Nr C 711
November 2022

Effekter på utsläpp av luftföroreningar från förändrad framtida elbalans i Sverige

Stefan Åström, Akram Sandvall, Tomas Wisell, Kenneth Karlsson, Ingrid Mawdsley

ivl
SVENSKA MILJÖINSTITUTET

Författare: Stefan Åström, Akram Sandvall, Tomas Wisell, Kenneth Karlsson, Ingrid Mawdsley
Medel från: Naturvårdsverket
Rapportnummer C711
ISBN 978-91-7883-426-6
Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2022
IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Denna rapport utgör slutleveransen av projektet ”Analys av förändrad framtida elbalans och utsläpp av luftföroreningar” (ref: NV-01287-22), finansierat av Naturvårdsverket. Kontaktperson för Naturvårdsverket har varit Maria Ullerstam. I referensgruppen har även Anna Brunlöf, Hans Hjortsberg, Filip Norlén och Dag Henning (Naturvårdsverket) ingått. Projektet har letts av Stefan Åström, och projektmedarbetare har varit Akram Sandvall, Tomas Wisell, Kenneth Karlsson och Ingrid Mawdsley, alla vid IVL Svenska Miljöinstitutet. Tack till Karin Söderlund på IVL för granskning av rapporten. I och med Naturvårdsverkets godkännande av denna rapport betraktas projektet som avslutat.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 5

Summary 6

1. Introduktion 7

1.1. Bakgrund 7
1.2. Lärdomar från tidigare NO_X-studier 8
1.3. Syfte & avgränsningar 9

2. Ingående scenarier 10

2.1. Översikt av Energimyndighetens två scenarier 10
2.2. Översikt av scenarierna från Nordic Energy Research 11

Beskrivning av *CNN*-scenariot 11
Beskrivning av *NPH*-scenariot 12

2.3. Övriga aspekter 12

3. Datainsamling och metodik 14

3.1. Kvantifierad beskrivning av scenarier 14
3.2. Dataursprung för emissionsfaktorer 18
3.3. Beräkning av utsläppsändringar 19
3.4. Känslighetsanalyser 20

4. Resultat 22

4.1. Utsläppskillnader mellan energimyndighetens scenarier 22
4.2. Utsläppskillnader mellan NCES-scenarierna 24
4.3. Sammanfattande resultat 27

5. Diskussion och slutsatser 28

6. Referenser 30

Bilaga 1 - emissionsfaktorer 31

NO_x (tusen ton / TWh bränsle) 31
PM2,5 (ton/TWh bränsle) 32
Referenser emissionsfaktorer 33

Sammanfattning

Enligt det senaste referensscenariot för Sveriges utsläpp av kväveoxider (NO_x) till 2030 kommer Sverige överskrida taket i det andra Utsläppstaksdirektivet (NEC-direktivet) om inte ytterligare åtgärder tas. Samtidigt är det så att NO_x -utsläpp till stor del orsakas av källor som även orsakar utsläpp av koldioxid. Oftast leder åtgärder till fördelaktig samverkan, d.v.s. att minskning av koldioxid ger minskning av NO_x (och vice versa), men i vissa situationer kan motverkan uppstå då vissa sätt att minska koldioxidutsläpp riskerar öka utsläpp av NO_x och tvärtom. Då arbetet med att minska utsläpp av koldioxid och andra samhällsförändringar sker relativt snabbt kan Sveriges utsläpp av NO_x därför komma skilja sig från det som antas i det senaste referensscenariot. Ett exempel på det arbete som pågår är en ökande elektrifiering av hela det svenska samhället.

Syftet med den här studien var att ta ett systemperspektiv på elproduktion och -användning och utifrån detta perspektiv undersöka hur framtida höga elbehov i flera sektorer (el- och värmeproduktion, bostäder och service, samt industri) och variabla elproduktionssystem kan komma att påverka utsläpp av NO_x och små partiklar (PM2,5).

Utsläppsberäkningarna gjordes genom att använda redan publicerade scenarier för det svenska energisystemet samt senast tillgängliga utsläppsfaktorer från Svensk MiljöEmissionsData (SMED) för att beräkna utsläpp av NO_x och PM2,5 för scenarierna. Scenerierna togs från Energimyndighetens senaste långsiktsprognos och från projektet Nordic Energy Perspectives. Scenarierna illustrerar olika grader av 'elektrifiering' av samhället och olika vägval vad gäller hög eller låg användning av CCS/BECCS.

Resultaten visar att ökad (i jämförelse med referens-scenario) elektrifiering riskerar att fördröja den pågående utsläppsminskningen av NO_x till år 2030 men skynda på utsläppsminskningen till år 2050. Effekten på den pågående utsläppsminskningen av PM2,5 riskerar dock vara fördröjande både år 2030 och 2050. Effekten på utsläppen är dock relativt låga, 2–3 tusen ton för NO_x och ca 200 ton för PM2,5 till år 2030, vilket motsvarar 4–5 % av sektorernas prognosticerade NO_x -utsläpp år 2030 och ca 2 % av PM2,5-utsläppen. Den positiva effekten år 2050 på NO_x är dock högre, med påverkan på utsläpp motsvarande -2- -4 tusen ton NO_x. Effekten på PM2,5 riskerar dock vara fortsatt negativ, med effekten på utsläpp år 2050 någonstans mellan -70 – +600 ton per år.

Resultaten är såklart osäkra då framtidsscenarier per definition är osäkra. Dessutom har vi gjort beräkningar på grov uppdelning av bränslen och sektorer, och med undantag för NO_x -emissionsfaktorer för arbetsmaskiner har vi använt konstanta emissionsfaktorer för NO_x. Men såvitt vi förstår är det ingen av dessa osäkerheter som skulle ändra huvudriktningen i våra resultat.

Givet studiens förutsättningar drar vi slutsatsen att snabbare elektrifiering av det svenska samhället riskerar fördröja den pågående minskningen av Sveriges NO_x- och PM2,5-utsläpp, med effekten att utsläppen år 2030 blir högre än de nu prognosticerade nivåerna. Effekten kommer däremot vara liten, och efter 2030 kommer effekten av elektrifiering rimligtvis bli den omvända.

Summary

According to the latest projections of Sweden's emissions of nitrogen oxides (NO_x) by 2030, Sweden will exceed the ceiling in the second NEC directive unless further measures are taken. At the same time, it is the case that NO_x emissions are largely caused by sources that also cause emissions of carbon dioxide. Most often, actions lead to co-benefits, i.e., that reduction of carbon dioxide results in reduction of NO_x (and vice versa). But in certain situations, the trade-offs can occur, as certain ways of reducing carbon dioxide emissions leads to increasing emissions of NO_x (and vice versa). As the efforts to reduce emissions of carbon dioxide and other societal changes takes place relatively quickly, Sweden's emissions of NO_x may therefore differ from what is assumed in the latest reference scenario. An example of the ongoing efforts is the increasing electrification of the entire Swedish society.

The purpose of this study was to take a systems perspective on electricity production and use, and from this perspective investigate how future high electricity needs in several sectors (electricity and heat production, households and services, and industry) and variable electricity production systems may affect emissions of NO_x and fine particulate matter (PM2,5).

The emission calculations were made by using already published scenarios for the Swedish energy system and the latest available emission factors from Swedish Environmental Emissions Data (SMED) to calculate emissions of NO_x and PM2,5 for the scenarios. The scenarios were taken from the Energy Agency's latest long-term forecast and from the Nordic Energy Perspectives project. The scenarios illustrate different degrees of 'electrification' of society and different path choices in terms of high or low use of CCS/BECCS.

The results show that increased (compared to the reference scenario) electrification risks delaying the ongoing emission reduction of NO_x until the year 2030 but hastening the emission reduction until the year 2050. However, the effect on the ongoing emission reduction of PM2.5 risks being delayed both in 2030 and 2050. The effect on emissions is relatively low though, +2-+3 thousand tons for NO_x and approximately 200 tons for PM2.5 by 2030, which corresponds to 4-5% of the sectors' projected NO_x emissions in 2030 and approximately 2% of projected PM2.5 emissions. The positive effect in 2050 on NO_x is higher, with an effect on emissions corresponding to -2- -4 thousand tons of NO_x. The effect on PM2.5 risks continuing to be negative, with emissions in 2050 somewhere between -70 – +600 tonnes per year.

The results are of course uncertain as future scenarios are by definition uncertain. In addition, we have made calculations on a coarse aggregation of fuels and sectors, and with the exception of NO_x emission factors for work machines, we have used constant emission factors for NO_x. However, to our understanding, none of these uncertainties would change the main direction of our results.

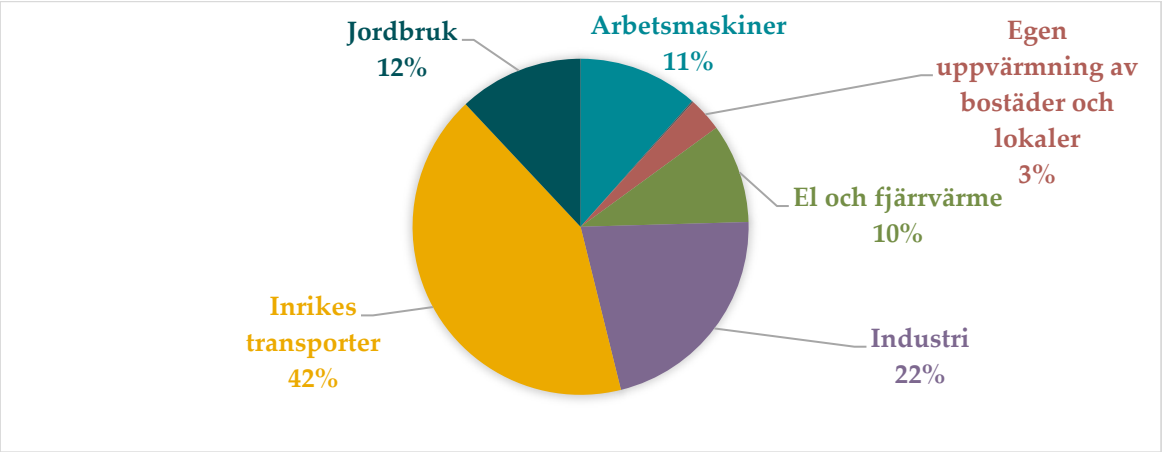
Given the conditions of the study, we conclude that faster electrification of Swedish society risks delaying the ongoing reduction of Sweden's NO_x and PM2.5 emissions, with the effect that the emissions in 2030 will be higher than they are projected. The effect, however, will be small, and after 2030 the effect of electrification will reasonably be the reverse.

1. Introduktion

1.1. Bakgrund

Kväveoxider (NO_x) är gaser som uppkommer huvudsakligen vid förbränning av bränsle i höga temperaturer. I begreppet kväveoxider inkluderas både kvävemonoxid, NO, och kvävedioxid, NO_2. Höga NO_x-utsläpp kan bidra till hög exponering med tillhörande hälsorisker, om de sker i områden där människor vistas. Kväveoxider orsakar negativa hälsoeffekter och påverkar bland annat luftvägar och lungor. Känsliga eller astmatiska personer drabbas främst. Högst tillåtna halter av NO_2 i omgivningsluften regleras genom miljökvalitetsnormer. Vidare preciseras de halter som ej ska uppnås för att negativ hälsopåverkan ska undvikas i miljökvalitetsmålet "Frisk luft". Dessutom bidrar kväveoxider till bildning av marknära ozon samt till övergödning och försurning av skog, mark och vatten.

2020 uppskattades Sveriges territoriella NO_x-utsläpp uppgå till cirka 118 tusen ton. Utsläppen har minskat med 59 % sedan 1990 och med 6 % jämfört med föregående år. Inrikes transporter stod för den största delen av NO_x-utsläppen år 2020 (42 %, 49 tusen ton), medan el- och fjärrvärmeproduktion samt industrin stod för 10 respektive 22 % (se Figur 1).



Figur 1: Sveriges territoriella NO_x-utsläpp år 2020 (Naturvårdsverket 2021).

Sveriges prognosticerade utsläpp av NO_x för 2030 är för höga jämfört med kravet från EU:s nya direktiv för utsläpp av luftföroreningar, som också kallas nya takdirektivet (NEC2) (2016/2284/EU). I direktivet finns bindande åtaganden (utsläppstak) för åren 2020 och 2030 samt ett indikativt mål för 2025. Enligt den senaste gapanalysen mellan det nationella åtagandet (tak på 60 tusen ton) och den senaste prognosen (76 tusen ton exklusive jordbrukssektorn) kommer Sverige överskrida åtagandet för kväveoxider 2030 med ca 16 tusen ton (Naturvårdsverket 2021).

NO_x -utsläpp och utsläpp av koldioxid (CO_2) kommer till stor del från samma källor. Oftast leder åtgärder till fördelaktig samverkan, d.v.s. att minskade utsläpp av koldioxid även ger minskade utsläpp av NO_x (och vice versa). Men det finns även motsatta situationer där vissa sätt att minska koldioxidutsläpp riskerar öka utsläpp av NO_x och tvärtom.

Samhällsomställningen som krävs för att nå Sveriges uppsatta klimatmål kommer innebära ett ökat behov av elektricitet samt en ökad användning av biobränsle och biodrivmedel. Hur denna omställning utvecklas kommer att ha betydelse för hur utsläppen av kväveoxider och partiklar kommer att se ut i framtiden. Det kommer behövas en ökad energiproduktion för att möta den

ökade elektrifieringen inom industri och transportsektorn. I Energimyndighetens rapport om hållbar elektrifiering finns ett antal scenarier som bland annat beskriver en möjlig utveckling av energibalansen (Energimyndigheten 2021a). Kraftvärmen kommer ha en viktig roll i den framtida energimixen då den kan balansera upp de mer väderberoende energislagen sol och vind. Detta kan resultera i ökade utsläpp av luftföroreningar ifall ytterligare teknisk rening inte införs. Andra faktorer som också kommer att ha stor betydelse för hur utsläppen av luftföroreningar kan utvecklas är:

- Utfasningen av fossila bränslen inom industrisektorn. En del av utfasningen kommer att ske genom övergång till el som energikälla men det kommer även finnas en del där man gör ett bränslebyte från fossilt till biogent bränsle samt omställningar till vätgasbaserade produktionssystem. Vid övergång till förbränning av biomassa finns risk för ökade utsläpp av luftföroreningar.
- Utfasning av fossila bränslen i spets- och reservanläggningar. Utsläppen från spets- och reservanläggningar har lägre krav på reningsteknik än anläggningar och pannor som körs som baslast. Vid en övergång till biogena bränslen finns därför risk för att utsläppen ökar.
- Utfasning av fossila bränslen inom transportsektorn. Hur stor andel av transportsektorn som använder biodrivmedel eller el som drivlina kommer ha stor betydelse för utvecklingen av luftutsläppen men påverkar även behovet av tillgång till elektricitet.
- Tekniska vägval mellan avskiljning och lagring av koldioxid (CCS) eller elektrifiering och flexibilitetshanteringstekniker.

Den gemensamma nämnaren för dessa faktorer är att de innebär ökad samverkan mellan sektorer som historiskt sett har varit relativt åtskilda. El- och värmeproduktion kommer kopplas ihop med tillverkningsindustrin och med transportsektorn. Till och med bostäder och uppvärmning kan komma integreras i takt med ökad installation av småskaliga solceller som kan bidra med el till elnätet och laddning av elfordon som kan fungera som batterier och extra kapacitet till elnätet. Därför behöver effekter på utsläpp analyseras med ett sektorsövergripande systemperspektiv snarare än analyseras sektor för sektor med ett stuprörsperspektiv.

1.2. Lärdomar från tidigare NO_X-studier

Då NO_X -utsläpp behöver minskas samtidigt som klimatpolicies och andra ändringar påverkar NO_X -utsläpp är det viktigt att studera möjligheter för ytterligare NO_X -utsläppsminskningar i Sverige och hur klimatåtgärder kan komma påverka NO_X -utsläpp. Under de senaste åren har IVL Svenska Miljöinstitutet på uppdrag av Naturvårdsverket genomfört ett flertal sådana studier. I IVL-rapport C563 studerades ett flertal styrmedels effekter på åtta typer av förbränningsanläggningar för att klargöra risker för att ändringar i bränsleval kan komma att påverka utsläpp. Rapporten kom bland annat fram till att på en anläggningsnivå kan klimatstyrmedel riskera ökning av NO_X -utsläpp, men att risken hålls nere av NO_X -utsläppsregleringar. Risken att NO_X -åtgärder skulle öka CO_2-utsläpp var mycket liten (Mawdsley m.fl. 2020). I IVL-rapport C577 rapporterades en förstudie om ifall den ökande användningen av sol- och vindkraft och den associerade användningen av 'balanserande elproduktion' kan riskera öka utsläppen av NO_X. Givet det balanseringsbehov som rimligtvis kommer krävas föreslog studien att de balanseringslösningar som undviker bränsleförbränning (energilagring, efterfrågeflexibilitet o.s.v.) kommer behöva kompletteras med förbränningsbaserade lösningar. För förbränningsbaserade lösningar minskas dock effekten på NO_X-utsläpp av att man samproducerar el och värme, vilket i sin tur förutsätter att det finns avsättnings- eller lagringsmöjligheter för värmen (Mawdsley & Nilsson 2021). Omvänt sammanställdes i rapport U6553 en översikt av om ifall utsläpp av luftföroreningar kan komma påverkas av ökad avskiljning och lagring av koldioxid från fossila (CCS) eller biogena förbränningskällor (BECCS). Dessa tekniker är nya eller till och med på innovationsstadiet, så kunskapsläget är inte tillfredsställande. Men givet det man vet i dag

föreslår litteraturen att påverkan av CCS på utsläpp av NO_x främst beror på om koldioxiden avskiljs före eller efter el- och värmeproduktionen. Avskiljning efter el- och värmeproduktion minskar verkningsgraden och ger därför högre NO_x-utsläpp (Möllersten m.fl., 2022). I rapport C652 studerades olika typer av utsläppsminskande åtgärder i transportsektorn. Av de åtgärder som hade påtaglig effekt på NO_x -utsläpp var det främst åtgärderna riktade mot inrikes sjöfart som kan betraktas som samhällsekonomiskt fördelaktiga, då ytterligare utsläppsreningstekniker för vägfordon antas bli mycket dyra (Åström m.fl., 2022). Enligt rapport C668 kommer inte ytterligare koldioxidåtgärder för vägtransporter hinna ha speciellt stora effekter relativt referensscenariot på utsläpp av vare sig koldioxid eller NO_x till 2030 eftersom kraven ställs på nyproduktion, däremot kommer utsläpp påverkas efter 2030. Av relevans för NO_x är att införande av dedikerade avgasreningstekniker som Euro 7/VII fortfarande kommer ha större effekt på utsläpp av NO_x och partiklar än klimatåtgärderna tills 2030 (Hult m.fl., 2022).

1.3. Syfte & avgränsningar

Syftet med den här studien var att ta ett systemperspektiv på NO_x-utsläpp kopplat till elproduktion och elanvändning och utifrån detta perspektiv undersöka hur framtida höga elbehov i flera sektorer och variabla elproduktionssystem kan komma att påverka utsläppen av NO_x och små partiklar (PM2,5). Då elektrifiering och dess effekter på utsläpp av koldioxid är väl studerat finns det redan scenarier att tillgå från litteraturen. Av effektiviseringsskäl, och för att kunna fånga in effekter av modelleringsantaganden har vi använt två scenarier var från två olika arbetsgrupper, se vidare kapitel 2.

Vidare beräknas effekt på NO_x och PM2,5-utsläpp med hjälp av det utsläppsinventeringsarbete som regelbundet görs av konsortiet Svensk MiljöEmissionsData (www.smed.se) som IVL samordnar. Men till skillnad från den svenska officiella rapporteringen av utsläpp beräknar vi i denna studie endast skillnader i utsläpp mellan de konventionella scenarierna och de som innebär högre grad av elektrifiering i samhället. Då energisystemsmodelleringsresultat inte möjliggör tydlig åtskillnad mellan energirelaterade utsläpp och processrelaterade utsläpp så rapporteras dessa samlat under kategorin industri. Då några scenarier innebär hög användning av nya tekniker som vätgaslösningar samt koldioxidinfångning och -lagring, vilka är dåligt utforskade ur ett luftföroreningsperspektiv, har vi fått göra antaganden för utsläppsfaktorer kopplade till dessa. För att ta höjd för största möjliga effekt på luftföroreningar antar vi därför att vätgasbaserade energisystemslösningar i industri och bostäder & service innebär förbränning av vätgas, med en emissionsfaktor för NO_x motsvarande dieselmotorer.

De scenarier som beräknas av de två olika energisystemsmodelleringsgrupperna presenteras med delvis olika system för hur man grupperar Sveriges energianvändning, och dessutom beräknas Sveriges utsläpp med ett tredje grupperingssystem. Detta kan orsaka viss skillnad i presentationen av energimängder och utsläpp för scenarierna. Den största svagheten med dessa olika grupperingssystem är att utsläpp från arbetsmaskiner är svåra att redovisa. I denna studies huvudresultat presenteras därför utsläppsberäkningar för arbetsmaskiner som en delmängd av utsläpp i andra sektorer. Då arbetsmaskiners utsläpp påverkas av maskinparkens ålder har vi valt att justera utsläppsfaktorer över tid för ett visst bränslesortiment så utsläppsprognosen stämmer överens med de offentligt rapporterade utsläppsprognoserna för arbetsmaskiner. Hur utsläppsfaktorer justeras, och i vilken sektor de rapporteras presenteras nedan under respektive modelleringsgrupp.

Trots att mängden bränsle till inrikes transporter är en av de bränslemängder som påverkas mycket av elektrifiering ingår det inte som syfte med denna rapport att räkna utsläppsskillnader för inrikes transporter. Orsaken till detta är att NO_x-utsläpp från transporter till stor del beror på andra faktorer än bränslekonsumtion (ålder på fordon, körstil, m.m.), samt att IVL rapport C668

nyligen gjort en detaljerad studie som studerat just elektrifieringen av inrikes transporters påverkan på NO_x-utsläpp i Sverige. Däremot så inkluderar denna studie de systemeffekter som följer av att transportsektorn ökar efterfrågan på elektricitet.

2. Ingående scenarier

Beräkningarna i denna rapport bygger på energiscenarior för Sverige framtagna av två delvis olika arbetsgrupper, Svenska Energimyndigheten och det nordiska Nordic Energy Research. Båda grupperna har arbetat med energisystem-modellen TIMES (Loulou 2016), men utifrån egna modelleringsansatser och frågeställningar. Detaljer för de respektive energiscenarierna ges i mer detalj nedan. Men översiktligt kan sägas att Energimyndighetens scenarier görs för Sverige och ett av scenarierna ingår som en del av underlaget till de svenska officiella utsläppsprognoserna för växthusgaser och luftföroreningar till EU och UNECE. Energimyndighetens scenarier innefattar inte måluppfyllelse av Sveriges nuvarande klimatmål, men elektrifieringsscenariot är väl beskrivet i form av ökad elefterfrågan från ett antal sektorer. Scenarierna från Nordic Energy Research bygger på den nordiska deklarationen om klimatneutralitet (Helsingforsdeklarationen) som undertecknades i januari 2019. Scenarierna är gjorda genom samlad modellering av hela Nordens energisystem. Elektrifieringsscenariot från Nordic Energy Research bygger mer på antagandet att Sverige exporterar mer el än att öka den inhemska konsumtionen av el.

2.1. Översikt av Energimyndighetens två scenarier

I Energimyndighetens rapport ’Scenarier över Sveriges energisystem 2020' (Energimyndigheten 2021b) undersöks en mängd olika scenarier för framtida svensk energianvändning. Det är viktigt att påpeka att inget scenario motsvarar ett uppfyllande av nuvarande energi- och klimatpolitiska mål för 2030 och 2045, och scenarierna var främst framtagna för att visa på centrala osäkerheter och gynna framtida planering. Gemensamt för alla scenarier är att de tar hänsyn till ett ändrat framtida svenskt klimat m.a.p. uppvärmningsbehov och ökad nederbörd med effekt på vattenkraft. Hänsyn tas även till skärpta miljöanpassningar av vattenkraft. Dessutom antas det att Sveriges tre mest moderna kärnkraftsreaktorer kan få utökad livslängd och nya kärnkraftsinvesteringar kan göras på platser där det redan finns kärnkraftsdriven elproduktion.

Ur rapportens scenarier är det scenariot *Referens EU* som används som underlag till Sveriges utsläppsprognos för luftförororeningar som rapporteras vartannat år till UNECE och EU (Submission 2021). Scenariot utgår ifrån de energi- och klimatpolitiska styrmedel som var implementerade senast 1 juli 2020. Vidare baseras scenariot på antaganden från EU-kommissionen gällande prisutveckling på utsläppsrätter för CO_2 och fossila bränslen. Ett av de alternativa scenarierna är *Elektrifiering* i vilket elektrifiering av viktiga samhällsfunktioner går snabbare än i *Referens EU*. Detta inkluderar högre andel laddbara fordon för vägtransporter, ökad utbyggnadstakt av datacenter och elektrifiering av arbetsmaskiner, samt ökad användning av vätgasbaserade tekniker för stål- och cementproduktion. Dessutom ingår höjda kvotnivåer i reduktionspliktssystemet för drivmedel till 2030, ett reduktionspliktssystem för förnybart flygbränsle, samt skattesänkningar för biodrivmedel och biodrivmedelsinblandning i fossila bränslen.

Dessa två scenarier finns även i något uppdaterad version i Energimyndighetens rapport ’Framtidens elektrifierade samhälle’ (Energimyndigheten 2021a, ER 2021:28), men då scenarierna i denna rapport inte beskrivs i den detaljeringsgrad som behövs för våra ändamål har vi valt att

istället använda de mycket liknande scenarierna som beskrivs i 'Scenarier över Sveriges energisystem 2020' (Energimyndigheten 2021b, ER 2021:06). Scenariot *Referens EU* i 2021:06 motsvarar *Låg Elektrifiering* i ER 2021:28, och scenariot *Elektrifiering* i ER 2021:06 motsvarar *Högre elektrifiering med passiva användare* i ER 2021:28.

2.2. Översikt av scenarierna från Nordic Energy Research

Modelleringen gjord av Nordic Energy Research presenteras som Nordic Clean Energy Scenarios (NCES, Wråke m.fl. 2021). Dessa scenarier syftade till att identifiera nödvändiga åtgärder för att nå delmål för år 2030 och kartlägga potentiella långsiktiga vägar till koldioxidneutralitet. NCES illustrerar hur de nordiska länderna kan bli den "mest hållbara och integrerade regionen i världen". NCES tolkar klimatneutralitet som netto-noll utsläpp av CO_2, och året då detta infinner sig varierar mellan länder, från 2030 för Norge till 2050 för Danmark. Även om alla NCES scenarier når klimatneutralitet tills 2050 så skiljer sig tre scenarier åt:

- **Carbon Neutral Nordic** (*CNN*) söker den billigaste vägen att nå klimatneutralitet och tar hänsyn till nuvarande nationella planer, strategier och mål.
- **Nordic Powerhouse** (*NPH*) utforskar möjligheten för Norden att spela en större roll i den bredare europeiska energiomställningen genom att producera mer el och bränslen för export utanför Norden.

Till dessa två scenarier finns det två känslighetsanalyser. I det ena fallet finns det begränsade möjligheter att lagra koldioxid (*CCS*), och prisökning på lagring höjer det totala CCS-priset med 20–60 % beroende på teknikval vid infångning och lagring. I det andra fallet begränsas möjligheten till import av biobränslen från dagens nivåer till noll år 2050. I vår studie har vi plockat ut de centrala scenarierna *CNN* och *NPH* samt deras två *CCS*-känslighetsanalyser för vidare utsläppsberäkningar. Vi antar alltså att skillnaden mellan *CNN* och *NPH* representerar ökad elektrifiering av Sverige. NCES har även modellerat ett tredje scenario 'Climate Neutral Behavior', men av resursskäl tar vi inte med detta scenario i analysen då det till stor del även speglar effekter av energieffektivisering, vilket ligger utanför syftet med denna studie.

Som förtydligande kan sägas att *CNN*- och *NPH*- scenarierna inte är direkt jämförbara med Energimyndighetens *Referens EU* och *Elektrifiering* då de är framtagna av olika modelleringsgrupper, genomförda över olika geografiska regioner, med olika antaganden och representerandes olika klimat- och energipolicies.

Beskrivning av *CNN*-scenariot

Klimat- och energipolicy
Energisystemet utvecklas enligt de nordiska ländernas nationella planer, strategier och mål för att nå koldioxidneutralitet, för Sveriges del klimatneutralitet runt 2045. De nordiska länderna blir klimatneutrala år 2050 medan övriga Europa minskar sina CO_2-utsläpp med 80 % till 2050. Omställningen i *CNN* drivs av höga CO_2-priser motsvarande de priser som anges i Internationella Energibyrån (IEA)s scenario 'Sustainable Development' som presenteras i World Energy Outlook 2020 (IEA 2020). De höga priserna driver en omställning av energisystemet genom att fasa in mer förnybara energikällor som solcellspaneler och vindkraftverk.

Teknisk utveckling
Minskningen av CO_2-utsläpp från el-, värme, och transporter kräver snabba åtgärder inom alla

sektorer. Mängden förnybar el- och värmeproduktion ökar för att ge ren energi till slutanvändarsektorer. Bioenergibaserad CCS (BECCS) kommer att kompensera några av de dyraste alternativen för att minska koldioxidutsläppen. Utvecklingen av vindkraft på land kommer att begränsas under den tekniska potentialen på grund av acceptans och markanvändningsproblem.

I de nordiska länderna sker en betydande ökning av efterfrågan på vätgasbaserade lösningar (Power-to-X, PtX) för att minska koldioxidutsläppen för långväga transporter och industrier. I övriga Europa är efterfrågan på PtX mer blygsam, vilket återspeglar en lägre vilja att betala för minskningar av växthusgaser. Vätgas antas användas bland annat för el- och värmeproduktion.

Bränsle / energianvändning
De nordiska länderna kommer att öka elexporten till Centraleuropa, men mängden kommer inte att öka mycket över nuvarande prognoser eftersom elektrifiering av nordisk uppvärmning, transport och industri kommer att kräva ett högt utbud av el med låga koldioxidutsläpp. Import av biomassa från länder utanför Norden kommer att begränsas till nuvarande eller något högre nivåer för att säkerställa hållbar bioenergianvändning.

Beskrivning av *NPH*-scenariot

Klimat- och energipolicy
Som *CNN* men med tillägg att all verksamhet ökar efterfrågan på el och/eller andra energiprodukter.

Teknisk utveckling
Utöver sina ansträngningar för att minska de nordiska utsläppen, har de nordiska länderna ett större antal datacenter, producerar fler batterier och lyckas öka exporten av el, elektrobränslen och kolfritt stål och aluminium. Den nordiska ekonomin gynnas av export av nya produkter. Den extra elektriciteten och elektrobränslena produceras av vindkraftsnav till havs, kärnkraftverk med utökad livslängd, markbaserade solcellskraftverk, och av landbaserad vind. Vilket förutsätter hög acceptans för landbaserad vind.

Bränsle / energianvändning
De nordiska länderna kan tillhandahålla billigare ren energi än Centraleuropa och kommer vara värdar för fler koldioxidsnåla tjänster och industrier samt öka sin export av koldioxidsnåla produkter och energibärare. Det skulle bli mer överskottsvärme från industri- och tjänstesektorn, som kan användas i fjärrvärmeproduktion.

2.3. Övriga aspekter

Det finns fler aspekter av potentiellt intresse för utsläpp av NO_x som inte explicit hanteras i scenarierna. Ett exempel är CCS, vars möjliga effekter på NO_x-utsläpp diskuteras i IVL rapport U6553 (Möllersten m.fl. 2022). Ett annat exempel är vätgasbaserade lösningar för industriell produktion av fossilfritt stål och cement, som diskuteras övergripligt nedan.

Fossilfri stålframställning
Syftet med användning av vätgas för stålframställning är att utveckla en teknik för fossilfri järn- och stålframställning. Förenklat byts nuvarande metoder baserade på kol eller koks som reduktionsmedel ut mot vätgas som reduktionsmedel. Genom att använda fossilfri el och vätgas i stället för koks och kol under ståltillverkningen kommer utsläppet att bli vatten i stället för koldioxid. Det finns flera aktörer som jobbar med att utveckla denna process och det har startats särskilda bolag för att driva detta, i Sverige framför allt HYBRIT och H2GS (H2Greensteel).

HYBRIT (som drivs av LKAB/SSAB samt Vattenfall) ligger lite tidsmässigt lite efter H2GS, men det är i princip samma process med skillnaden att H2GS gör allt på samma ställe, medan LKAB har ansvar för direktreduktion (DRI) av järnmalm med vätgas och SSAB smältprocessen (Kaby 2022).

Enligt ett samrådsunderlag (Hybrit, 2020) om HYBRIT:s demonstrationsanläggning för DRI, kan utläsas att utsläpp av luftföroreningar (partiklar, kväveoxider) skulle kunna komma ifrån följande fem processer:

1. rökgaser vid förbränning när vätgasen som ska föras in i reaktorn värms upp (restgas med kvarvarande vätgas från reaktorn eller något biobränsle alternativt kommer det bli fråga om eluppvärmning.)
2. vätgas som av säkerhetsskäl behöver facklas bort.
3. kväveoxider som bildas vid förbränning vid höga temperaturer från det kväve som finns i luften samt från den skyddsgas i form av kvävgas som används vid reaktorns öppningar.
4. järnhaltigt stoft från järnråvaran,
5. Eventuellt partikelbildning till följd av svaveldioxidbildning (från det svavel som finns i järnråvaran).

Ugnen kan värmas med naturgas men förmodligen kommer mestadels el användas som bränsle, då finns ingen förbränning och inga luftföroreningar skapas. Det innebär att punkt 1 ovan försvinner. Punkt 2 blir kvar då vätgas används i processen, det blir den enda NO_X i så fall, men detta alternativ kommer förmodligen att vara mycket ovanligt. Vätgasen kommer i stället att renas och föras tillbaka till reaktortanken. Det blir knappast någon NO_X alls, blir det något så i så fall mycket låga halter. Ugnen kommer ligga på ca 800° C så det finns ingen risk för termisk NO_X-bildning (punkt 3).

Angående partikelbildning (punkt 4 och 5) är reaktortanken sluten och borde inte släppa ut något betydande. Beräkningar av utsläpp av partiklar finns i en rapport från H2GS (SWECO 2021) och en från USEPA som beskriver ”Direct Reduced Iron (DRI) Project”[1]. Det är emellertid inte möjligt att utläsa emissionsfaktorer från dessa då de inte anger uppgifter om energiförbrukningen av vätgas, och därmed går det inte att härleda emissionsfaktorer (kg utsläpp/ kWh insatt bränsle).

LKAB ska (bara) producera järnsvamp fram till år 2050 och det betyder att de ska reducera ca 30 miljoner ton malm till användbar metall om de behåller samma brytningstakt som idag. H2GS anger att de ska producera 6 miljoner ton malm, 5 miljoner ton stålprodukter. SSAB ska likt H2GS ha ”minimills” och det är okänt hur stor del av produktionen som kommer att hamna inom Sverige.

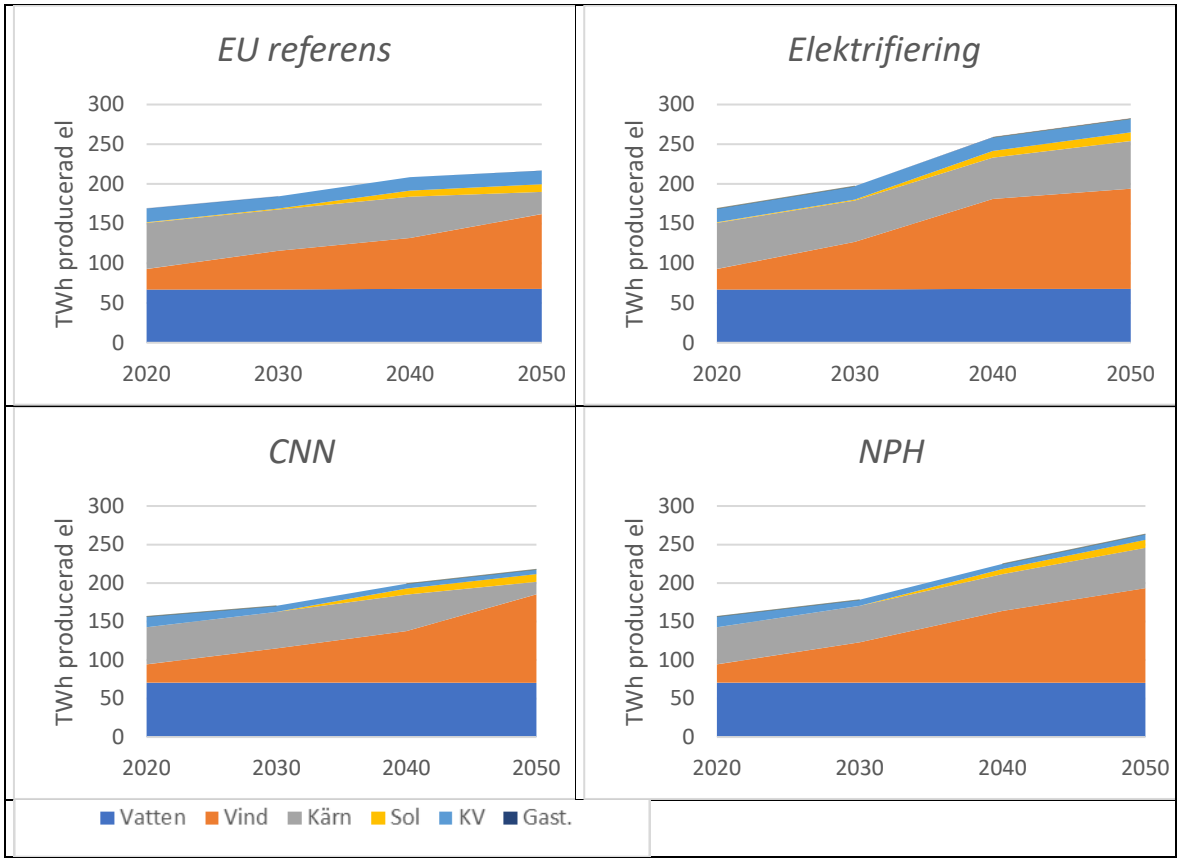
[1] https://archive.epa.gov/region6/6pd/air/pd-r/ghg/web/pdf/voestalpine-final-revised-ba013014.pdf.

3. Datainsamling och metodik

I detta kapitel beskrivs de underliggande data som har använts i studien samt metodiken för beräkning av hur elektrifiering kan komma påverka utsläppen av NO_x och PM2,5.

3.1. Kvantifierad beskrivning av scenarier

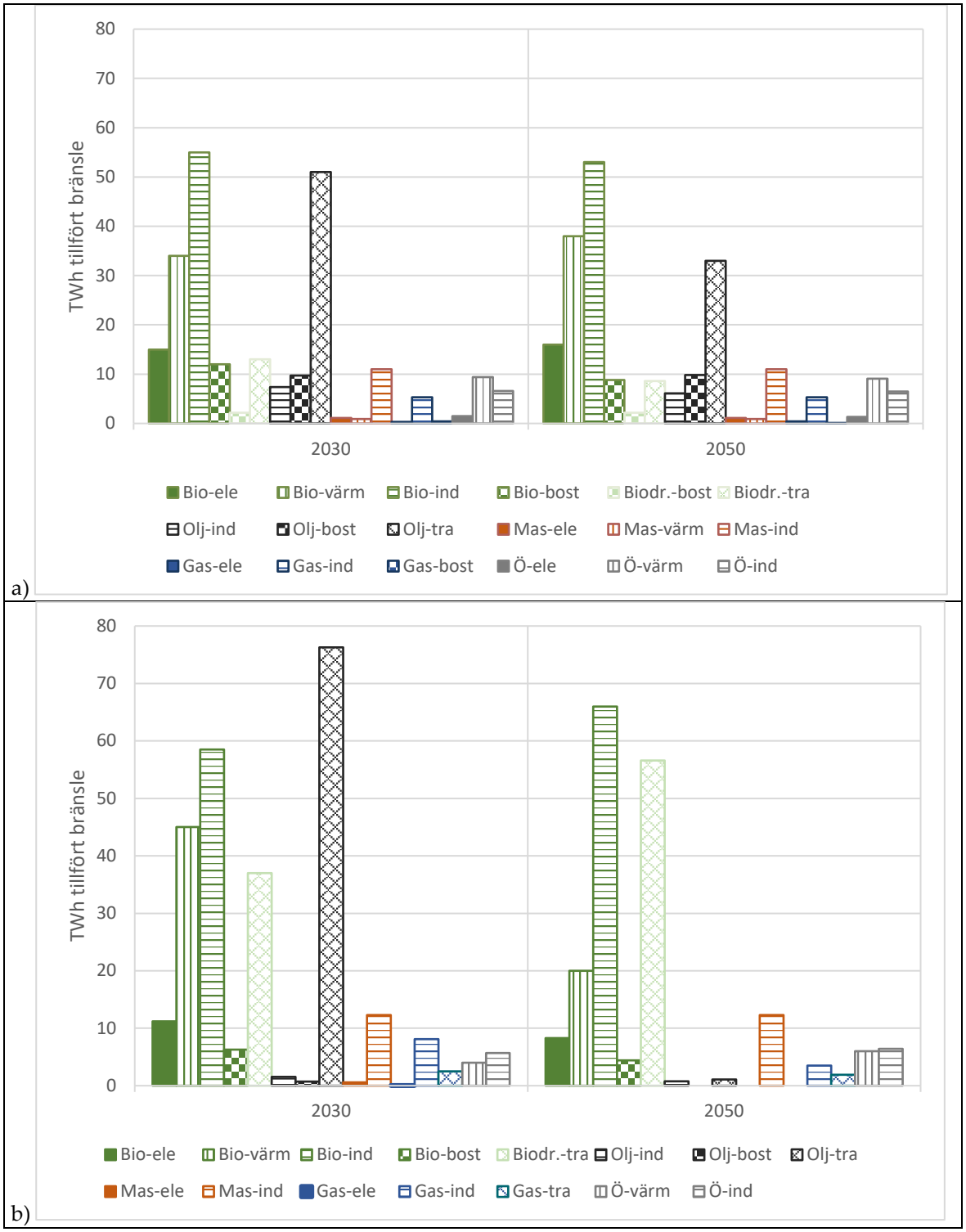
I både Energimyndighetens scenarier och NCES innebär elektrifiering/ökad elproduktion, i grova drag en ökad satsning på vindkraftsel och kärnkraftsel samt en ökad total produktion av el. Figur 2 visar för fyra scenarier den mängd el som produceras 2020–2050 uppdelad över sex olika produktionsslag (vatten, vind, kärnkraft, kraftvärme, solkraft, och gasturbin). Istället för att som i basscenarierna *EU Referens* och *CNN* nå en elproduktion på ca 220 Terawattimmar (TWh) el år 2050, så innebär *Elektrifiering* en elproduktion på närmre 275 TWh och *CNN* en produktion på ca 260 TWh. Vad som inte syns i figurerna är att *Elektrifiering* innebär ca 0,5 TWh mer el från gasturbiner än i *EU Referens*.



Figur 2: Elproduktion per produktionsslag för de två EM-scenarierna och de två NCES-scenarierna. Vatten = vattenkraft, Vind = Vindkraft, Kärn = Kärnkraft, Sol = Solcellsel, KV = Kraftvärme, Gast = Gasturbin. Det som inte syns i bild är att Elektrifiering innebär 0.5 TWh mer gasturbinsel än EU Referens.

Centralt för utsläpp av NO_x är mängden bränsle som används i de olika scenarierna. Figur 3 visar med hög upplösning vilka bränslen som används i vilka sektorer år 2030 och 2050 för scenarierna *EU referens* och *CNN*. Överlag syns en högre användning av bränslen i *CNN* än i *EU referens*. Dessutom skiljer sig scenarierna åt i att *CNN* innebär högre användning av biobränslen och biodrivmedel i industri- och transportsektorn samt en total utfasning av oljebränslen i

transportsektorn. Intressant i *CNN* är också en överflyttning av biobränsleanvändning från el- och värmeproduktion till industriändamål mellan år 2030 och 2050.



Figur 3: Bränsletillförsel (el- & värme) samt bränsleanvändning (ind, bost, tra) för a) *EU referens* och b) *CNN*. Bränsletillförseln är uppdelad på fem bränslen och fem sektorer. Bränslen: Bio = biobränsle, Olj = Oljebränslen, Mas = Kol, koks, & masugnsgas, Gas = Naturgas, LNG, m.m., Ö = Övriga bränslen. Ele = Elproduktion, Värm = Värmeproduktion, ind = Industri, bost = Bostäder, Tra = transport. Endast poster över 1 TWh är medtagna i figurerna.

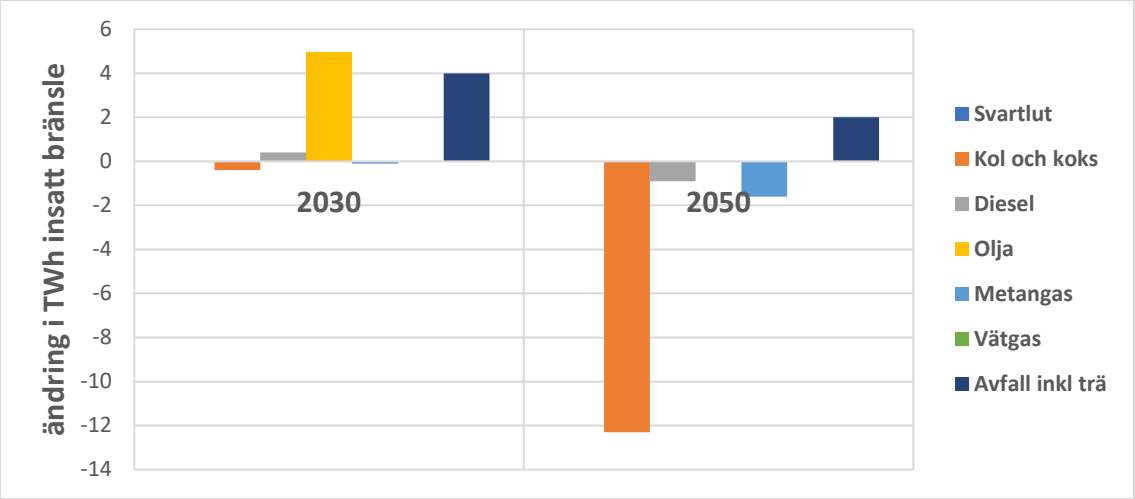
Skillnader i bränsleanvändning sorterat per bränsle eller per sektor som följd av elektrifiering syns i de följande figurerna. Tabell 1 ger en överblick över kategorisering som används. Notera att transportsektorns bränsleanvändning *INTE* är inkluderad i de följande delarna av rapporten.

Tabell 1: Bränsle- och sektorsaggregering i följande delar av rapporten.

Bränslekategorier	Kommentar
Svartlut	Biobaserad rest från pappers- och massaindustrin,
Kol och koks	-
Diesel	Dieseloljor och andra lättare flytande bränslen
Olja	Tyngre oljor
Metangas	Naturgas, biogas, koksgas,
Vätgas	-
Avfall inkl. trä	Avfallsbränslen och fasta biobränslen samt övriga bränslen
Sektorer Energimyndigheten	**Kommentar**
El- & värmeproduktion	-
Industri	Sektorn inkluderar främst tung tillverkningsindustri
Bostäder & Service m.m.	Sektorn inkluderar bostäder, lokaler, jordbruk, skogsbruk och större delen av arbetsmaskiner
Sektorer NCES	**Kommentar**
El- & värmeproduktion	-
Industri & Service m.m.	Sektorn inkluderar lokaler, jordbruk, skogsbruk och större delen av arbetsmaskiner
Bostäder	Sektorn inkluderar mindre mängd arbetsmaskiner

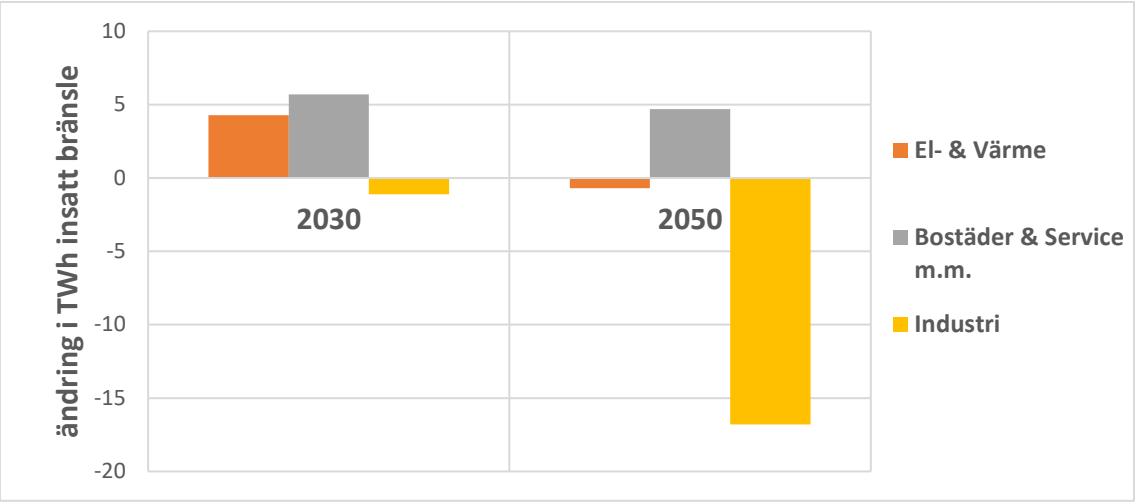
Skillnader i bränsleanvändning i transportsektorn redovisas inte då elektrifieringseffekt på transportsektorns utsläpp redovisas i IVL rapport C668 (Hult m.fl. 2022). Som läsanvisning kan sägas att om stapelns värde är över noll så innebär det att energianvändningen är högre i *Elektrifiering* än i *EU referens* (motsvarar högre i *NPH* än i *CNN*). Om stapelns värde är lägre än noll är energianvändningen högre i *EU referens* än i *Elektrifiering* (högre i *CNN* än i *NPH*).

I Figur 4 syns att *Elektrifiering*s effekt på förbränning av bränsle är av olika tecken år 2030 och 2050. Till år 2030 innebär *Elektrifiering* högre användning av olja och avfall inkl. trä, men till 2050 är denna skillnad nästan helt borta och ersatt av en kraftig minskning av kol- och koks- och metananvändning. Totalt är det lägre mängd bränsle som används år 2050 i *Elektrifiering* än i *EU referens*.



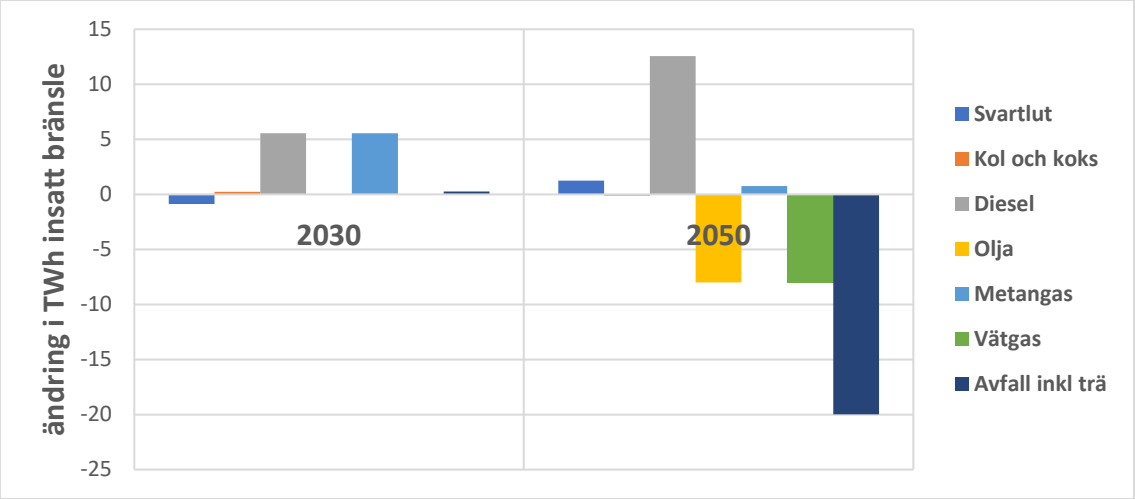
Figur 4: Ändring i insatt bränsle till bostäder & service m.m., industri, samt el- & värmeproduktion: *Elektrifiering* minus *EU referens* sorterad per bränsle.

Sorterat per sektor syns att *Elektrifiering* år 2030 främst innebär ökad energianvändning för el- och värmeproduktion samt till bostäder, service m.m. Till år 2050 innebär *Elektrifiering* kraftigt minskad bränsleanvändning inom industrin och något högre energianvändning för bostäder, service m.m.



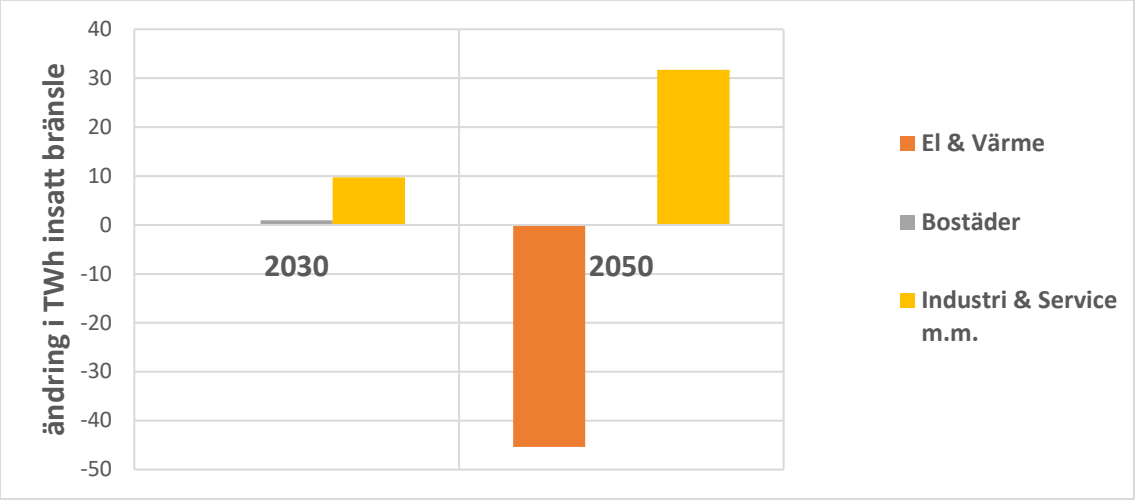
Figur 5: Ändring i insatt bränsle till bostäder & service m.m., industri, samt el- & värmeproduktion: *Elektrifiering* minus *EU referens* sorterad per sektor.

En jämförelse mellan *CNN* och *NPH* visar liknande tendenser, om än annorlunda grupperade (Figur 6). Till 2030 skulle *NPH* innebära högre användning av olja och metangas än *CNN*. Den högre användningen beror på ökande användning över tid av dessa bränslen i industri & service, något som är möjligt av klimatskäl då scenarierna antar användning av CCS. Till 2050 är skillnaderna dock större. *NPH* innebär högre användning av dieselolja än *CNN*, men mängden vätgas och avfalls- samt träförbränning är lägre i *NPH* än i *CNN*.



Figur 6: Ändring i insatt bränsle till bostäder & service m.m., industri, samt el- & värmeproduktion: *NPH* minus *CNN* sorterad per bränsle.

Som syns i Figur 7 minskar mängden insatt bränsle för el- och värmeproduktion i NPH relativt CNN men ökar i industrin.



Figur 7: Ändring i insatt bränsle till bostäder & service m.m., industri, samt el- & värmeproduktion: *NPH* minus *CNN* sorterad per sektor.

3.2. Dataursprung för emissionsfaktorer

Emissionsfaktorerna som används i utsläppsberäkningarna är främst hämtade från SMED (Svensk Miljöemissionsdata)[2] och är samma värden som används i internationell utsläppsrapportering (se Bilaga 1 för data och referenser). Data tas för år 2020 då framtida prognosår har sekretessbelagda emissionsfaktorer. SMED:s kategorier har matchats mot de kategorier som förekommer i Energimyndighetens scenarier och i scenarierna från TIMES-modellen. Kategorierna matchas grundat på sektorn, process och beskrivet bränsleslag. Till följd av att beskrivningarna av framför allt bränsleslaget och emissionsfaktorerna kan skilja sig avsevärt i scenarierna och i SMED:s

[2] www.smed.se

kategorier kan detta vara en källa till osäkerhet. I de fall då utsläppsberäkning baserat på *EU referens* för en given sektor leder till utsläpp som skiljer sig för mycket från Sveriges officiella prognos har vi antagit utsläppsreningsteknik-specifika utsläppsfaktorer hämtade från Eus Clean Air Outlook 2 (Amann m.fl. 2020). Detta tillvägagångssätt användes för PM2,5 och förbränning av svartlut, träbränslen och oljeförbränning i industrin och bostäder & service m.m. För industri och träbränslen antar vi emissionsfaktorer motsvarande en mix så att 10 % av förbränningens PM2,5-utsläpp renas med cyklon, och 90 % renas med enfälts elektrostatisk rening (ESP). För industri och svartlut antar vi 15 % cyklon och 85 % ESP. För industri och oljebränslen antar vi att PM2,5-utsläpp renas genom optimerade förbränningsprocesser (good housekeeping). För bostäder & service samt träbränslen antar vi emissionsfaktorer som motsvarar att 70 % av bränslet eldas med villapannor yngre än 2005 års modell och 30 % av bränslet eldas med 'förbättrade pannor'.

Ur scenarierna allokerar vi vissa flytande bränslen som används inom industri samt bostäder & service till arbetsmaskiner. Emissionsfaktorer för dessa bränslen som antas användas till arbetsmaskiner sätts olika för år 2030 och 2050 då utsläppen påverkas mycket av maskinernas tillverkningsår. Emissionsfaktorn för NO_x 2050 ansätts till ca 60 % av emissionsfaktorn 2030, vilket motsvarar den prognosticerade utsläppsminskningen för arbetsmaskiner mellan 2030 och 2050.

I vissa fall har undantag gjorts i val av emissionsfaktorer, till exempel användning av vätgas vid framställning av flygbränsle ("Jet Kerosene"), där det gjorts ett antagande att vätgas har samma NO_x-emissionsfaktor som dieselolja (0,18 kg/MWh bränsle). Detta antagande motiveras genom uppgifter i olika källor[3] som hänvisar till höga förbränningstemperaturer vid förbränning av vätgas. Detta trots att bästa tillgängliga kunskap om vätgasanvändning för stålproduktion hänvisar till låga förbränningstemperaturer (se kapitel 2.3). Avseende emissionsfaktor för PM2,5 från vätgasförbränning har denna emissionsfaktor antagits vara noll. För Energimyndighetens scenarier har vi inte kunnat räkna utsläpp från vätgas då de inte innehåller någon information om hur stora mängder vätgas som kommer användas. I den mån *Elektrifiering* innebär ökad förbränning av vätgas innebär det att våra resultat över ändringar mellan *EU referens* och *Elektrifiering* blir underskattningar. Kombinationerna av sektor, process, bränsle och emissionsfaktor för de använda värdena i denna utredning presenteras i Bilaga 1.

3.3. Beräkning av utsläppsändringar

Utsläppsberäkningarna sker på enklaste sätt genom att multiplicera sektors- och bränslespecifika emissionsfaktorer med motsvarande aktivitetsdata för scenarierna. Effekten på utsläpp av elektrifiering fås sedan av att subtrahera utsläpp i elektrifieringsscenariot (*Elektrifiering* & *NPH*) från det motsvarande bas-scenariot (*EU referens* & *CNN*). Om man gör en ekvation av beräkningarna skulle den se ut på detta sätt:

$$\Delta e_p = \sum_{f,s} (a_{f,s,sc-bas} * ef_{p,f,s,sc-bas}) - \sum_{f,s} (a_{f,s,sc-ele} * ef_{p,f,s,sc-ele})$$

Där:
p, f, s, sc = ämne (NO_x eller PM2,5), bränsle, sektor, scenario
Δe = skillnad i utsläpp

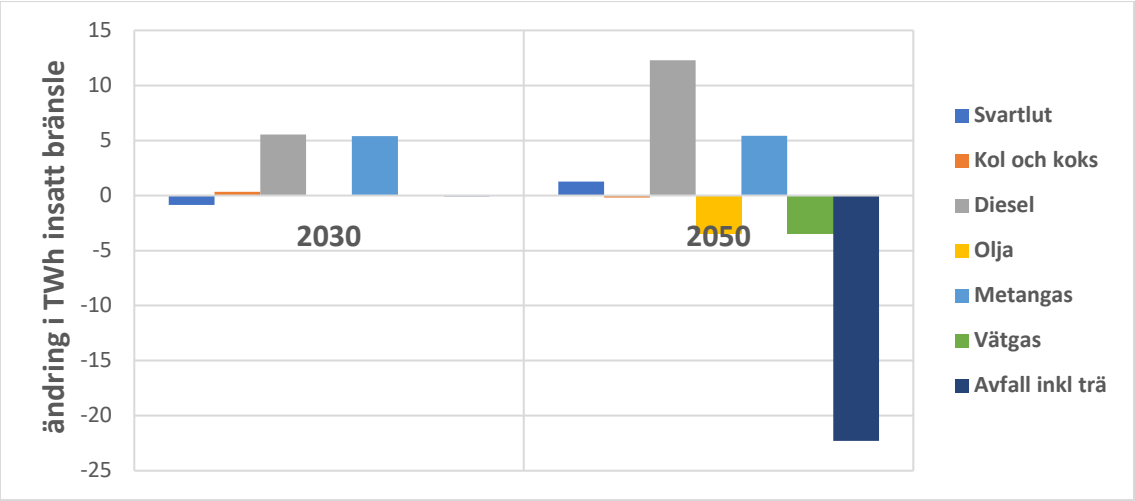
[3] https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions

https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2019.1685999

bas = grundscenariot (*EU referens* eller *CNN*)
ele = elektrifieringsscenariot (*Elektrifiering* eller *NPH*)

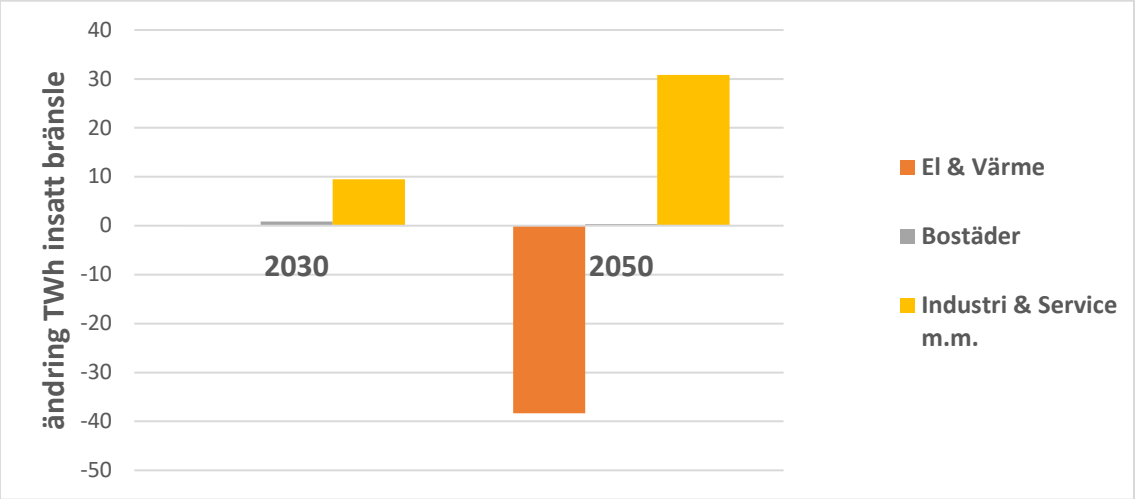
3.4. Känslighetsanalyser

Då CCS och vätgaslösningar är mycket nya tekniska lösningar som ännu inte finns etablerade i något energisystem är det relevant att studera dessa ytterligare. Då NCES inkluderar scenarier som beskriver konsekvenser av att CCS blir mycket dyrare har vi även genomfört beräkningar för dessa scenarier. Dessa scenarier presenteras som *CNN-CCS* & *NPH-CCS*. Som syns om man jämför Figur 8 med Figur 7 så associeras dyrare CCS-teknik med att ett skifte från *CNN* till *NPH* att mindre vätgas och avfall inkl. träbränsle förbränns i Sverige, men mer metangas och dieselolja.



Figur 8: Ändring i insatt bränsle; *NPH-CCS* minus *CNN-CCS* sorterad per bränsle.

Per sektor associeras dyrare CCS med att *CNN* använder mer bränsle för el- och värmeproduktion än *NPH* (Figur 9).



Figur 9: Ändring i insatt bränsle; *NPH-CCS* minus *CNN-CCS* sorterad per sektor.

4. Resultat

För att kunna kontrollera rimligheten i våra resultat har vi trots olika klassificeringssystem i energisystem-modellerna och utsläppsfaktorsberäkningarna valt att kontrollera våra egna beräknade utsläpp i *EU referens* med Sveriges officiella prognos för ungefär motsvarande sektorer. Jämförelsen görs för sektorerna 'Energy industries' (1A1), 'Manufacturing industries and construction' (1A2), 'Off-road transport' (1A3a,c,d,e), 'Other sectors' (1A4), och 'Industrial Processes' (2A,B,C,H,I,J,K,L) samt TIMES-modellsektorerna för Energimyndighetens scenarier: 'El- & Värme', 'Industri', samt 'Bostäder & Service m.m.' respektive NCES-scenariernas modellsektorer 'El- & Värme', 'Industri & Service m.m.', samt 'Bostäder' De två senare sektorerna innehåller utsläpp från arbetsmaskiner (se Tabell 1 för presentation av skillnader mellan modelleringsgrupper). Resultaten av jämförelsen visas i Tabell 2.

Tabell 2: Utsläpp av NOx & PM2,5 i Sveriges senaste officiella rapportering och i våra beräkningar baserade på E*U referens*, utsläpp från vägtransporter är inte medräknade.

Scenario	Utsläpp	2030	2050
Officiell	NOx	58 tusen ton	50 tusen ton
EU referens	NOx	55 tusen ton	50 tusen ton
% av officiell	NOx	95 %	100 %
Officiell	PM2,5	9 300 ton	6 600 ton
EU referens	PM2,5	9 400 ton	8 400 ton
% av officiell	PM2,5	101 %	127 %

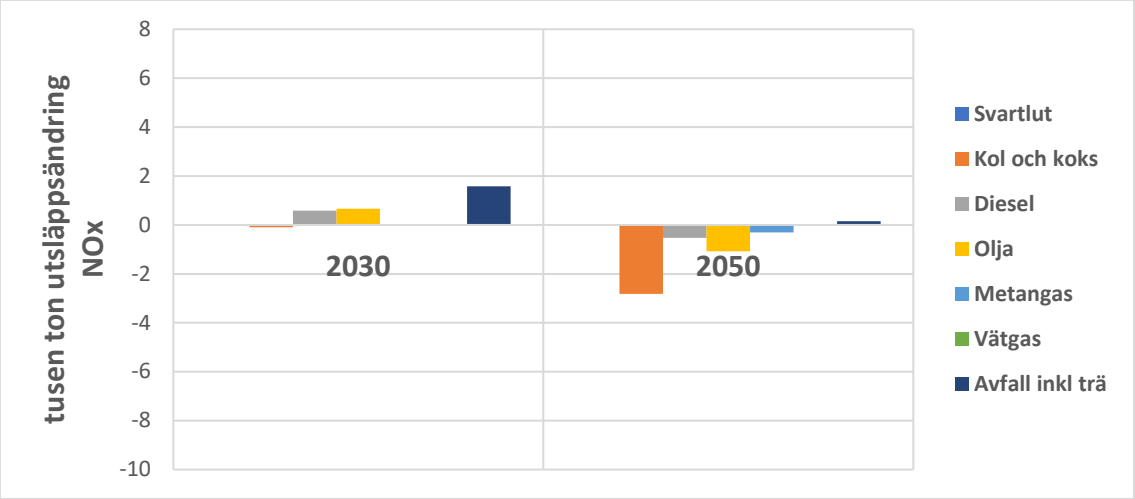
Avvikelsen i NOx-utsläpp mellan den officiella prognosen och *EU referens* innebär att skillnader i utsläpp mellan *EU referens* och *Elektrifiering* rimligtvis är lite underskattade för år 2030. Den stora avvikelsen mellan våra utsläppsberäkningar och den officiella prognosen syns för PM2,5 år 2050. När man studerar skillnader per sektor syns att det är utsläppsutvecklingen för bostäder och service som skiljer sig mest åt och driver hela skillnaden mellan officiella prognosen och *EU referens* år 2050. Det är inte helt klart vad exakt som driver skillnaden, men det är antagligen ändringar i emissionsfaktorer för förbränning av träbränslen mellan år 2030 och 2050 i den officiella prognosen som driver skillnad i utsläpp. Dessa ändringar är konsistenta med en föryngring av pannor, kaminer m.m. I *EU referens* antar vi samma utsläppsfaktor för båda år, vilket antagligen inte den officiella prognosen gör. Följande resultat för PM2,5 från Bostäder & Service m.m. Bostäder får alltså tolkas med försiktighet då de överdriver effekten på PM2,5-utsläpp av elektrifiering år 2050.

Nedan redovisas scenarioresultaten sorterat för Energimyndighetens och NCES modellering. Resultaten visas aggregerat för bränslesorterna: Svartlut, Kol- & koks samt masugnsgaser, Diesel, Oljebränslen, Metangas, Vätgas, samt Avfall inkl. träbränslen. Vi visar även resultat aggregerat över huvudsektorerna El- och värmeproduktion, Bostäder & service m.m., samt Industri. Den största (>85 %) bränslemängden till arbetsmaskiner antas finnas i sektorn Bostäder & service m.m.

4.1. Utsläppskillnader mellan energimyndighetens scenarier

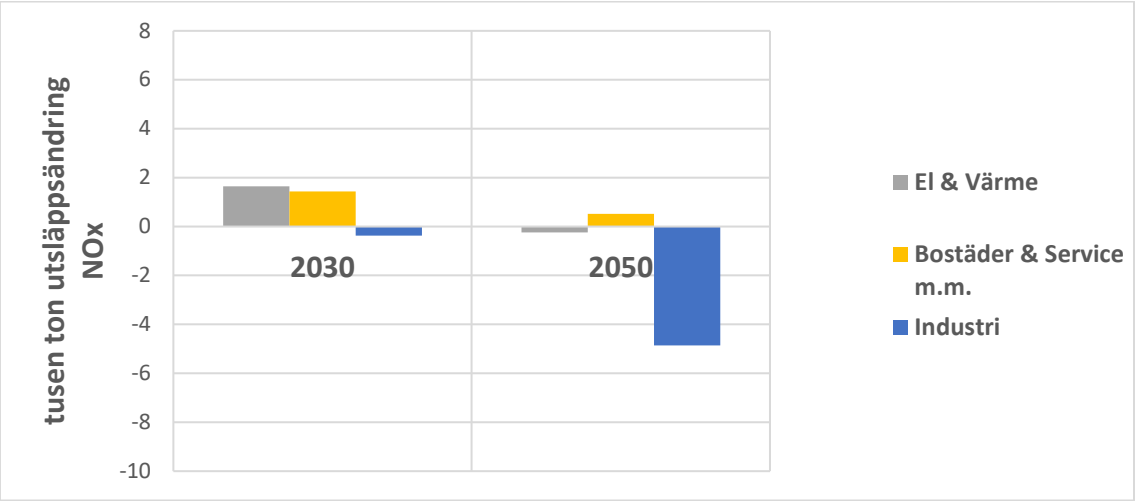
Enligt Energimyndighetens scenarier och de emissionsfaktorer som antagits riskerar NOx-utsläpp år 2030 öka ca 3 tusen ton som effekt av elektrifieringsscenariot. Situationen är den omvända år 2050. Figur 10 visar resulterande skillnad i utsläpp när man tar utsläpp i *Elektrifiering* minus

utsläpp i *EU referens*. Om stapeln är negativ är utsläpp i *Elektrifiering* lägre än i *EU referens*, om stapeln är positiv är utsläpp i *Elektrifiering* högre än i *EU referens*. Samma typ av figur visas för samtliga scenariojämförelser sorterat per bränsle och per sektor. Ur Figur 10 kan man se att utsläppsändringar främst drivs av att elektrifiering innebär ökad förbränning av avfall & träbränslen år 2030 och av minskad användning av kol, koks, diesel och oljebränslen 2050.



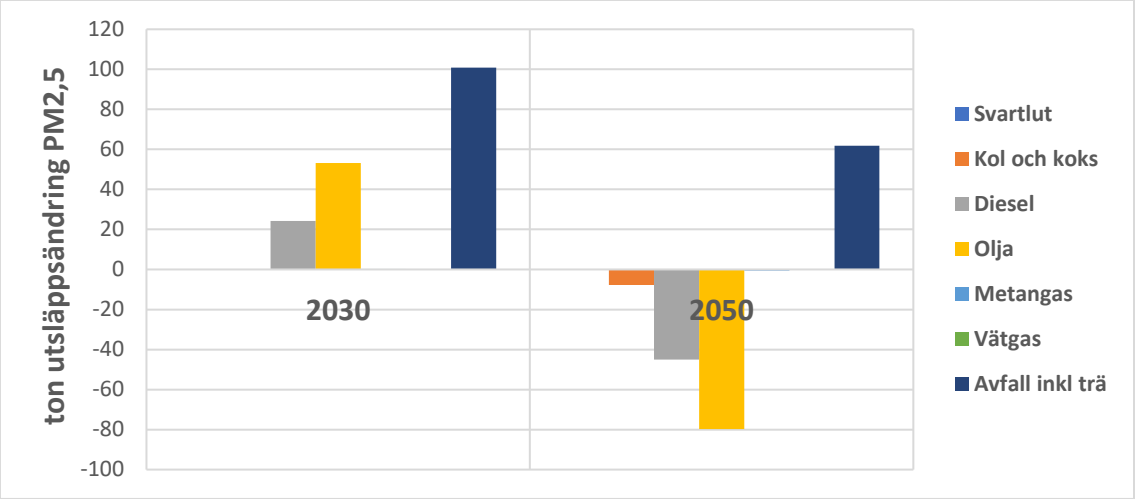
Figur 10: Ändring i NO_x-utsläpp; *Elektrifiering* minus *EU referens* sorterad per bränsle.

Per sektor sker de största effekterna år 2030 i el- och värmeproduktion samt Bostäder & Service m.m. år 2030, och industrin år 2050 (Figur 11).



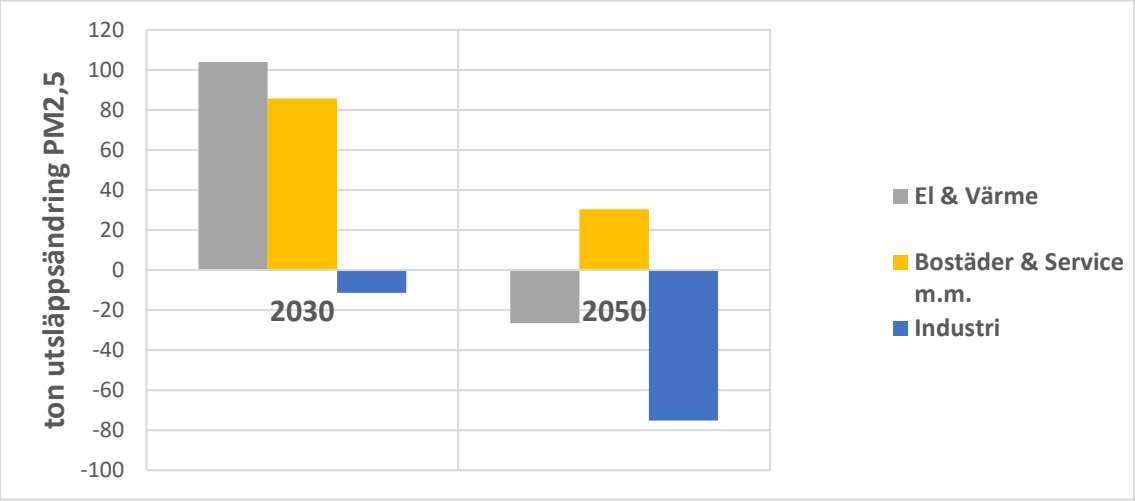
Figur 11: Ändring i NOx-utsläpp; *Elektrifiering* minus *EU referens* sorterad per sektor.

Även för utsläpp av PM2,5 följer ändringarna mellan scenarierna samma mönster. PM2,5-utsläpp i Elektrifiering är högre än i EU referens år 2030, men lägre år 2050. Utsläppen ökar dock konsistent från avfall och träbränsleanvändning (Figur 12).



Figur 12: Ändring i PM2,5-utsläpp; *Elektrifiering* minus *EU-referens* sorterad per bränsle.

Per sektor finns de största skillnaderna i utsläpp i sektorerna El & värmeproduktion samt Bostäder & Service m.m. år 2030, och i Industri år 2050 (Figur 13). Detta på grund av högre mängd bränsleanvändning i *Elektrifiering* än i *EU referens*.



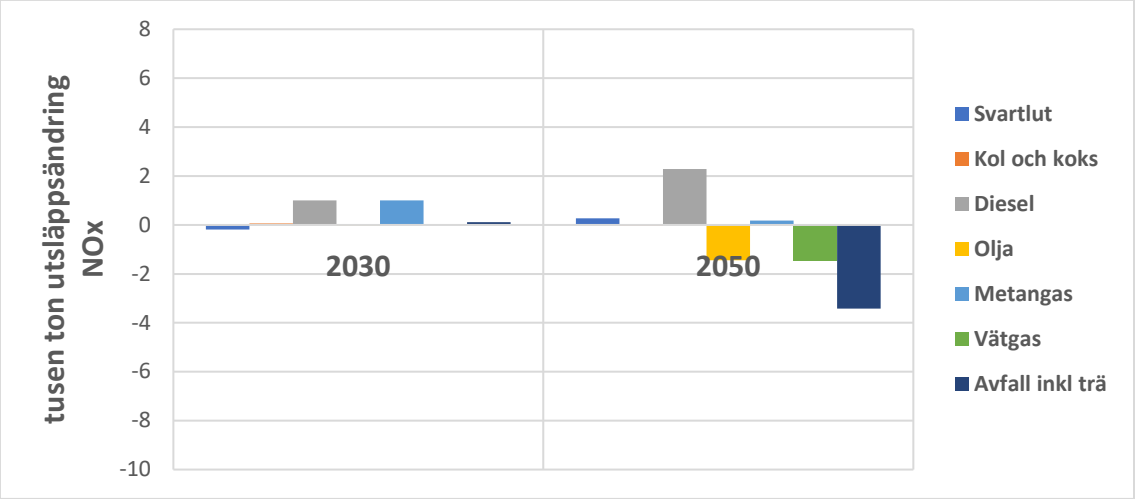
Figur 13: Ändring i PM2,5-utsläpp; *Elektrifiering* minus *EU referens* sorterad per sektor.

Sammantaget visar vår analys baserad på Energimyndighetens scenarier att till år 2030 finns det risk att elektrifiering ökar utsläpp genom ökad användning av träbränslen till främst El- och värmeproduktion samt Bostäder & service m.m. Senare år leder dock *Elektrifiering* till lägre utsläpp av NO_x då främst industrin minskar sin förbränning.

4.2. Utsläppskillnader mellan NCES-scenarierna

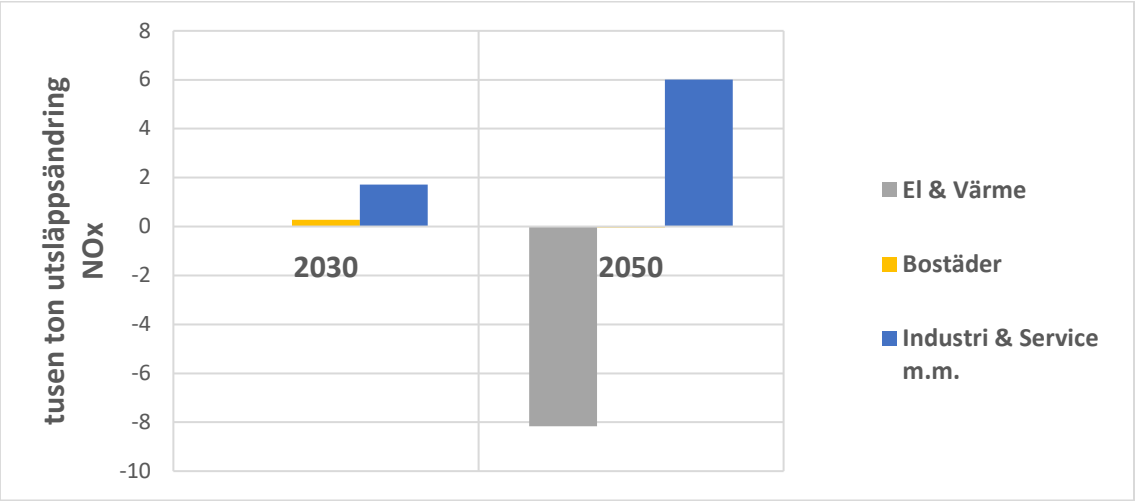
Till skillnad från Energimyndighetens scenarier så representerar NCES-scenarierna olika varianter för Sverige att nå uppsatta mål om klimatneutralitet. Men även NCES-scenarierna antyder att NO_x-utsläppen skulle öka. Ökningen blir ca 2 tusen ton år 2030 p.g.a. ökad el- och värmeproduktion,

men utsläppen minskar med ca 4 tusen ton år 2050 (Figur 14). År 2030 drivs ändringen av ökad diesel och metangasanvändning i industrin (vilka är användbara p.g.a. antagande om tillgänglig CCS), men år 2050 drivs ändringen av minskad användning av vätgas samt avfall inkl. träbränslen. Som påminnelse grundas effekten från vätgas på antagandet att vätgasen förbränns och då har samma emissionsfaktor som dieselolja.



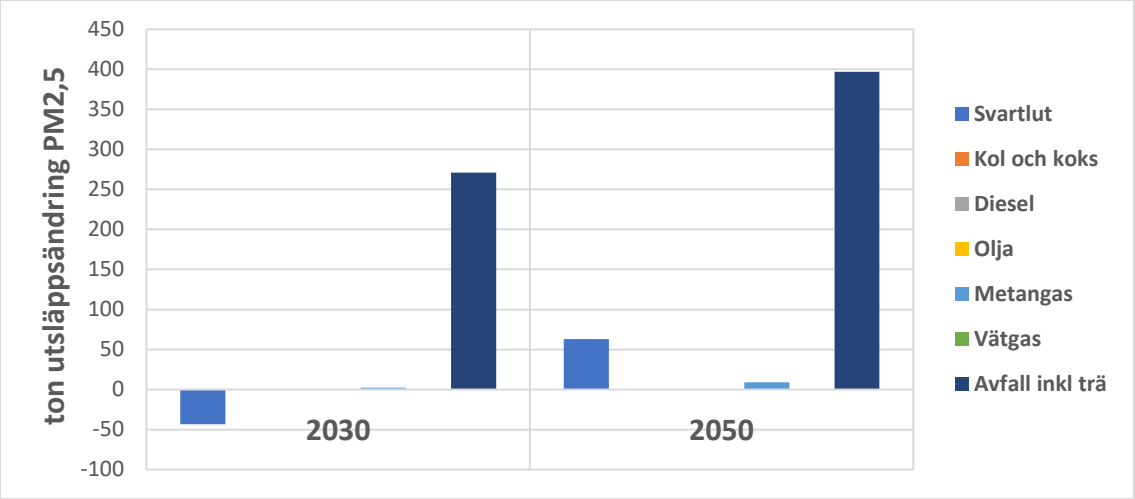
Figur 14: Ändring i NOx-utsläpp; *NPH* minus *CNN* sorterad per bränsle.

Per sektor är det främst industrins utsläpp som driver utsläppsökningen till 2030 p.g.a. elektrifiering, men till år 2050 motverkas industrins fortsatta ökning av ännu kraftigare minskning av utsläpp från el- och värmeproduktion (Figur 15).



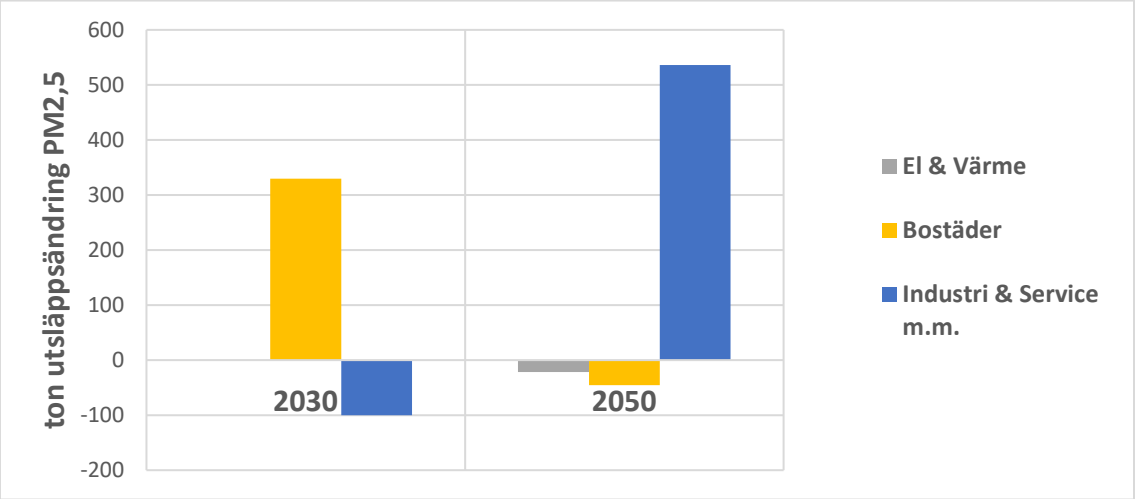
Figur 15: Ändring i NOx-utsläpp; *NPH* minus *CNN* sorterad per sektor.

NCES-scenarierna innebär att utsläpp av PM2,5 ökar både år 2030 och 2050, främst från ökad användning av avfall- och träbränslen (Figur 16).



Figur 16: Ändring i PM2,5-utsläpp; *NPH* minus *CNN* sorterad per bränsle.

Per sektor varierar det dock mellan 2030 och 2050. År 2030 ökar utsläppen p.g.a. högre utsläpp från Bostäder, men år 2050 är det industrins utsläpp som driver ökningen (Figur 17).



Figur 17: Ändring i PM2,5-utsläpp; *NPH* minus *CNN* sorterad per sektor.

NCES-scenarierna är konsistenta med Energimyndighetens scenarier i att utsläpp av NO_x riskerar öka år 2030 som följd av elektrifiering, men minska till 2050. Däremot skiljer sig scenarierna åt i vilka bränslen och sektorer som påverkar utsläppsändringarna. En jämförelse mellan de olika modellgruppernas scenarier är inte aktuell då de skiljer sig mycket åt i både modellantaganden och sektorsindelning. I energimyndighetens scenariojämförelse är det framför allt en nästan total utfasning till år 2050 av kol- och koks som driver utsläppsminskningen, men i NCES är det avfall och träbränslen. Det är däremot viktigt att påminna om att vi för Energimyndighetens scenarier inte haft information om mängden vätgas som förbränns. Därmed är inte skillnad i NO_x-utsläpp från vätgas inkluderat i siffrorna för Energimyndighetens scenarier. Per sektor är det i Energimyndighetens scenariojämförelse framför allt minskad förbränning i Industri som leder till utsläppsminskning. I NCES ökar utsläppen från Industrin men minskar från El- och värmeproduktion år 2050.

Resultaten från känslighetsanalysen över CCS visar inga större skillnader annat än att minskningen i NO_x-utsläpp år 2050 som följer av *NPH-CCS* blir något större än av *NPH*. Däremot blir ökningen av PM2,5-utsläpp något mindre år 2030 och något större år 2050.

4.3. Sammanfattande resultat

Givet studiens avgränsningar samt de scenarier och emissionsfaktorer som använts så visar resultaten att elektrifiering riskerar leda till 2–3 tusen ton högre NO_x-utsläpp och ca 200 ton högre PM2,5-utsläpp år 2030 än jämförelsescenariot (Tabell 3). Men efter 2030 ändrar effekten av elektrifiering riktning så att utsläppen av NO_x är 2–5 tusen ton lägre än jämförelsescenariot år 2050. Effekten på PM2,5 är inte konsistent mellan scenarier år 2050 och emissionsfaktorerna är rimligtvis något förhöjda. Givet dessa reservationer är det risk att elektrifiering leder till högre utsläpp av PM2,5 år 2050.

Tabell 3: Sammanfattning av totala ändringar i NO_x- och PM2,5-utsläpp kopplat till elektrifiering.

Scenariogrupp		2030	2050	enhet
Energimyndigheten *Elektrifiering* minus *EU referens*	NO_x	3	-5	Tusen ton
	PM2,5	178	-71	Ton
Nordic Clean Energy Scenarios *NPH* minus *CNN*	NO_x	2	-4	Tusen ton
	PM2,5	230	469	Ton
Nordic Clean Energy Scenarios *NPH-CCS* minus *CNN-CCS*	NO_x	2	-2	Tusen ton
	PM2,5	166	634	Ton

5. Diskussion och slutsatser

De resultat vi fått fram i detta projekt visar att det till år 2030 finns risk att elektrifiering av de svenska transport- och industrisektorerna leder till långsammare utsläppsminskning av NO_x och PM2,5 från de studerade sektorerna El- & Värmeproduktion, Industri, Bostäder och Service än vad som antas i Sveriges nuvarande officiella utsläppsprognos. Modellresultaten föreslår delvis olika orsaker till att utsläpp påverkas. Enligt Energimyndighetens scenarier är det högre användning av bränslen av kategorin avfall och träbränslen till El- och värmeproduktion samt Bostäder och Service som håller utsläppen uppe. NCES-scenarierna föreslår däremot högre användning av dieselolja och gas inom industrin än i referensscenariot som pådrivande faktor. Till 2050 vänder effekten, och i Energimyndighetens scenarier drivs effekten av minskad kol- och koksanvändning inom industrin, men enligt NCES-scenarierna drivs det av minskad användning av avfall och träbränslen.

För båda modellerna blir påverkan på utsläpp från de studerade sektorerna ca 4–5 % av sektorernas totala utsläpp av NO_x år 2030 och ca 2 % för PM2,5 (2–3 tusen ton NO_x & ca 200 ton PM2,5), vilket är inom vad som bör betraktas som godtagbar osäkerhet för scenarier till 2030. Men då Sverige söker lösningar för att nå utsläppstaket för NO_x enligt NEC-direktivet är det ändå bekymrande att elektrifiering riskerar motverka övriga åtgärder för att minska utsläpp av NO_x. Som procent av nationellt totala NO_x-utsläpp är effekten större år 2050 än 2030 och av omvänt tecken, en minskning av 4–10 % av nationell totalt (ca 1 % för PM2,5).

Till effekterna på de studerade sektorerna, kommer effekter av elektrifiering på transportsektorns egna utsläpp. Enligt IVL rapport C668 kommer effekten på NO_x inte vara speciellt stor till år 2030: ca 0,4 tusen ton lägre utsläpp än rapportens referensscenario (Hult m.fl. 2022). Alltså finns det inte skäl att tro att elektrifiering av transportsektorn till år 2030 kommer balansera effekten av elektrifiering på utsläpp från de sektorer som studerats här (0,4 tusen ton <2–3 tusen ton). Till detta kommer att scenarierna i IVL-rapport C668 antar större elbehov i transportsektorn än vad som antas i de scenarier som ligger till grund för våra beräkningar, så man kan hypotetiskt säga att transportsektorns påverkan på NO_x-utsläpp i våra scenarier är lägre än 0,4 tusen ton år 2030. Däremot blir effekten på NO_x-utsläpp till 2050 större. I jämförelse med rapportens referensscenario skulle utsläppen p.g.a. ökad elektrifiering av transporter innebära ca 3 tusen ton lägre utsläpp. Fortfarande bör man dock ta hänsyn till skillnader i transportsektorns elbehov mellan IVL rapport C668 och denna studie. År 2050 antar IVL C668 ca 28 TWh för elfordon 2050 medan *EU referens* antar 24 TWh. Precis som för år 2030 kan man då tänka att transportsektorns påverkan på NO_x-utsläpp i våra scenarier är lägre än 3 tusen ton år 2050.

Resultaten är såklart osäkra, vilket alltid är fallet med scenariostudier. Mycket kan komma att ändra hur det framtida energisystemet utvecklas, och därmed våra resultat. T.ex. har Sverige nu öppnat upp för ökad produktion av havsbaserad el i och med billigare anslutning till land för de bolag som producerar havsbaserad el. Den tekniska potentialen för havsbaserad el har uppskattats till över 150 TWh (Svensk Vindenergi 2021), medan Energimyndighetens scenarier som använts i vår studie antar mindre än en TWh år 2050. Dessutom är scenarierna gjorda innan Ryssland invaderade Ukraina, vilket redan nu har påverkat europeiska bränsle- och elpriser och därmed lönsamhetskalkyler för investeringar. Hur de påverkar investeringar är såvitt vi förstår oklart. Högre el- och bränslepriser gynnar investeringar, men den högre osäkerhet som ett krig för med sig missgynnar investeringar. I en rapport från forskningsprogrammet MISTRA Carbon Exit dras slutsatsen att krigets påverkan på det svenska energisystemet på kort sikt uppmuntrar till ökad energieffektivisering och accelererade investeringar i förnyelsebar energi, främst vind- och solkraft (Zetterberg m.fl. 2022), båda åtgärder vilka kan antas leda till snabbare utsläppsminskningar av svenska NO_x-utsläpp.

Vad gäller hur emissionsfaktorerna påverkar resultatens osäkerhet är de viktigaste faktorerna att vi genomfört beräkningar på en relativt hög aggregeringsnivå vad gäller bränslen och sektorer, och att vi med undantag för arbetsmaskiners NO_x-utsläpp antagit konstanta emissionsfaktorer för NO_x. Den höga aggregeringsnivån innebär att vi riskerar missa vissa högutsläppande delsektorer. Detta skulle kunna påverka våra beräknade NO_x-utsläppskillnader om scenarierna implicit skiljer sig åt vad gäller användning av små förbränningsanläggningar. Små förbränningsanläggningar har över lag inte lika strikta krav på utsläpp som de större. Konstanta emissionsfaktorer motsvarar att vi antar samma användningsnivå av utsläppsrenande tekniker. 2030 är i praktiken endast sju år bort, vilket är en kort period för att hinna driva igenom ny lagstiftning om krav på utsläppsrening. Så användning av samma emissionsfaktorer år 2030 som år 2020 är rimligt, men det är genomförbart med ökad användning av reningstekniker till år 2050. Ytterligare en osäkerhet kommer av oklarheter kring hur vätgas kan komma användas i framtiden och vilka NO_x-emissionsfaktorer som följer. Fler studier behövs på detta område.

Sammantaget hade det varit önskvärt att studera fler alternativa utvecklingsvägar för det framtida svenska energi- och transportsystemet. Det hade dessutom varit önskvärt att genomföra beräkningarna på en lägre aggregeringsnivå för att kunna fånga upp scenarioskillnader för viktiga delsektorer. Dessutom skulle det varit önskvärt att ha bättre information om NO_x-utsläpp från olika typer av vätgasanvändning och att ha beräknat alternativa användningsnivåer av NO_x-utsläppsreningsteknik.

Givet studiens förutsättningar drar vi slutsatsen att snabbare elektrifiering av det svenska samhället riskerar fördröja den pågående minskningen av Sveriges NO_x och PM2,5-utsläpp, med effekten att utsläppen år 2030 blir högre än de är prognosticerade. Effekten kommer däremot vara liten, och efter 2030 kommer effekten av elektrifiering rimligtvis bli den omvända.

6. Referenser

Amann, M., m.fl., 2020, Support to the development of the Second Clean Air Outlook

Hult, C., m.fl., 2022, Styrmedel för minskade NOX-utsläpp från vägtrafik i scenarier med skärpta EU-krav för fordons CO2-utsläpp, IVL rapport C668

Energimyndigheten, 2021a. Framtidens elektrifierade samhälle - Analys för en hållbar elektrifiering, ER 2021:28

Energimyndigheten, 2021b, Scenarier över Sveriges energisystem 2020, ER 2021:6

Hybrit, 2020. Hybrit demonstrationsanläggning för direktreduktion av järnmalm med vätgas., u.o.: Hybrit Development AB

Kaby, M., 2022. Industrihandläggare, Naturvårdsverket [Intervju] (06 2022).

Loulou, R., m.fl., 2016, Documentation for the TIMES Model - PART I

IEA, 2020, World Energy Outlook 2020, IEA, Paris

Mawdsley, I., m.fl., 2020, Styrmedelseffekter på utsläpp av luftföroreningar och växthusgaser - Nulägesanalys av åtta förbränningsanläggningar, IVL rapport Nr C563

Mawdsley, I., Nilsson, A., 2021, Balansering av sol- och vindkraft - En förstudie kring utsläpp av växthusgaser och luftföroreningar vid användning av olika tekniker, IVL rapport Nr C577

Möllersten, K., m.fl., 2022, Kunskapssammanställning CCS och luftföroreningar, IVL rapport U6553

Naturvårdsverket, 2021. Scenario ger viktig bild av framtida luftföroreningar, https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/statistik--utslapp-och-halter/scenario-ger-viktig-bild-av-framtida-luftfororeningar/

Svensk Vindenergi, 2021, Havsbaserad vindkraft – en nyckel till industrins omställning

Sweco, 2021. Green Steel- spridningsberäkningar, u.o.: H2GS.

Wråke, M., m.fl., 2021, Nordic Clean Energy Scenarios: Results Viewer. Nordic Energy Research. Hämtad från https://cleanenergyscenarios.nordicenergy.org

Zetterberg, L., Johnsson, F., Elkerbout, M., 2022, Impacts of the Russian invasion of Ukraine on the planned green transformation in Europe

Åström, S., m.fl., 2022, Styrmedel för minskade NOX-utsläpp från vägtrafik, inrikes sjöfart och fiskefartyg: Utsläppseffekter, kostnader och nyttor år 2030, IVL rapport C652

Bilaga 1 - emissionsfaktorer

NO_x (tusen ton / TWh bränsle)

Sektor	Bränsle	CRF-kod	EF NOx (kg/ MWh)
Industri	Wooden fuels	1A2	0,22
Industri	Black liquor	1A2	0,22
Industri	Diesel Oil		1,21
Industri	Coking coal	1A2	0,25
Industri	Coke	1A2	0,25
Industri	LPG	1A1b, 1A2	0,17
Industri	Diesel Oil	1A1b, 1A2	0,18
Industri	Other petroleum fuels	1A2	0,36
Industri	Natural Gas	1A1b, 1A2	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Wooden fuels	1A4b	0,29
Hushåll/Bostäder/Service	Diesel Oil		1,21
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil		1,21
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Gas works gas	1A4b	0,18
Energiproduktion	Other biomass	1A1a	0,40
Energiproduktion	Waste	1A1a	0,18
Energiproduktion	Peat	1A1a	0,25
Energiproduktion	Residual Fuel Oil	1A1a	0,22
Energiproduktion	Coking coal	1A1a	0,11
Energiproduktion	LPG	1A1a	0,05
Energiproduktion	Landfill gas	1A1a	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Wooden fuels	1A4b	0,29
Industri	Coking coal	1A2	0,252
Industri	El/värme		0
Industri	Diesel Oil	1A2gvii	1,21
Industri	Wooden fuels	1A2	0,216
Industri	Diesel Oil	1A2gvii	0,813604
Industri	Residual Fuel Oil	1A1b, 1A2	0,324
Industri	Diesel Oil	1A1b, 1A2	0,18
Industri	Coking coal	1A2g	1,98
Industri	Black liquor	1A2	0,216
Energiproduktion	Black liquor	1A2	0,216
Energiproduktion	El/värme		0
Energiproduktion	Methane etc.	1A2	0,18
Energiproduktion	Wooden fuels	1A1a	0,216
Energiproduktion	Vätgas	1A3a / ii(ii)	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	El/värme		0
Hushåll/Bostäder/Service	Gas works gas	1A4b	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	0,18
Hushåll/Bostäder/Service	Natural Gas	1A1b, 1A2	0,18

PM2,5 (ton/TWh bränsle)

Sektor	Bränsle	CRF-kod	EF PM2,5 (g/ MWh)
Industri	Wooden fuels	1A2	88,00
Industri	Black liquor	1A2	50,00
Industri	Diesel Oil		50,00
Industri	Coking coal	1A2	0,61
Industri	Coke	1A2	0,61
Industri	LPG	1A1b, 1A2	0,36
Industri	Diesel Oil	1A1b, 1A2	7,20
Industri	Other petroleum fuels	1A2	26,16
Industri	Natural Gas	1A1b, 1A2	0,36
Hushåll/Bostäder/Service	Wooden fuels	1A4b	348,98
Hushåll/Bostäder/Service	Diesel Oil		50,00
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	10,80
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil		50,00
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	12,80
Hushåll/Bostäder/Service	Gas works gas	1A4b	1,80
Energiproduktion	Other biomass	1A1a	25,20
Energiproduktion	Waste	1A1a	0,72
Energiproduktion	Peat	1A1a	3,60
Energiproduktion	Residual Fuel Oil	1A1a	10,80
Energiproduktion	Coking coal	1A1a	0,72
Energiproduktion	LPG	1A1a	0,36
Energiproduktion	Landfill gas	1A1a	0,36
Hushåll/Bostäder/Service	Wooden fuels	1A4b	46,80
Industri	Coking coal	1A2	0,612
Industri	El/värme		0
Industri	Diesel Oil	1A2gvii	7,2
Industri	Wooden fuels	1A2	88,00
Industri	Diesel Oil	1A2gvii	7,2
Industri	Residual Fuel Oil	1A1b, 1A2	29,88
Industri	Diesel Oil	1A1b, 1A2	
Industri	Coking coal	1A2g	32,4
Industri	Black liquor	1A2	50,00
Energiproduktion	Black liquor	1A2	172,8
Energiproduktion	El/värme		0
Energiproduktion	Methane etc.	1A2	0,36
Energiproduktion	Wooden fuels	1A1a	0,464
Energiproduktion	Vätgas	1A3a / ii(ii)	0
Hushåll/Bostäder/Service	El/värme		0
Hushåll/Bostäder/Service	Gas works gas	1A4b	1,8
Hushåll/Bostäder/Service	Domestic Heating Oil	1A4b	10,8
Hushåll/Bostäder/Service	Natural Gas	1A1b, 1A2	1,8

Referenser emissionsfaktorer

Utsläpp	Bränsle	Källa
NOx	Eldningsolja 1, dieselolja	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Eldningsolja 2-5	Boström et al., 2004a
NOx	Propan och butan, fotogen	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Stadsgas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Metan och bränngas	EF for natural gas
NOx	Naturgas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Karbidugnsgas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Koksugnsgas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Masugnsgas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	LD-gas	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Kol	Boström et al., 2004a
NOx	Koks	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Trädbränsle /el, fjvm, industri	Boström et al., 2004a
NOx	Trädbränsle /småskalig förbränning	Paulrud et al., 2006. Helbig et al 2018
NOx	Torv	Boström et al., 2004a
NOx	Avfall*	Boström et al., 2004a
NOx	Tallolja	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Deponigas	EF for natural gas
NOx	Petroleumkoks	EF for coke
NOx	Brännolja	Nyström & Skårman, 2006
NOx	Övriga biobränslen	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Övriga petroleumbränslen	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Övriga fasta fossila bränslen	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Övriga ospecifierade bränsle	NATURVÅRDSVERKET 1995
NOx	Raffinaderigaser	Nyström & Skårman, 2006
PM 10	Alla bränslen utom småskalig eldning av trä	Boström et al., 2004b
PM 10	Trädbränsle /småskalig förbränning	Paulrud et al., 2006. Helbig et al 2018
PM 2.5	Alla bränslen utom småskalig eldning av trä	Boström et al., 2004b
PM 2.5	Trädbränsle /småskalig förbränning	Paulrud et al., 2006. Helbig et al 2018
NOX	Eldningsolja 1: sjöfart	Transportstyrelsen
NOX	Eldningsolja 2-5: sjöfart	Transportstyrelsen
PM10	Alla bränslen: sjöfart	Wisell, Mawdsley & Fridell 2017.
PM25	Alla bränslen: sjöfart	Wisell, Mawdsley & Fridell 2017.
NOx	Alla bränslen: vägtrafik	HBEFA 4.1

IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se