



Omställningsscenariot - 2024

Scenario över Sveriges Energisystem 2020-2050

*Mathias Gustavsson, Kenneth Karlsson, Andrea Marin Radoszynski och
Akram Sandvall*

Göteborg den 28 maj 2024

Rapportnummer: U6849

Författare: Mathias Gustavsson, Kenneth Karlsson, Andrea Marin Radoszynski (Energy Modelling Lab, DK) och Akram Sandvall

På uppdrag av: WWF Sverige

Granskare: Julia Hansson (IVL)

Godkännare: Anna Söderholm (IVL)

Framsidesbild: Shutterstock

Förslag på citering: Gustavsson, M., K. Karlsson, A. M. Radoszynski och A. Sandvall (2024). Omställningsscenariot 2024 - Scenario över Sveriges Energisystem 2020-2050, Slutversion, uppdragsrapport, IVL Svenska Miljöinstitutet, på uppdrag av WWF Sverige, Göteborg, 28 maj 2024

De resultat och slutsatser som presenteras i denna rapport är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis WWF Sveriges uppfattning.

Förord

Världsnaturfonden WWF:s vision är en framtid där vi människor lever inom de planetära gränserna med bevarande av biologisk mångfald och ekosystemtjänster, samtidigt som vi når netto-noll och därefter nettonegativa växthusgasutsläpp och en ökad motståndskraft mot klimatiförändringar. WWF:s långsiktiga ambition är att integrera naturens betydelse i ekonomiskt beslutsfattande där allt offentligt och privat kapital bidrar positivt till vetenskapligt baserade miljö- och klimatmål.

WWF Sverige gav 2011 ut rapporten "Hållbar energi – 100% förnybart på naturens villkor" (WWF 2011). De krav och prioriteringar som WWF då presenterade gäller övergripande även idag, med fokus på energieffektivisering, minskad konsumtion samt planering, utveckling och innovation. Ett säkert och hållbart energisystem behöver utvecklas inom ramarna för ekologisk hållbarhet i landskapet, och samtidigt som bevarandet av ekosystemfunktioner och biologisk mångfald stärks, i linje med WWFs strategi för biodiversitet (WWF 2024).

Sedan WWF:s senaste energirapport har omställningen blivit akut. FN:s klimatpanel *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) har i sina rapporter visat hur riskerna och konsekvenserna med klimatiförändringarna ökar ju större uppvärmningen blir. Mycket snabba utsläppsminskningar brådskar för att undvika eller mildra alltmer djupgående effekter och allvarliga störningar för människa och natur. Det krävs global handlingskraft för en omfattande energiomställning, för att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader, vända förlusten av biologisk mångfald och säkra en rättvis och hållbar omställning.

Syftet med denna rapport är att presentera ett undersökande scenario för utvecklingen av Sveriges energisystem, för att tydliggöra möjliga lösningar och huvudutmaningar i den energiomställning samhället befinner sig i. De resultat och slutsatser som presenteras speglar inte nödvändigtvis WWF Sveriges ståndpunkter. Arbetet med rapporten har tagit avstamp i den vision och de nyckelområden som tagits fram i WWF:s globala energiramverk (WWF 2023):

1. Minska energibehovet genom energieffektivisering.
2. Aktivt fasa ut fossila bränslen.
3. Generera endast förnybar el.
4. Elektrifiera allt vi kan.
5. Utveckla förnybara lösningar på energitjänster som inte kan direkt elektrifieras.

Scenariot som presenteras i denna rapport har tagits fram med en energisystemmodell som exkluderar lokalisering, *sensitivity-mapping*. Den inkluderar inte heller kvantifiering av materialanvändning. Samhället behöver genomgående arbeta ambitiöst med effektivisering, hållbar produktion och konsumtion samt utveckling av cirkulära system för att minska behovet av ny energiinfrastruktur och råmaterial. Samtidigt förväntas efterfrågan på olika mineraler och metaller öka och där behövs en hållbar materialförsörjning genom hela värdekedjan. Biomassa är en begränsad resurs med behov av styrning mot hållbar produktion inom biosfärens ekologiska gränser och för energianvändning till de sektorer som har svårast att hitta alternativ.

All energiinfrastruktur har en påverkan på naturen och ekosystemen, vilka är avgörande för människans välmående, försörjning och ekonomier. I en omställning som ska ske snabbt finns ett stort behov att beakta och begränsa negativ påverkan med avseende på landanvändning, biologisk mångfald, ekosystem och ursprungsbefolkningars rättigheter. Även om omställningen kommer att ställa vissa krav på naturresurser och lokalsamhällen kan god planering och holistiskt genomförande ta itu med både klimat- och naturrisker och generera naturpositiva¹ resultat. En utbyggnad av förnybar energi behövs för att ersätta de fossila energikällor som fasas ut. Rapporten *Building a Nature-Positive Energy Transformation* (WWF och BCG 2023) visar att ett energisystem som drivs av förnybara energikällor kommer att vara mycket bättre för natur och människor än ett energisystem som domineras av fossila bränslen.

En omfattande samhällsomställning är akut och våra beslutsfattare måste agera kraftfullt och tydligt i linje med vetenskapen. WWF Sverige vill se en ambitiös energipolitik som konkret bidrar till att uppfylla de klimatpolitiska målen. De energipolitiska målen bör i hög grad stärka Sverige som föregångsland och drivkraft för hållbar konsumtion, beteendeförändring, effektivitet, hushållande med energi och resurser samt incitament som skapar engagemang för en energiomställning som bidrar till att klimatmålen uppnås. Beslutsfattare behöver också se till att energiomställningen följer det globala ramverket för biologisk mångfald som ska stoppa och vända förlusten av biologisk mångfald till 2030.

Gustaf Lind (Generalsekreterare, Världsnaturfonden WWF)

Maja Wennerberg Fåhræus (Expert energifrågor, Världsnaturfonden WWF)

¹ Naturpositivitet definieras som att hejda och vända förlusten av natur, mätt från 2020 års baslinje, genom att öka arternas, populationernas och ekosystemens hälsa, förekomst, mångfald och motståndskraft så att naturen senast 2030 på ett synligt och mätbart sätt är på väg att återhämta sig (NPI 2024).

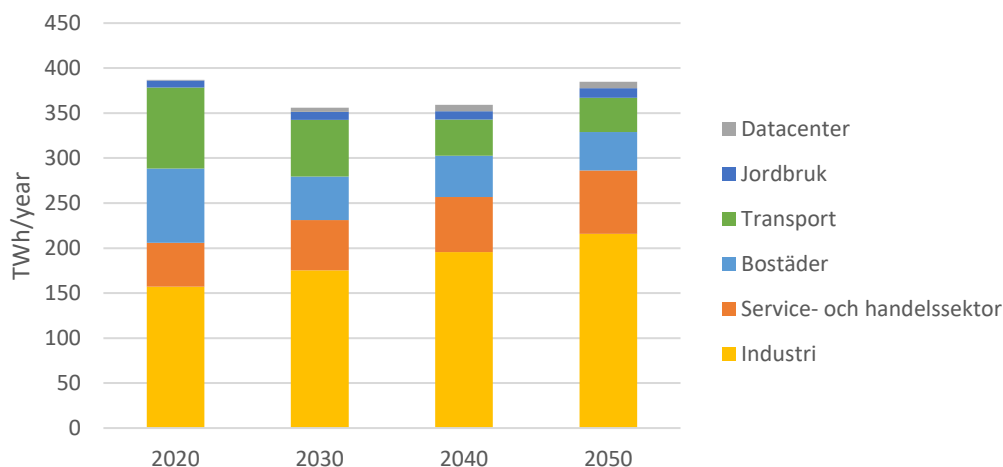
Sammanfattning

Sveriges energisystem står inför en rad omställningar som ett led i att Sverige skall klara klimatambitionerna enligt Parisavtalet. Energirelaterade utsläpp av växthusgaser står för den absolut största delen av Sveriges nationella utsläpp. Olja och kol används framför allt i industri- och transportsektorer och här kommer nya produktionsprocesser behöva etableras, men även produktionskapacitet för olika bränslen och insatsmaterial för att ersätta dagens fossila resurser. Rapporten presenterar ett långtidsenergiscenario som inkluderar alla samhällets sektorer med syfte att presentera hur man kan uppnå ambitiösa klimatmål kopplat till det svenska energisystemet, samt visa på utmaningar i denna omställning. Detta långtidsscenario har kallats *omställningsscenario* då just omställning av många av samhällets sektorer påverkar hur scenariot ser ut.

Omställningsscenario är utvecklat baserat på en kostnadsoptimerande energisystemsmodell (TIMES-NEU). Den utveckling som presenteras representerar den mest kostnadsoptimala utveckling av energisystemet under de givna förutsättningarna. Omställningsscenario har ett antal centrala utgångspunkter som sätter ramar för hur scenariot utvecklas. De resultat och rekommendationer som redovisas i rapporten skall *inte* ses som ett ställningstagande av WWF Sverige i dessa frågor.

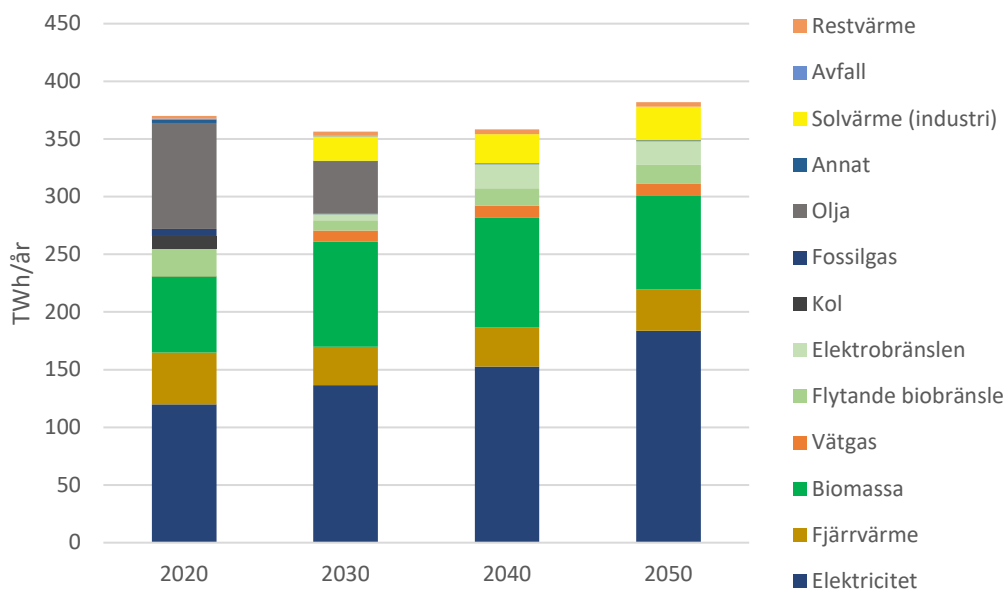
Scenariot skall uppnå nära nollutsläpp av växthusgaser från energisektorn till 2040, vilket kan jämföras med nuvarande svenska klimatmål som är satta för uppfyllelse 2045. Vidare skall fossila resurser fasas ut ur det svenska energisystemet enligt utfasning av kol till 2030, utfasning av naturgas till 2035 och utfasning av olja- och petroleumprodukter till 2040. De energibehov som uppstår i Sverige skall på sikt kunna tillgodoses nationellt. Import och export över landets gränser begränsas inte då det ger stabilitet och funktionalitet, men efter 2035 sätts ett krav på att det inte skall uppstå en nettoimport på årsbasis av biobränslen, elektrobränslen eller elektricitet. Alla energisektorer ingår i omställningsscenario och för transportsektorn inkluderas även internationell sjö- och luftfart från Sverige.

Omställningsscenariots energianvändning per sektor visar hur energiefterfrågan i industrisektorn ökar från 2020 hela perioden fram till 2050. Detta är en effekt av nya produktionsprocesser i bl.a. stålsektorn, men även som ett resultat av att produktion av elektrobränslen ökar. Inom bostadssektorn reduceras energiefterfrågan som ett led av energieffektiviseringsåtgärder och utbyggnad av värmepumpar. Transportområden blir i allt högre grad elektrifierad (Figur 1).



Figur 1: Energianvändning per sektor i omställningsscenariot, 2020-2050.

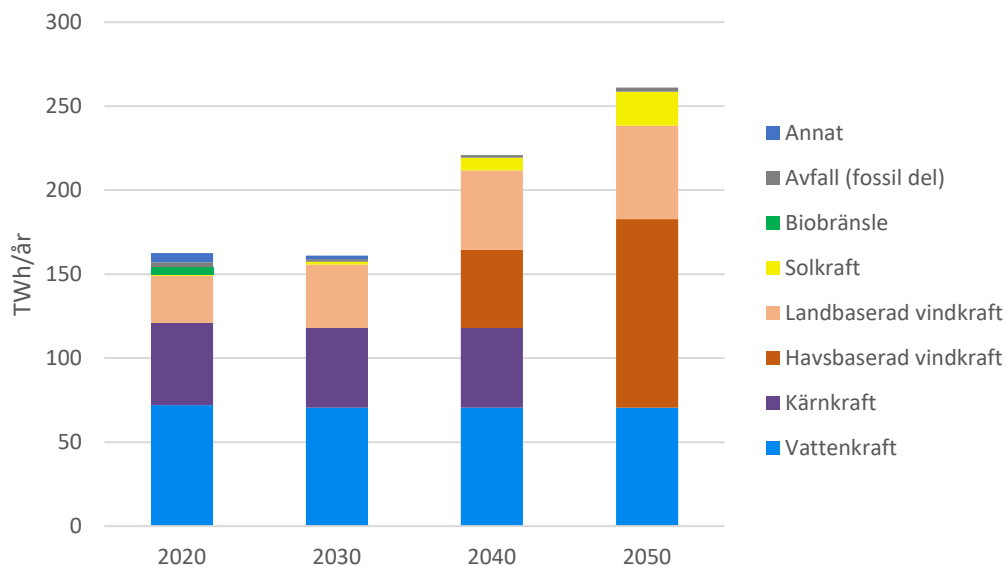
Elproduktionen kommer att behöva öka med drygt 50% jämfört med dagens produktion. Olja fasas ut och ersätts i transportsektorn med elektricitet och även elektro- och biobränslen. Biomassa kommer framför allt användas för att ersätta olika bränslen i transporter och inte återfinnas för fjärrvärme.



Figur 2: Slutlig energianvändning i Sverige år 2020-2050 uppdelat på energibärare, inklusive utrikes transporter.

För elproduktionen kommer framför allt vindkraft, land- och havsbaserad, byggas ut på stor skala. Kärnkraft kommer vara möjlig att livstidsförlänga men sista reaktorn stängs av 2045. 2020 fanns en elexport på 25 TWh och detta

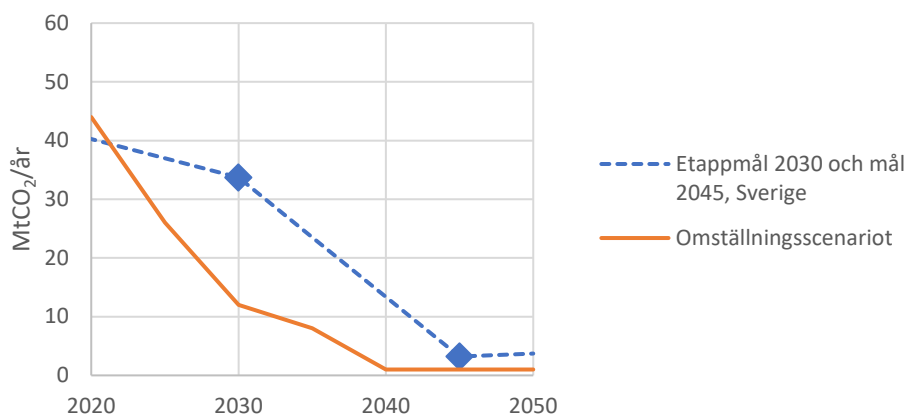
utrymme används för att klara efterfrågan på elektricitet under perioden fram till 2030 men därefter kommer en ökad elproduktionskapacitet (Figur 3).



Figur 3: Elproduktion i Sverige 2020-2050 i omställningsscenariot.

Energisystemsmodellen säkerställer att efterfrågan på elkraft, värme och andra energibärare kan tillgodoses över året. För elkraft kommer reglerkapacitet i produktionsmixen, sammankoppling med grannländers energisystem samt efterfrågestyrning i elsystemet hantera den ökade andelen intermittenta kraftslag.

Omställningsscenariot kommer uppvisa starkt avklingande utsläpp av växthusgaser från energisystemet. Detta är ett resultat av utfasningen av fossilt kol, olja och gas från energisystemet.



Not: Skillnaden i startpunkterna 2020 beror på att omställningsscenariot inkluderar utrikes transporter.

Figur 4: Associerade energirelaterade utsläpp av växthusgaser för omställningsscenariot jämfört med etappmål 2030 och Sveriges klimatmål 2045.

Koldioxidinfångning och lagring (CCS) inom energisektorn kommer behövas i avfallsförbränningsanläggningar där fortsatt viss andel fossilt kommer brännas. En viss utbyggnad av CCS vilken till stor del drivs av behovet av koldioxid för produktion av elektrobränslen. Totalt fångas 2050 omkring 5 miljoner ton koldioxid in från biogena processer i industri samt avfallsförbränning. Infångade koldioxiden används för produktion av elektrobränslen, inget lagras.

För samhällssektorerna kommer industrisektorn framvisa en ökad energiefterfrågan som är ett resultat av omställning av stålindustrin samt en ökad produktion av stål. Dessutom uppstår produktionsbehov av ersättningsbränslen för transporter som inte kan elektrifieras – här kommer elektrobränslen och biobränslen att fylla viktiga funktioner. Den nya produktionskapaciteten kommer bidra till ökad efterfrågan på främst elektricitet. Biomassa kommer omfördelas från bl.a. värmesektorn till produktion av flytande bränslen och ersättning av andra fossila resurser. Samtidigt med denna ökning av energiefterfrågan i industrisektorn, sker en ambitiös energieffektivisering i industriprocesser för att reducera energibehovet. För bostadssektorn kommer energiefterfrågan minska med knappt hälften till 2050 genom att implementera energieffektiviseringsåtgärder samt åtgärder att byta ut uppvärmningssystem. Lågenergibyggnader kommer att vara den standard som implementeras vid renoveringar och vid nybyggnationer. Transporter kommer i stor utsträckning elektrifieras. Transportlösningar som är mer effektiva främjas. För de långväga luft- och sjöfartstransporterna kommer olika ersättningsbränslen för flyg- och fartygsbränslen introduceras. Totalt sett reduceras energiefterfrågan i transportsektorn, inklusive utrikes transporter, med drygt hälften till 2050.

Omställningsscenariot pekar, i likhet mot många andra energiscenarior idag, på det kraftigt ökade behovet av elektricitet. Nivån på ökningen beror på olika förutsättningar och prognoser kring bl.a. ökning av produktion av stål i Sverige. Omställningsscenariot visar att den omställning som driver på denna ökning av efterfrågan på elektricitet kommer etableras redan 2030 och sedan fortsätta i perioden fram till 2050. För att kunna möta den förväntade ökade efterfrågan måste utbyggnaden av kapacitet för elproduktion, infrastruktur för el, vätgas och elektrobränslen börjas byggas ut.

I omställningsscenariot driver ett antal processer på ett ökat behov av energiproduktion i Sverige, däribland industrisektorns omställning, ersättning av fossila resurser och dessa ersättningar kan inte enbart importeras (som är dagens situation) samt att befolkningsökning skapar ökad efterfrågan på bostadsyta och transporter. Omställningsscenariot inkluderar även processer inom alla sektorer som driver på för minskade energibehov, t.ex. energieffektiviseringsåtgärder och överföring till mer effektiva lösningar samt beteende förändringar som driver på för en reducerad energiefterfrågan. Omställningsscenariot är en kombination av båda dessa och lösningen ligger i en kombination av åtgärder.

Fyra punkter lyfts som avslutning till rapporten. *Omställningen för att nå klimatmålen har redan börjat och vi är mitt i den.* Det innebär att åtgärder måste fortsatt komma slag i slag för att kunna möta behov och åtgärder för framtiden. *Det kommer att ske en kraftig ökning av behovet av elkraft i framtiden och utbyggnad av elproduktion kommer behöva prioriteras.* En nära nog fördubbling av dagens elanvändning är att vänta år 2050. *Hållbara biobränslen är en begränsad resurs vilket förutsätter styrning.* Användningen måste ske där biomassan gör mest nytta i omställningen - omställningsscenariot visar att detta bl.a. inkluderar drivmedel för långväga transporter som inte kan elektrifieras. *Omställningen måste bygga på ambitiösa åtgärder för energieffektivisering och effektiva lösningar.* Reduktion av energibehov underlättar övergången till ett icke-fossilt energisystem.

Omställningsscenariot visar på att det inte finns någon enkel mirakellösning för omställningen utan det är en sammansatt lösning med flera komponenter som möjliggör omställningen. Att etablera långsiktighet och tydliga budskap om ambitioner kommer vara nödvändigt. Målet med omställningen är att uppnå nära nollklimatutsläpp från energisektorn 2040 och att långsiktigt bygga ett hållbart energisystem som kan fortsätta utvecklas efter 2050. Omställningsscenariot visar på hur ett sådant energisystem kan se ut samtidigt som det identifieras utmaningar där fortsatt arbete med samtal och tankar om möjliga alternativa vägar behöver diskuteras och utvecklas.

Förkortningar

CCS	Koldioxidinfångning och lagring (Carbon capture and storage)
CNB	Climate neutral behavior
CO _{2eq}	Koldioxidekvivalenter
e-bränslen	Elektrobränslen
ESABCC	European Scientific Advisory Board on Climate Change
EU	Europeiska Unionen
GROT	Grenar och toppar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEB	Lågenergibyggnad
LULUCF	Utsläpp och upptag av växthusgaser från markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk
NEU	Northern Europe
ON	Open Nordic
pkm	Personkilometer
SKA	Skogliga konsekvensanalyser
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM1 System
tkm	Tonkilometer
TYNDP	Ten-year Network Development Plans
k	Kilo, prefix som anger ett tusen (10 ³)
M	Mega, prefix som anger en miljon (10 ⁶)
G	Giga, prefix som anger en miljard (10 ⁹)
T	Tera, prefix som anger en biljon (10 ¹²)
W	Watt, anger effekt
Wh	Watt timmar, anger energi (1 Wh = 3 600 Joule)

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning.....	iii
Förkortningar.....	viii
1 Introduktion	1
2 Metod	3
3 Omställningsscenariots berättelse.....	6
4 Antagna förutsättningar i omställningsscenariot	8
4.1 Mål och ambitioner.....	8
4.1.1 Klimatmålen	8
4.1.2 Utfasning av fossila resurser.....	9
4.1.3 Energianvändningen i Sverige och import	9
4.2 Tillförsel potentialer	9
4.2.1 Vindkraft	10
4.2.2 Vattenkraft.....	11
4.2.3 Biomassa	12
4.2.4 Solenergi	13
4.2.5 Avfallsförbränning	14
4.2.6 Kärnkraft	15
4.2.7 Fossila resurser	16
4.3 Energianvändning	17
4.3.1 Industrisektor.....	18
4.3.2 Bostäder och servicesektor.....	21
4.3.3 Transportsektor.....	23
5 Omställningsscenariot 2050	26
5.1 Total energianvändning, elproduktion och klimat.....	26
5.2 Energianvändning inom industrisektor samt handel- och servicesektor.....	35
5.3 Energianvändning bostäder.....	37
5.4 Energianvändning transport.....	38
6 Diskussion	40
7 Slutsatser	44
8 Referenser	46

1 Introduktion

Sveriges energisystem är mitt i en rad av förändringsprocesser som på olika vis ställer krav och formar vårt framtida energisystem. Nödvändigheten att anpassa samhället till minskade utsläpp av växthusgaser i linje med Parisöverenskommelsen (UN 2015) omsätts i Europeiska Unionens (EU) ramverk och policys (European Parliament 2021) och därmed även i svensk lagstiftning. Till detta kan läggas att de resultat avseende reduktionen av växthusgasutsläpp går långsamt och de ambitioner som redovisas i nationella åtaganden räcker långt ifrån hela vägen för att nå målet om en temperaturökning på maximalt 1,5 grader (se t.ex. UNEP 2023). I och med att förändringstakten är långsam kommer de förändringar som är nödvändiga att behöva ske inom en allt kortare tidsrymd. I EU är det nuvarande målet nära nollutsläpp till 2050, och ett förslag om mål för 90-95% minskade nettoutsläpp till 2040 jämfört med 1990 års utsläppsnivåer ligger på bordet (ESABCC 2023).

Samtidigt sker teknisk utveckling och transformativa förändringar i industri, transport och energisektorerna i allt snabbare takt. Förnybara energislag som vind- och solkraft har blivit alltmer kostnadseffektiva (IRENA 2022) jämfört med icke-förnybara alternativ. Utbyggnaden av vind- och solkraft sker i en takt som överstiger de scenarier som tidigare redovisats.

Snabba förändringar syns även idag på energianvändningssidan. Både inom industri- och transportsektorer sker snabba förändringar och aktörer uttrycker högt ställda ambitioner om att göra investeringar som syftar till omställning bort från ett fossilberoende. Stålsektorn demonstrerar nu processer baserat vätgasreduktion istället för att använda fossilt kol. Vätgasen kommer framställas med el från förnybar elproduktion och då i huvudsak vindkraft (se t.ex. Fossilfritt Sverige 2021). Inom transportsektorn syns en ökad försäljning av eldrivna fordon, detta gäller inte minst inom kollektivtrafik och även ett ökat intresse för godstransporter. Sammantaget kan det konstateras att en kraftig elektrifiering av samhället är att vänta. Elanvändningen kommer att öka och samtidigt förändras efterfrågan på andra energibärare. En utmaning ligger i att säkerställa att effektiva lösningar skapas och att utbyggnation och drift inte görs på bekostnad av annan miljöpåverkan, hälsa och andra samhällsvärden.

Denna rapport presenterar ett långtidsscenario av Sveriges energisystem som sträcker sig fram till 2050. Energiscenarier som sträcker sig över lång tid handlar inte om att presentera en plan (*blueprint*) för omställning, utan syftar till att skapa underlag för att förstå och analysera möjliga utvecklingsvägar och att ge guidning och underlag för strategiska beslut. Ett långtidsenergiscenario

kan hjälpa till att ge förslag på huvudutmaningar och åtgärder som kan komma att vara nödvändiga i senare skeden om uppskalning av en tekniklösning etableras. I och med de stora omställningar som det svenska energisystemet står inför idag så blir långtidsscenarierna i stor utsträckning explorativa – det handlar om att skapa robusta förutsättningar för att ha måluppfyllelse och hantera omvärldsförändringar som kan komma i framtiden.

Sverige är inte unikt i att befinna sig i denna omställning, liknande processer sker runt om i Norden, Europa och världen. Målet i dessa omställningsprocesser är att minska klimatutsläpp, men även att skapa hållbara och konkurrenskraftiga teknikskiften i industrin samt samhällsförändringar. Dessa omvärldsförändringar kommer att påverka Sverige både direkt och indirekt. Sveriges nationella utsläpp av växthusgaser uppgick år 2022 till 45,2 ton koldioxidequivivalenter ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) (Naturvårdsverket 2023b) vilket motsvarar omkring 4,3 ton $\text{CO}_{2\text{eq}}$ per person och år. Ser vi på konsumtionsbaserade utsläpp så uppgår de till nästan 8,0 ton $\text{CO}_{2\text{eq}}$ per person och år och detta illustrerar hur svenskarnas livsstil är förknippat med omvärlden.

Syftet med rapporten är att utveckla ett långtidsenergiscenario för Sverige fram till 2050, kallat *omställningsscenariot*. Fokus finns på att undersöka möjligheter att nå klimatmålsuppfyllelse, energieffektivisering och miljöhänsyn. Scenariot inkluderar mål om utfasning av fossila resurser i energisystemet till 2040 samt den gröna omställning som förväntas i den industriella sektorn. Scenariot inkluderar transport-, industri-, bostads- och servicesektorer samt har en hög ambition avseende energieffektivisering i alla sektorer. Scenariot undersöker även hur en begränsning avseende nettoimport av energiresurser och energibärare över året kan hanteras och vilka effekter det får på behov energitillförselssidan. Omställningen handlar om att fasa ut de fossila resurserna ur energisystemet till 2040, men även en omställning av industrisektorn för produktion utan fossila insatsmaterial, vilket innebär en rad förändringar i energianvändning. Rapporten utgör ett underlag för WWF Sverige att utforma förslag på lösningar och strategier inom energi- och klimatområdet. De resultat och rekommendationer som redovisas i rapporten skall *inte* ses som ett ställningstagande av WWF Sverige i dessa frågor.

Rapporten inleds med en introduktion som följs av en beskrivning av den metod (framför allt modellen) som använts för att utveckla scenariot. Metodpresentationen följs av ett kapital som ger en översikt av omställningsscenariot och dess prioriteringar vilket följs av beskrivning av de ingående förutsättningarna som är definierade i modellen, bland annat utvecklingsutrymme, historisk efterfrågan och begränsningar. Kapitel 5 presenterar det utvecklade omställningsscenariot. I kapitel 6 förs en diskussion kring några av huvudpunkterna från resultaten och avslutas i kapitel 7 med slutsatser.

2 Metod

Energisystemsscenarier kan utvecklas på olika sätt. I arbetet som ligger till grund för denna rapport har en kostnadsoptimerande modell, kallad TIMES²-Northern Europe (NEU), använts. Denna modell utvecklar, baserat på en integrerad analys av alla ingående sektorer och variabler, ett scenario med kostnadsoptimala investeringar och utvecklingsvägar för att tillfredsställa de energibehov som finns. Detta görs inom de ramar som har definierats för ett specifikt scenario.

TIMES-NEU modellen bygger på den öppna nordiska modellen Open Nordic (ON)-TIMES och täcker alla sektorer inom energisystemet (för mer information om ON-TIMES se t.ex. NER 2023). TIMES-NEU modellen innehåller ett stort antal möjliga teknologier och energibärare att investera i och ger därmed en stor bredd i analyserna. Modellen inkluderar Sverige, Finland, Norge, Danmark, Tyskland och Polen, där Sverige, Finland och Danmark är uppdelade i elhandelsområden. Vidare finns kopplingar mellan länderna för att följa upp och hantera handel över gränser, det finns även en databas som hanterar priser för en global bränslemarknad. Denna rapport fokuserar det svenska energisystemet.

Modellens tidshorisont är 2050 och den körs i 5-årsteg med en rullande *fore-sight* period på 10 år. Det innebär att modellen jobbar med att finna strategiska lösningar för utmaningar som ses komma 10 år senare i scenariot. Modellen är avstämd mot historiska data för de senaste åren. I presentationer av resultat visas utfallen för 2020, 2030, 2040 och 2050 i syfte att visa omställningens huvuddrag. Modellen arbetar dock med en högre tidsupplösning. För att fånga den förnybara energins intermittens och olika efterfrågemönstren har modellen en upplösning på 56 *timeslices* per år. Alla årets timmar delas in i olika "driftssituationer" för att fånga variabiliteten och systemdriften, t.ex. låg sol- och vindelsproduktion men hög efterfrågan, eller låg efterfrågan med hög förnybar produktion. Dessa *timeslices* väljs så att man fångar in perioder där systemet har goda marginaler kring tillgång och efterfrågan, och andra där sol- och vindkraftsproduktion är låg med samtidigt en hög belastning. Energisystemsmodellen arbetar för att hitta lösningar inom ramen för förutsättningarna som satts där efterfrågan på energi från de olika sektorerna kan tillgodoses på mest kostnadseffektiva sätt. Detta inkluderat investeringar i nödvändig överföringskapacitet eller att utnyttjande av olika energislag prioriteras för olika ändamål för att klara driftsituationerna. Energisystemsmodellen inkluderar inte kostnader på externaliteter som miljöpåverkan på djur- och växtliv.

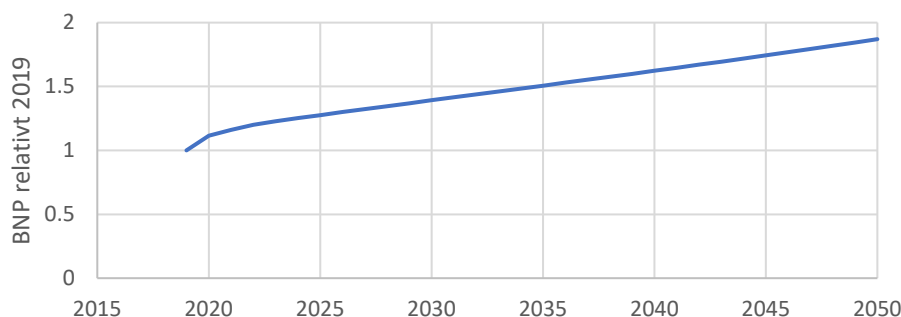
² TIMES är en förkortning av The Integrated MARKAL-EFOM1 System, där MARKAL är ett tidigare system för energisystemsmodellering.

Sverige representeras i modellen av fyra regioner vilka följer Sveriges fyra elprisregionerna (SE1, SE2, SE3 och SE4). I varje region representeras de olika slutliga energisektorerna (industri, tjänster, bostäder och transport) med olika grader av detaljnivå, t.ex. i bostadssektorn representeras olika typer av byggnader (t.ex. flerbostadshus och fristående byggnader, olika åldrar, landsbygd/stad) för att fånga utvecklingen av golvyta (från varje byggnadstyp) och dess motsvarande energibehov. I varje region modelleras produktionen av el och värme, vilket representerar de olika kraftverken som i sin tur är uppdelade på olika kategorier. I energisystemsmodellen inkluderas *stranded assets* (infrastruktur som förlorar sitt värde pga. ändrade omständigheter) i bedömningen för kostandsoptimerad utveckling. För vindkraft återfinns landbaserade vindkraftverk och havsbaserad vindkraft, där den sistnämnda kategorin även delas upp i kustnära och havsbaserade vindkraft.

För transporter inkluderas alla nationella transporter samt utrikes sjö- och luftfart. För sjöfart inkluderar detta transporter mellan svenska och utländska hamnar samt i förekommande fall trafik mellan två utländska hamnar. För luftfart inkluderas bränsle som är köpt i Sverige men använts för flygningar till utrikesdestinationer. Väg- och bantrafik inkluderas inte i internationella transporter.

För klimatberäkningar ingår endast de energirelaterade växthusgasutsläppen, d.v.s. utsläpp och upptag av växthusgaser från markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (LULUCF) ingår inte. Modellen inkluderar utsläppsfaktorer på bränslen men inkluderar inte byggnationer av nya kraftanläggningar och de utsläpp som är en del av importerade produkter till Sverige.

Befolkningsökningen är definierad enligt statistikmyndighetens prognos befolkningsprognos för Sverige SCB (2023) och anger en befolkning år 2020 på knappt 10,4 miljoner och år 2050 en population på 11,8 miljoner. För den ekonomiska utvecklingen har Konjunkturinstitutets långtidsprognos (KI 2023) använts (Figur 5).



Figur 5: Relativ utveckling av BNP 2019-2050 (KI 2023).

Det utvecklade scenariot är baserat på kostnadsoptimering (d.v.s. representerar ett scenario där modellen söker efter en så låg kostnad som möjligt för att leverera den energiefterfrågan som finns i systemet inom ramen för olika begränsningar). Detta är samma ansats som använts i bland annat Energimyndighetens långtidsscenarior (Energimyndigheten 2023b) och en rad nordiska studier (Norden och IEA 2013; Wråke *et al.* 2021a). Förutom att ansatsen är densamma så är den grundläggande energisystemsmodellen samma i de studierna som i den föreliggande studien – det som skiljer går att finna i begränsningarna och förutsättningar inom vilket modellen skall finna sitt kostnads-optimala scenario. Man kan förenklat säga att denna scenarioutvecklingsmetod berättar "*vad du får*" under vissa givna förutsättningar. Detta kan ställas med så kallade *back-casting* metoder där resultat är mer av arten "*vad du vill ha*" och sedan en potentiell väg dit. Dessa scenarier utvecklas med ett specificerat slutmål. Scenarier som tagit sitt avstamp i en back-casting-ansats har använts i många energiscenarier inom miljörörelsen (se t.ex. Gustavsson *et al.* 2011; Naturskyddsföreningen 2019) där den metoden de ger utrymme för att hantera transformativa förändringar. Svårigheten i den typen av scenariobyg-gande ligger bl.a. i detaljgrad och hantering av den enorma komplexitet som finns i energisystemet. Den modell som använts i detta scenario skapar utifrån angivna förutsättningarna den mest kostnadseffektiva lösningen uppdelat på år och aspekter kring framtida behov.

Omställningsscenariot är en utveckling av *Climate neutral behavior* (CNB) scenariot som presenterades i Nordic Clean Energy Scenarios (Wråke *et al.* 2021a; Wråke *et al.* 2021b). CNB scenariot avser åtgärder för energi- och materialeffektivitet som reducerar efterfrågan samt antagande om stark acceptans från medborgare, politiker och privatsektor i omställningen som ytterligare möj-liggör omställningsarbetet. CNB scenario har ytterligare utvecklats för att in-kludera t.ex. justerade potentialer för olika kraftslag, framskjutet mål (från 2045 till 2040) om nära nollutsläpp från energisystemet och utfasning av fos-sila resurser.

3 Omställningsscenariots berättelse

Omställningsscenariot är utvecklat kring frågan om hur en omställning i Sverige kan se ut förutsatt att energieffektivisering, naturhänsyn och nära nollutsläpp av växthusgaser från energisystemet i Sverige nås 2040. Detta sker samtidigt med en omställning av basindustri i Sverige bort från fossilberoende. Detta kräver en utbyggnation av infrastruktur såsom ledningsnät och pipelines samt investeringar i nya produktionsanläggningar för bland annat vätgas, elkraft och industriprocesser. Det är även en omställning mot mer effektiva lösningar, t.ex. ökad elektrifiering av transporter, förbättrad isolering i byggnader samt implementering av åtgärder som helt undviker en energitjänst, som t.ex. distansarbete eller att välja bort onödiga resor. I många avseenden är detta en unik situation där vi ser hur klivet från en situation med förhållandevis stort beroende av fossila resurser till en mer cirkulär och förnybar ekonomi kommer att ske under en relativt kort period. Tiden som finns i anspråk definieras till stor del av de klimatåtaganden som Sverige har tagit beslutat om och behöver ta. Förutom att nå målen vid ett visst årtal kommer frågan om ambitiösa minskningar längs vägen för att inte i onödan minska den kvarvarande utsläppsbudgeten (se t.ex. Stoddard och Anderson 2022). Det finns således en tidsaspekt där de ackumulerade utsläppen under hela perioden och mål vid specifika årtal.

Omställningsscenariot utvecklas med hänsyn till sociala, ekonomiska och miljömässiga värden. Detta implementeras via begränsningar för olika resursslag (se kapitel 4). En ytterligare ambition i omställningsscenariot är att de energier eller resursbehov som finns i Sverige som del av omställningen ska kunna produceras här. Scenariot inkluderar mekanismer som uppmuntrar till och drar nytta av handel med områden runt Sverige, men samtidigt strävar omställningsscenariot efter att på årsbasis inte ha stora netto-importer av bränslen eller andra energiresurser. Denna ambition implementeras i scenariot från år 2035. Angreppssättet innebär *inte* ett ifrågasättande av internationell handel som sådan, utan ska ses som en konsekvens av att scenariot fokuserar på en omställning som inte skapar en export av miljö- och sociala problem till andra delar av världen.

Energieffektivisering är ett prioriterat område i omställningsscenariot där åtgärder både för att stimulera effektivare processer och för att etablera högre energieffektivitet i bl.a. byggnader implementeras. Till detta läggs åtgärder som syftar till att skapa mer effektiva energilösningar, t.ex. att föra över transporter från individuella lösningar till kollektivtrafik. Dessa åtgärder erbjuder samma energitjänst (till exempel persontransport) men till en lägre energiinsats.

Samtidigt måste omställningsscenariot kunna hantera en ökad energianvändning under perioden som omställningsscenariot avser. Denna ökning är främst kopplat till omställningen som kommer behöva ske i industrisektorn. Omställningsscenariot är utvecklat i en omvärld där åtgärder och förändringar för att fasa ut fossila resurser ur energisystemet sker. En utgångspunkt i omställningsscenariot är att det finns en hög grad av stöd till de åtgärder som måste genomföras. Detta inkluderar offentlig och privat sektor samt befolkningen i stort. Stödet realiserar både ur perspektivet att klimatomställningen är nödvändig samt att omställningen bidrar till andra kvalitéer och fördelar som materialiseras via åtgärderna. Detta inkluderar förbättrad miljö, långsiktigt arbete för en starkare konkurrenskraft och innovationsprocesser (se t.ex. WWF och BCG 2023).

4 Antagna förutsättningar i omställningsscenariot

I detta kapitel beskrivs de mål och förutsättningar som formar det utvecklade energiscenariot. Vidare presenteras de potentialer som är angivna för de olika produktionsslag samt energianvändning i sektorerna. Potentialer som är angivna i detta kapitel sätter ramarna inom vilket omställningsscenariot senare modelleras.

4.1 Mål och ambitioner

Scenariot beskriver en utveckling av ett energisystem där ett antal mål uppfylls. Målen är implementerade i modellen så att de kommer uppfyllas. Stegen för att nå målet utvecklas av energisystemsmodellen med hänsyn till satta förutsättningar.

4.1.1 Klimatmålen

Sverige har antagit en klimatlag som syftar till att det inte skall finnas några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären 2045 (Regeringen 2017). Inom EU är målet satt att vara klimatneutral till 2050 (European Parliament 2021). Samtidigt står det klart att länders åtgärder och planer för att nå Parisavtalets ambition inte är tillräckliga (UNEP 2023). European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC 2023; ESABCC 2024) har rekommenderat högre ambitioner och snabbare utfasning där energisektorns klimatutsläpp bör vara nära noll redan 2040.

I omställningsscenariot har målet satts att uppnå nära nollutsläpp från energisystemet 2040 vilket alltså är fem år tidigare än de svenska målen som gäller idag. Här avses växthusgasutsläpp som är *direkt* associerade till energisystemet, avräkningar för klimatåtgärder på andra platser eller upptag i biomassa räknas inte in. Internationella luft- och sjöfartstransporter (passagerare och gods) från Sverige inkluderas i scenariot. Detta innebär att utsläpp från bränslet för flyg och båtar skall inkluderas även om själva utsläppen faktiskt sker i annat land.

Tekniska lösningar för koldioxidinfångning, så kallad *Carbon capture and storage* (CCS), begränsas inte och fyller funktion i t.ex. avfallsförbränningsanläggningar och vissa industrianläggningar som inte kan undvika fossilbaserade klimatutsläpp, men rollen är begränsad i och med utfasning av fossila resurser. Energisystemsmodellen strävar efter att finna energilösningar i systemet som når målen om nära nollutsläpp 2040 och när detta mål nås implementeras inte ytterligare reduceringar.

4.1.2 *Utfasning av fossila resurser*

I scenariot kommer fossila resurser att fasas ut ur det svenska energisystemet i steg enligt:

- utfasning av kol till 2030,
- utfasning av naturgas till 2035 och
- utfasning av de sista fossila bränslena, inklusive petroleumprodukter, 2040.

Fossila resurser återfinns till stor del inom transportsektorn och industrisektorn och utfasningen kommer ställa krav på sektorerna att skapa förutsättningar för alternativa produktionslösningar och slutanvändning. Produktion av nya ersättningsbränslen kommer etableras under perioderna fram till utfasningen. Det finns en rad pågående initiativ för minskning av kolberoende inom stålsektorn (Pei *et al.* 2020; Fossilfritt Sverige 2021) och en rad initiativ inom området för avancerade bränslen som ersättning för petroleumprodukter (Energimyndigheten 2021).

4.1.3 *Energianvändningen i Sverige och import*

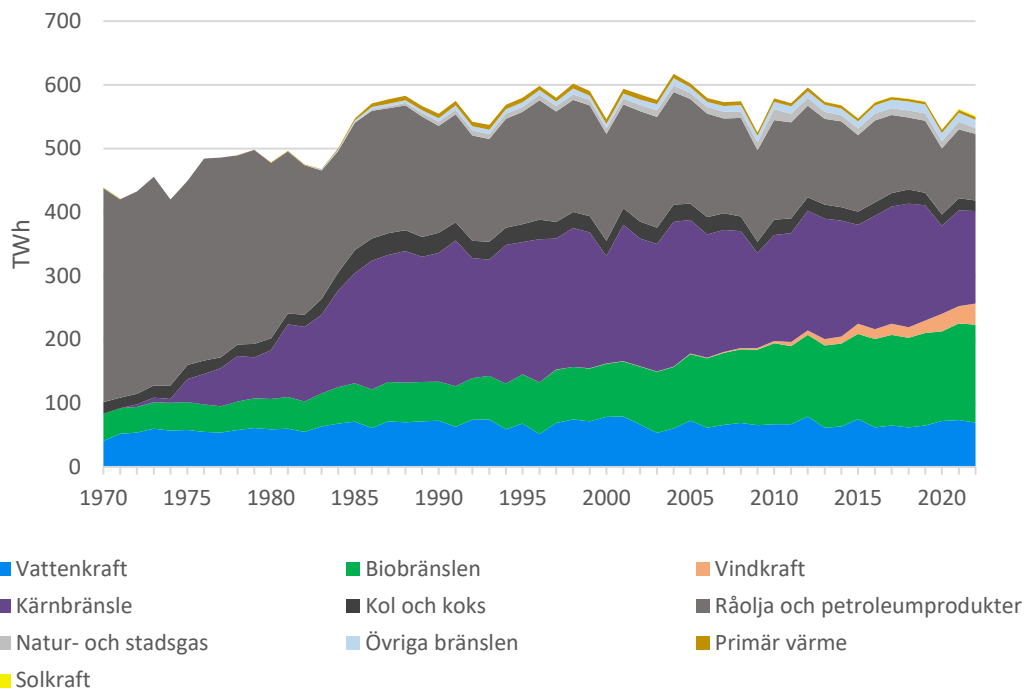
Fokus är på Sverige och det är även där som systemgränserna är satta. En central aspekt i scenariot är att förstå hur de energibehov som finns, och kommer uppstå som del av omställningen i Sverige, kan mötas. Import och export över landets gränser begränsas inte men efter 2035 sätts ett krav på att det inte uppstår en nettoimport på årsbasis av biobränslen, elektrobränslen eller elektricitet. Syftet med detta är att tydliggöra den nödvändiga utvecklingen av produktionskapacitet av avancerade bränslen och kapacitet att generera den efterfrågade elkraften som industriutvecklingen efterfrågar.

Import och export är en naturlig del av energisystemet över året och nödvändig för att hantera variationer i belastning och efterfrågan. Begränsningen kring att inte ha en nettoimport på årsbasis avser att reducera risken att miljöproblem uppstår i andra länder som ett resultat av omställningen av energisystemet i Sverige.

4.2 *Tillförsel potentialer*

I energisystemsmodellen definieras maximala potentialer för de olika ingående kraftslagen. Energibehoven i efterfrågesektorerna tillgodoses inom ramar för dessa satta potentialer. De angivna potentialerna nås nödvändigtvis inte i själva scenariot senare. Beskrivningen av potentialer här syftar till att ge förståelse för de ramar som energisystemsmodellen verkar inom.

Energisystemet har genomgått stora förändringar i fördelningen av olika energislag i energimixen under de senaste 50 åren (Figur 6).

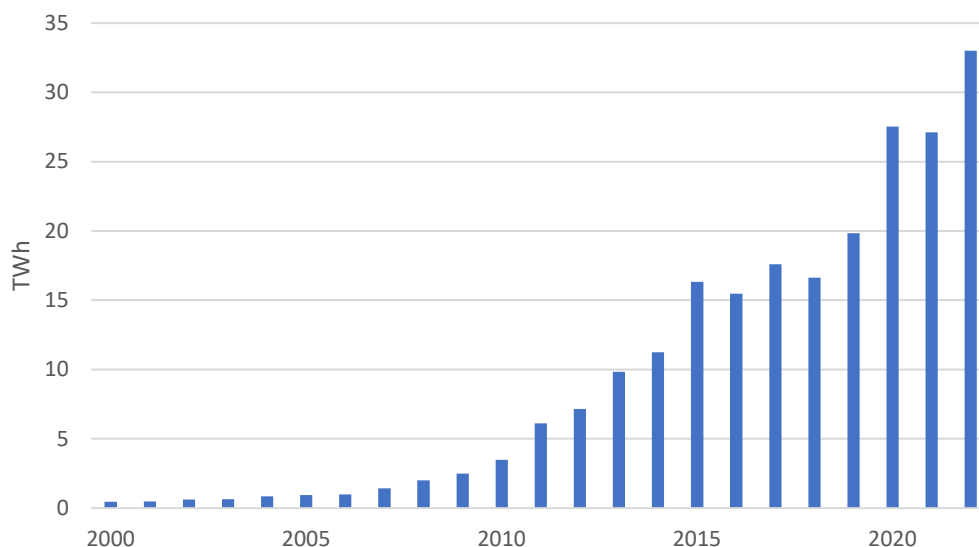


Figur 6: Energitillförsel till det svenska energisystemet 1970-2022 (Energimyndigheten 2023d).

Figur 6 inkluderar förluster i systemet där framför allt kärnkraft har en stor förlust i och med energi i kylvatten kyls bort i havet.

4.2.1 Vindkraft

Vindkraftexpansionen i Sverige har gått väldigt fort (Figur 7) och potentialen för ytterligare etableringar bedöms vara stora. Redan 2025 förväntas elproduktionen närma sig omkring 50 TWh per år (Energimyndigheten 2023e).



Figur 7: Elproduktion från vindkraft i Sverige 2000-2022 (Energimyndigheten 2022; Energimyndigheten 2023d).

Vindkraft kan vara havsbaserad och landbaserad. Idag byggs ofta vindkraftsanläggningarna som vindkraftsparker och därmed fås bättre ekonomi i anläggningarna och det blir samtidigt tydliga verksamheter i området där vindkraftsparken finns. Då ett vindkraftverk idag är av betydande storlek syns de även på långt håll och är ett ingrepp i naturen. Energimyndigheten (2023e) visar hur potential på upp till 120 TWh havsbaserad vindkraft skulle kunna utformas i enlighet med havsplaner.

I modellen finns en potential för 28 GW landbaserad vindkraft respektive 33 GW havsbaserad vindkraft för 2050. Den installerade effekten av vindkraft i Sverige 2022 var 14 GW landbaserad vindkraft och 0,2 GW havsbaserad vindkraft (Energimyndigheten 2023a).

4.2.2 Vattenkraft

Sverige har sedan år 2000 haft lite drygt 16 GW installerad effekt i vattenkraft och elproduktionen uppgick till 72 TWh under 2020; under ett normalår är bidraget 68 TWh (Energimyndigheten 2022). Den utbyggnad som skett har, historiskt och men även fortfarande i viss utsträckning en negativ påverkan på ekosystem och naturmiljöer i och kring vattendrag. Åtgärder för miljöförbättringar implementeras i och med krav att moderna miljövillkor skall gälla för vattenkraften i Sverige, vilket är ett arbete som troligtvis kommer att pågå under hela perioden fram till 2045 (Regeringen 2018; Havs- och Vattenmyndigheten 2023).

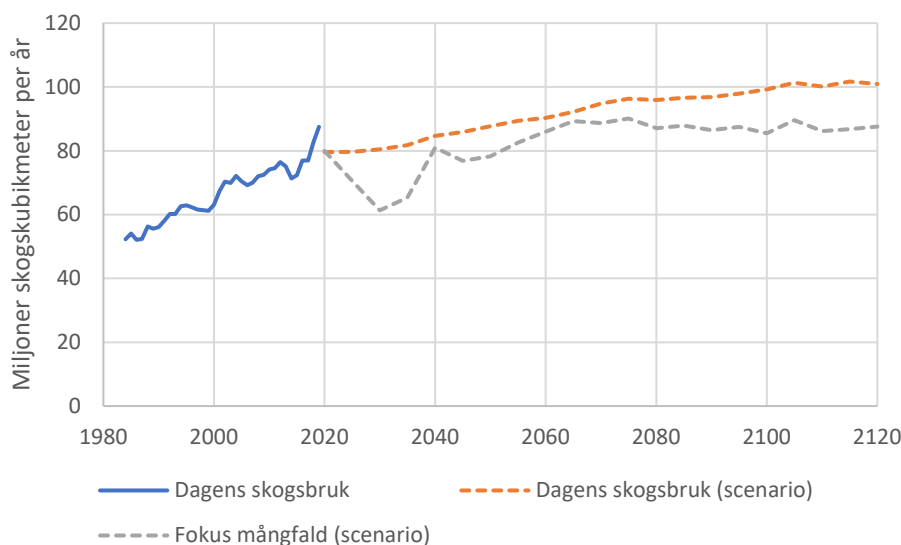
Den potential som i modellen är angiven för vattenkraft är densamma som finns installerad idag. Eventuella effekthöjande förändringar i existerande större anläggningar, samt förändringar i nederbörd och liknande, antas vägas upp av utnyttjas i samband med den förlust av elproduktion som ofta blir resultatet då miljöstatus förbättras kring för vattendrag kring vattenkraftsanläggningar.

4.2.3 *Biomassa*

Biomassa får en förändrad roll i det framtida energisystemet då fossilbaserade kolföreningar behöver ersättas med kolföreningar baserade på förnybara resurser, där biomassa från land-, sötvatten- eller havsekosystem är en möjlighet.

Miljömålet levande skogar, som syftar till att skydda skogens produktionsvärde samtidigt som sociala- och kulturmiljövärden värnas och den biologiska mångfalden bevaras, bedöms inte kunna nås (Naturvårdsverket 2023a). Skogsbruket skall utföras med lika hänsyn till produktionsvärden som för miljövärden, men ofta blir fokus på produktion. Sättet som skogen brukas påverkar även hur skogen fungerar som en kolsänka. Det kol som binds i skogens biomassa är betydande och skogsbrukets utformning är en variabel som anger hur omfattande inbindningen av kol blir (se t.ex. Skogsstyrelsen 2022; Zanchi och Eriksson 2023).

Skogliga konsekvensanalyser (SKA) 2022 (Skogsstyrelsen 2022) innehåller bedömning av skogsråvara, biologisk mångfald, potentiell kolsänka i skogen samt andra nyttigheter från skogen. För denna rapport har ambitionen varit att närma sig en biomassaanvändning och utveckling av efterfrågan som följer det SKA 2022 scenario som kallas "Fokus mångfald" vilket ökar variationen och biologisk mångfald, men som även uppvisar ökad kolinlagring i skogen under en kort- och mellanlång tidsperiod. Figur 8 beskriver avverkningen i svenskt skogsbruk enligt scenario "Dagens skogsbruk" och "Fokus mångfald" (Skogsstyrelsen 2023a).



Figur 8: Avverkning i svenskt skogsbruk 1984-2019 (Skogsstyrelsen 2023b) samt scenario "Dagens skogsbruk" och "Fokus mångfald" (Skogsstyrelsen 2023a).

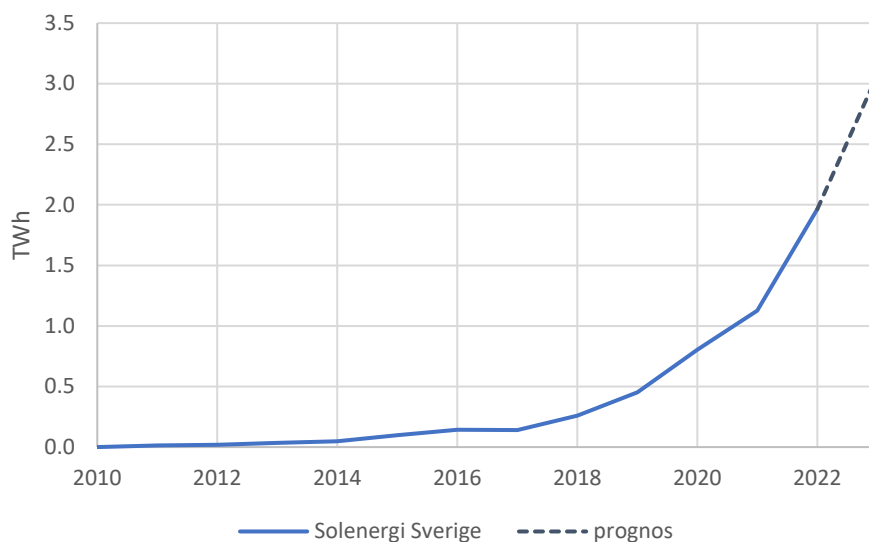
Biomassa som används i energisektorn är många gånger biflöde eller en delprocess i användningen av en biomassaressurs för olika användningsområden. I exempelvis fallet med ett träd så finns delar som går till massaved och annat till timmer. Grenar och toppar (GROT) kan användas för energiändamål. Längs produktionskedjan uppstår det bi- eller restprodukter, exempelvis sågspån kan användas för pellets och svartlut från sulfatprocessen vid pappers-tillverkning kan användas för energiändamål.

Potentialuppskattningen för biomassa som används som en övre teknisk begränsning i omställningsscenariot är baserade på Nordic Clean Energy Scenario (Wråke *et al.* 2021a). Potentialen inkluderar en reduktion av möjliga mängder mellan år 2020 och 2040 i skogsbaserad biomassa, detta är i linje med "Fokus mångfald" scenariot i SKA 2022³. Det antas att konkurrensen om biomassa från jordbruk ökar och därmed reduceras potentialen som kan användas i energisektorn från jordbruket.

4.2.4 Solenergi

I Sverige har utbyggnaden av elproduktion från solenergi ökat väsentligt under senare år, dock från en låg nivå. Enligt Svensk Solenergi (2023) bidrog sol-el till det svenska elsystemet med knappt 2 TWh under 2022 och med 3 TWh (Figur 9).

³ Scenariot *Fokus Mångfald* i SKA 22 är det scenario för skogsbruket som ligger närmast WWF bedömning av behov av skydd, hänsyn och ett mer naturnära skogsbruk.



Figur 9: SolenergiproduktionElproduktion från solenergi från nätanslutna anläggningar Sverige 2010-2022 (Energimyndigheten 2023c) och prognos 2023 (Svensk Solenergi 2023).

Solel finns både i större och mindre anläggningar och expansionen har skett inom båda dessa segment. För anläggningar på byggnader kommer elproduktionen delvis gå till den egna användningen och delar säljas till elnätet, solcellsparkar säljer all produktion. 2022 var den installerade solelseffekten knappt 2,4 GW vilket representerade en 51% ökning av installerad effekt jämfört med året innan (Svensk Solenergi 2023). Den potential som är satt i modellen är 38 GW.

Solvärme är en potentiell lösning för uppvärmning för alla sektorer. Stora delar av investeringar i solenergi kommer ligga på fastigheter, offentliga fastigheter, industribyggnader och markanläggningar. Solvärme kan skapa möjlighet att minska värmebehovet under delar av året.

4.2.5 Avfallsförbränning

Sverige har 35 avfallsförbränningsanläggningar med energiåtervinning. Totalt levererades 18 TWh värme, 3 TWh el och 20 GWh kyla under 2022 (Avfall Sverige 2023). Anläggningarnas förbränningskapacitet övergår den mängd svenskt avfall som kan vara aktuellt för förbränning och vi har därmed en nettoimport av avfall för förbränning.

Inom EU ges allt större prioritet till cirkulära lösningar där material återvinns och återanvänds, så kallad cirkulär ekonomi (European Commission 2020). Avfallsdirektivet (European Parliament 2018) anger att alternativ hantering (återvinning och återanvändning) är att föredra före förbränning med

energiåtervinning. Förbränning är snäppet ovan deponi i avfallshierarkin och ger inte möjlighet att recirkulera material i ekonomin. Inom perioden fram till 2050 kommer avfallsmängder och sammansättningar att reduceras. Återvinning och återanvändning av material är att föredra jämfört med förbränning för energiåtervinning och denna trend ligger till grund för en minskad projektion av avfallsförbränning i energisystemet (Tabell 1).

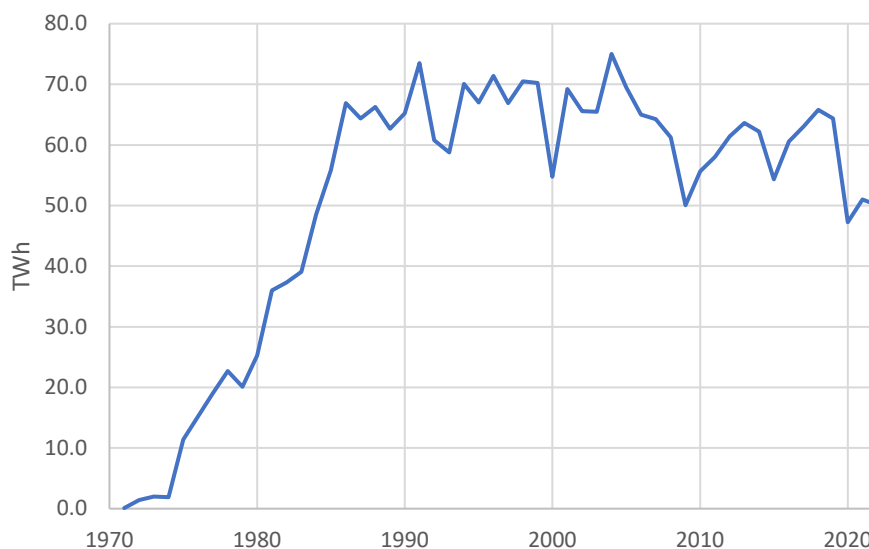
Tabell 1: Projektion för avfall i modellen.

TWh/år	2020	2030	2050
Avfall (mixat)	23	14	13

Den fossila andelen i avfallsbränslet är svår att undvika, t.ex. fossilbaserad plast och vissa andra delar kommer att finnas kvar även efter 2040.

4.2.6 Kärnkraft

Sverige har sedan 70-talet haft ett tillskott av elektricitet från kärnkraftsanläggningar. Under senare år har produktionen minskat i och med att kärnkraftsreaktorer har lagts ned (Figur 10).



Figur 10: Kärnkraftsproduktion i Sverige 1970 – 2022 (Energimyndigheten 2023c).

I omställningsscenariot kommer de kvarvarande kärnkraftsreaktorerna att avvecklas inom perioden fram till 2050. Anläggningar tillåtas ha livstidsför-längning, men inga nya anläggningar byggs. Den sista reaktorn stängs ned 2045.

Utfasningen av kärnkraft kan inom ramen för omställningsscenariots berättelse motiveras från två perspektiv. Scenariot prioriterar långsiktiga lösningar

där prioritet är på förnybara energikällor om så är möjligt. Kärnkraft är inte ett förnybart även om den är fossilfri. Den andra aspekten är att det kärnbränslet som används i Sverige importeras. Sverige har haft viss uranbrytning under 60-talet då uran utvanns från alunskiffer i Ranstadsverket i Västergötland (Höglund 2010) men verksamheten lades ganska snabbt ned. Utifrån ambitionen att Sverige skall klara sina egna energibehov på årsnettobasis kommer kärnkraft falla bort då kärnbränslet importeras till Sverige⁴. Import av kärnbränsle pågår tills sista anläggningen inte längre är i drift 2045⁵.

4.2.7 Fossila resurser

Sveriges användning av fossila resurser återfinns främst i transport- och industrisektorn och kan delas upp i oljebaserade produkter, kol och naturgas. Sverige har ingen egen utvinning av vare sig kol, olja eller naturgas. Sverige har en relativt stor raffineringsindustri där importerad råolja raffineras till olika petroleumprodukter som sedan exporteras. Exporten av fossila bränslen uppgick till 181 TWh 2021 (Energimyndigheten 2023a).

För petroleumprodukter så är transportsektorn det område där mest används. Totalt uppgick användningen av petroleumprodukter i Sverige till 78 TWh år 2021. Transporter, inklusive utrikes sjöfart, stod för 60 TWh av dessa, följt av industri med 9 TWh (Energimyndigheten 2023a).

Kol används främst inom industrin där stålindustrin står för den största efterfrågan. Kol och koks⁶ används som reduceringsmedel i produktionsprocessen. Användning resulterar även i masugns gas som används till värme- och elproduktion. Totalt användes 15,4 TWh kol i Sverige 2021 varav 9,3 TWh användes i koksverk följt av industrianvändning 6,0 TWh. Fjärrvärmesektorn använde 0,1 TWh kol (Energimyndigheten 2023a).

Naturgasanvändningen uppgick 2021 till 12,4 TWh, där industri använde 4,2 TWh och icke-energiändamål använde 4,2 TWh. Resterande 4,0 TWh fördelades på el och fjärrvärme (2,0 TWh), bostäder och service (1,5 TWh) och transporter (0,5 TWh) (Energimyndigheten 2023a).

Potentialer för fossila resurser omfattar inte potentialuppskattningar på samma sätt som för andra energikällor och för dessa ställs krav på utfasning av dessa i enlighet med mål för energisektorn. Enligt denna utfasningsambition så gäller (som tidigare nämnts):

⁴ Sverige har sedan augusti 2018 lagstiftning som tar bort möjligheten att få tillstånd för utvinning, brytning och prospektering av uran i Sverige (Prop 2018).

⁵ Detta är ett avsteg från regeln om netto-import av bränslen på årsbasis.

⁶ Koks är kol som via en pyrolysisprocess omvandlats till koks.

- Kol – utfasning till 2030
- Gas – utfasning till 2035
- Alla petroleumprodukter – utfasning till 2040

Det kommer att finnas några undantag till detta: dels fossila komponenter i avfallsförbränning som inte går att undvika och en mindre mängd fossilt kol som används som insatsmaterial i ståltillverkningen⁷.

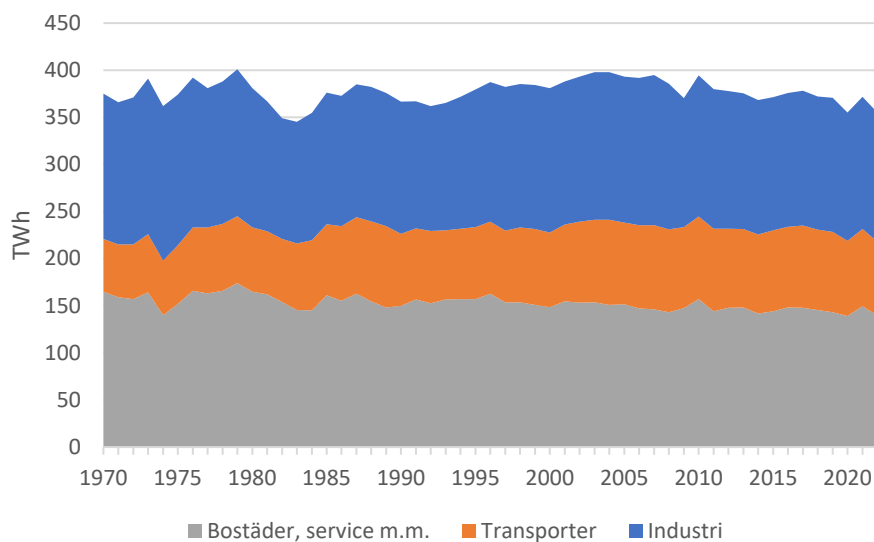
4.3 Energianvändning

I detta avsnitt anges hur energimodellen hanterar energiefterfrågan i de olika sektorerna. Användningen av energi i samhället skapar nytta i form av verksamheter, tjänster och komfort. Tillgång på energi i avseende på både effekt och energi är ofta nödvändiga för att kunna etablera nya verksamheter och bostäder. Detta är tydligt i omställningsscenariot som inkluderar en rad nya verksamheter som är helt beroende på framför allt elproduktion och även vätgas (som i sig kräver el). Det innebär att ny elproduktion kommer krävas för att klara behoven i nya verksamheter. Att verka för att öka energieffektiviteten är ett viktigt samhällsmål och lyfts i de globala utvecklingsmålen, mål 7.3 (UN 2023). I EU återfinns energieffektivisering som en central del i att kunna nå de klimatmål som satts upp (European Parliament 2023). I omställningsscenariot antas långtgående ambitioner för energieffektiviseringar vara implementerade inom alla sektorer⁸.

Sveriges energianvändning i bostads-, service-, transport- och industrisektorerna har varit relativt stadig sedan 1970 och legat på omkring 370 TWh per år (Figur 11). Energianvändningen har skett i ett sammanhang av ökad ekonomisk aktivitet och även en ökad befolkning. Under perioden fram till 2050 kommer det behöva ske ett antal stora förändringar som är ett resultat av omställningen från fossila resurser men även som del av energieffektivisering samt förändringar i efterfrågan av energitjänster.

⁷ Detta undantag för kol återfinns i energisystemsmodellen som 'stålbränsle'.

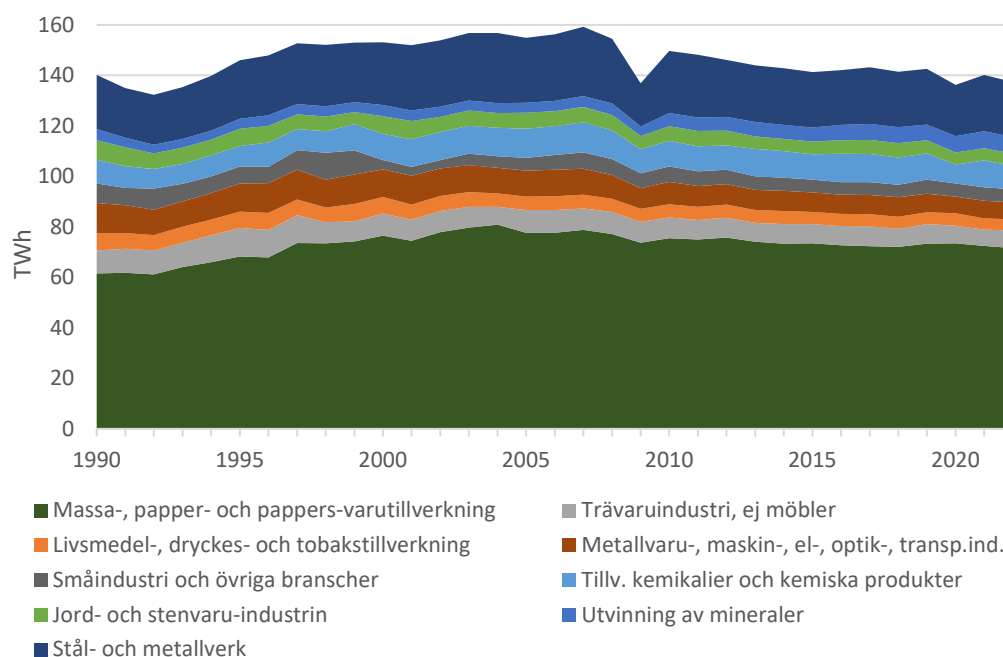
⁸ Idag diskuteras alltmer energieffektiviseringar utifrån å ena sidan effektiviseringar av existerande lösningar, d.v.s. att man får samma ljusmängd med mindre insats av energi (istället för lysrör används en LED armatur), och å andra sidan av det som kallas på engelska kallas "*sufficiency*" åtgärder. *Sufficiency* är svårt att översätta på svenska men handlar om förändringar som skapar tillräckliga energitjänster och möjligen kan man säga att det handlar om begränsningar men det implicerar att någon lägger en begränsning utifrån. Det handlar snarare om åtgärder som minskar energianvändningen samtidigt som användaren ser över och kanske omformulerar den energitjänst som levereras. Ett exempel är under den period av höga elpriser 2022 då många sänkte inomhustemperaturen och satte på sig lite mer kläder inne. Ett annat exempel är att åka kollektivt istället för att ta egen bil, i båda fallen får användaren energitjänsten transport men den levereras baserat på olika tekniskalösningar. Potentialen i *sufficiency* åtgärder är mycket stor men kräver ofta kombinationer av beteendeförändring och incitament som gynnar detta. Se vidare på t.ex. Bourgeois *et al.* (2023) och i svensk politisk debatt Lindgren *et al.* (2023). I denna rapport har vi använt energieffektiviseringar för att täcka in båda delarna.



Figur 11: Energianvändningen i Sverige sektorsvis 1970-2022, exklusive förluster (Energimyndigheten 2023c).

4.3.1 Industrisektor

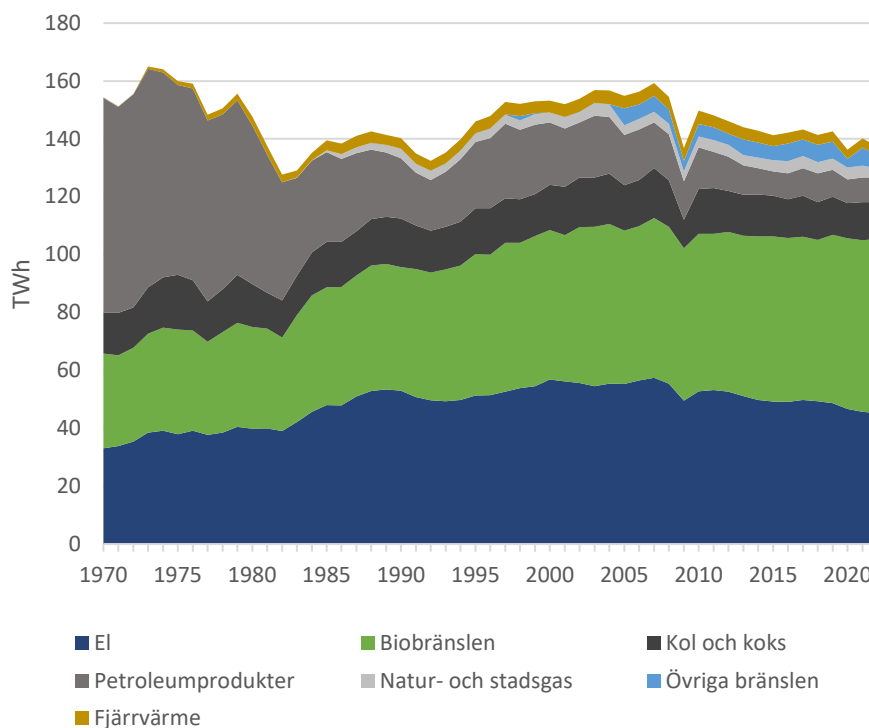
Sverige har en basindustri som förädlar olika naturresurser till stål, papper, cement och kemiska produkter. Basindustrin står för en stor andel av den energi som används inom industrisektorn i Sverige (Figur 12).



Figur 12: Industrisektorns olika brancher och energianvändning 1970-2022 (Energimyndigheten 2023c).

Papper och massaindustri, stålindustri och tillverkning av kemikalier står för ungefär 75% av energianvändningen inom industrisektorn. Inom industrisegmentet finns en rad processer där fossila resurser spelar stora roller. För stålindustrin är kol en viktig del av processen och för raffinaderier samt vissa kemiindustrier är petrokemiska produkter centrala i processen.

Samtidigt är biobränslen och el idag de två största energibärarna för industrisektorn och stod tillsammans för lite drygt 75% av energibehovet 2022 (Figur 13).



Figur 13: Industrisektorns energianvändning uppdelat på energibärare 1970-2022 (Energimyndigheten 2023c).

Inom industrisektorn förväntas en övergång till vätgasbaserad stålproduktion under perioden fram till 2050. I och med att kol enligt omställningsscenariots ramar skall fasas ut till 2030 så blir takten på denna övergång snabb. Övergången till fossilfri stålproduktion är dock i linje med de planer och visioner som finns från stålsektorn (Jernkontoret 2018; Fossilfritt Sverige 2021). För omställningsscenariot följer produktionsvolymerna av stål den som finns angiven i Energimyndighetens långtidsscenario "lägre elektrifiering" (Energimyndigheten 2023b). I den process som stålindustrin nu demonstrerar och tänker investera i används vätgas, el och biobränsle i stället för kol som används idag⁹. Denna vätgas kommer produceras i Sverige. Produktionen av vätgas förväntas ske via elektrolys av vatten vilket kräver elektricitet.

Inom industrisektorn kommer en produktionskapacitet för avancerade bränslen behöva utvecklas. Detta avser både biobaserade bränslen och s.k. elektrobränslen (e-bränsle). Både biobränslen och elektrobränslen kommer efterfrågas inom bl.a. transportsektorn för transporter som inte enkelt kan elektrifieras (t.ex. sjö- och luftfart). Elektrobränslen är ett samlingsnamn för bränslen som produceras från elektricitet, vätgas och koldioxid eller kväve (F3 2021).

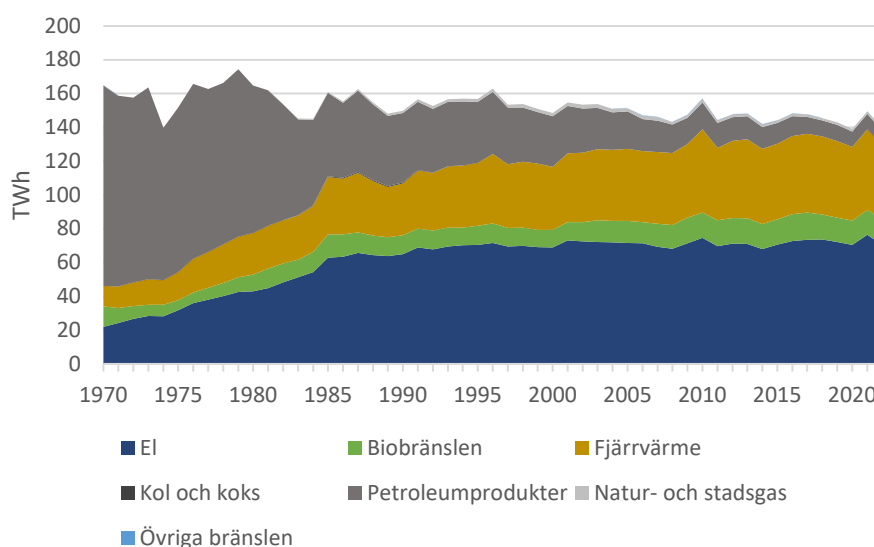
⁹ I modellen har Sandberg (2020) använts för att modellera systemet.

Möjligheten finns att producera olika bränslen som e-metanol, e-fotogen samt ammoniak vilka alla är potentiella ersättningsbränslen. Denna nya industriegren kommer öka efterfrågan på elektricitet samt vätgas.

Energieffektiviteten för ny teknik förbättras i alla sektorer vilket följer den genomsnittliga trenden i modellens databas för tekniklösningar. Men i det utvecklade scenariot finns det ett extra fokus på att minska energiefterfrågan i Sverige. Industriella och kommersiella sektorer (exklusive stålindustrin) antas kunna leverera samma resultat och samtidigt minska energiförbrukningen med 15%-20% med en 10 årig återbetalningstid (Draborg *et al.* 2022). Inom industrisektorn, exklusive tung industri, implementeras energibesparingar och effektiviseringar som har en ekonomisk återbetalningstid på mindre än 10 år. Inom processindustri nås en effektivisering på mellan 10%-20% över perioden.

4.3.2 Bostäder och servicesektor

I Sverige har vi sett en tämligen stor förändring i energianvändningen inom bostads- och servicesektorn där framför allt petroleumprodukter har minskat och fjärrvärmens har fått en ökad roll tillsammans med elektricitet (Figur 14).



Figur 14: *Energianvändning i bostads- och service sektorn 1970-2022 (Energimyndigheten 2023c).*

I modellen implementeras ett krav att från och med 2030 skall byggnader som renoveras samt nybyggnationer ha 25% lägre energianvändning än den som anges enligt gällande byggregler, vilket är den nivå som benämns som lågenergibyggnader i Energimyndigheten och Boverket (2018). För att driva på

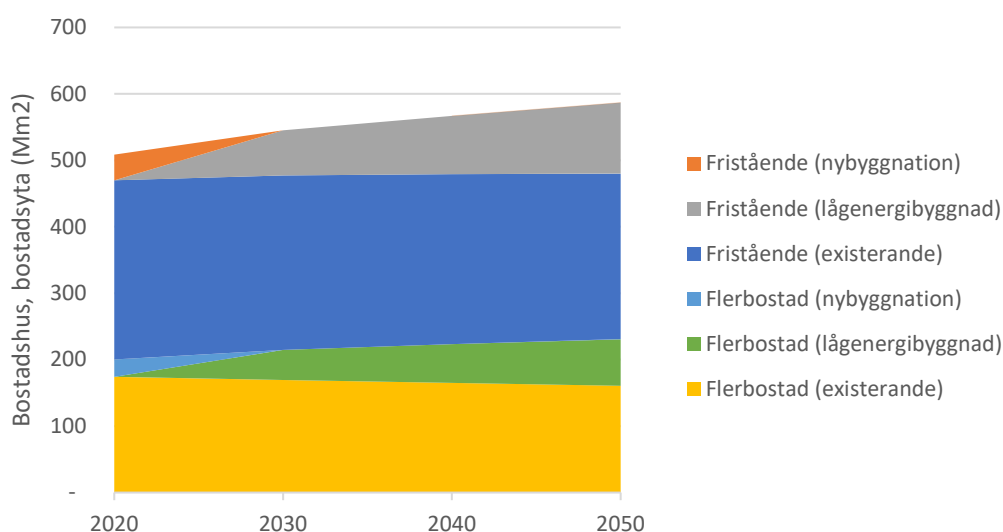
denna utveckling finns kostnader kring energibesparingsåtgärderna i byggnadsbeståndet (Tabell 2).

Tabell 2: Antaganden om kostnader för olika nivåer av energibesparingar i byggbestånd (Boverket och Energimyndigheten 2016).

Flerfamiljshus		Småhus	
Potentiell effektivisering (TWh)	Kostnad (kr/kWh)	Potentiell effektivisering (TWh)	Kostnad (kr/kWh)
4	0	6	0
5	1,0	11	0,5
10	2,0	17	1,0
18	2,5	27	2,0

Den existerande bebyggelsen kommer inkluderas i åtgärder i och med den normala renoveringen som sker i byggnader. Vid en renovering kommer byggnaden att nå LEB nivån.

Nya bostäder kommer behövas och denna expansion sker med lågenergi-byggnadsbostäder enligt lågenergistandard (LEB) från och med 2025 (Figur 15).



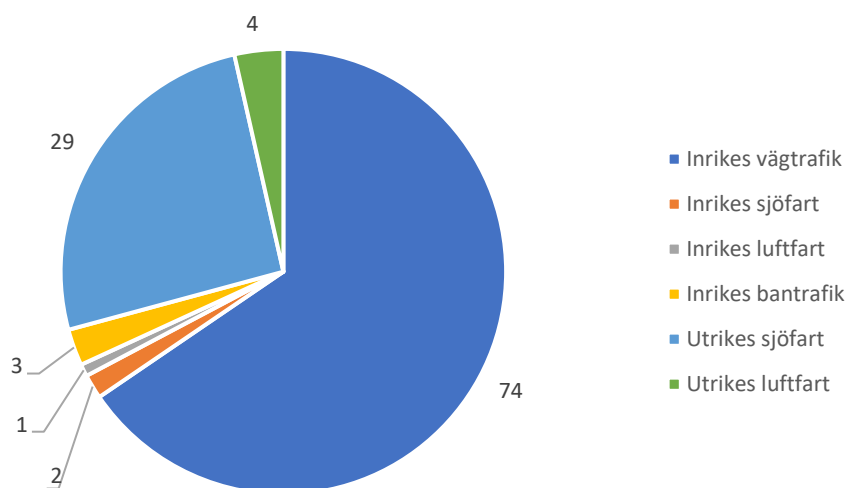
Figur 15: Bostadsyta och fördelning mellan olika byggnadstyper (Mm² bostadsyta).

Omkring 80 miljoner kvadratmeter boyta kommer att läggas till den totala bostadsytan fram till 2050, jämfört med 2020. För nya bostäder kommer kraven av att vara 25% mer effektiva än de gällande byggreglerna, och detta från och med 2025.

4.3.3 Transportsektor

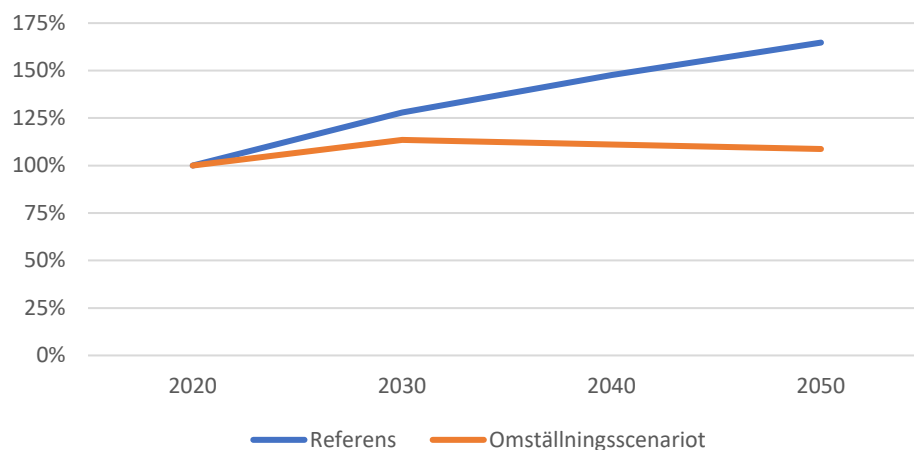
Transportsektorn är idag till stor del baserad på petroleumprodukter (bensin och diesel). Tåg och annan spårbunden trafik är nästan uteslutande eldriven. I kollektivtrafiken finns många bussar med förbränningsmotorer men inköp av förnybara bränslen som biodiesel eller biogas är relativt vanligt. I många urbana miljöer är elbussar vanliga. För internationell sjö- och luftfart är fossila bränslen dominerande.

Transportsektorn inkluderar både nationella och internationella transporter. De nationella transporterna stod år 2020 för 79 TWh och de internationella transporterna för 33 TWh (Energimyndigheten 2023a). Fördelningen mellan de olika transportområdena uppvisar att inrikes vägtrafik står 65% av den totala energianvändningen inom transportsektorn följt av utrikes sjöfart som står för drygt 25% av energianvändningen (Figur 16).



Figur 16: Fördelning av transportsektorns energianvändning 2020, i TWh per segment, fördelat på utrikes och inrikestransporter. Siffror i digrammet anger antal TWh per kategori (Energimyndigheten 2022).

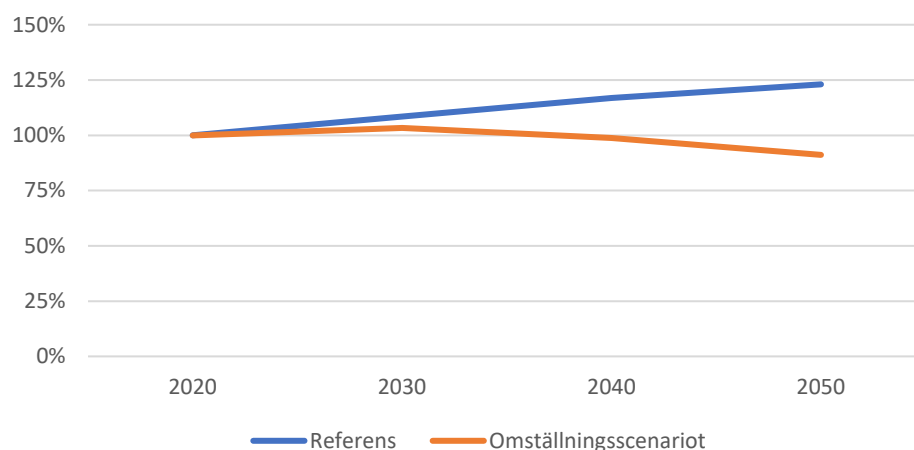
Transportarbete anges ofta i personkilometer (pkm) för persontransporter och tonkilometer (tkm) för godskilometer. På det sättet tydliggörs hur mycket transporter som genomförs i samhället. Kollektivtrafik kan hantera stora mängder persontransporter (pkm) med färre antal fordonskilometer och i många fall resulterar detta även i ett lägre energibehov. Omställningsscenario har, jämfört med Trafikverkets basprognoser (Trafikverket 2023), en relativt restriktiv utveckling av transportarbetet i samhället vilket är ett tänkt resultat av beteendeförändringar hos befolkningen kring transportbehov och transportlösningar (Figur 17).



Figur 17: Utveckling av persontransportarbete (pkm) i omställningsscenariot jämfört med referens, inkl. internationell luft- och sjöfart.

Utvecklingen för att minska transportarbete kan ske på många vis (Persson *et al.* 2019). Urbanisering, attraktiva samarbetshubbar på landsbygden, förändrade beteenden kring människors vilja att spendera tid på saker som pendling eller andra resor är några exempel.

För godstrafik finns en stor dominans av utrikes sjöfartstransporter då dessa sker med båtar vilka fraktar ett stort tonnage en lång sträcka vilket resulterar i stort antalet tkm. Omställningsscenariot har en prognos kring godstransportarbetet som ligger mer eller mindre stadigt på dagens nivå, vilket kan jämföras med Trafikverket (2023) som har en uppåtgående trend (Figur 18).



Figur 18: Utveckling av godstrafikarbete (tkm) i omsställningsscenariot och jämfört med referens, inkl. internationell luft- och sjöfart.

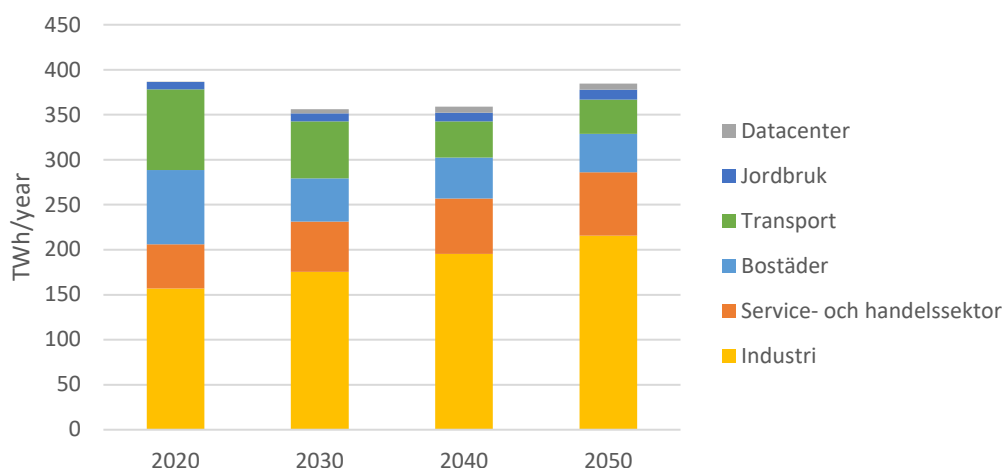
Inom transportsektorn skapas effektivare lösningar med förbättrad logistik i logistikkedjan men även ett minskat transportberoende (Persson *et al.* 2019). Förändringar inom industrisektorn kommer även att leda till förändrad efterfrågan på vissa långväga transporter, t.ex. råolja, malm och petroleumprodukter, vilka kommer reducera antalet tonkilometer.

5 Omställningsscenariot 2050

Omställningsscenariot för 2050 är modellerat utifrån förutsättningarna som är beskrivna i kapitel 3 och 4. I detta kapitel beskrivs energitillförsel och energiefterfrågan som utvecklas i scenariot utifrån förutsättningarna.

5.1 Total energianvändning, elproduktion och klimat

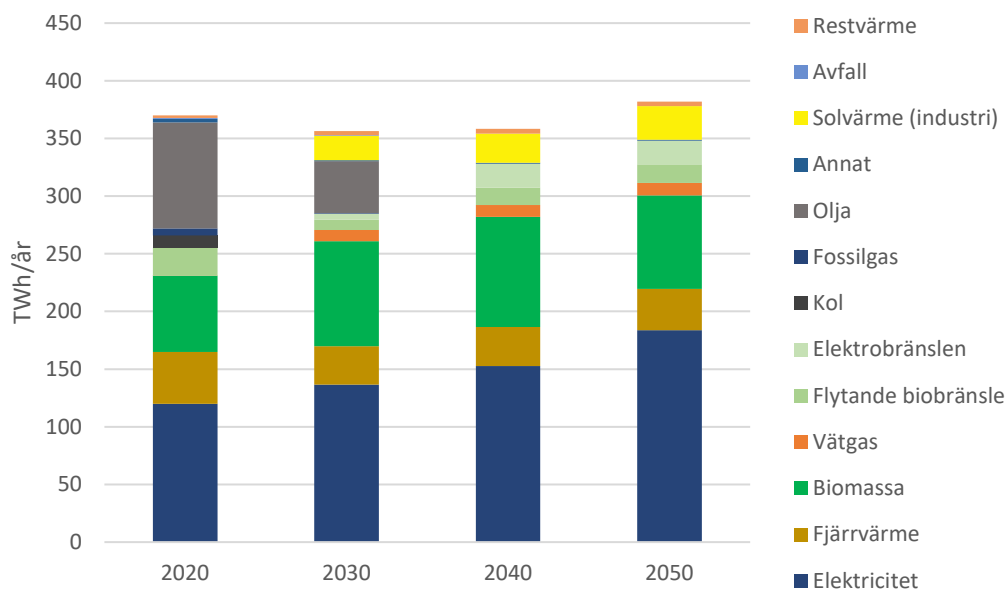
Den slutliga energianvändningen i omställningsscenariot beskriver en reduktion fram till 2030–2040 och därefter ökar energiefterfrågan i det svenska energisystemet igen vilket är en effekt av ett ökat energibehov inom industrisektorn som behöver producera elektrobränslen för att täcka efterfrågan samt även en generell utveckling som överstiger effekterna från energieffektiviseringsåtgärderna (Figur 19).



Figur 19: Energianvändning per sektor i scenariot, 2020-2050.

Inom transportsektorn minskar energianvändningen som en effekt av förändrat transportarbete, överflyttning till kollektivlösningar, övergång till elektriska drivlinor och mer effektiva fordon. Värmeefterfrågan minskar som ett resultat av värmebesparingar i byggnader samt att de mer effektiva lågenergibygnaderna etableras som norm. Mer effektiva hushållsapparater och annan elektronik introduceras vilket reducerar efterfrågan på hushållsel. Efterfrågan på el från datacenter samt inom jordbrukssektorn förväntas öka något. Industri och handel uppvisar en ökad energianvändning som ett resultat av processförändringar vilket förstärker efterfrågan på framför allt elektricitet.

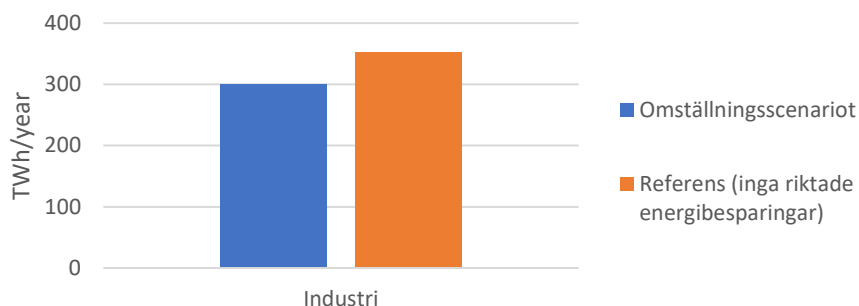
Omställningen av systemet innebär att fossila energislag helt fasas ut och ersätts med elektricitet, elektrobränslen och biobaserade bränslen i kombination med reducerad energiefterfrågan via effektiviseringar och förändrade användningsmönster (Figur 20).



Figur 20: Slutlig energianvändning Sverige 2020-2050 uppdelat på energibärare, inklusive utrikes transporter.

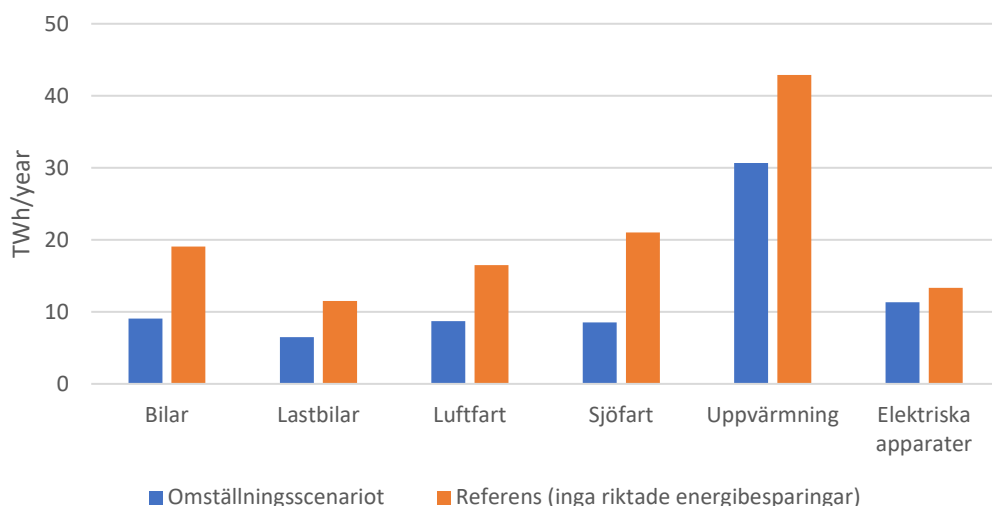
Mängden biomassa (flis och pellets) från skogen i omställningsscenariot kommer inte att öka men det sker en viktig omfördelning till områden där den gör mest nytta. Elektrobränslen och flytande biobränslen kommer behövas i transportsektorn för transporter som inte enkelt kan elektrifieras (t.ex. långväga flyg- och sjötransporter) och delar av biomassa styrs mot detta samt behov inom industrin.

Nya tekniklösningar, processer, renoveringar och en generell teknikutveckling bidrar till att öka energieffektiviteten i samhället. I omställningsscenariot har högre ambitioner än en referensnivå på historisk effektivisering angivits. Via denna högre ambitionsnivå minskas energiefterfrågan inom industrisektorn 2050 med 51 TWh jämfört med referensfallet (Figur 21).



Figur 21: Energiefterfrågan 2050 i omställningsscenariot jämfört med referens utan riktade energibesparingar för industrisektorn. Skillnaden avser additionell effekt från riktade energieffektiviseringsåtgärder.

Denna minskning av energibehov inom industrisektorn avser satsningar med en återbetalningstid på 10 år (Draborg *et al.* 2022). Liknande reducerade energibehov kan ses inom en rad områden där omställningsscenariot har en högre ambition för energieffektivisering än *business as usual* nivå (Figur 22).

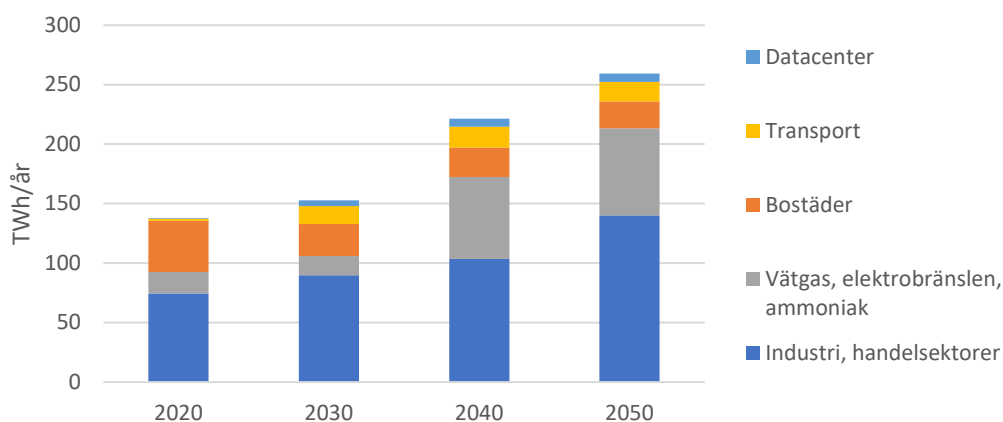


Figur 22: Energiefterfrågan 2050 i omställningsscenariot jämfört med referens utan riktade energibesparingar för olika ändamål. Skillnaden avser additionell effekt från riktade energieffektiviseringsåtgärder.

De åtgärder som avser en högre nivå än *business as usual* handlar om både effektiviseringsåtgärder i en viss teknologi, samt teknikskiften så att samma energitjänst kan levereras med andra tekniklösningar. Den sammanlagda skillnaden i energianvändningen mellan omställningsscenariot och referensen för exemplen i Figur 21 och Figur 22 uppgår till 100 TWh.

Samtidigt som energieffektivisering sker förväntas elanvändningen i Sverige öka relativt dramatiskt. Efterfrågan på elektricitet inom industrisektorn och

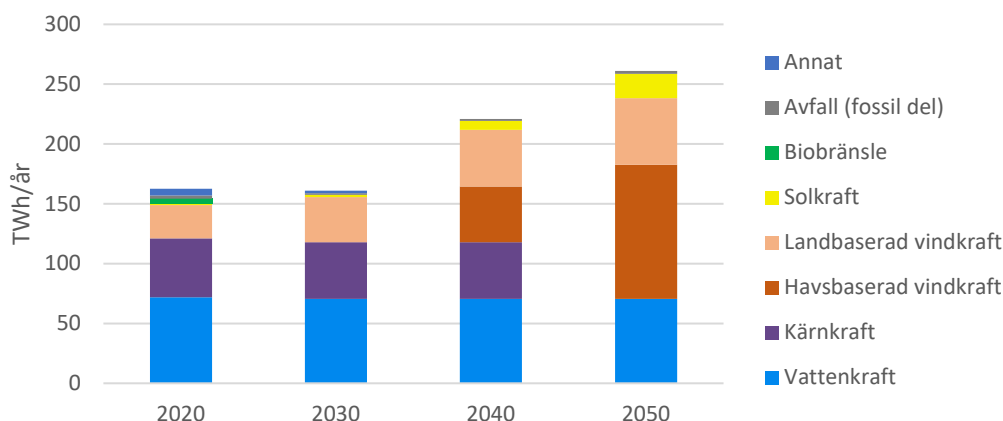
för produktion av vätgas, elektrobränslen och ammoniak är betydande och uppgår 2050 till 213 TWh jämfört med 90 TWh 2020 (Figur 23).



Figur 23: Efterfrågan på elektricitet i Sverige för olika ändamål 2020-2050 i omställningsscenariot.

Efterfrågan på elektricitet inom bostadssektorn reduceras med omkring hälften som ett resultat av effektiviseringsåtgärder i bland annat uppvärmningsteknik, husisolering och hushållsapparater. Sammantaget leder detta till att omställningsscenariot inkluderar en ökning på drygt 120 TWh (+88%) elektricitet 2050 jämfört med 2020.

För att hantera den ökade efterfrågan på elektricitet kommer utbyggnad av ny kapacitet för elproduktion att etableras. Den nya kapaciteten kommer framför allt från ny havs- och landbaserad vindkraft. Till detta kommer även ett tillskott på elektricitet från solceller (Figur 24).



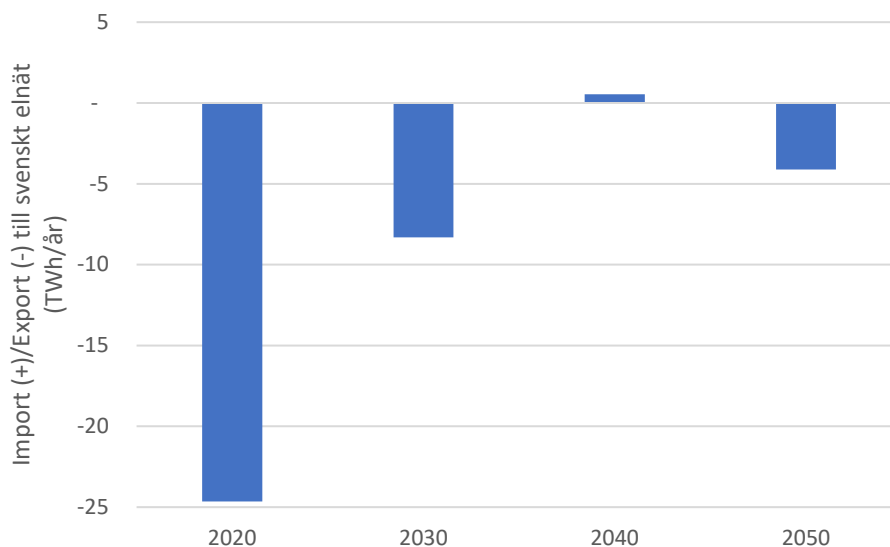
Figur 24: Elproduktion i Sverige 2020-2050 i omställningsscenariot.

Den största expansionen i elproduktion återfinns för havsbaserad vindkraft som 2050 uppgår till 110 TWh. Denna expansion återfinns framför allt i den

senare hälften av perioden. Däremot expanderar landbaserad vindkraft i början av perioden och levererar uppemot 55 TWh elektricitet vid år 2050. En kartläggning av planering av havsbaserad vindkraft i Sverige från 2022 (Kinning 2022) uppger att anläggningar motsvarande 67 TWh elektricitet ligger i tillståndsfas, 125 TWh elektricitet i förberedelsefas och utöver detta finns 174 TWh elektricitet som är i mycket tidiga skeden av planering och undersökning. Detta visar på ett intresse men säger inget om huruvida anläggningarna får tillstånd och senare även om nätkoncession och investeringsbeslut kommer.

Utbyggnaden av vindkraft och solenergi kommer öka andelen intermittenta energislag till energisystemet. Energisystemsmodellen hanterar olika driftssituationer, t.ex. kallt väder och det inte blåser samt tillfällen med stor efterfrågan, och säkerställer elnätets funktionalitet och leveranssäkerhet under de driftsituationerna. I omställningsscenariot säkerställs funktionen av elnätet via reglerkraft, efterfrågestyrning samt försäkran om att det finns överföringskapacitet inom Sverige och mot grannländernas elsystem. Vattenkraften kommer fortsatt bidra med viktig reglerkapacitet. Vattenkraften byggs inte ut i omställningsscenariot utan ligger på samma nivå. Den reglerkraft som finns, då framför allt i damkraftverken, utnyttjas för korttidsreglering. Till detta läggs ökad efterfrågestyrning (*load demand management*) i de olika sektorerna där elkraften används. Det finns stor potential för att utveckla efterfrågestyrning i vätgasproduktion, elfordonssektorn samt i styrning av bostäder och lokalers energiefterfrågan. Svensk vätgasproduktion och de industriella processer där detta kommer efterfrågas är under uppbyggnad idag och skulle potentiellt kunna byggas upp så de kan verka för att utjämna variationer i elsystemet. Utbyggnaden av elnätet i omställningsscenariot följer *Ten-year Network Development Plans* (TYNDP) som avser en tänkt utveckling av energiöverföringskapacitet i en stor del av Europa (Entso-E och Entso-G 2022). Den utveckling som beskrivs i de scenarierna möjliggör den överföringskapacitet som omställningsscenariot efterfrågar.

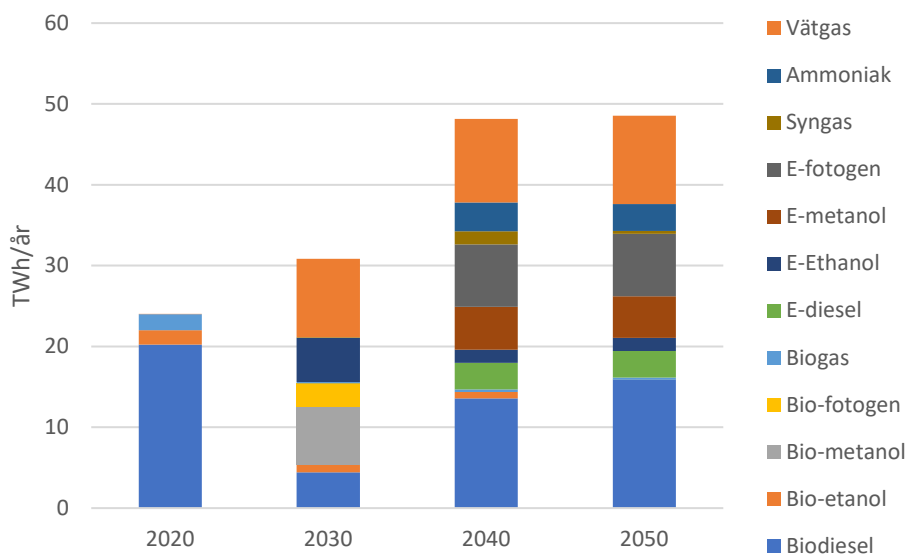
Sverige har under de senaste 10 åren haft en årlig netto-export av elektricitet över årsbasis (Energimyndigheten 2023a). Omställningsscenariot uppvisar en minskad men dock fortsatt netto-export av elektricitet (Figur 25).



Figur 25: Balans i elhandeln med omgivande länder 2020-2050 för omställningsscenariot.

Omställningsscenariot kommer utveckla elproduktionen i landet så att efterfrågan på el säkerställs på nettobasis över året, dvs ökad efterfrågan på el kommer kräva etablering av ny elkraftproduktion i Sverige. En viktig drivkraft för ökat elbehov i landet är den mängd elektrobränslen, vätgas och biobränslen som kommer behövas för att ersätta de fossila resurserna som fasas ut.

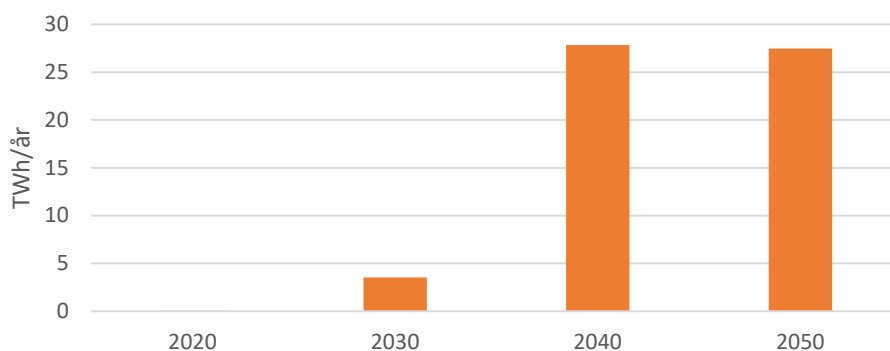
I Figur 26 beskrivs användningen av flytande biobränslen och elektrobränslen samt vätgas i Sverige. För 2020 inkluderas bränslen som både är producerade i Sverige och importerade. Från 2030 är produktionen och användningen av icke fossila bränslen i stort sett lika, sett på årsbasis, i och med begränsningen kring import.



Figur 26: Användning av icke fossilbaserade bränslen i det svenska energisystemet, inklusive internationella transporter och vätgas för stålindustri.

I omställningsscenariot implementeras ett krav från och med 2035 att nettoimport av biobränslen och elektrobränslen inte skall ske. Det innebär att en produktionskapacitet för att producera biobränslen, elektrobränslen inklusive ammoniak och vätgas till stålprocesser kommer behöva byggas i Sverige. Dessa bränslen kommer ersätta fossila bränslen inom bland annat luft- och sjöfart. Stora delar av biodiesel som används i Sverige idag är importerad.

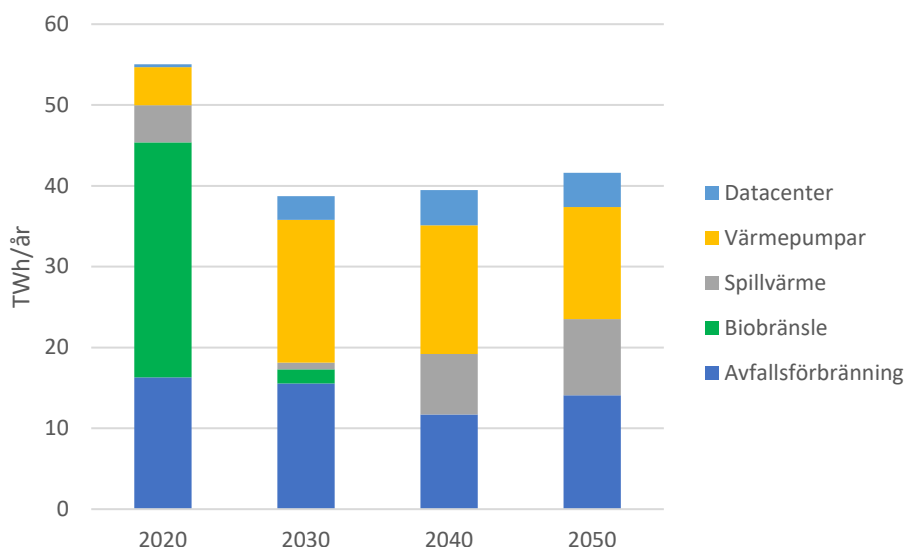
Vätgas används i många sektorer för industriell produktion (stålindustri) samt även för produktion av elektrobränslen. Den totala mängden vätgas som kommer behövas i omställningsscenariot uppgår till 27,5 TWh 2050 (Figur 27).



Figur 27: Total vätgasefterfrågan i omställningsscenariot 2020-2050.

Vätgas kommer produceras i elektrolysörer och produktionen förväntas vara i Sverige. Vätgas ingår i processer för att göra elektrobränslen och även i stål-tillverkning när fossilt kol fasas ut.

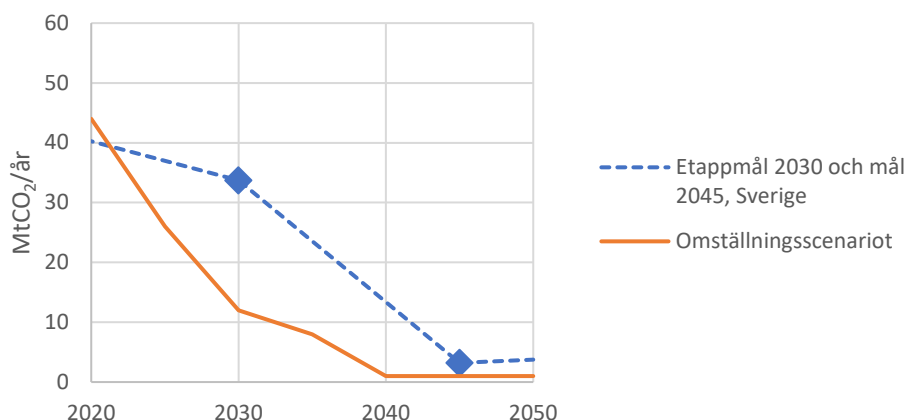
Fjärrvärme är utbyggd runt omkring i Sverige och levererar värme till hus och byggnader i urbana miljöer. I och med omställningen av energisystemet kommer värmepumpar och spillvärme från olika processer få en allt större roll i fjärrvärmeleveranser (Figur 28).



Figur 28: Fjärrvärme och fördelning på energislag.

Under omställningstiden kommer biobränsle prioriteras för andra användningar i energisystemet än för fjärrvärme. En ökning ses bland annat i industrisektorn för att ersätta fossila resurser. Denna prioritering är ett resultat av att det finns begränsningar kring mängden biobränsle samt av kostnadsskäl. Det som ersätter biobränslet är värmepumpar, olika restvärmeströmmar och det finns även en minskning av värmebehovet i och med renoveringar.

De associerade växthusgasemissionerna till energisystemet i omställningsscenariot uppvisar snabb minskning för att nå nära nollutsläpp 2040 (Figur 29).



Not: Skillnaden i startpunkterna 2020 beror på att omställningsscenariot inkluderar utrikes transporter.

Figur 29: Associerade energirelaterade utsläpp av växthusgaser för omställningsscenariot jämfört med etappmål 2030 och Sveriges klimatmål 2045.

I Figur 29 beskrivs förutom associerade utsläpp till omställningsscenariot även en linje för Sveriges nuvarande ambitioner beskrivna i svenska klimatpolitiska ramverket (Regeringen 2017) samt rapporteringen till EU (Regeringen 2020). För den kurvan anges 2030 en reduktion med 56% jämfört med utsläpp från energisektorn 1990 och för 2045 är reduktionen 98% jämfört med 1990. Här avses endast energirelaterade utsläpp, och för kurvan som beskriver etappmål 2030 och mål 2045 för Sverige inkluderas inte internationella transporter. För omställningsscenariot är utsläppsminskningen inklusive internationella transporter och om dessa inte skulle inkluderas skulle utsläppsminskningarna vara snabbare då flyg- och fartygsbränsle till stor del är fossilt även 2030. Skillnaden i total utsläpp 2020–2050 mellan omställningsscenariot och svenska mål (förutsatt linjär utveckling mellan målpunkterna) är omkring 250 MtCO_{2eq}. Detta är associerade klimatutsläpp i energisektorn som undviks i omställningsscenariot jämfört med den utvecklingsbana som beskrivs av etappmål och mål 2045.

Koldioxidinfångning (CCS) kommer att etableras för vissa anläggningar i Sverige (Tabell 3).

Tabell 3: Resultat avseende koldioxidinfångning (CCS) för omställningsscenariot 2030-2050.

	2030	2040	2050
Installerad panneffekt utrustad med CCS (MW)	470	1 163	1 035
Total mängd infångad koldioxid (kton), varav	1 792	4 874	5 085
Infångad biogen koldioxid, industri (kton)	1 677	3 584	2 529
Infångad koldioxid (biogent och fossilt ursprung) vid avfallsförbränning (kton)	115	1 265	2 545
Infångad biogen koldioxid vid uppgradering av biogas (kton)	0	25	11

Den infångade koldioxiden kommer när väl elektrobränsleindustri finns etablerad kunna användas i denna. Dock kommer det finnas ett behov att lagra viss koldioxid runt 2030 men detta behov byggs bort i och med en efterfrågan på koldioxid i produktion av elektrobränslen (Tabell 4).

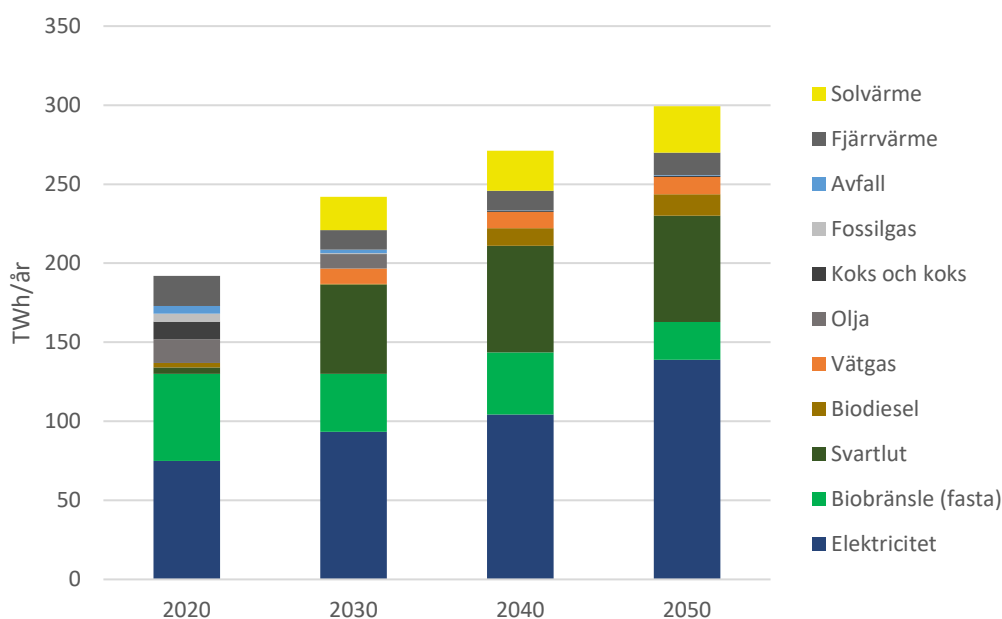
Tabell 4: Infångad koldioxid för lagring och användning 2030-2050.

	2030	2040	2050
Koldioxid som lagras (kton)	1 550	0	0
Koldioxid för produktion elektrobränslen (kton)	242	4 874	5 085
Totalt lagrad och användning	1 792	4 874	5 085

Det kommer inte behövas någon ytterligare import av koldioxid för produktionen av elektrobränslen i Sverige.

5.2 Energianvändning inom industrisektor samt handel- och servicesektor

Industrisektorns omställning under denna omställningsperiod kommer på många vis vara historisk. Tekniklösningar som varit gängse under lång tid kommer att bytas ut mot nya processer och produktionssätt. Detta gäller inte minst inom stålindustrin, men även den petrokemiska industrin kommer oundvikligen att behöva ta steget från hantering av stora mängder fossila resurser till att leverera biobaserade bränslen och elektrobränslen. Elektricitet kommer att bli den dominerande energibäraren inom sektorn 2050 (Figur 30).

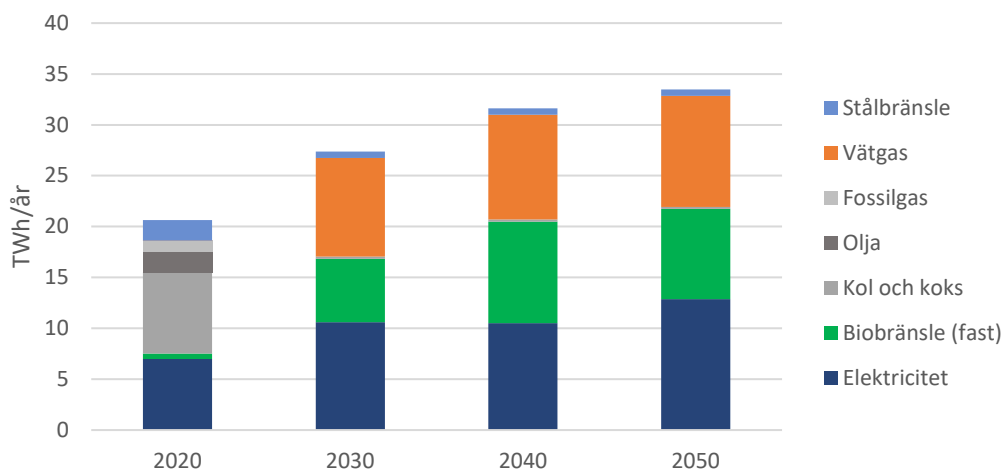


Figur 30: Energianvändning i industrisektorn och handel- och servicesektor uppdelat på energibärare. Omställningsscenariot 2020-2050.

Under hela perioden fram till 2050 ses en ökning av energianvändningen i industrisektor samt handel och servicesektor. Detta kan kontrasteras med hur under de senaste 10 åren energianvändningen i industrisektor har de facto minskat (se Figur 13). Samtidigt med denna ökning av energianvändning med 107 TWh under perioden finns en energieffektivisering utöver *business as usual* på 50 TWh (Figur 21). Solvärme kommer behövas för att möta värmebehov i handel och industri. I detta fall är det solvärme för varmvatten och värmebehov och anläggningar på tak.

I omställningsscenariot kommer stålproduktionen 2030 ha övergått till en vätgasreducerad process med ljusbåge. Detta är den lösning som industrin i Sverige presenterar som lösningen för att reducera klimatutsläppen i sin produktion (se t.ex. Jernkontoret 2018; Pei *et al.* 2020). För omställningsscenariot är stålproduktionen till en början i linje med dagens stålproduktion, men når en nivå som är 1,8 gånger högre än dagens år 2050. Sektorn själv lyfter gärna en ännu större ökning av produktionen (se t.ex. Fossilfritt Sverige 2021) och Energimyndigheten har i sin senaste långtidsprognos (Energimyndigheten 2023b) utgått ifrån en hög respektive en låg nivå för produktionen¹⁰.

¹⁰ I dessa framtidsplaner för produktionsökningen avses inte att öka brytningen av järnmalm men att öka andelen av den brutna malmen som blir till stål i stålverk i Sverige. Idag exporteras stora delar av järnmalmen som bryts i Sverige (SGU 2022).

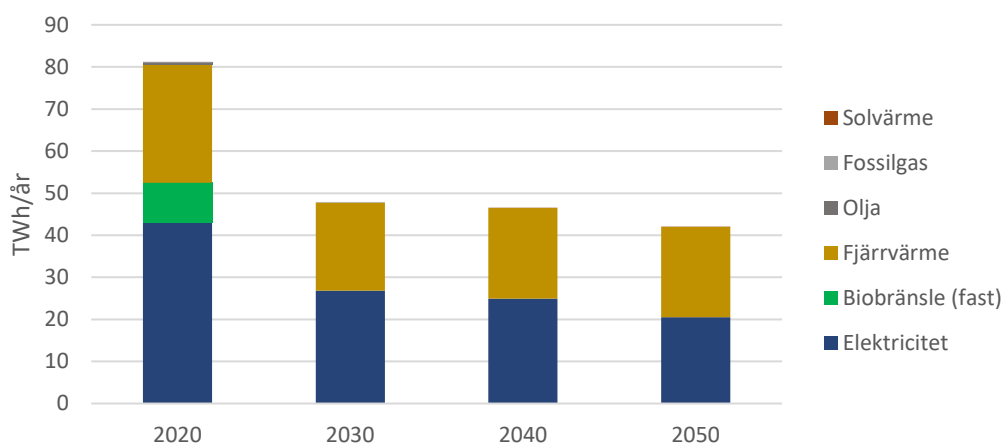


Figur 31: Energianvändning i stålsektorn för omställningsscenariot 2020-2050.

Produktion av vätgas kommer ske i Sverige och kräver i sin tur elektricitet (är inte en del av elektricitet användningen i Figur 31). Större vätgaslager kommer även behöva etableras nära stålverken för att säkerställa tillgång på vätgasen. Omställningen är mycket snabb och drygt 13 TWh koks samt 6 TWh kol ersätts med elektricitet, vätgas och biobränsle redan 2030 i och med den utfasningstrappa som förutsätts. Stålbränsle (Figur 31) avser en blandning av kol/koks som krävs som insatsmaterial i själva stålprocessen.

5.3 Energianvändning bostäder

Bostadssektorn uppvisar en tydlig reduktion i energianvändning både inom värmebehov och i hushållsel (Figur 32).



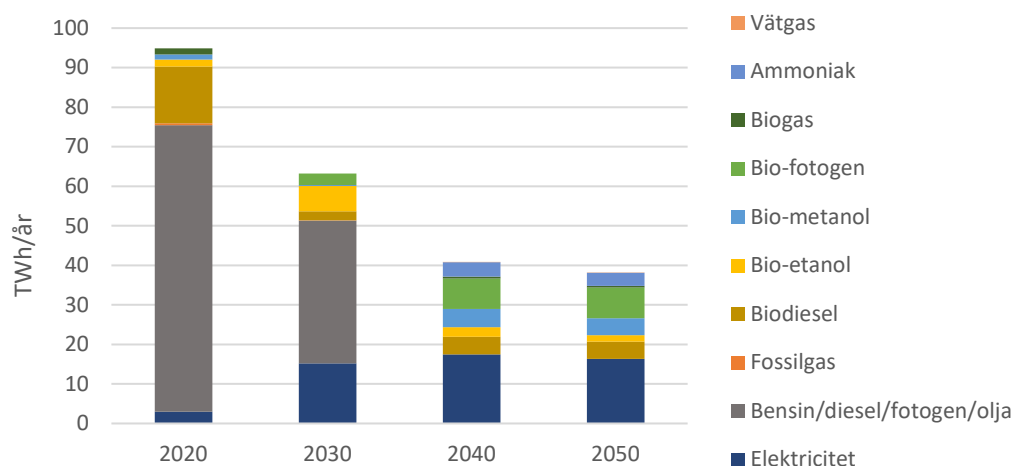
Figur 32: Energianvändningen i bostäder för omställningsscenariot 2020-2050.

Elförbrukningen i bostadssektorn minskar från 50,94 TWh till 26,87 TWh. Denna minskning är en kombination av flera effektivitetsåtgärder som att vitvaror antas ersättas med bästa tillgängliga teknik (BAT) vilket reducerar elförbrukningen med 3,7 TWh över perioden. En viktig åtgärd är att introducera värmepumpar brettpå för att snabbt erhålla en högre effektivitet i värmesystemen. 2030 finns ingen direktverkande el då dessa har värmepumpar vilket detta minskar elförbrukningen. Båda åtgärderna summerar till en reduktion av elförbrukningen med 24 TWh.

Utöver detta finns en reduktion av värmebehovet per ytenhet som ett resultat av renoveringar till lågenergibyggnadsstandard. Renoveringstakten är 4% vilket ger effekter i energibehovet. Vid 2020 är andelen "vanliga" byggnader 87% jämfört med lågenergibyggnader som är 13%. Detta ändras och 2030 är 20% av byggnadsbeståndet lågenergibyggnader. En vanlig byggnad har en energianvändning på i genomsnitt 130 kWh/m² uppvärmd yta. För nya lågenergibyggnaderna är motsvarande siffra 70 kWh/m² uppvärmd yta. Denna förbättring i byggnadsbeståndet minskar värmeförbrukningen med 11 TWh i omställningsscenariot. Utöver detta antas de befintliga byggnaderna renoveras vilket ökar deras energieffektivitet från 130 TWh/m² till 100 TWh/m². Med en renoveringstakt på 4% av byggnadsmassan per år fås en besparing på 12 TWh fram till 2030. Efter de snabba åtgärderna till 2030 klingar reduktionen av energianvändning i bostadsbeståndet av.

5.4 Energianvändning transport

En kraftig ökning av elfordon för den nationella trafiken ses under perioden fram till 2050. I och med att petroleumprodukter fasas ut till 2040 måste dessa ersättas med biobränslen och elektrobränslen i internationella transporter. Produktionskapaciteten byggs ut och sätts i kraft till 2040 då efterfrågan på bränslen kan mötas på års-nettobasis med bränslen producerade i Sverige (ett uppsatt krav i omställningsscenariot). Sammantaget minskar energiefterfrågan i transportsektorn under omställningen och planas ut efter 2040 (Figur 33).



Figur 33: Energianvändning i transportsektorn, inklusive internationella transporter. Omställningsscenariot 2020-2050.

Inom internationell sjöfart kommer ammoniak bli ett viktigt bränsle som ersätter den fossila oljan som används idag (för en översikt av förnybara bränslen i sjöfart se IRENA 2021). Omställningsscenariot väljer ammoniak som en kostnadseffektiv lösning för dessa sjötransporter. För luftfart ersätts dagens flygfotogen med biobaserat flygfotogen.

Övergången till eldrift i transportflottan är en bidragande orsak till att den reducerade energianvändningen uppvisas i omställningsscenariot. Detta avser största delen av den väg- och spårburna trafiken i Sverige. En ytterligare bidragande orsak till minskad energianvändning går att finna i övergången till mer effektiva transportlösningar som kollektivtrafik och delade fordon samt ändrade rese- och transportbeteenden.

6 Diskussion

Som en del i samhällsomställningen där fossila resurser fasas ut, kommer energisystemet behöva anpassas till de nya förutsättningarna. Omställningsscenariot visar hur energisystemet måste ställa om dels som en direktkonsekvens av att fossila resurser måste bytas ut i energisektorn, men även indirekt som ett resultat av en industri som ställer om sina produktionsprocesser och efterfrågar andra insatsmaterial och därmed ändrad energiefterfrågan. Utifrån presentationen av omställningsscenariot i kapitel 5 framträder att efterfrågan på elektricitet kommer stiga kraftigt och elektrobränslen, inklusive vätgas och ammoniak kommer introduceras för att ersätta fossila resurser.

Denna situation är inte unikt för omställningsscenariot utan liknande ökning på efterfrågan på elektricitet redovisas i de flesta energiscenarior som presenterats för Sverige de senaste åren. För omställningsscenariot kommer efterfrågan på elektricitet ökat till knappt 260 TWh/år. Detta kan ställas i relation till andra scenarier:

- (Energiföretagen 2023) utvecklar ett scenario med elektricitetsbehovet 330 TWh/år 2045
- Energimyndigheten har två scenarier för sin senaste långtidsscenariorapport (Energimyndigheten 2023b) där den lägre nivån anges till 228 TWh/år och den högre 362 TWh/år
- Naturskyddsföreningen (Naturskyddsföreningen 2019) anger en elproduktion på 173 TWh år 2040 i sin senaste rapport

Att jämföra olika scenarier är dock svårt då förutsättningarna är olika. I omställningsscenariot ingår t.ex. internationella luft- och sjöfartstransport samt en ökning av stålproduktion till motsvarande 1,8 dagens nivå 2050. Variationen kopplat till dessa begränsningar gör jämförelser svåra. Generellt gäller att en kraftig utbyggnad av elkraftproduktion som allt viktigare och denna kopplar dels till efterfrågan på elektricitet i och med behov av ersättningsbränslen där tidigare fossila använts, dels som ett resultat av produktionsökning i industrin.

Biomassa får en förändrad roll i omställningsscenariot. Prioritet att använda den värdefulla biomassaresursen som ersättningsbränsle eller insatsmaterial för ändamål där möjligheten att hitta en ersättningslösning för dagens fossila användning är svår. Detta kan vara vissa tunga transporter där elektrifiering är svår eller industriella processer. I energiscenarior från runt 2010 finns ofta bioenergi med som en direkt ersättning till petroleumprodukter eller kol, men detta återfinns inte i omställningsscenariot i samma utsträckning. Elektrobränslen, värmepumpar och vätgas är mer kostnadseffektiva lösningar för energibehov som transporter, uppvärmning av hus och lokaler samt

industriprocesser. En orsak till denna förändring är att förnybara energislag som vind och sol har fortsatt att bli alltmer konkurrenskraftiga (IRENA 2022). Vidare har tekniker på efterfrågesidan utvecklats, inte minst elektrifierade transporter.

Omställningsscenariot har en tydlig utfasningstrappa för de fossila resurserna. Sverige använder inga stora mängder fossilgas så detta ställer främst krav på att lösningar finns på plats för att hantera situationen när kol förvin- ner ur energisystemet 2030 och när oljeprodukter förvin- ner 2040. Vid dessa punkter måste produktion av alternativa bränslen, elproduktionskapacitet och även investeringar i de nya produktionsanläggningarna och transport- medlen ha skett. Inom industrisektorn finns en rad initiativ för omställning där man inkluderar aktörer från energisektorn redan från start då behovet av energi är en så pass central del i satsningen. Sveriges möjlighet att producera förnybar elektricitet är en förutsättning för många satsningar och profilering av produkter med en tydlig klimatprofil. Stålintustrin är ett aktuellt exempel på detta. Klimatprofilen har dock en potentiell negativ miljöpåverkan. Vind- kraftutbyggnaden kommer, även om den ligger inom de begränsningar som satts i modellen, vara på en skala som kommer påverka havsområden och även landområden. Till detta kommer behov av transmission- och distribu- tionskapacitet. Sammantaget kommer det leda till bland annat behov av mark, fragmentisering i landskapet, visuellpåverkan och ljudpåverkan. Omställ- ningsscenariot inkluderar en tanke om hög nivå av acceptans hos befolk- ningen för att genomföra förändringar men det finns stora osäkerheter avse- ende detta.

Omställningsscenariot har satt upp ett antal ramar (se kapitel 3 och kapitel 4) som påverkar hur scenariot utformats. Kravet om att från 2035 inte på årsbasis ha en netto-import av energiresurser resulterar i att systemet måste möta för- ändrad energiefterfrågan med produktion i Sverige. Detta gäller bränslen för att ersätta olja och även elektricitet och vätgas. De potentialer som angivits för modellen (se kapitel 4) kommer i många fall uppnås och på olika vis påverka prioriteringar och möjligheter för energisystemsmodellen att finna den mest kostnadseffektiva lösningen. Ett exempel är introduktionen av solvärme för handel och servicesektorn som används för varmvatten och andra värmebe- hov under de delar av året som detta är möjligt. På så vis skapat energimo- dellen den mest kostnadseffektiva lösningen givet ramarna.

Omställningsscenariot handlar både om att ställa om befintligt energisystem till förnybart samt en omställning av industri och samhälle för att klara kli- matmålen. Utvecklingen av denna lösning skall baseras på att energibehov hanteras utan netto-import över året. Efterfrågan och energitillgång kommer behöva balanseras över året, samt om möjligt ge utrymme för en export. Alla resurser som idag importeras, både fossila (t.ex. olja, naturgas, kärnbränsle)

och förnybara (t.ex. biodiesel), kommer från och med 2035 ersättas med energiresurser som finns i Sverige. Drivkrafter i omställningsscenariot för att minska, respektive öka energiproduktionen i Sverige, illustrerar hur olika processer parallellt påverkar omställningen (Tabell 5).

Tabell 5: Exempel på drivkrafter som påverkar behovet av energiproduktion i Sverige

Bidrar till <u>ökat</u> behov av energiproduktion i Sverige	Bidrar till <u>minskat</u> behov av energiproduktion i Sverige
Industrisektorer ökar produktion	Energieffektiviseringsåtgärder – alla sektorer. Innovation och teknikutveckling.
Energi för Internationell sjö- och luftfart från Sverige ingår i det svenska scenariot.	Beteendeförändringar (t.ex. resebeteende, minskad energianvändning)
Fossila resurser (importerade/fasas ut) skall ersättas med lösningar producerade i Sverige	Transporteffektivitet
Befolkningsökning driver på mer bostadsyta, transporter o.s.v.	

I omställningsscenariot finns ambitiösa åtgärder för att effektivisera energianvändningen inom alla sektorer samt åtgärder som avser beteendeförändringar och energihushållning. Detta ger effekter i minskad energiefterfrågan inom sektorerna. Att öka ambitionerna ytterligare skulle innebära att marginalkostnaderna för åtgärder skulle bli högre. Den totala energiefterfrågan (Figur 19) visar på hur det sammantaget är en relativt stabil energiefterfrågan, trots en ökning på omkring 100 TWh i industri och handel (Figur 30). Effektiviseringarna i bostad, transport, industri och handel reducerar energiefterfrågan. För industrins produktionsökning så är detta något som ligger i framtiden. I omställningsscenariot har en ökning inkluderats men som ligger i det lägre spektret av ökningsprognoser som presenteras av olika källor (se t.ex. Jernkontoret 2018; Fossilfritt Sverige 2021; Energiföretagen 2023; Energimyndigheten 2023b).

Scenariot har som mål att uppnå nära nollutsläpp till 2040 vilket är fem år tidigare än det nuvarande svenska målet. Detta mål nås samtidigt som alla rena fossila bränslen har fasats ut ur energisystemet. Energisystemet 2040 är till största delen baserad på energiproduktion med små utsläpp av växthusgaser. I det sammanhanget återfinns CCS-lösningar i en begränsad utsträckning i omställningsscenariot vilket inkluderar specifika avfallsförbränningsanläggningar¹¹. Nära nollutsläppsmålet nås med åtgärder som undviker energirelaterade växthusgasutsläpp och därmed undviks behov att fånga in och lagra koldioxid. Det finns ett behov av koldioxid i produktionen av

¹¹ Cementindustri kommer fortsatt ha utsläpp av koldioxid som del i processen och CCS kommer troligen behövas för att hantera dessa utsläpp (Fossilfritt Sverige 2023)

elektrobränslen och detta skapar ett behov av CCS lösningar. Omställnings-
scenariot har ingen import av koldioxid för detta ändamål.

7 Slutsatser

I denna rapport har ett långtidsscenario utvecklats som sträcker sig till 2050. Detta scenario, som har kallats omställningsscenariot, har syftat till att undersöka hur ett energisystem kan utvecklas i Sverige med förutsättning att nära nollutsläpp från energisystemet kan uppnås redan 2040 och att energibehov som uppstår i samhällets kan hanteras med resurser från landet. Scenariot omfattar en utfasning av fossila resurser till 2040.

Sammantaget krävs stora insatser för att etablera en produktionskapacitet för elektricitet, elektrobränslen och biobränslen samt åtgärder för att minska energianvändningen via energieffektivisering och effektivare systemlösningar. Inom transport, bostäder, industri och handel kan energianvändningen minskas och fossila resurser fasas ut, samtidigt ges utrymme för en ökad energianvändning i industrisektorn som ett resultat av efterfrågan på bränslen och vätgas samt en produktionsökning i stålsektorn. Utifrån rapportens resultat kan följande fyra punkter lyftas.

Omställningen har redan börjat, vi är mitt i den. Vi ser en rad pågående omställningsprocesser inom transport (elfordon), bostäder (solpaneler på taken, laddning av bilar i hemmet, värmepumpar), industri (omställning av stålindustri, produktion av elektrobränslen). Dessutom sker en utbyggnad av vindkraft och solkraft. Denna positiva trend kommer dock behöva ytterligare stöd och moment då den planering och investeringsbeslut som tas idag många gånger kommer bli realiserade först om 5–10 år. Omställningsscenariot visar på hur förändringsprocesserna behöver ske kontinuerligt för att göra det möjligt att nå målet om nära nollutsläpp 2040.

Kraftig ökning av efterfrågan på elektricitet. Den omställning som krävs kommer att kräva en rejäl ökning av elanvändningen. Inom transportsektorn kommer eldrift av de transporter som är möjliga vara att föredra. Elektricitet kommer även användas för att producera elektrobränslen, vätgas och ammoniak. Elproduktionen i Sverige kommer behöva öka med nästan 90% till 2050 jämfört med idag. Denna ökning kommer till stor del baseras på havsbaserad och landbaserad vindkraft.

Hållbara biobränslen är en begränsad resurs vilket förutsätter styrning. De tillgängliga bioresurserna måste prioriteras till användningsområden där ersättningslösning är svåra att finna. Biomassa i fjärrvärmenätet fasas ut till förmån för att använda denna resurs till industriella processer och biobränslen för användning i bl.a. transportsektorn. Att skapa förutsättningar för att höja värdet på biomassaressurserna kommer med risk att ökade uttag av dessa sker. Omställningsscenariot har begränsningar i avseende på tillgängliga potentialer

vilket driver fram de prioritering av hur dessa utnyttjas och som illustreras i scenariot.

Potentialen för att minska energiefterfrågan är stor. Omställningen handlar minst lika mycket om att dra full nytta av att skapa lösningar som är mer effektiva redan vid etableringen, att driva på för energieffektiviseringar i renoveringar och arbeta för att introducera bästa möjliga teknik i avseende på energianvändningen. Resultaten från omställningsscenariot visar hur dessa extra ambitioner reducerar energiefterfrågan på totalt 100 TWh 2050 jämfört med läget om man inte utför riktade åtgärder.

De stora byggprojekt och ingrepp i miljö och landskap som detta omställningsscenario kommer kräva är inte oproblematiskt. Det är oundvikligt att miljön kommer att påverkas i den omställning som beskrivs i omställningsscenariot. Samtidigt är siktet inställt på att minska klimatpåverkan genom att fasa ut fossila resurser och att de energibehov som finns i Sverige skall kunna hanteras inom landets gränser för att undvika att miljöpåverkan flyttas någon annanstans. Alla är en del av samhället och blir påverkade via de åtgärder som föreslås på transportsidan, via renoveringsambitioner och kring ny energiinfrastruktur. Omställningsscenariot visar på att det inte finns någon enkel *quick fix* utan det är en sammansatt lösning med flera komponenter som möjliggör omställningen. Att etablera långsiktighet och tydliga budskap om ambitioner kommer vara nödvändigt. Omställningsscenariot är utvecklat med en tanke om att det finns en acceptans i samhället för dessa förändringar men denna kommer behöva byggas upp. Omställning sker i en omvärld där det också sker en omställning vilket kan bidra till ökad acceptans och vilja i samhället för förändring.

Målet med omställningen är att uppnå nära noll utsläpp från energisektorn 2040 och att långsiktigt bygga ett hållbart energisystem som kan fortsätta utvecklas efter 2050. Omställningsscenariot visar på hur ett sådant energisystem kan se ut samtidigt som det identifieras utmaningar där fortsatt arbete med samtal och tankar om möjliga alternativa vägar behöver diskuteras och utvecklas.

8 Referenser

- Avfall Sverige (2023). *Swedish Waste Management 2022*, Avfall Sverige, Malmö, Sweden.
- Bourgeois, S., N. Taillard, E. Balembois, A. Toledano, A. Gabert, Y. Marignac, ... S. Teyssset (2023). *Climate neutrality, Energy security and Sustainability: A pathway to bridge the gap through Sufficiency, Efficiency and Renewables*, CLEVER network, Alixan, France. June.
- Boverket och Energimyndigheten (2016). *Underlag till den andra nationella strategin för energieffektiviserande renovering*, Rapport ET 2016:15, Boverket, Karlskrona. November.
- Draborg, S., K. Mortensen, B. Elmegaard, J. Rosendal Carstensen och P. Maagøe Petersen (2022). *Kortlægning af energiforbrug og opgørelse af energisparepotentialer i produktionserhvervene*, Potentialerapport, Energistyrelsen, Copenhagen. 17.11.2022.
- Energiföretagen (2023). *Sveriges elbehov 2045. Hur stänger vi gapet?*, En rapport från Energiföretagen, Energiföretagen, Stockholm. Februari.
- Energimyndigheten (2021). *Underlagsrapport: Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak* ER 2021:36, Statens Energimyndighet, Eskilstuna. maj.
- Energimyndigheten (2022). *Energiläget 2022. Med energibalanser för år 1970-2020* ET 2022:09, Statens Energimyndighet, Eskilstuna.
- Energimyndigheten (2023a). *Energiläget i siffror 2023 (excel)*, Statens Energimyndighet, Eskilstuna. mars.
- Energimyndigheten (2023b). *Scenarier över Sveriges energisystem 2023. Med fokus på elektrifieringen 2050* ER 2023:07, Statens Energimyndighet, Eskilstuna.
- Energimyndigheten. (2023c). "Statistikdatabas." Hämtad 20 november, 2023, från <https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/>.
- Energimyndigheten. (2023d). "Energimyndigheten." Hämtad 20 november, 2023, från <https://www.energimyndigheten.se/>.
- Energimyndigheten (2023e). *Förslag på lämpliga energiutvinningsområden för havsplanerna* ER 2023:12, Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Energimyndigheten och Boverket (2018). *Utvärdering av lågenergibyggnader - fallstudie 2017. Rapport till regeringen*. ER 2018:08, Energimyndigheten och Boverket, Eskilstuna. Mars.
- Entso-E och Entso-G (2022). *TYNDP 2022. Scenario Report*. April 2022.

- ESABCC (2023). *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050*, European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC), Brussels. 15 June 2023.
- ESABCC (2024). *Towards EU climate neutrality. Progress, policy gaps and opportunities*, European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC), Copenhagen. January.
- European Commission (2020). *A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social committee and the committee of the regions COM(2020) 98 final, European Commission, Brussels, Belgium. 11.3.2020.
- European Parliament (2018) "Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste." *Official Journal of the European Union*, 109-140.
- European Parliament (2021) "Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')." *Official Journal of the European Union*, 1-17.
- European Parliament (2023) "Directive (EU) of the European Parliament and the Council of 13 September 2023 on Energy Efficiency and amending regulation (EU) 2023/955 (recast)." *Official Journal of the European Union*, 1-111.
- F3 (2021). *Elektrobränslen*, F3 Faktablad Nr 9, Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel (F3), Göteborg. April.
- Fossilfritt Sverige (2023). *Färdplan för klimatneutral konkurrenskraft. Betongbranschen*, Färdplan för Fossilfri konkurrenskraft, Fossilfritt Sverige, Stockholm.
- Fossilfritt Sverige (2021). *Strategi för fossilfri konkurrenskraft - Vätgas*, Horisontella strategier, Fossilfritt Sverige, Stockholm. Januari.
- Gustavsson, M., E. Särnholm, P. Stigsson och L. Zetterberg (2011). *Energy Scenario for Sweden 2050 Based on Renewable Energy Technologies and Sources*, Report B2008, IVL Swedish Environment Institute and WWF Sweden, Göteborg and Stockholm. September.
- Havs- och Vattenmyndigheten. (2023). "Vattenkraftverk och dammar." Hämtad 22 november, 2023, från <https://www.havochvatten.se/arbete-i-vatten-och-energiproduktion/vattenkraftverk-och-dammar.html>.

- Höglund, L. O. (2010). *Kunskapsläge om miljökonsekvenser av propektering, utvinning och bearbetning av mineraltillgångar av uran*, Kemakta AR 2010-07, Kemakta Konsult på uppdrag av Naturvårdsverket, Stockholm. Mars.
- IRENA (2021). *A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050*, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. October.
- IRENA (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- Jernkontoret (2018). *Klimatfärdplan för en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige*, Rapport D 869, Jernkontoret och Fossilfritt Sverige, Stockholm.
- KI. (2023). "Prognosdatabasen." Hämtad 1 november, 2023, från <https://prognos.konj.se>.
- Kinning, L. (2022). *Sammanställning över planerad havsbaserad vindkraft i Sverige*, Svensk vindenergi, Stockholm. 2022-05-03.
- Lindgren, O., T. Hahn, M. Karlsson och M. Malmaeus (2023). "Exploring sufficiency in energy policy: insights from Sweden." *Sustainability: Science, Practice and Policy* **19**(1): 15.
- Naturskyddsföreningen (2019). *Fossilfritt, förnybart, flexibelt. Framtidens hållbara energisystem*. K. Östman, Rapport, Naturskyddsföreningen, Stockholm.
- Naturvårdsverket (2023a). *Fördjupad utvärdering av Sveriges miljömål 2023*, Rapport 7088, Naturvårdsverket, Stockholm. Januari.
- Naturvårdsverket. (2023b, 15 juni 2023). "Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser." Hämtad 11 nov, 2023, från <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/>.
- NER. (2023). "Energy system models used for the Nordic Clean Energy Scenarios." Hämtad 1 december, 2023, från <https://cleanenergyscenarios.nordicenergy.org/model>.
- Norden och IEA (2013). *Nordic Energy Technology Perspectives. Pathways to a Carbon Neutral Energy Future*, Norden and International Energy Agency (IEA).
- NPI. (2024). "Nature Positive - A Global Goal for Nature. Nature Positive by 2030." Hämtad 22 maj, 2024, från <https://www.naturepositive.org/>.
- Pei, M., M. Petäjäniemi, A. Regnell och O. Wijk (2020). "Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland." *Metals* **10**(7).

- Persson, M., C. Hult och M.-O. Larsson (2019). *Transportstudien 2019. Analys av åtgärder för en hållbar transportsektor*, C rapport 450, IVL Svenska Miljöinstitutet på uppdrag av WWF, Stockholm. November.
- Prop (2018). *Förbud mot utvinning av uran*, Regeringens proposition 2017/18:212, Sveriges Regering, Stockholm. 21 mars.
- Regeringen (2017). *Ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige*, Regeringens proposition 2016/17:146, Sveriges Regering, Stockholm. 9 mars 2017.
- Regeringen (2018). *Vattenmiljö och vattenkraft*, Lagrådsremiss dnr 201800754, Sveriges Regering, Stockholm. 8 mars 2018.
- Regeringen (2020). *Sveriges integrerade nationella energi- och klimatplan*, Infrastrukturdepartementet, Sveriges Regering, Stockholm. 2020-01-16.
- Sandberg, E. (2020). Capturing Swedish Industry Transition towards Carbon Neutrality in a National Energy System Model. Luleå, Luleå University of Technology. **Licentiate**: 175.
- SCB. (2023, 2023-05-03). "Befolkningsprognos för Sverige." Hämtad 10 november, 2023, från <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/manniskorna-i-sverige/befolkningsprognos-for-sverige/>.
- SGU (2022). *Bergverksstatistik 2021. Statistics of the Swedish Mining Industry 2021*, Periodiska publikationer 2022:1, Sveriges Geologiska Undersökningar (SGU), Uppsala.
- Skogsstyrelsen (2022). *Skogliga konsekvensanalyser 2022 - syntesrapport. Regeringsuppdrag*, Rapport 2022/11, Skogsstyrelsen, Jönköping, Sweden.
- Skogsstyrelsen. (2023a). "Skogliga konsekvensanalyser 2022. Skogsstyrelsens statistikdatabas." Hämtad 27 nov, 2023, från <https://pxwebska.skogsstyrelsen.se/pxweb/sv/SKA22/>.
- Skogsstyrelsen. (2023b). "Skogsstyrelsens statistikdatabas." Hämtad 27 nov, 2023, från <http://pxweb.skogsstyrelsen.se/pxweb/sv/Skogsstyrelsens%20statistikdatabas.>
- Stoddard, I. och K. Anderson (2022). *A new set of Paris Compliant CO2-Budgets for Sweden*, Carbon Budget Briefing Note CBBN1, Centre for Environment and Development Studies (CEMUS), Uppsala University, Uppsala. March 21.
- Svensk Solenergi. (2023). "Svensk Solenergi - vi påverkar och tar debatten." Hämtad 28 nov, 2023, från <https://svensksolenergi.se/>.
- Trafikverket. (2023, 2023-04-28). "Trafik- och transportprognoser." Hämtad 21 november, 2023, från <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i->

[branschen/Planera-och-utreda/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/Kort-om-trafikprognoser/](#).

- UN (2015). *Paris Agreement*, United Nations (UN), Paris. 12 December 2015
- UN. (2023). "The 17 Goals. Sustainable Development." Hämtad 1 december, 2023, från <https://sdgs.un.org/goals>.
- UNEP (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)* 9789280740981, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- Wråke, M., K. Karlsson, A. Kofoed-Wiuff, T. Folsland Bolkesjø, T. J. Lindroos, M. Hagberg, . . . T. Koljonen (2021a). *Nordic Clean Energy Scenarios: Solutions for Carbon Neutrality*, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Wråke, M., K. Karlsson, A. Kofoed-Wiuff, T. Folsland Bolkesjø, T. J. Lindroos, B. Tennbakk, . . . T. Koljonen. (2021b). "Nordic Clean Energy Scenarios: Results Viewer." Hämtad 27 nov, 2023, från <https://cleanenergyscenarios.nordicenergy.org>.
- WWF (2011). *Hållbar Energi. 100% förnybart på naturens villkor*, Rapport, Stiftelsen Världsnaturfonden (WWF), Stockholm. September.
- WWF (2023). *Global Energy Policy Framework*, World Wide Fund for Nature (WWF), Gland. November.
- WWF. (2024). "Global biodiversity." 2024, från <https://www.wwf.eu/what-we-do/biodiversity/global-biodiversity/>.
- WWF och BCG (2023). *Building a Nature-Positive Energy Transformation: Why a low-carbon economy is better for people and nature*, WWF and Boston Consulting Group (BCG), Washington.
- Zanchi, G. och A. Eriksson (2023). *Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan*, Rapport 2023/10, Skogsstyrelsen, Jönköping.

STOCKHOLM

Box 21060, 100 31 Stockholm

GÖTEBORG

Box 53021, 400 14 Göteborg

MALMÖ

Nordenskiöldsgatan 24
211 19 Malmö

KRISTINEBERG

(Center för marin forskning
och innovation)
Kristineberg 566
451 78 Fiskebäckskil

SKELLEFTEÅ

Kanalgatan 59
931 32 Skellefteå

NAVI MUMBAI, INDIA

CBD Belapur Navi Mumbai – 400614
State of Maharashtra, **India**

BEIJING, CHINA

Room 612A
InterChina Commercial Building No.33
Dengshikou Dajie, Dongcheng District
Beijing 100006, China