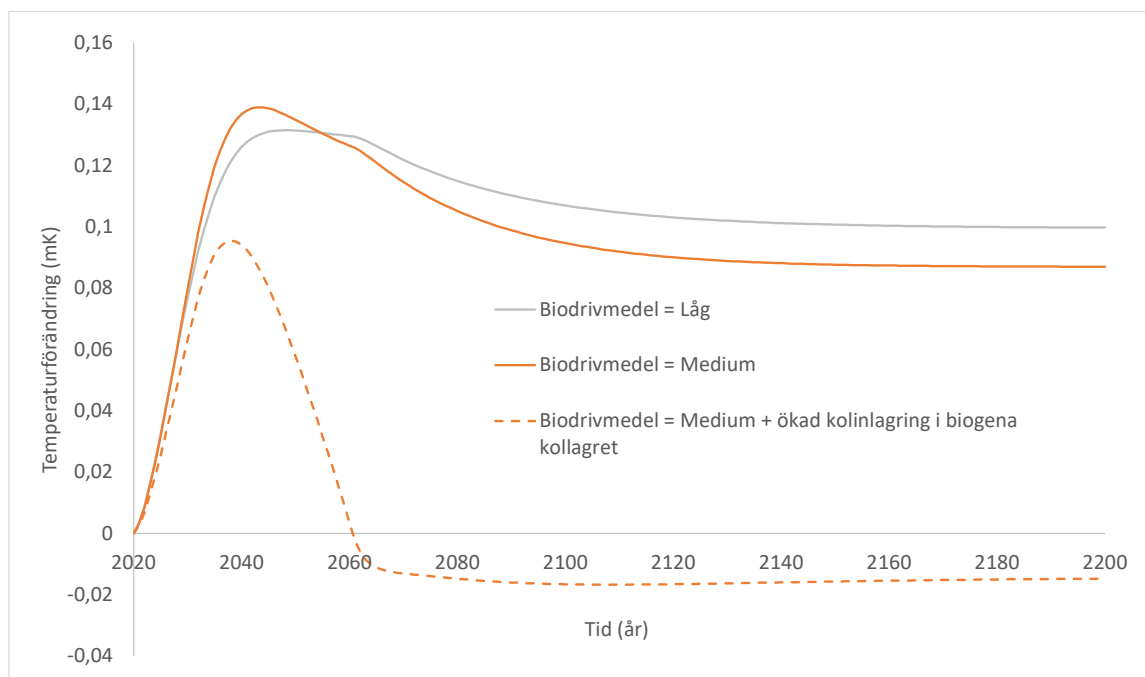


Figur 16. Temperaturpåverkan av den svenska skogssektorn, genom koldioxidinbindningen som sker i skog och skogsprodukter, och av den svenska biltrafikens utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060, samt nettoutsläpp av biogen koldioxid 2020–2200 som följd av biodrivmedelsanvändning 2020–2060 för två olika fall (för detaljer se texten). Temperaturpåverkan visas för fallen med förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och scenariot Global klimatomställning. Biogena kolbalansen modelleras för fallet där bioråvarorna som används har en genomsnittlig omsättningstid på 30 år.

Figur 16 illustrerar vad som också kunde konstateras utifrån en jämförelse av koldioxidinbindning respektive -utsläpp i Figur 2 och Figur 8; att den nedkylande effekten av kolinbindning i skog och skogsprodukter är större än den svenska biltrafikens bidrag till uppvärmning. Skillnaden mellan de två kurvorna som visar skogsbrukets temperaturpåverkan i Figur 16 indikerar dessutom att temperatureffekten av att skogsbruket förändras kan bli ungefär lika stor som biltrafikens temperaturpåverkan. Detta illustreras i Figur 17 som utöver biltrafikens temperaturpåverkan för de två fall som visas i Figur 16 innehåller ett tredje fall som visar den sammanlagda temperaturpåverkan av biltrafiken och skogsbruket, där en förändring av brukningsmetoderna leder till att skogstillväxten och kolinlagringen i skogen ökar. Närmare bestämt kombinerar det tredje fallet temperaturpåverkan av (i) ökad biodrivmedelsanvändning enligt Medium-scenariot i Tabell 3; och (ii) förändringar inom skogsbruket syftande till att höja skogstillväxten i de skogar som är tillgängliga för virkesproduktion. Temperaturpåverkan av skogsbrukets förändring modelleras utgående ifrån skillnaden mellan scenarierna *Maximum potential harvest* och *Increased fertilization* gällande kolinbindning i skog och skogsprodukter 2020–2060.

Figur 17 illustrerar genom det tredje fallet hur ökad nedkylning som följer av ökad kolinbindning i skog och skogsprodukter dämpar uppvärmningen som orsakas av biltrafikens utsläpp 2020–2060. På längre sikt stabiliseras som synes temperaturpåverkan kring en nedkylning vilket förklaras av att ökningen av det biogena kollagret 2020–2060 är lite större än biltrafikens kumulativa utsläpp av fossil koldioxid under samma period. Temperaturpåverkan av kolinbindning och utsläpp efter 2060 hanteras inte här eftersom denna studie fokuserar på biltrafikens omställning fram till 2060. Men Figur 2 ger tillsammans med Figur 8 en grund för reflektioner kring hur biltrafikens och skogsbrukets långsiktiga temperaturpåverkan beror på vilka utvecklingsvägar som följs.

Notera att det tredje fallet i Figur 17 endast visas för att illustrera betydelsen av att fånga upp sektorskopplingar när omställningsstrategier utvärderas. I realiteten bestäms skogssektorns utveckling av en lång rad faktorer och vi har i denna studie inte undersökt hur förväntningar kring framtida efterfrågan på skogliga biodrivmedel kan komma att påverka skogsbrukets inriktning. Skogsbrukets inriktning kan också påverkas genom andra åtgärder, t ex styrmedel för att öka arealen tillgänglig skog som undantas från skogsbruk, ett alternativ som också analyserades i den tidigare refererade studien av olika skogsbruksstrategier (Petersson et al., 2022). Även detta alternativ kan dämpa uppvärmningen som orsakas av biltrafikens utsläpp, om den avkylande effekten av ökad kolinbindning i skogen som undantas från skogsbruk är större än den omvända effekten av att det produceras färre skogsprodukter vilket innebär mindre kolinbindning i produkter och mindre substitution.



Figur 17. Temperaturpåverkan av utsläpp av fossil koldioxid 2020–2060, samt nettoutsläpp av biogen koldioxid 2020–2200, för de två fall gällande biltrafiken som visas i Figur 16, samt ett tredje fall som visar den sammanlagda temperaturpåverkan av (i) biltrafikens utveckling fram till 2060 i scenariot där det införs förbud mot försäljning av nya bilar med förbränningsmotor år 2030 och inblandning av biodrivmedel i bensin och diesel ökar i linje med den antagna reduktionsplikten för 2030 och ligger därefter kvar på 2030-nivå fram till 2060. Omvärldsutvecklingen följer scenariot Global klimatomställning och biomassan som används för biodrivmedelsproduktion har en genomsnittlig omsättnings-tid på 30 år; samt (ii) en förändring inom svenskt skogsbruk ifrån situationen som Skogsstyrelsen har angivit för perioden 2000–2009 (*Maximum potential harvest*) till situationen som representeras av scenariot *Increased fertilization* där skogstillväxten ökar som följd av skogsgödsling.

4 SLUTSATSER OCH AVSLUTANDE DISKUSSION

Krav på biodrivmedelsinblandning och ett förbud av förbränningsmotorer i nybilsförsäljningen kan båda ge betydande bidrag till att minska de fossila koldioxidutsläppen i Sverige. Ett förbud skulle sannolikt driva upp takten betydligt när det gäller elektrifiering av fordonsparken och därmed bidra avsevärt till netto-nollmålet för 2045. Om förbudet införs tidigt (före 2030) och med lång framförhållning skulle det även kunna ge ett viktigt bidrag till att minska utsläppen av fossil koldioxid från avgasrören med 70 % fram till 2030 (jämfört med 2010). Att öka elektrifieringstakten är fördelaktigt i ett klimatperspektiv även i fallet där koldioxidutsläppen från den globala biltillverkningen minskar relativt långsamt. Men en fortsatt inblandning av biodrivmedel behövs sannolikt också, speciellt för att nå målet med 70 % minskning fram till 2030. Styrmedel som minskar bilsresandet (tex. ökade bränsleskatter, kilometerskatt eller trängselskatt) kan ge ett viktigt bidrag till att hålla nere utsläppen genom att minska behovet av drivmedel (speciellt om övergången till elbilar går långsamt) och el för batteriladdning.

Vi har inte specifikt studerat effekten av ett förbud mot försäljning av fossila bränslen i stället för ett förbud mot försäljning av fordon med förbränningsmotorer. Med ett förbud mot förbränningsmotorer finns en risk att viljan att investera i biodrivmedelsproduktion i Sverige minskar. Om kapaciteten för inhemsk produktion av (främst skogsbaserade) biodrivmedel inte byggs ut så behöver biodrivmedelsimporten öka för att vi ska kunna nå de politiska målen. Därmed kan risken öka att den svenska biltrafikens klimatomställning orsakar ökande växthusgasutsläpp utomlands kopplat till produktionen av biodrivmedlen som importeras.

En utbyggd kapacitet för inhemsk biodrivmedelsproduktion skulle minska risken för sådana negativa effekter och skulle samtidigt kunna öka försörjningstryggheten, vilket har blivit ett starkare motiv pga. kriget i Ukraina. Elektrifiering av biltrafiken kan på längre sikt leda till att efterfrågan på biodrivmedel för användning i bilar minskar i Sverige. Därmed framstår det som klokt att utveckla produktionssystem med beredskap för att produktionen på längre sikt kan komma att inrikta sig mot export samt andra användningsområden än biltrafik.

Påverkan på den globala medeltemperaturen av att använda fossila bränslen och biobränslen från den svenska skogen skiljer sig åt. Temperaturökningen är ungefär linjärt relaterad till kumulativa koldioxidutsläpp från användningen av fossilbränslen, men är i allmänhet inte linjärt relaterat till kumulativa biogena koldioxidutsläpp från biobränsleanvändning (t ex biogena koldioxidutsläpp ifrån avgasrör). Temperaturpåverkan beror i stället på hur det biogena kolkolagret (kol lagrad i ekosystem och i biobaserade produkter) påverkas av att biomassa används för energigändamål, alltså hur mark- och biomassaanvändningen som är associerad med bioenergisystemet påverkar balansen mellan fotosyntes, respiration och bränder, samt lagring av kolatomer i biobaserade produkter.

Vidare har koldioxidutsläpp från användningen av fossila bränslen en temperaturpåverkan som fortgår i hundratals år efter att utsläppet har ägt rum, vilket inte gäller generellt för biogena koldioxidutsläpp från biobränsleanvändning. Som vi har visat bestäms den långsiktiga temperaturpåverkan i stället av hur biobränslesystemet påverkar det biogena kolkolagrets förändring över tid. Därför kan samma sorts biobränsle ha olika temperaturpåverkan, även om det används för samma ändamål (i vårt fall som fordonsbränsle). Utöver bioråvarornas omsättningstid så är skogsbrukets inriktning avgörande.

Historiska erfarenheter, och även framåtblickande studier såsom Petersson et al. (2022), visar att ett skogsbruk inriktat på att öka skogstillväxten och säkra råvaruförsörjningen för den svenska skogsindustrin kan resultera i ökande inbindning av koldioxid i skogar och skogsprodukter. Det svenska skogsbruket är idag en betydande nettosänka av koldioxid och i ett nationellt perspektiv kan skogsbruket sägas dämpa den uppvärmning som orsakas av olika aktiviteter inom landet, exempelvis den svenska biltrafiken. Samtidigt kan styrmedel för att minska klimatpåverkan av sådana aktiviteter leda till ett intensifierat uttag av skogsbiomassa för att möta en ökande efterfrågan på biodrivmedel och andra skogsprodukter, vilket i sin tur kan leda till minskande nettoinbindning av koldioxid i skogen. Men samtidigt kan, som sagt, förväntningar kring en framtida ökad efterfrågan på skogsprodukter leda till investeringar i skogsbruksåtgärder som leder till ytterligare ökad skogstillväxt och kolinbindning.

Vi har i denna studie inte undersökt i vilken utsträckning skogssektorns förväntningar kring framtida efterfrågan på skogliga biodrivmedel kan påverka skogsbrukets långsiktiga inriktning och därigenom kolinbindning i skog och skogsprodukter, samt substitutionsmönster. Dessa samband kan vara av större betydelse än vilken sorts biomassa som används för biodrivmedelsproduktion. Exempelvis, Holmström et al. (2013) undersökte effekter av att anpassa skogsbruket till tre sortiment; timmer, massaved och skogsbränsle, där samtliga betraktas som jämställda och i sammanhanget lika viktiga. Slutsatsen var att en anpassning kan möjliggöra ett ökat biomassa-uttag för bioenergi parallellt med ökade massavedsuttag och där även uttagsvolymerna vid slutavverkning ökade. Skogsbruket blev mer gallringsintensivt och skogens omloppstid ökade något. Cintas et al. (2015) rapporterade liknande resultat.

Den parallellt löpande studien av olika skogsbruksstrategier (Petersson et al. 2022) bekräftade slutsatser från tidigare studier, t ex (Gustavsson et al. 2017); om substitutionseffekten anses relativt låg så kan avsättning av skogsmark som reservat på kort sikt minska koldioxidhalten i atmosfären mer än när samma skog brukas för produktion av råvaror till skogsindustrin. En viktig reservation är dock att antagandena om substitutionsmönster i (Petersson et al. 2022) inte bygger på ekonomisk modellering som kan fånga upp konsumtions- och produktionsmönster runtom i världen. Speciellt när det gäller kortsiktiga effekter så finns en risk att minskad produktion av skogsprodukter i Sverige leder till ökad produktion av samma produkter i andra länder där skogsbruket inte upprätthåller en positiv kolbalans och skogsindustrin använder mycket fossilt bränsle. Därigenom kan ökad avsättning av skogsmark i Sverige leda till att vi på kort sikt får mer koldioxid i atmosfären. För alla nivåer av substitutionseffekt så visade resultaten i (Petersson et al. 2022) att skogsbruk för produktion ger lägre koldioxidhalt i atmosfären på längre sikt och skogsbruk för ökad produktion (gödsling) ger lägre koldioxidhalter på både kort och lång sikt.

Avslutningsvis, i denna rapport har vi inte tagit upp frågan hur klimatförändringarna kan komma att förändra situationen i skogen. Men i studien av olika skogsstrategier undersöktes också hur klimatförändringarna kan komma att påverka den svenska skogen. Simuleringarna visade att möjliga positiva och negativa effekter av klimatförändringarna (och naturliga störningar) kan ha stor inverkan på skogens kolbalans och hållbara avverkningsnivåer. Detta ger skäl för vidare studier av skogsbruksstrategier i ett föränderligt klimat, till stöd för Sveriges omställning mot klimatneutralitet och även för att förbättra kunskapsunderlag till stöd för klimatanpassning.

REFERENSER

Argonne National Laboratory, 2020. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET®) Model - GREET 2, Version 2019. URL <https://greet.es.anl.gov/> (besökt 2020.09.01).

Berndes, G., Ahlgren, S., Börjesson, P., Cowie, A.L., 2013. Bioenergy and land use change-state of the art. Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ. 2, 282–303. <https://doi.org/10.1002/wene.41>.

Cintas, O., Berndes, G., Cowie, A. L., Egnell, G., Holmström, H. and Ågren, G. I. (2016), The climate effect of increased forest bioenergy use in Sweden: evaluation at different spatial and temporal scales. WIREs Energy Environ. 2016, 5:351–369. doi: 10.1002/wene.178

Cowie, A., Berndes, G., Bentsen, NS., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., Harris, ZM., Johnsson, F., Junginger, HM., Kline, KL., Koponen, K., Koppejan, J., Kraxner, F., Lamers, P., Majer, S., Marland, E., Nabuurs, GJ., Pelkmans, L., Sathre, R., Schaub, M., Smith, CT., Soimakallio, S., Van Der Hilst, F., Woods, J., Ximenes, FA., 2021. Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. Global Change Biology Bioenergy, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12844>

de Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S. & Olsson, B.A. 2018. Miljöpåverkan av skogsbränsleuttag – En syntes av forskningsläget baserat på Bränsleprogrammet hållbarhet 2011-2016. ER 2018:02. Energimyndigheten, Eskilstuna.

Energimyndigheten, 2019. Kontrollstation 2019 för reduktionsplikten ER 2019:27. Eskilstuna, Sverige.

Energimyndigheten, 2020a. Energiläget i siffror 2020. Eskilstuna, Sverige.

Energimyndigheten, 2020b. Drivmedel 2019 ER 2020:26. Eskilstuna, Sverige.

European Environment Agency, 2020. CO2 passenger cars v18. Monitoring CO2 Emissions from Passenger cars – Regul. 2019/631. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-18> (besökt 2020-10-01).

European Commission, 2019b. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. Off. J. Eur. Union 62, 80.

Europeiska Rådet, 2009. 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. Off. J. Eur. Union 140, 16–62.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J. L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. 39 Palmer, M. Watanabe, M. Wild, H. Zhang, 2021, The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and 40 Climate Sensitivity. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A., et al., 2020. Global carbon budget 2020, *Earth Syst Sci Data*, 12, pp. 3269–3340, [10.5194/essd-12-3269-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020).

Gustavsson, L., Hauss, S., Lundblad, M., Lundström, A., Ortiz, C.A., Sathre, R., Le Truong, N., Wikberg, P.-E., 2017. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 612–624.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.056>

Howard, C., Dymond, C.C., Griess, V.C. et al., 2021. Wood product carbon substitution benefits: a critical review of assumptions. *Carbon Balance Manage* 16, 9. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00171-w>

Holmström, h., Wikström, P., Eriksson, L.O. (2012). Energioptimera skogsbruket: Fallstudier av potentialen i skogsbränsleanpassningar. Fjärrsyn, Rapport 2012:13. ISBN 978-91-7381-094-4

International Energy Agency (IEA), 2019. World Energy Outlook 2019. OECD/IEA, Paris, France.

International Energy Agency (IEA), 2020. Global EV Outlook 2020 - Entering the decade of electric drive?. OECD/IEA, Paris, France. <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en>.

IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

Jenkins S., Millar R. J., Leach N., Allen M.R., 2018. Framing Climate Goals in Terms of Cumulative CO₂-Forcing-Equivalent Emissions, *Geophysical Research Letters*, 45(6): 2795–2804, <https://doi.org/10.1002/2017GL076173>.

Jing, L., El-Houjeiri, H.M., Monfort, J.C., Brandt, A.R., Masnadi, M.S., Gordon, D., Bergerson, J.A., 2020. Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential. *Nature Climate Change* 10, 526–532. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0775-3>.

Khanna, M., Wang, W., Hudiburg, T.W., Delucia, E.H., 2017. The social inefficiency of regulating indirect land use change due to biofuels. *Nature Communication* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms15513>.

Leach N.J., Jenkins S., Nicholls Z., Smith C.J., Lynch J., Cain M., Walsh T., Wu B., Tsutsui J., Allen M.R., 2021. FaIRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3007–3036, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>.

Leskinen P, Cardellini G, González García S, Hurmekoski E, Sathre R, Seppälä J, et al., 2018. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *From Science to Policy*; 2018.7 (November), 28.

Lundblad, M. (2018). Underlag för en svensk bokföringsrapport för brukad skogsmark inklusive skoglig referensnivå. SLU, Report, SLU ID: SLU.ua.2018.2.6-3343.
<https://unfccc.int/documents/271847>.

Masnadi, M.S., El-Houjeiri, H.M., Schunack, D., Li, Y., Englander, J.G., Badahdah, A., Monfort, J.C., Anderson, J.E., Wallington, T.J., Bergerson, J.A., Gordon, D., Koomey, J., Przesmitzki, S., Azevedo, I.L., Bi, X.T., Duffy, J.E., Heath, G.A., Keoleian, G.A., McGlade, C., Nathan Meehan, D., Yeh, S., You, F., Wang, M., Brandt, A. R., 2018. Global carbon intensity of crude oil production. *Science* (80-.) 361, 851–853. <https://doi.org/10.1126/science.aar6859>.

Millar, R. J., Nicholls, Z. R., Friedlingstein, P., & Allen, M. R., 2017. A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 7213– 7228.
<https://doi.org/10.5194/acp-17-7213-2017>

Morfeldt, J., Davidsson Kurland, S. & Johansson, D.J.A., 2021. Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines. *Transportation Research Part D* 95 (2021) 102807.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102807>

Naturvårdsverket, 2019. Fördjupad analys av den svenska klimatomställningen 2019 - Industrin i fokus. Stockholm, Sverige. URL <http://www.naturvardsverket.se/978-91-620-6911-7/>.

Nicholls, Z., Lewis, J., 2021. Reduced Complexity Model Intercomparison Project (RCMIP) protocol, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4589756>.

Petersson, H., Ellison, D., Appiah Mensah, A., Berndes, G., Egnell, G., Lundblad, M., Lundmark, T., Lundström, A., Stendahl, J., Wikberg, P.-E., 2022. On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden, *Global Change Biology Bioenergy*, in press. DOI : 10.1111/gcbb.12943

Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R. J., Passerello, G. A., & Regayre, L. A., 2018. FAIR v1.3: A simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geoscientific Model Development*, 11, 2273– 2297. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2273-2018>

Smith, C., Z. R. J. Nicholls, K. Armour, W. Collins, P. Forster, M. Meinshausen, M. D. Palmer, M. Watanabe, 2021. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 20 Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Available from <https://ipcc.ch/static/ar6/wg1>.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020. Utleveranser av biodrivmedel, efter varuslag. Månad 2018M01 - 2020M07. URL <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/manatlig-bransle-gasoch-lagerstatistik/> (besökt 2020-10-02).

Sterner E, Johansson D.J.A., 2017. The effect of climate–carbon cycle feedbacks on emission metrics, *Environmental Research Letters* 12(3) 034019.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa61dc>

Sumfleth, B., Majer, S., Thrän, D., 2020. Recent developments in low iluc policies and certification in the EU biobased economy. *Sustainability* 12, 1–34. <https://doi.org/10.3390/su12198147>.

Regeringen, 2020a. Regeringens proposition 2019/20:65 En samlad politik för klimatet – klimat-politisk handlingsplan. URL <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/proposition/2019/12/prop.-20192065/> (besökt 2020-09-30).

Regeringen, 2020b. Bränslebytet förstärks med högre inblandning av förnybart i drivmedel. URL <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2020/09/branslebytetforstarks-med-hogre-inblandning-av-fornybart-i-drivmedel/> (besökt 2020-09-30).

Takaes Santos, I., 2020. Confronting governance challenges of the resource nexus through reflexivity: A cross-case comparison of biofuels policies in Germany and Brazil. *Energy Research & Social Science* 65, 101464 <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101464>.

Trafikverket, 2020. Scenarier för att nå klimatmålet för inrikes transporter. Borlänge, Sweden. URL <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/langsiktig-planering-av-infrastruktur/Inriktningsunderlag/inriktningsunderlag-202220332037/kunskapsunderlag-till--inriktningsplaneringen/scenarier-for-att-na-klimatmalet-och-paverkan-pa-vagtrafiken/> (besökt 2021-09-30).



CHALMERS

