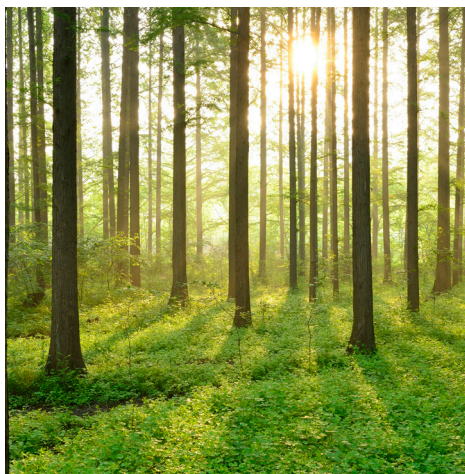


SCENARIER FÖR ENERGI OCH KLIMAT

RAPPORT 2021:771



KLIMATFÖRÄNDRINGARNAS
KONSEKVENSER



Scenarier för energi och klimat

En delrapport i projektet ”Klimatförändringarnas
konsekvenser för energisystemet”

MARTIN HAGBERG

THOMAS UNGER

JENNY GODE

ISBN 978-91-7673-771-2 | © Energiforsk Maj 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

År 2020 var det varmaste året som uppmätts i Europa och jordens medeltemperatur låg på samma höga rekordnivå som 2016. De globala utsläppen av växthusgaser fortsätter att öka och vi rör oss mot en global temperaturhöjning på över 3 grader mot slutet av seklet. Effekterna blir oåterkalleliga om vi inte lyckas bryta utvecklingen.

I den arktiska regionen, som norra Sverige tillhör, går uppvärmningen betydligt snabbare och vi ser redan effekterna av detta. Den ökade temperaturen påverkar både naturmiljö och samhället och därigenom inte minst det svenska energisystemet med allt större inslag av förnyelsebar energi. Det leder bland annat till att produktionsförutsättningarna för olika energislag förändras och att energisystemet blir mer sårbart.

I detta projekt - *Klimatförändringars konsekvenser för energisystemet* – har Energiforsk samlat ett 15-tal forskare och analytiker från Chalmers Tekniska Högskola, IVL Svenska Miljöinstitutet, Profu och SMHI för att fördjupa kunskapen om klimatförändringarnas påverkan på det svenska energisystemet och vilka åtgärder som krävs för att minska de negativa effekterna. Projektet har genomförts av Martin Hagberg, Thomas Unger och Jenny Gode på Profu i nära samverkan med representanter från berörda delar av energisektorn, forsknings-organisationer, myndigheter, försäkringsbolag, med flera.

Energiforsk vill rikta ett stort tack dels till medverkande forskare, dels till alla medverkande i projektets styrgrupp och olika arbetsgrupper. Sammantaget har över hundra personer från ett 50-tal olika organisationer bidragit till projektets genomförande. Energiforsk vill också rikta ett särskilt tack till projektets finansiärer (C4 Energi, Energimyndigheten, E.ON Sverige, Fortum Sverige, Göteborg Energi, If, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Stiftelsen IVL, Svenska kraftnät, Söderenergi, Tekniska verken i Linköping, TVO, Uniper, Vattenfall, ÅForsk).

Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Klimatförändringen och dess betydelse för vår planet har alltmer hamnat i fokus för samhällsdebatten. En viktig pusselbit i den klimatpolitiska forskningen är de olika scenarierna för det globala och det regionala klimatet som klimatforskare världen över tar fram och där IPCC har en nyckelroll. Osäkerheterna i beräkningarna är av flera skäl stora, inte minst då det handlar om relativt långa tidsrymder och då det fortfarande finns en hel del kunskapsluckor. Beroende på bakomliggande antaganden så landar dessa scenarier i ett relativt brett temperaturökningsintervall, typiskt +1,5 till över +4 graders uppvärmning till slutet av detta århundrade, jämfört med den förindustriella nivån. Bakom dessa klimatscenarier finns en omfattande flora av energisystemscenarier som i sin tur bygger på antaganden om exempelvis ekonomisk tillväxt, teknisk utveckling, styrkan i den globala och regionala klimatpolitiken samt tillgång till bränslen och energiresurser. Syftet med denna rapport är bland annat att föröka knyta ihop flera av de internationellt uppmärksammade klimatscenarierna med de bakomliggande energisystemscenarierna.

Vi avslutar denna rapport med en beskrivning av ett antal möjliga framtider för den svenska el- och fjärrvärmeförsörjningen mot 2050, baserat på energisystemmodellering. Vi använder dessa framtidsbilder som utgångspunkt för analysen av systemeffekterna av klimatförändringen på den svenska el- och fjärrvärmeförsörjningen i projektet "Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet". Det är nämligen inte förrän man skapat sig en bild av hur det framtida energisystemet kan tänkas se ut som man kan få en mer relevant förståelse för hur klimatförändringen påverkar energisystemet och dra lärdomar för omställningsarbetet. Även om vi redan idag kan se tecken på den pågående klimatförändringen så är det först om några decennier som genomslaget sannolikt blir mer betydande. Och då har vi ett i flera avseenden helt annat energisystem än idag.

Summary

Climate change and its impact on our planet has received increased attention in the public debate over the past years. Global and regional climate scenarios from e.g. IPCC form essential basis for climate-policy research. However, the uncertainties in these scenarios are relatively large. This is explained by the relatively large time spans involved and by the fact that there is still a certain lack in knowledge. Depending on assumptions, the scenarios indicate global temperature increases of typically +1,5 to more than +4 degrees C at the end of this century, compared to pre-industrial temperature levels. The climate scenarios are linked to scenarios for the long-term development of the energy systems that, in turn, are based on assumptions about, for example, economic growth, technological development, climate-policy stringency and access to fuels and energy resources. The purpose of this report is to describe the link between a number of internationally well-known climate scenarios and their relation to specific energy system scenarios.

In the second part of this report, we present a selection of possible future scenarios for the Swedish electricity and district heating supply systems, based on detailed energy-systems modelling. The scenarios are used as a starting point for the assessment of consequences of climate change on the Swedish electricity and district-heating supply systems in the project "Impacts of climate change on the energy system". A projection and understanding of what the future energy system might look like is essential for assessing the impact of climate change on the energy system, and to draw conclusions relevant to the transition of the energy system. Even if we already today can see clear signs of the ongoing change in the climate, a more significant impact is expected in a couple of decades. When we reach that point in time, we are in many aspects facing a completely different energy system than the present.

Innehåll

Inledning	8
DEL 1: Scenarioutblick	9
1 Scenarier för strålningsdrivning – RCP	10
1.1 Representative concentration pathways	10
1.2 Framtagningsprocess	12
1.3 Användningsområden	13
1.4 Energisystemets utveckling i underliggande IAM-scenarier	14
1.5 Effekter på global medeltemperatur	15
2 Energisystemscenarier i IPCC AR5	16
2.1 Scenariogruppering	16
2.2 Utsläpp av växthusgaser	17
2.3 Energisystemets utveckling	18
3 Socio-ekonomiska scenarier - SSP	21
3.1 Shared socioeconomic pathways	21
3.2 Framtagningsprocess	21
3.3 Narrativ och egenskaper	22
3.4 Energisystemets utveckling	24
4 Energisystemscenarier i IPCC SR 1,5	27
4.1 Scenariogruppering och fyra scenarioexempel	27
4.2 Utsläpp av växthusgaser	28
4.3 Energisystemets utveckling	29
5 IEA-scenarier	31
5.1 World Energy Outlook	31
5.1.1 CO ₂ -emissioner	32
5.1.2 Energisystemets utveckling	33
5.2 Energy technology perspectives	34
6 EU-scenarier	35
6.1 EU reference scenario	35
6.1.1 Energisystemets utveckling	35
6.1.2 CO ₂ -emissioner	36
6.2 EUCO-scenarier	37
6.2.1 Energianvändning och växthusgasutsläpp	37
7 Svenska och nordiska scenarier	39
7.1 Nordic ETP	39
7.2 NEPP	39
7.3 Energimyndigheten	40
7.4 Energibranschens färdplaner	40
8 Diskussion och slutsatser	42

DEL 2: Scenarier för det svenska el- och fjärrvärmesystemet	44
1 Metod och omvärldsscenarier	45
1.1 Två omvärldsscenarier	45
1.2 Två viktiga scenarioskiljande parametrar: klimatpolitik och elektrifiering	46
2 Elproduktionen	48
2.1 Vindkraft	48
2.2 Kärnkraft	49
2.3 Vattenkraft	51
2.4 Kraftvärme	51
2.5 Solel	52
3 Produktionseffekt	54
4 Fjärrvärme	57
Referenser	59

Inledning

Denna rapport är en delrapport i forskningsprojektet "Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet" ("KLIMPEN"). I detta forskningsprojekt utgör klimatförändringarnas påverkan på olika energislag den ena dimensionen i en sammansatt risk- och sårbarhetsanalys för det framtida svenska energisystemet. Den andra dimensionen utgörs av den roll som de olika energislagen kan komma att få i det framtida svenska energisystemet. Ju större andel av energiförsörjningen ett specifikt energislag kan tänkas få i framtiden desto viktigare kommer det specifika energislagets utsatthet för (eller robusthet mot) klimatförändringar att vara för hela energisystemets samlade riskbild och sårbarhet.

För att bilda sig en uppfattning om den framtida utvecklingen av energisystemet används ofta olika typer av scenarioanalys. Energisystemmodeller har utnyttjats för scenarioanalys sedan 1970-talet och metodiken är sedan länge väl etablerad. Det borgar för att många av de energisystemscenarier som idag tas fram håller hög kvalitet metodmässigt sett. Däremot sker ständigt en utveckling och förändring av de omvärldsfaktorer som påverkar energisystemens utveckling, vilket ställer (ständiga) krav på att uppdatera energisystemscenarierna. Exempelvis medför teknikutvecklingen att en modellbeskrivning av olika tekniker med bland annat kostnader och prestanda löpande måste uppdateras för att spegla det aktuella läget. Vidare har socio-ekonomiska förutsättningar som befolkningsutveckling och ekonomisk utveckling samt samhällstrender i stort en påverkan på efterfrågan av energitjänster vilket också behöver tas hänsyn till i scenario- och modellutveckling.

Denna rapport avser att ge en bild av hur det framtida energisystemet kan komma att utvecklas och därmed hur betydelsen av olika energislag kan förändras. Detta görs med två skilda ansatser och med olika perspektiv, bland annat avseende geografisk avgränsning. Rapporten redogör dels för en litteraturstudie/genomgång där en mer generell och internationell utblick kring energisystemscenarier görs, och dels för en modellanalys specifikt inriktad mot det nordiska och svenska energisystemet och de teknikslag som är i särskilt fokus inom KLIMPEN-projektet. Dessa olika ansatser redovisas i denna rapport i två skilda rapportdelar: "DEL 1: Scenarioutblick" och "DEL 2: Scenarier för det svenska el- och fjärrvärmesystemet".

DEL 1 av rapporten utgör en genomgång av redan befintliga energi- och klimatscenarier med ett globalt, europeiskt respektive nordiskt och svenskt perspektiv. Del 1 syftar till att ge en inblick i ett antal scenarioarbeten som på senare tid har haft ett betydande genomslag i energi- och klimatforskning och/eller energipolitisk debatt på ett internationellt eller nationellt plan. En underliggande frågeställning har också varit vad det finns för förhållande mellan energisystemscenarier och scenarier som används som grund för klimatmodellering.

DEL 2 av rapporten redogör för en scenarioanalys baserad på modellen TIMES-NORDIC med inriktning på Sverige och Norden. Syftet med Del 2 är att ge underlag för diskussionen inom KLIMPEN-projektet med avseende på de olika energislagens framtida roll och betydelse för energiförsörjningen med fokus på vindkraft, kärnkraft, vattenkraft, bioenergi och sol.

DEL 1: Scenarioutblick

Del 1 utgör en genomgång kring viktiga energi- och klimatscenarier med ett globalt, europeiskt respektive nordiskt och svenskt perspektiv. Studien syftar till att ge en inblick i ett antal scenarioarbeten som på senare tid har haft ett betydande genomslag i energi- och klimatforskning och/eller energipolitisk debatt på ett internationellt eller nationellt plan. De internationella scenarier som berörs har begränsats till scenarier som används och/eller tagits fram av IPCC, IEA och EU-kommissionen.

Del 1 syftar till att ge en orientering kring metoder och resultat för viktiga energiscenarier utifrån ovan nämnda perspektiv och avgränsningar. En underliggande frågeställning är också vad det finns för (direkt eller indirekt) förhållande mellan energisystemscenarier och scenarier som används som grund för klimatmodellering, de så kallade RCP-scenarierna.

Del 1 tar sitt avstamp i en beskrivning av RCP-scenarierna i kapitel 1, för att därefter behandla andra IPCC-relaterade scenarioarbeten i kapitel 2 och 3. Kapitel 4 presenterar scenarier framtagna av IEA och kapitel 5 beskriver scenarier framtagna av EU-kommissionen. Kapitel 6 ger en inblick i nordiska och svenska energiscenarier. Kapitel 7 avrundar rapportdelen med en sammanfattande diskussion.

1 Scenarier för strålningsdrivning – RCP

Detta kapitel beskriver utvecklingen, huvudsakliga egenskaper och användningsområden för de så kallade RCP-scenarierna, vilka är viktiga inom de senaste årens klimatforskning. Avsnittet avser även att klargöra i vilken mån och på vilket sätt RCP-scenarierna kopplar till scenarier för energisystemets utveckling. Kapitlet bygger på van Vuuren et al. (2011a) samt kompletterande källor.

1.1 REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS

FN:s klimatpanel, IPCC, kom 2013/2014 ut med sin femte utvärderingsrapport (IPCC, 2014). Viktiga delar av rapporten grundar sig på en uppsättning av en vid tidpunkten ny typ av scenarier, så kallade "Representative Concentration Pathways" (RCPs). RCP-scenarierna beskriver hur växthuseffekten kan komma att förstärkas i framtiden, men utan att koppla detta till specifika narrativ om samhällets socio-ekonomiska utveckling.

I IPCC:s samanställning används fyra olika RCP-scenarier: RCP2,6; RCP4,5; RCP6; och RCP8,5 (Vuuren et al., 2011a). Scenarierna benämns efter den nivå av antropogen (av människan orsakad) strålningsdrivning som respektive scenario ger upphov till år 2100 i jämförelse med förindustriell nivå. Strålningsdrivning är skillnaden mellan den energi från solinstrålning som träffar jorden och den energi som jorden strålar ut i rymden, och mäts i enheten watt per kvadratmeter (w/m²) (SMHI, 2019).

RCP-scenarierna beskriver olika utvecklingsvägar för koncentrationer av växthusgaser, aerosoler och andra klimatpåverkande faktorer. Innehållet i scenarierna beskrivs i Tabell 1. All scenariodata, det vill säga sammanhängande datauppsättningar för utsläpp, koncentrationer av växthusgaser med mera, finns tillgängligt i en online-databas för nedladdning för vidare analys (RCP Database, 2009).

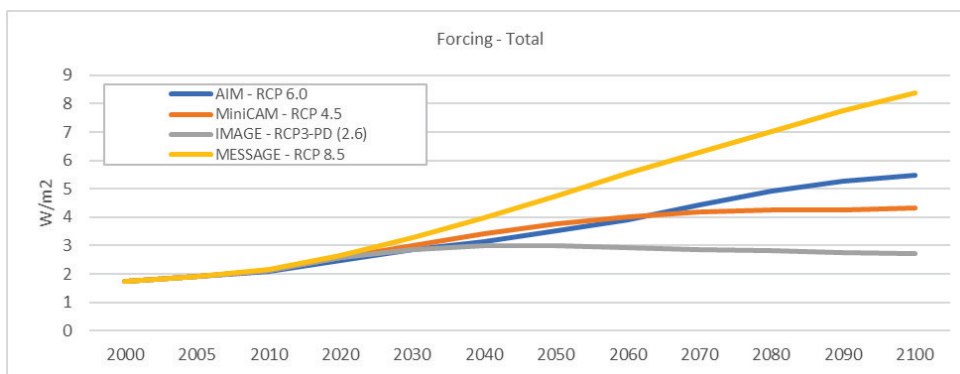
Tabell 1. Tillgänglig av typ av information i RCP-scenarier och geografisk upplösning (van Vuuren et al., 2011)

Typ av data	Geografisk upplösning
Emissioner av växthusgaser	Globalt och för 5 regioner, respektive 0,5° x 0,5° nät
Emissioner av aerosoler och kemiskt aktiva gaser	0,5° x 0,5° nät
VOC-emissioner	0,5° x 0,5° nät
Koncentration av växthusgaser	Globalt
Koncentration av aerosoler och kemiskt aktiva gaser	0,5° x 0,5° nät
Data för landanvändning/landtäckning	0,5° x 0,5° nät med delnätfraktioner

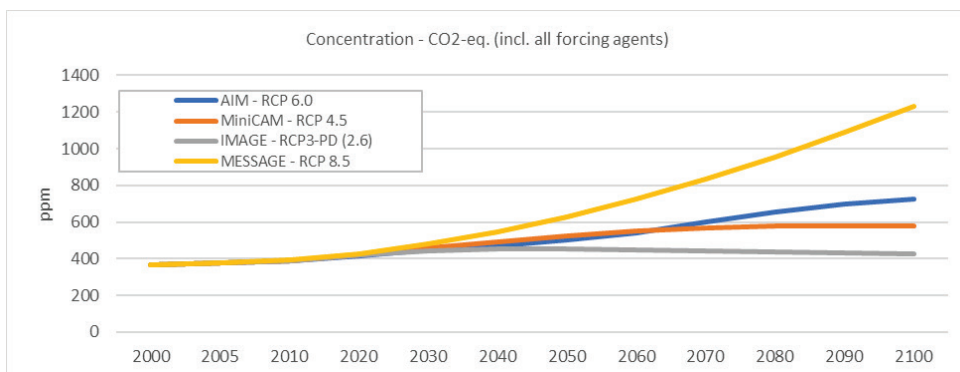
RCP-scenarierna har ett antal viktiga egenskaper och begränsningar. RCP-scenarierna är "representativa" på så sätt att varje RCP representerar ett större antal emissionsscenarier i litteraturen (van Vuuren et al, 2011). Som grupp betraktat avsågs de fyra RCP-scenarierna att täcka in hela spannet av relevanta

utsläppscenarier i litteraturen vid tiden för framtagandet. Scenarierna avser att vara internt logiskt sammanhängande projektioner av faktorer som påverkar strålningsdrivning, men att inte utgöra fullständiga integrerade scenarier med exempelvis socio-ekonomiska parametrar. Varje RCP-scenario kan alltså uppnås på olika sätt ifråga om socio-ekonomiska utvecklingsvägar.

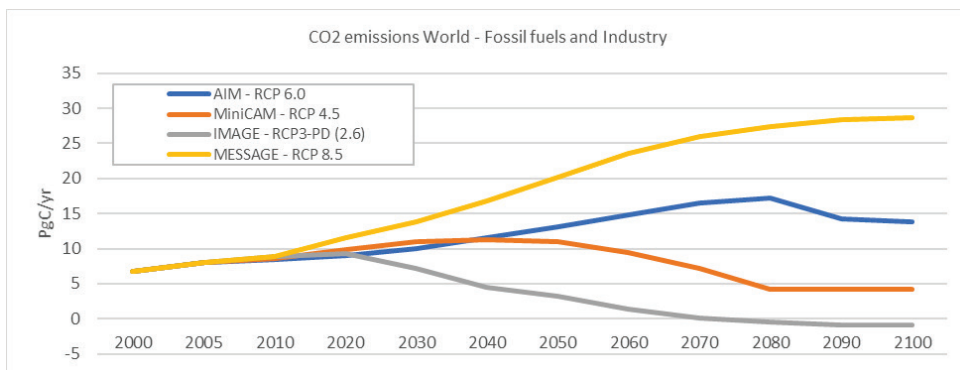
Figur 1–4 visar på en del av egenskaperna för de olika RCP-scenarierna. Figur 1 visar på utvecklingen av scenariernas strålningsdrivning, Figur 2 presenterar CO_{2eq} koncentrationsnivåer i atmosfären och Figur 3 och 4 visar energirelaterade CO₂-emissioner på global nivå respektive OECD-nivå. Scenariodata är hämtad från RCP databasen (RCP Database, 2009).



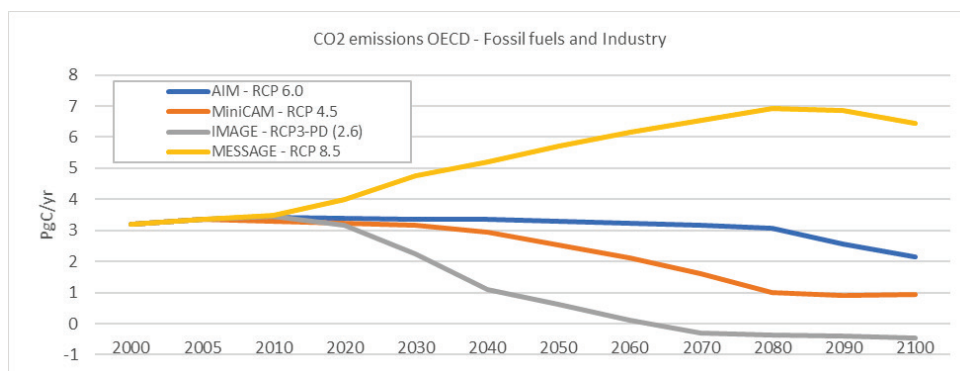
Figur 1. Strålningsdrivning (radiative forcing) för RCP-scenarier (RCP Database, 2009).



Figur 2. CO_{2eq}-koncentration för RCP-scenarier (RCP Database, 2009).



Figur 3. CO₂-emissioner från fossil bränsleanvändning och från industri (ej inkluderat effekter av förändrad markanvändning) på global nivå för RCP-scenarier (RCP Database, 2009).



Figur 4. CO₂-emissioner från fossil bränsleanvändning och från industri (ej inkluderat effekter av förändrad markanvändning) på OECD-nivå för RCP-scenarier (RCP Database, 2009).

Som framgår av Figur 1–4 så har scenarierna skilda egenskaper:

- RCP2,6 är det mest optimistiska scenariot i fråga om utsläppsminskningar. Utvecklingsvägen är representativ för scenarier som leder till väldigt låga koncentrationer av växthusgaser. Detta scenario har en "peak" i strålningsdrivning på ca 3,1 W/m² i mitten av århundradet för att sedan sjunka till 2,6 W/m² till år 2100 (scenariot kallas därför också RCP 3PD, där PD står för Peak-Decline). För att nå sådana nivåer, reduceras utsläppen av växthusgaser avsevärt över tid. Se vidare van Vuuren et al. (2007; 2011a; 2011b).
- RCP4,5 är ett stabiliseringsscenario där den totala strålningsdrivningsnivån stabiliseras före 2100. Scenariot kan ses som ett reduktionsscenario med medelhöga reduktionsnivåer (van Vuuren et al, 2011a). Se vidare Clarke et al. (2007), Wise et al (2009) och Thomson et al. (2011).
- RCP6,0 är ett stabiliseringsscenario där den totala strålningsdrivningen stabiliseras efter 2100. RCP6 kan tolkas antingen som ett referensscenario med medelhöga utsläpp eller ett reduktionsscenario med låga reduktioner (van Vuuren et al, 2011a). Se vidare Fujino et al. (2006), Hijioka et al. (2008) och Masui et al. (2011).
- RCP8,5 karakteriseras av kraftigt ökande växthusgasutsläpp och är representativt för scenarier i litteraturen som leder till höga växthusgas-koncentrationer (van Vuuren et al, 2011). Scenariot kan ses som ett referensscenario med höga utsläpp. Se vidare Riahi et al. (2007; 2011).

1.2 FRAMTAGNINGSPROCESS

Scenarierna är framtagna baserat på resultat från så kallade "Integrated Assessment Models" (IAMs) och kompletterande metoder. IAMs är en typ av globala modeller i vilka man söker att fånga interaktioner mellan energisystem, socioekonomiska samhällsaspekter (som befolkningsutveckling och BNP) och i många fall också markanvändningsaspekter och klimatsystem (IPCC, 2014).

Utifrån en litteraturgenomgång där ett stort antal publicerade IAM-scenarier identifierades, framgick att publicerade scenarier hade ett brett spann i avseende om strålningsdrivning, från 2,5 W/m² till över 9 W/m² år 2100 (van Vuuren et al, 2011a).

Baserat på det totala litteraturunderlaget (vilket bestod totalt av 324 scenarier, av vilka 37 klarade alla uppsatta kriterier, se vidare van Vuuren et al, 2011a) valdes fyra representativa nivåer för strålningsdrivning, liksom fyra IAM-scenarier vilka kunde användas för kvantifiering av RCP-scenarierna. Tillsammans ansågs dessa nivåer och scenarier täcka in och vara representativa för litteraturunderlaget som helhet (van Vuuren et al, 2011a). De fyra scenarierna uppdaterades och IAM-modellresultaten bearbetades sedan vidare med andra metoder och modeller (som till exempel atmosfäriska modeller och kolcykel-klimatmodeller) för att erhålla scenariodata i den form och detaljeringsgrad, avseende bland annat geografisk upplösning, som förutsatts (van Vuuren et al, 2011a).

För att få fyra scenarier som var representativa för litteraturunderlaget ifråga om utsläppsnivåer och relaterade strålningsdrivningsnivåer valde man, enkelt uttryckt, ett scenario som ur denna aspekt låg i överkant, ett som låg i underkant, och två som låg däremellan. Scenariernas indataantaganden eller resultat kring socio-ekonomisk utveckling och energisystem är i detta sammanhang mindre viktiga och utgör inte en del av själva RCP-scenarierna (och är inte heller tillgängliga i RCP-scenariodatabasen). Efter själva framtagningsprocessen kan sägas att banden med de specifika IAM-scenariernas socioekonomiska förutsättningar och utfall ifråga om exempelvis energisystemets utveckling klipps. Istället poängterar man att ett flertal olika socioekonomiska och tekniska utvecklingsvägar (inom energisystemet och inom makroekonomin i stort) i princip kan leda till samma RCP-scenario, det vill säga samma utsläppsbana och samma strålningsdrivning.

RCP-scenarierna är framtagna av olika modelleringsteam och baserat på olika modeller (van Vuuren et al, 2011a): RCP2,6 utvecklades av IMAGE-modelleringsgruppen på PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. RCP4,5 utvecklades av MiniCAM-modelleringsgruppen på Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) i USA. RCP6,0 utvecklades av AIM-modelleringsgruppen på National Institute for Environmental Studies (NIES) i Japan. RCP8,5 utvecklades med hjälp av MESSAGE-modellen och IIASA Integrated Assessment Framework på International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) i Österrike.

1.3 ANVÄNDNINGSMOMRÅDEN

Det finns flera användningsområden för RCP-scenarierna (van Vuuren, 2011a):

- Input till klimatmodellering. Klimatmodellering baserat på RCP-scenarierna undersöker bl.a. klimatförändringar som en funktion av strålningsdrivningsnivåer och kolflöden kopplat till olika CO₂-koncentrationsnivåer.
- Input till utsläppsminskingsanalyser ("mitigation analysis"). RCP-scenarierna kan användas till forskning kring reduktionsåtgärder och socio-ekonomiska förhållanden som är i linje med ett specifikt scenario för framtida CO₂-koncentrationer. Detta inkluderar bland annat energisystem-modelleringsstudier där olika effekter av teknisk utveckling och klimatpolicy kan studeras.

- Input till effektanalyser ("impact analysis"). I kombination med klimatmodelleringar och information/scenarier kring framtida socio-ekonomiska förutsättningar så kan RCP-scenarierna bidra i analyser kring effekter av klimatförändringar.

Slutligen anses de underlätta samarbete mellan olika discipliner kopplat till forskning om klimatförändring genom att forma en sammanhängande analytisk grund (van Vuuren, 2011a).

1.4 ENERGISYSTEMETS UTVECKLING I UNDERLIGGANDE IAM-SCENARIER

Som tidigare har indikerats så är RCP-scenarierna inte framtagna med sinsemellan logiskt sammanhängande socio-ekonomiska antaganden och/eller gemensamma referensfall, utan de är istället utvalda baserat på deras emissionsnivåer och relaterade koncentrationsnivåer (van Vuuren, 2011a).

Som nämndes i föregående avsnitt, så kan information från RCP-scenarierna (i fråga om till exempel utsläppsnivåer och koncentrationsnivåer) ligga till grund för framtagandet av nya energisystemscenarier. Alternativt kan energisystemscenarier som tas fram, eller har tagits fram, "i efterhand" kopplas till ett RCP-scenario baserat på dess utfall (i fråga om till exempel utsläpp av växthusgaser,) för att på så sätt sätta scenariot i ett klimatperspektivsammanhang.

De underliggande socioekonomiska parametrarna och energisystemets utveckling i de IAM-scenarier som ligger till grund för RCP-scenarierna skall inte tolkas som unika för det slutgiltiga RCP-scenariot. Med detta sagt så är dessa aspekter ändå en viktig del av de för RCP-scenarierna underliggande IAM-scenarierna. Betraktade som enskilda scenarier så kan det förstås ändå vara intressant att titta på energisystemets utveckling i dessa scenarier. De får då betraktas som exempel på utvecklingsvägar som kan leda till de utsläpps- och strålningsdrivningsnivåer som ges i RCP-scenarierna.

Gällande energianvändning så visar de underliggande IAM-scenarierna till RCP2,6; RCP4,5 och RCP6 en primärenergianvändning på 750–900 EJ år 2100, motsvarande ca dubbla användningen mot början av seklet (van Vuuren et al., 2011a). Det underliggande IAM-scenariot till RCP8,5 uppvisar en betydligt högre energianvändning, bland annat som en följd av högre befolkningsutveckling och lägre nivå av teknikutveckling, och landar år 2100 på en primärenergianvändning på ca 1750 EJ (van Vuuren et al., 2011a).

Det finns en tydlig skillnad i energimix mellan de till RCP-scenarierna underliggande IAM-scenarierna. Den totala användningen av fossila bränslen speglar som förväntat scenariernas strålningsdrivningsnivå. Som en följd av användning av CCS-teknik ("carbon capture and storage") så visar alla scenarier en större användning av kol och/eller naturgas år 2100 i jämförelse med år 2000 (van Vuuren et al., 2011a). Oljeanvändning håller sig förhållandevis konstant i scenarierna, med undantag av det till RCP2,6 underliggande IAM-scenariot där det sker en minskning. Icke-fossila alternativ ökar i alla scenarier, inklusive förnybara resurser (sol och vind), bioenergi och kärnkraft (van Vuuren et al., 2011a). Drivkrafter för detta inkluderar ökande energiefterfrågan, stigande

fossilbränslepriser och klimatpolicies. För RCP2,6 är CCS baserad på bioenergi (BECCS) en viktig del. Detta resulterar i negativa utsläpp och tillåter även en viss fossilbränsleanvändning utan CCS i slutet av seklet (van Vuuren et al., 2011a).

1.5 EFFEKTER PÅ GLOBAL MEDELTEMPERATUR

Implementering av RCP-scenarierna i klimatmodeller (CMIP5-modellerna) visar förändring av den globala medeltemperaturen för 2081–2100 i jämförelse med 1850–1900 för de olika RCP-scenarierna enligt nedan (IPCC, 2013). Först visas medelvärdet $\pm$ en standardavvikelse, inom parentes ges 5 till 95% spannen baserat på normalfördelning.

- RCP2,6 (°C): $1,6 \pm 0,4$ (0,9; 2,3)
- RCP4,5 (°C): $2,4 \pm 0,5$ (1,7; 3,2)
- RCP6,0 (°C): $2,8 \pm 0,5$ (2,0; 3,7)
- RCP8,5 (°C): $4,3 \pm 0,7$ (3,2; 5,4)

2 Energisystemscenarier i IPCC AR5

Detta kapitel ger en inblick i den scenarioanalys som gjordes i IPCC:s femte utvärderingsrapport gällande det globala energisystemets utveckling för att nå klimatmål. Avsnittet bygger i första hand på kapitel 6 och 7 i IPCC:s "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change" (IPCC, 2014b).

2.1 SCENARIOGRUPPERING

I IPCC:s femte utvärderingsrapport analyseras scenarier för omställningen av det globala energisystemet (IPCC, 2014b). Fokus ligger på energirelaterade CO₂-emissioner och de nödvändiga åtgärder i energisystemet för att nå utsläppsreduktioner som är kompatibla med olika långsiktiga klimatmål. Analysen bygger på ett stort antal energisystemscenarier, omkring 1200, vilka även har gjorts tillgängliga i en online-databas (se AR5 Scenario Database, 2014). Scenarierna bygger på ett 30-tal olika modeller och är framtagna av ett flertal forskargrupper.

I analysen kategoriserades scenarierna i referens- och reduktionsscenarier ("baseline and mitigation scenarios"), och delades vidare in i grupper baserat på de CO_{2eq}-koncentrationsnivåer de ger upphov till år 2100, se Tabell 2.

Tabell 2. Gruppering av scenarier från "AR 5 Scenario Database" baserat på uppnådd CO_{2eq}-koncentration (tabell baserad på IPCC, 2014b).

CO _{2eq} koncentration 2100 (ppm)	Strålningsdrivning 2100 (W/m ²)	Kumulativa CO ₂ emissioner 2011–2100 (GtCO ₂)	Motsvarande RCP	Antal scenarier som sträcker sig till 2100	Temperaturökning till 2100 (°C) ^{a)}
430–480	2,3–2,9	<950	RCP2,6	114	1,5–1,7 (1,0–2,8)
480–530	2,9–3,45	950–1500	-	257	1,7–2,1 (1,2–3,3)
530–580	3,45–3,9	1500–1950	-	222	2,0–2,3 (1,4–3,6)
580–650	3,9–4,5	1950–2600	RCP4,5	109	2,3–2,6 (1,5–4,2)
650–720	4,5–5,1	2600–3250	RCP4,5	27	2,6–2,9 (1,8–4,5)
720–1000	5,1–6,8	3250–5250	RCP6	120	3,1–3,7 (2,1–5,8)
>1000	>6,8	>5250	RCP8,5	166	4,1–4,8 (2,8–7,8)

a) Temperaturökning i jämförelse med 1850–1900 beräknat med MAGICC modellen. Spänn utan parentes avser medianestimeringar och illustrerar skillnader mellan scenarierna inom varje kategori. Spänn inom parentes inkluderar också osäkerheter kopplat till kolcykel och klimatsystem så som det är representerat i MAGICC-modellen.

Gruppen av scenarier med de mest omfattande utsläppsreduktionerna, vilka leder till koncentrationsnivåer på 430–480 ppm CO_{2eq} år 2100, bedömdes motsvara en medeltemperaturförändring på ca 1,5–1,7°C till slutet av seklet i förhållande till

tiden före industrialiseringen, och med en trolig chans (66%; "likely" enligt AR5:s begreppsdefinition) behålla temperaturförändringen under 2 grader. Däremot bedöms det som mer osannolikt än sannolikt ("more unlikely than likely") att ökningen av medeltemperaturen hålls under 1,5°C. Scenarierna i gruppen med CO_{2eq}-koncentrationer på 650–720 motsvarar förhållandevis blygsamma reduktionsansträngningar, i linje med en medeltemperaturökning på ungefär 2,6–2,9°C. Grupperna av scenarier som leder till koncentrationer över 720 ppm består i hög utsträckning av referensscenarier utan eller med mycket begränsade reduktionspolicies. (IPCC, 2014b)

Tabell 2 anger också vilket RCP-scenario som respektive scenariogrupp kan anses motsvara. Detta bygger på CO_{2eq}-koncentrationsnivåerna år 2100. I vissa fall, för scenarier med strålningsdrivning mellan 2,9 och 3,9 finns inget direkt motsvarande RCP-scenario.

2.2 UTSLÄPP AV VÄXTHUSGASER

I gruppen av referensscenarier ökar de energirelaterade CO₂-emissionerna med mellan 80% och 130%, eller upp till 55–70 GtCO₂, till år 2050 i jämförelse med år 2010 (avser 25te till 75te percentilen av alla referensscenarier i scenariodatabasen, se Figur 5 (hämtad från IPCC, 2014b)). Till slutet av århundradet stiger utsläppen ytterligare och når för medianen bland referensscenariorna ca 80 GtCO₂ per år och för 75te percentilen ca 90 GtCO₂ per år. Noterbart är att RCP8,5-scenariot når över 100 GtCO₂ och är således i jämförelse med flertalet referensscenarier i scenariodatabasen ett scenario med mycket höga utsläpp.

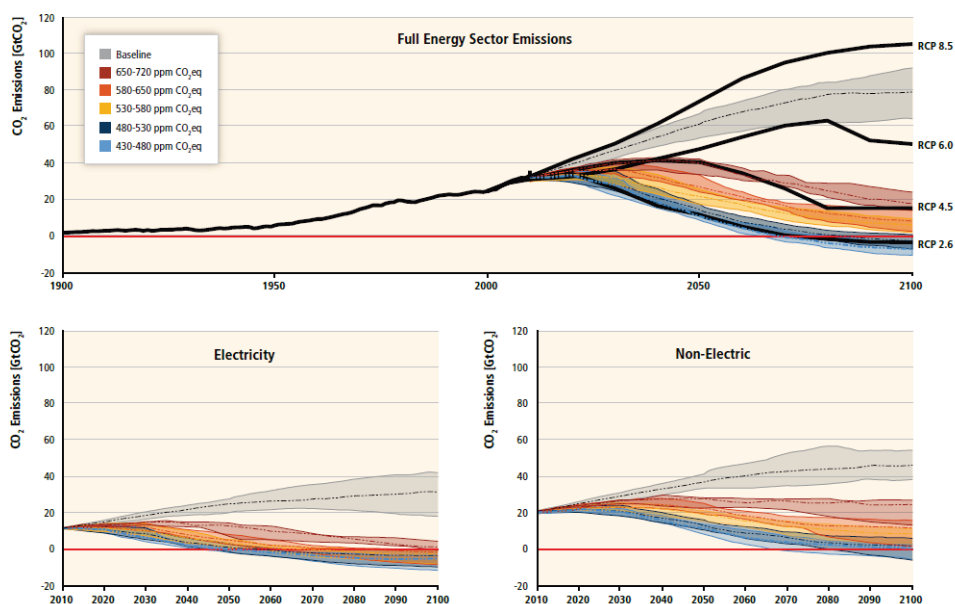


Figure 7.9 | Global development of annual CO₂ emissions for the full energy system including energy supply, and end uses (upper panel), and the split between electricity and non-electric emissions (lower panels). The baseline emissions range (grey) is compared to the range of emissions from mitigation scenarios grouped according to their long-term CO_{2eq} concentration level by 2100. Shaded areas correspond to the 25th–75th percentile and dashed lines to the median across the scenarios. 'Non-electric' comprises emissions from the full chain of non-electric conversion processes as well as emissions from fossil fuels supplied to the end-use sectors. The upper panel includes in addition also the representative concentration pathways (RCPs) (black lines, see Chapter 6, Table 6.2). Source: WGIII AR5 Scenario Database (See Section 6.2.2 and Annex II.10). Note: Some scenarios report industrial process emissions (e.g., CO₂ released from cement manufacture beyond energy-related emissions) as part of the energy system.

Figur 5. CO₂-emissioner från det globala energisystemet i scenarier grupperade efter långsiktig CO_{2eq}-koncentrationsnivå. Skuggade områden avser 25–75 percentilen i scenariogruppen och streckade linjer avser medianen. Svarta linjer i övre bild visar RCP-scenarierna. Figur är hämtad från IPCC (2014b).

För majoriteten av de scenarier som når CO_{2eq}-koncentrationer på 480 ppm och lägre år 2100 så har de energirelaterade utsläppen sin topp mellan 2020–2030 för att sedan sjunka med ca 10–15 GtCO₂ till 2050. Detta motsvarar en utsläppsreduktion till 2050 på mellan 50–70% i förhållande till år 2010. För att nå ambitiösa klimatmål blir negativa utsläpp viktiga för många scenarier, inte minst inom elsektorn, se Figur 5.

2.3 ENERGISYSTEMETS UTVECKLING

IPCC konstaterar att en stabilisering av CO_{2eq}-koncentrationerna i atmosfären kräver stora förändringar i den globala energitillförseln, men också att det finns ett flertal tillgängliga åtgärder för att åstadkomma detta (IPCC, 2014b). Sådana åtgärder inkluderar minskning av den slutliga energiefterfrågan, genom förbättrad effektivitet och/eller beteendemässiga förändringar, såväl som bränslebyten (till exempel från kol till gas) och introduktion av tillförselalternativ med låg kolintensitet som förnybart, kärnkraft, CCS och även förbättrad effektivitet i användandet av fossila bränslen (IPCC, 2014b).

Figur 6 (hämtad från IPCC, 2014b) visar tre exempel på scenarier för energisystemet som är i linje med CO_{2eq}-koncentrationer på 480 ppm CO_{2eq} år 2100. Scenarierna, som är framtagna med modellerna MESSAGE, REMIND och GCAM, visar olika utvecklingsvägar för hur energisystemet kan förändras. Referensscenarierna (till vänster i figuren) visar att utan nya klimatpolicies fortsätter energitillförseln att domineras av fossila bränslen. Den globala energitillförseln ökar i referensscenarierna från kring 600 EJ år 2020 till 900–1200 EJ/år till 2050 (IPCC, 2014b).

För att begränsa CO_{2eq}-koncentrationen till 480 ppm krävs en snabb och omfattande ersättning av fossilbränsleanvändningen (utan CCS). I de tre scenarierna ersätts mellan 60 och 300 EJ fossila bränslen till 2030, och till 2050 är den fossila bränsleanvändningen 230–670 EJ lägre än i referensscenarierna (IPCC, 2014b).

Låga CO_{2eq}-koncentrationer nås med hjälp av olika åtgärder i olika scenarier. Skillnaderna reflekterar att det finns en betydande vidd i antaganden gällande tekniktillgänglighet, potentialer och policyförutsättningar. På kort sikt visar emellertid alla tre scenarier på vikten av åtgärder som reducerar energiefterfrågan. Till år 2030 nås 40–90% av emissionsreduktionerna genom besparingar i energiefterfrågan, vilket reducerar behovet av fossila bränslen. På lång sikt skiljer sig bidraget från minskad energiefterfrågan åt mellan scenarierna. I MESSAGE-scenariot ersätts ca 1200 EJ av fossil bränsleanvändning genom effektivitetsåtgärder och förbättringar på efterfrågesidan till år 2100, i GCAM-scenariot är motsvarande värde ca 400 EJ (IPCC, 2014b).

I reduktionsscenarierna ses en omfattande uppbyggnad av energitillförselsalternativ med låga CO₂-utsläpp. Nivån av en utbyggnad beror till stor del på utvecklingen av energiefterfrågan som bestämmer den övergripande ”storleken” på systemet. Som en konsekvens visar scenarier med större betoning på effektivisering och andra åtgärder för att begränsa energiefterfrågan mindre

omfattande och mindre snabb uppskalning av alternativa tillförselmöjligheter (IPCC, 2014b).

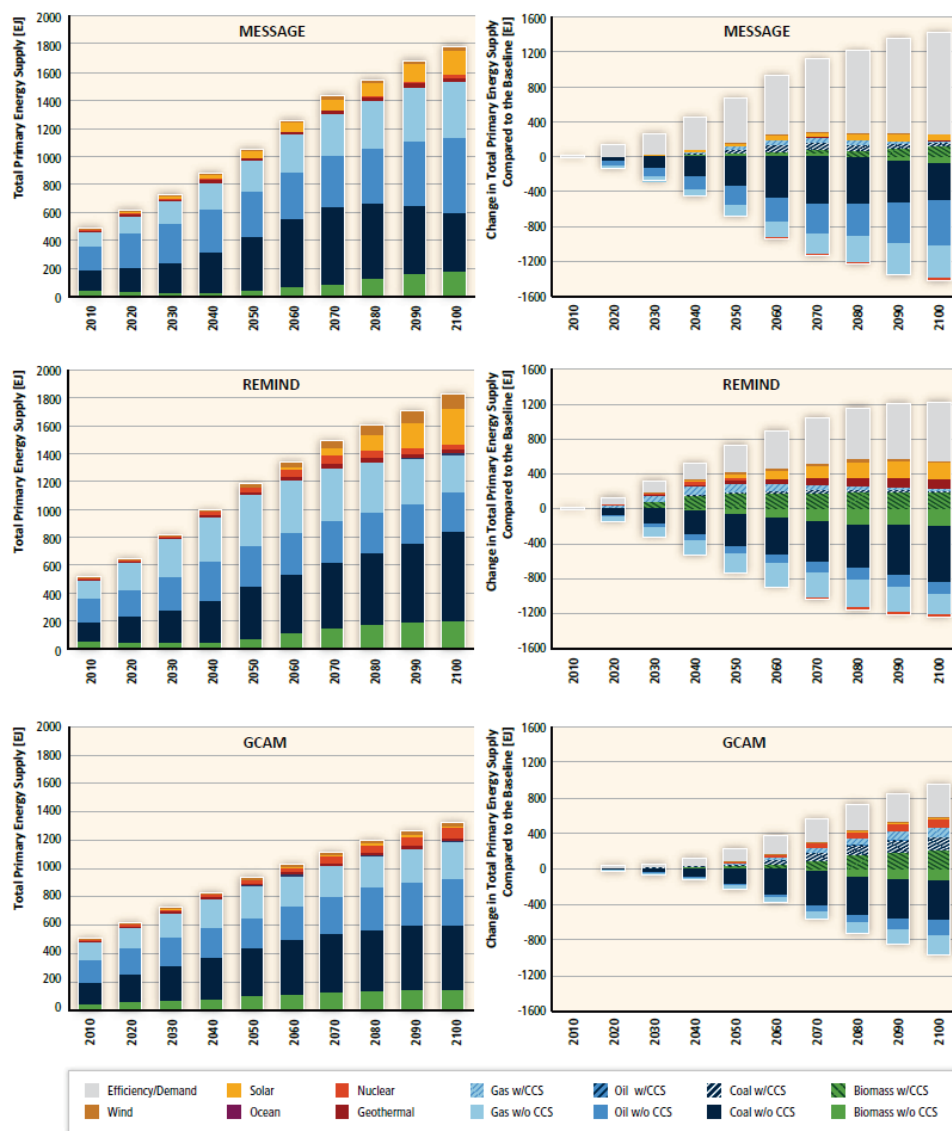


Figure 7.10 | Development of annual primary energy supply (EJ) in three illustrative baseline scenarios (left-hand panel); and the change in primary energy compared to the baseline to meet a long-term concentration target between 430 and 530 ppm CO₂eq. Source: ReMIND (RoSE: Bauer et al., 2013); GCAM (AME: Calvin et al., 2012); MESSAGE (GEA: Riahi et al., 2012).*

* Note that 'Savings' is calculated as the residual reduction in total primary energy.

Figur 6. Primär energitillförsel för tre referensscenarier (till vänster) och skillnad i primär energitillförsel för tre reduktionsscenarier (till höger) som når koncentrationsnivåer på mellan 430 och 530 ppm CO₂eq i jämförelse med referensfall. Figur är hämtad från IPCC (2014b).

Figur 7 (hämtad från IPCC, 2014b) jämför scenarier med omfattande reduktioner av växthusgasutsläpp med låg respektive hög global energiefterfrågan år 2050. Scenarier med hög energiefterfrågan visar generellt sett en högre användning av teknikalternativ med låg kolintensitet och en snabbare utfasning av fossil bränsleanvändning utan CCS. Scenarioanalysen visar också att en hög energiefterfrågan i många fall får en förstärkt inlåsning avseende olje användning. Detta

sätter extra press på andra sektorer att minska sin kolintensitet ännu snabbare, för att på så sätt kompensera för en ökad utsläpp från oljeprodukter. Resultaten bekräftar vikten av åtgärder för minskad energianvändning för att öka flexibiliteten i energitillförselsystem, och minska risken för att stringenta reduktionsstabiliseringsscenarier blir ouppnåeliga. Noterbart är att även i scenarier med låga koncentrationsnivåer, finns en betydande användning av fossila bränslen år 2050. (IPCC, 2014)

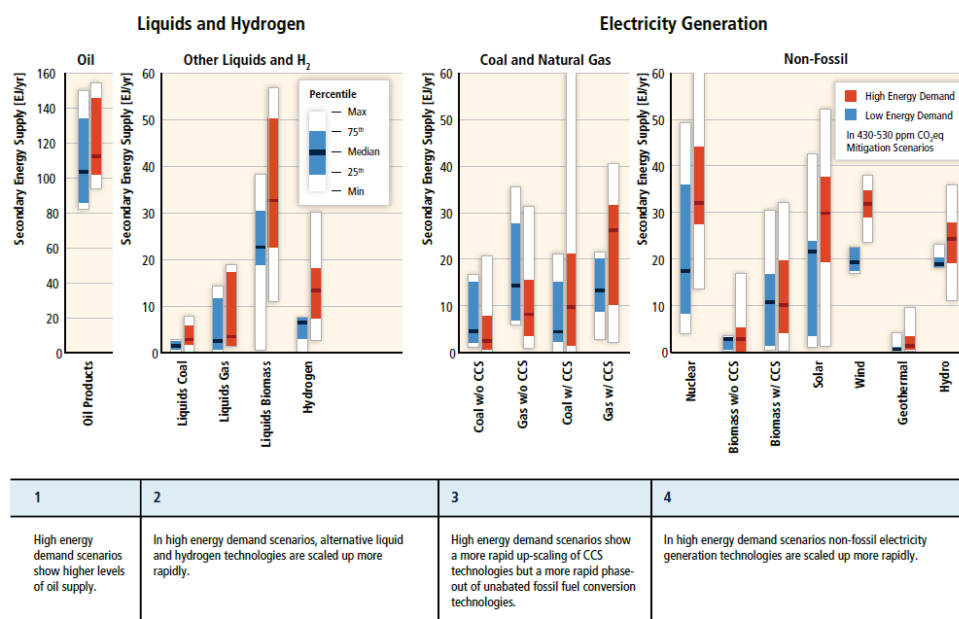


Figure 7.11 | Influence of energy demand on the deployment of energy supply technologies for stringent mitigation scenarios (430–530 ppm CO₂eq) in 2050. Blue bars for 'low energy demand' show the deployment range of scenarios with limited growth of final energy of < 20% in 2050 compared to 2010. Red bars show the deployment range of technologies in case of 'high energy demand' (> 20% growth in 2050 compared to 2010). For each technology, the median-, interquartile-, and full-deployment range is displayed. (Source: WGIII AR5 Scenario Database; see Annex II.10).

Notes: Scenarios assuming technology restrictions and scenarios with final energy in the base-year outside $\pm 5\%$ of 2010 inventories are excluded. Ranges include results from many different integrated models. Multiple scenario results from the same model were averaged to avoid sampling biases. For further details see Chapter 6.

Figur 7. Användning av olika energitekniker i scenarier med kraftiga utsläppsreduktioner (430-530 ppm CO₂eq) år 2050 uppdelat i scenarier med hög (röd) respektive låg (blå) total energianvändning. Varje kvartil samt medianvärden indikeras av det totala scenariounderlaget indikeras. Figur är hämtad från IPCC (2014b).

3 Socio-ekonomiska scenarier - SSP

Detta kapitel beskriver utvecklingen och huvudsakliga egenskaper för de så kallade SSP-scenarierna, som under senare år har utvecklats för analys av de socio-ekonomiska dimensionerna kring klimatförändring. Kapitlet avser även ge en inblick i hur SSP-scenarierna kopplar till RCP-scenarierna och hur energisystemets utveckling ter sig i denna scenariokontext. Kapitlet bygger på Riahi et al. (2017a; 2017b) och kompletterande källor.

3.1 SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS

Under senare år har en uppsättning scenarier utvecklats som beskriver hur det globala samhället, demografi och ekonomi kan komma att förändras. Dessa scenarier kallas "Shared Socioeconomic Pathways" (SSPs) och används nu som en viktig del energi- och klimatmodelleringar som bland annat ger input till IPCC:s sjätte utvärderingsrapport (som publiceras 2020–21).

SSP-scenarierna inkluderar som dess grundläggande delar: scenariobeskrivningar (narrativ), kvantifierade projektioner för befolkningstillväxt, BNP, och urbanisering, samt kvalitativa antaganden kring energi- och landanvändning (Riahi et al., 2017a; 2017b). Dessa faktorer tjänar som utgångspunkt för den vidare kvantifieringen av scenarierna med hjälp av IAM-modeller, med vilka bland annat energisystemets utveckling beräknas (Riahi et al., 2017a; 2017b).

Utsläppsreduktion behandlas separat från de underliggande utvecklingsvägarna som beskrivs i SSP-scenarierna. Varje SSP har ett referensfall ("baseline") vilket ger utvecklingen av exempelvis växthusgasutsläpp i en värld utan nya klimatpolicies. Utöver detta kan SSP-scenarierna kombineras med ett flertal utsläppsreduktionsmål, till exempel de nivåer som kopplar till RCP-scenarierna (se kapitel 2). SSP-scenarierna och RCP-scenarierna innehåller således olika typer av information och kompletterar varandra, och kan kombineras till integrerade scenarier som innehåller såväl beskrivning av klimatpåverkande faktorer (i RCP-scenarierna) som socio-ekonomiska narrativ (i SSP-scenarierna).

3.2 FRAMTAGNINSPROCESS

Utvecklingen av SSP-scenarierna bestod av fem huvudsakliga steg (Riahi et al., 2017a):

- Framtagande av scenarieberättelserna, eller narrativen, som ger den underliggande logiken för varje SSP. Narrativen fokuserar på faktorer kopplat till socio-ekonomisk förändring som i regel inte täcks av modeller.
- Utvidgning av narrativen till "input-tabeller" som i kvalitativa termer beskriver de huvudsakliga SSP-egenskaperna och scenarioantaganden (till exempel ifråga om energiefterfrågan i olika sektorer är "låg", "medium", eller "hög"; om olika aspekter av teknologisk utveckling är "låg", "medium", eller "hög"; och så vidare).

- Utveckling av kvantitativa demografiska och ekonomiska parametrar som utgör grundläggande beståndsdelarna ("basic elements") av SSP-scenarierna.
- Framtagande av utvecklingsvägar för energisystem, landanvändning, växthusgasutsläpp och emissioner av luftföroreningar för SSP-scenariernas referensutveckling genom modellering med IAMs.
- Vidare framtagande av SSP-reduktionsscenarioer baserat på modellering med IAMs. SSP-scenarierna har kombinerats med flera av de strålningsdrivningsnivåer som återspeglas i RCP-scenarierna (kapitel 2), samt ytterligare nivåer.

Så långt har sex olika IAM-modeller använts i implementeringen av scenarieförutsättningarna. Därtill har resultat för följande strålningsdrivningsnivåer tagits fram (W/m^2): 1,9; 2,6; 3,4; 4,5 och 6,0. För referensfallen förutsätts inte en viss strålningsdrivningsnivå utan den blir en konsekvens av förutsättningarna i varje SSP och frånvaron av ytterligare klimatpolicies. Modellresultaten är tillgängliga i en online-databas (se SSP Database, 2018).

Kombinationen av fem SSP-scenarier, referensfall och ett flertal reduktionsfall, samt sex modeller leder till ett stort antal modellfall och en ansevärd mängd resultatdata. För varje SSP har emellertid så kallade "marker" scenarier valts ut, vilka kan sägas representera utvecklingen inom ett visst SSP. Övriga modellfall inom samma SSP kompletterar marker-scenarierna genom att bland annat ge en bild av osäkerheter och alternativa möjliga utfall (Riahi et al., 2017a). Modellerna som utvecklats för marker-scenarierna är enligt nedan (ansvarigt modelleringsteam ges inom parentes) (Riahi et al., 2017b):

- SSP1: IMAGE (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency)
- SSP2: MESSAGE-GLOBIOM (IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis)
- SSP3: AIM (NIES – National Institute for Environmental Studies, Japan)
- SSP4: GCAM (PNNL – Pacific Northwest National Laboratory, USA)
- SSP5: REMIND-MAGPIE (PIK – Potsdam Institute for Climate Research, Germany)

3.3 NARRATIV OCH EGENSKAPER

SSP-scenarier inkluderar scenarieberättelser, eller narrativ, som beskriver hur framtiden kan utvecklas gällande breda samhällstrender. Deras syfte är att ge ett logiskt sammanhang för förutsättningarna inom scenariot såväl som en beskrivning av trender som i regel inte fångas av modeller (Riahi et al., 2017a). De är designade så att de spänner över ett stort utfallsrum beträffande socioekonomiska utmaningar kopplat till två huvudsakliga aspekter: utsläppsreduktion ("mitigation") och klimatanpassning ("adaptation").

Tabell 3 sammanfattar SSP-narrativen (från Riahi et al., 2017a), och tabell 4 summerar de huvudsakliga egenskaperna hos SSP-scenarierna (från IPCC, 2018, i sin tur baserat på O'Neill et al., 2017).

Tabell 3. Sammanfattning av SSP-narrativ citerade från Riahi et al. (2017a)

SSP1	Sustainability – Taking the Green Road (Low challenges to mitigation and adaptation) The world shifts gradually, but pervasively, toward a more sustainable path, emphasizing more inclusive development that respects perceived environmental boundaries. Management of the global commons slowly improves, educational and health investments accelerate the demographic transition, and the emphasis on economic growth shifts toward a broader emphasis on human well-being. Driven by an increasing commitment to achieving development goals, inequality is reduced both across and within countries. Consumption is oriented toward low material growth and lower resource and energy intensity.
SSP2	Middle of the Road (Medium challenges to mitigation and adaptation) The world follows a path in which social, economic, and technological trends do not shift markedly from historical patterns. Development and income growth proceeds unevenly, with some countries making relatively good progress while others fall short of expectations. Global and national institutions work toward but make slow progress in achieving sustainable development goals. Environmental systems experience degradation, although there are some improvements and overall the intensity of resource and energy use declines. Global population growth is moderate and levels off in the second half of the century. Income inequality persists or improves only slowly and challenges to reducing vulnerability to societal and environmental changes remain.
SSP3	Regional Rivalry – A Rocky Road (High challenges to mitigation and adaptation) A resurgent nationalism, concerns about competitiveness and security, and regional conflicts push countries to increasingly focus on domestic or, at most, regional issues. Policies shift over time to become increasingly oriented toward national and regional security issues. Countries focus on achieving energy and food security goals within their own regions at the expense of broader-based development. Investments in education and technological development decline. Economic development is slow, consumption is material-intensive, and inequalities persist or worsen over time. Population growth is low in industrialized and high in developing countries. A low international priority for addressing environmental concerns leads to strong environmental degradation in some regions.
SSP4	Inequality – A Road Divided (Low challenges to mitigation, high challenges to adaptation) Highly unequal investments in human capital, combined with increasing disparities in economic opportunity and political power, lead to increasing inequalities and stratification both across and within countries. Over time, a gap widens between an internationally-connected society that contributes to knowledge- and capital-intensive sectors of the global economy, and a fragmented collection of lower-income, poorly educated societies that work in a labor intensive, low-tech economy. Social cohesion degrades and conflict and unrest become increasingly common. Technology development is high in the high-tech economy and sectors. The globally connected energy sector diversifies, with investments in both carbon-intensive fuels like coal and unconventional oil, but also low-carbon energy sources. Environmental policies focus on local issues around middle and high income areas.
SSP5	Fossil-fueled Development – Taking the Highway (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation) This world places increasing faith in competitive markets, innovation and participatory societies to produce rapid technological progress and development of human capital as the path to sustainable development. Global markets are increasingly integrated. There are also strong investments in health, education, and institutions to enhance human and social capital. At the same time, the push for economic and social development is coupled with the exploitation of abundant fossil fuel resources and the adoption of resource and energy intensive lifestyles around the world. All these factors lead to rapid growth of the global economy, while global population peaks and declines in the 21st century. Local environmental problems like air pollution are successfully managed. There is faith in the ability to effectively manage social and ecological systems, including by geo-engineering if necessary.

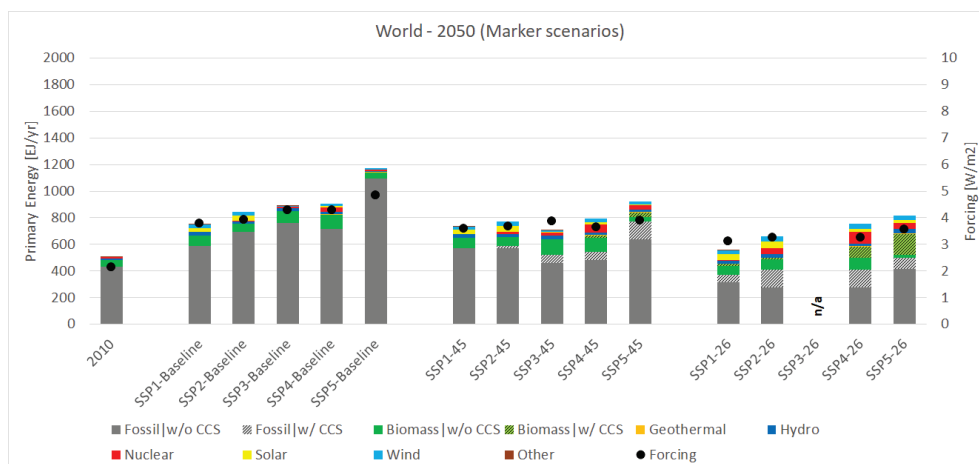
Tabell 4. Summering av egenskaper för SSP-scenarier (från IPCC, 2018 och O'Neill et al., 2017)

Socio-Economic Challenges to Mitigation	Socio-Economic Challenges to Adaptation		
	Low	Medium	High
High	SSP5: Fossil-fueled development Low population Very high economic growth per capita High human development High technological progress Ample fossil fuel resources Very resource intensive lifestyles High energy and food demand per capita Economic convergence and global cooperation		SSP3: Regional rivalry High population Low economic growth per capita Low human development Low technological progress Resource-intensive lifestyles Resource-constrained energy and food demand per capita Focus on regional food and energy security Regionalization and lack of global cooperation
Medium		SSP2: Middle of the road Medium population Medium and uneven economic growth Medium and uneven human development Medium and uneven technological progress Resource-intensive lifestyles Medium and uneven energy and food demand per capita Limited global cooperation and economic convergence	
Low	SSP1: Sustainable development Low population High economic growth per capita High human development High technological progress Environmentally oriented technological and behavioral change Resource-efficient lifestyles Low energy and food demand per capita Economic convergence and global cooperation		SSP4: Inequality Medium to high population Unequal low to medium economic growth per capita Unequal low to medium human development Unequal technological progress: high in globalized high-tech sectors, slow in domestic sectors Unequal lifestyles and energy/food consumption: resource intensity depending on income Globally connected elite, disconnected domestic work forces

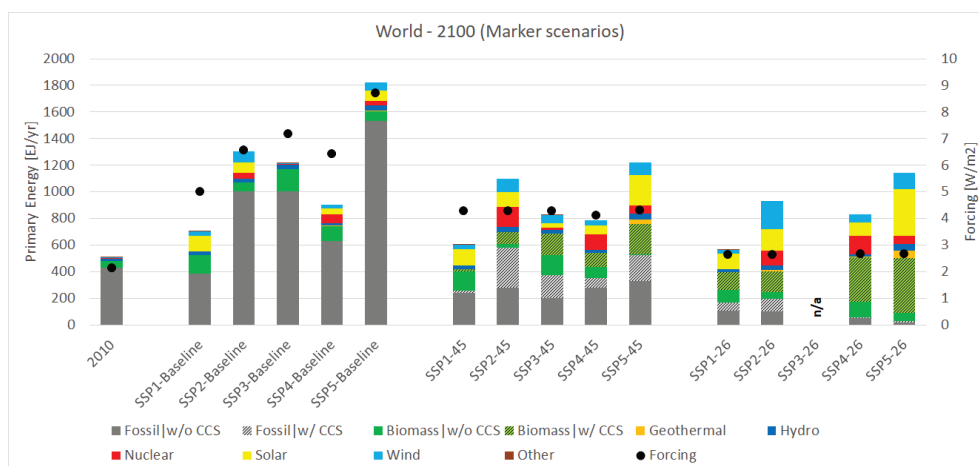
3.4 ENERGISYSTEMETS UTVECKLING

Figur 8 presenterar primärenergitillförsel och strålningsdrivningsnivåer för SSP-scenariernas referensfall samt för två reduktionsfall. Reduktionsfallen når utsläppsreduktioner som är i linje med strålningsdrivningsnivåerna i RCP4,5 respektive RCP2,6 (motsvarande en temperaturökning på 1,7–3,2°C respektive 0,9–2,3°C, se avsnitt 1.5). Figuren är baserad på data hämtad från SSP-databasen (SSP Database, 2018) och visar resultat för marker-scenarierna (se avsnitt 4.2). Reduktionsfallen benämns efter SSP samt efter uppnådd strålningsdrivningsnivå år 2100, till exempel SSP1-45 för strålningsdrivningsnivån 4,5. Referensfallen beskriver SSP-scenariernas utveckling utan ytterligare klimatpolicies och de resulterande växthusgasutsläpp och strålningsdrivningsnivåer skiljer sig därmed kraftigt åt mellan fallen. För reduktionsfallen är den aktuella strålningsdrivningsnivån istället något som är på förhand bestämd så modellerna styrs i en riktning som åstadkommer detta (om möjligt).

I scenarierna används en kombination av åtgärder för att reducera energirelaterade växthusgasutsläpp, såväl tillförselsidan som efterfrågesidan i energisystemet. På tillförselsidan ses en övergång från fossila bränslen (utan CCS) till en högre andel förnybart, CCS, och i många fall kärnkraft. På efterfrågesidan sker energi-effektiviseringar inklusive bland annat en ökad elektrifiering (Riahi et al., 2017a).



(a)



(b)

Figur 8. Primärenergitillförsel och strålningsdrivningsnivåer för SSP-scenarier för referensfall och för två reduktionsfall: med strålningsdrivning på ca 4,5 W/m² och med strålningsdrivning på ca 2,6 W/m². Resultat för år 2050 i (a) och år 2100 i (b) (år 2010 redovisas som jämförelse). Avser "Marker"-scenarier (se vidare beskrivning i text). Data som figuren är baserad på är hämtad från SSP-databasen (SSP Database, 2018).

Ansträngningen som krävs för att nå specifika klimatmål beror av SSP-scenario. I vissa fall sker redan stora förbättringar, till exempel gällande energieffektivitet, redan i referensutvecklingen (till exempel för SSP1-baseline), vilket minskar svårigheten (och kostnaden) att nå långsiktiga klimatmål. I andra fall innehåller referensutvecklingen mycket begränsade strukturella förändringar och/eller en hög energiintensitet vilket innebär större utmaningar att nå klimatmål (till exempel SSP5 och SSP3) (Riahi et al., 2017a).

Riahi et al. (2017a) konstaterar att det krävs en snabb uppskalning av tillförselalternativ med låga utsläpp för nå ambitiösa klimatmål. Oberoende av SSP så baseras ca 40–60% av primärenergitillförseln på global nivå på förnybart, CCS och/eller kärnkraft år 2050 för marker-scenarier som ligger i linje med en strålningsdrivningsnivå på 2,6 W/m² år 2100. Detta motsvarar ca 3–4 gånger högre

andel än år 2010. Noterbart är att CCS spelar en betydande roll i flera reduktions-scenarier.

Kostnaderna för att nå ett visst klimatmål skiljer sig åt mellan SSP-scenarierna. I linje med scenarionarrativen så är reduktionskostnaderna, vilka har en stark korrelation med utmaningarna kopplat till utsläppsreduktion, lägre i SSP1 och SSP4 i jämförelse med SSP3 och SSP5 (Riahi et al., 2017a). Alla reduktionsmål är inte möjliga att nå för alla SSP-scenarier i modelleringen. Exempelvis kunde ingen lösning hittas för målet om 2,6 W/m² för förutsättningarna i SSP3. Riahi et al. (2017a) påpekar att det faktum att modellerna inte kan hitta lösningar för alla kombinationer av förutsättningar inte är detsamma som att det är en omöjlighet också i verkligheten. Det indikerar dock att det finns en ökad risk att omställningen under sådana förutsättningar inte är möjlig på grund av de involverade tekniska och/eller ekonomiska utmaningarna (Riahi et al., 2017a).

4 Energisystemscenarier i IPCC SR 1,5

Detta kapitel ger en inblick i de scenarier som används i IPCC:s specialrapport om effekter av en global uppvärmning på 1,5 °C och relaterade utsläppsbanor för växthusgaser. Bakgrunden till rapporten, som kom ut 2018, var att många länder ansåg att kunskapen om förutsättningar och konsekvenser av 1,5 graders uppvärmning var begränsad, och parterna i Parisavtalet bjöd därför in IPCC att analysera detta. Detta kapitel bygger på den aktuella specialrapporten (IPCC, 2018).

4.1 SCENARIOGRUPPERING OCH FYRA SCENARIOEXEMPEL

IPCC:s specialrapport (IPCC, 2018) om 1,5 graders uppvärmning (över förindustriella nivåer) togs fram inom ramen för IPCC:s sjätte utvärderingscykel och bygger på en sammanställning och analys av ett stort antal publicerade artiklar (mer än 6000). Liksom i AR5 sammanställs och analyseras ett stort antal scenarier för det globala energisystemets utveckling och dess koppling till klimatförändring.

Analysen baseras på, sedan AR5-arbetet, nyttillkommen scenariolitteratur. I det nya underlaget finns ett flertal studier med scenarier förenliga med en uppvärmning på 1,5 °C, det vill säga med mer strikta scenarier än den mest strikta scenario-kategorin i AR5 (som avspeglade en temperaturökning på under 2 °C med mer än 66% sannolikhet). Många scenarierna som inkluderas bygger på det socio-ekonomiska ramverket definierat av SSP-scenarierna (som beskrivs i kapitel 3).

På liknande sätt som i AR5 grupperades och kategoriserades scenarier som identifierats i litteraturen. Här användes en klassificering baserad på uppsatta gränser för temperaturökning (förenliga med 1,5 respektive 2 graders uppvärmning) samt huruvida de temporärt överskrider temperaturgränsen och i så fall i vilken utsträckning ("low overshoot" eller "high overshoot"). Sammanställningen och grupperingen av scenarier innebar att man till bas för analysen av reduktionsscenarier hade 90 scenarier som var förenliga med 1,5 graders temperaturökning samt 132 scenarier som var förenliga med en 2 graders temperaturökning. (IPCC, 2018)

Utöver analysen av scenariokategorier (med ovan nämnda egenskaper) belyses i rapporten också fyra specifika scenario-exempel, eller illustrativa scenario-arketyper. Dessa fyra scenarier består av tre scenarier baserat på SSP-ramverket samt ett som inte baseras på detta:

- S1: är ett scenario med hållbarhetsfokus som baseras på SSP1 och som tagits fram med AIM-modellen.
- S2: är ett medelvägsscenario som baseras på SSP2 och är framtaget med MESSAGE-GLOBIOM-modellen.
- S5: är ett fossil-bränsle intensivt scenario som baseras på SSP5 och som tagits fram med REMIND-MAGPIE-modellen.
- LED: är ett scenario med starkt fokus på åtgärder på efterfrågesidan (LED="low energy demand").

Dessa scenarier används i rapporten för att belysa specifika egenskaper och variationer inom gruppen av 1,5 graders-scenarier, speciellt med fokus på att exemplifiera den variation av kombinationer av reduktionsåtgärder som är förenligt med 1,5 graders uppvärmning. Scenarierna benämns ibland också P1, P2, P3 och P4 för LED, S1, S2 respektive S5. (IPCC, 2018)

4.2 UTSLÄPP AV VÄXTHUSGASER

Scenarier förenliga med 1,5 graders uppvärmning kräver en kraftig och snabb reducering av antropogena utsläpp av CO₂, se Figur 9. Detta åstadkoms genom förändringar inom energi, transport, byggnader såväl som inom jordbruk, skogsbruk och annan landanvändning (AFOLU = Agriculture, Forestry and Other Land Use). Noterbart är att utsläppen på global nivå i så gott som samtliga scenarier behöver uppnå negativa utsläpp, det vill säga att mer CO₂ tas bort från atmosfären än vad som tillförs den. I de flesta scenarier sker detta mellan 2040 och 2060. Den senare delen av spannet innebär oftast temporärt överskridande ("overshoot") av 1,5 gradersnivån. (IPCC, 2018)

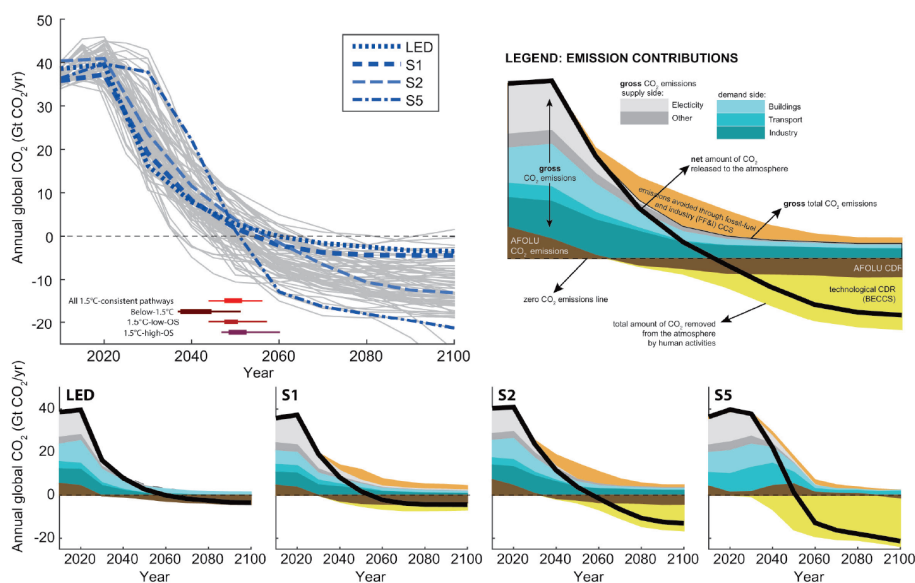


Figure 2.5 | Evolution and break down of global anthropogenic CO₂ emissions until 2100. The top-left panel shows global net CO₂ emissions in Below-1.5°C, 1.5°C-low-overshoot (OS), and 1.5°C-high-OS pathways, with the four illustrative 1.5°C-consistent pathway archetypes of this chapter highlighted. Ranges at the bottom of the top-left panel show the 10th–90th percentile range (thin line) and interquartile range (thick line) of the time that global CO₂ emissions reach net zero per pathway class, and for all pathways classes combined. The top-right panel provides a schematic legend explaining all CO₂ emissions contributions to global CO₂ emissions. The bottom row shows how various CO₂ contributions are deployed and used in the four illustrative pathway archetypes (LED, S1, S2, S5, referred to as P1, P2, P3, and P4 in the Summary for Policymakers) used in this chapter (see Section 2.3.1.1). Note that the S5 scenario reports the building and industry sector emissions jointly. Green-blue areas hence show emissions from the transport sector and the joint building and industry demand sector, respectively.

Figur 9. Globala antropogena CO₂-utsläpp i scenarier som är förenliga med 1,5 graders uppvärmning. Uppe till vänster illustreras utsläppsbånar för samtliga sådana scenarier, med de fyra illustrativa scenario-arketyperna särskilt markerade. Nederst i figuren visas de fyra illustrativa arketypp-scenarierna i en högre detaljnivå där utsläppsnivåer i olika sektorer såväl användande av CDR-åtgärder framgår. Figur är hämtad från IPCC (2018).

De fyra illustrativa modellscenarier i SR1.5-rapporten ger exempel på olika scenarier där uppvärmningen begränsas till 1,5 grader. Scenarier skiljer sig åt ur ett flertal aspekter, exempelvis gällande socio-ekonomiska förutsättningar (befolknings-tillväxt, ekonomisk tillväxt med mera) men också ifråga vilken vikt

man lägger vid olika åtgärder för reduktion av växthusgaser. I alla fyra scenarier används borttagande av CO₂, det vill säga åtgärder som ger upphov till negativa utsläpp, ("Carbon Dioxide Removal"-CDR) men i vilken grad skiljer sig åt mellan scenarierna. Likaså skiljer sig det relativa bidraget av CDR-åtgärder mellan å ena sidan åtgärder inom jordbruk, skogsbruk och annan landanvändning och å andra sidan bioenergi med CCS (BECCS).

4.3 ENERGISYSTEMETS UTVECKLING

Figur 10 visar primärenergitillförsel för scenarier som är förenliga med 1,5 graders uppvärmning inklusive de fyra illustrativa arketypt-scenarierna (samt också för ett IEA-scenario). Som förväntat uppvisar denna typ av scenarier en tillväxt i andelen energi med låga CO₂-utsläpp, som förnybart, kärnkraft och fossilbränsleanvändning med CCS, samt en minskande andel fossilbränsleanvändning utan CCS. Generellt uppvisar scenarierna också en snabb minskning av kolintensiteten i elproduktionen samt en ökande elektrifiering av i efterfrågesektorerna. CCS i kombination med både fossila bränslen och biobränslen blir också en viktig del i de flesta av scenarierna. (IPCC, 2018)

Energisystemets utveckling skiljer sig åt på flera sätt mellan de fyra arketypt-scenarierna (IPCC, 2018):

- S1-scenariot exemplifierar en utveckling med ett stort fokus på hållbarhet inom energisystemet såväl som inom andra delar av samhället. Scenariot karakteriseras av innovationer inom teknologier med låg kolintensitet, men också av en förhållandevis låg social acceptans för BECCS.
- S2-scenariet är ett medelvägsscenario där social och teknisk utveckling följer historiska mönster. Utsläppsreduktioner sker i första hand genom förändrade produktionssätt inom energi och andra produkter och i en mindre utsträckning genom minskad efterfrågan.
- S5-scenariot är ett resurs- och energiintensivt scenario, med bland annat en hög efterfrågan på drivmedel. Utsläppsreduktioner sker främst genom tekniska lösningar, där BECCS får en mycket viktig roll.
- LED-scenariot exemplifierar en framtid där sociala, affärsmässiga och tekniska innovationer leder till ett minskat behov av energi, trots ökande levnadsstandard. Ett nedbantat energisystem möjliggör en snabb omställning med minskande CO₂-utsläpp som följd. CCS används inte i scenariot.

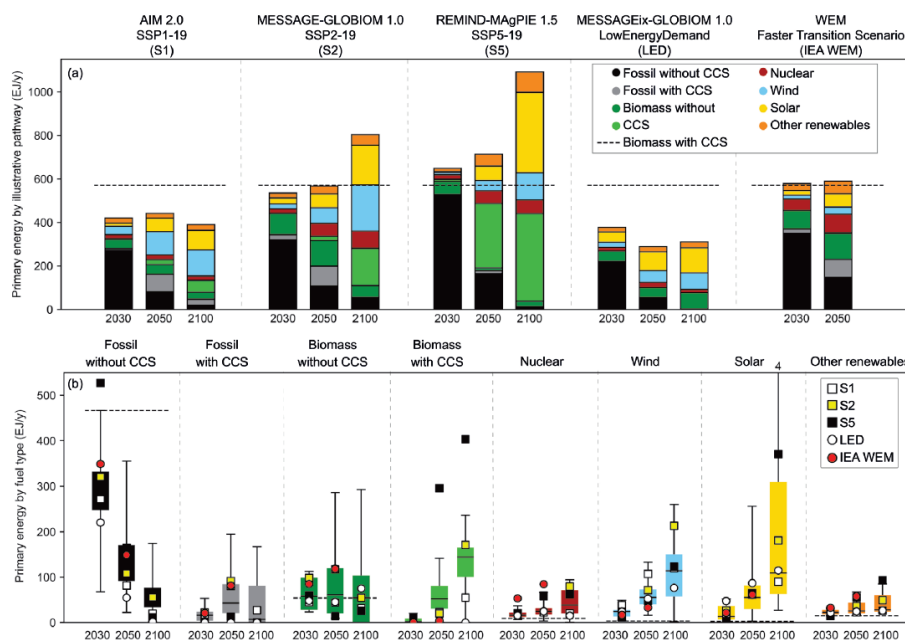


Figure 2.15 | Primary energy supply for the four illustrative pathway archetypes plus the IEA's Faster Transition Scenario (OECD/IEA and IRENA, 2017) (panel a), and their relative location in the ranges for pathways limiting warming to 1.5°C with no or limited overshoot (panel b). The category 'Other renewables' includes primary energy sources not covered by the other categories, for example, hydro and geothermal energy. The number of pathways that have higher primary energy than the scale in the bottom panel are indicated by the numbers above the whiskers. Black horizontal dashed lines indicates the level of primary energy supply in 2015 (IEA, 2017e). Box plots in the lower panel show the minimum-maximum range (whiskers), interquartile range (box), and median (vertical thin black line). Symbols in the lower panel show the four pathway archetypes S1 (white square), S2 (yellow square), S5 (black square), LED (white disc), as well as the IEA (red disc). Pathways with no or limited overshoot included the Below-1.5°C and 1.5°C-low-OS classes.

Figur 10. Primär energitillförsel i för de fyra illustrativa arkertyp-scenarierna och ett IEA-scenario (övre bild), samt spannet av primär energitillförsel uppdelat på bränsletyp/teknik för samtliga 1,5 graders-scenarier med markeringar för arkertyp-scenarier och IEA-scenario (nedre bild). Figur är hämtad från IPCC (2018).

5 IEA-scenarier

International Energy Agency (IEA) publicerar regelbundet scenarier för det globala energisystemets utveckling. I detta kapitel ges en inblick i två återkommande IEA-publikationer vilka har en internationellt stor spridning: World Energy Outlook (WEO) och Energy Technology Perspectives (ETP).¹

5.1 WORLD ENERGY OUTLOOK

IEA:s årligen återkommande publikation "World Energy Outlook" (WEO) är en väl etablerad källa för scenarier för det globala energisystemets utveckling. WEO 2019 presenterar tre olika scenarier (IEA, 2019a): "Stated Policies Scenario", "Current Policies Scenario", och "Sustainable Development Scenario". Scenarierna skiljer sig åt gällande vad som antas kring framtida policies inom energiområdet. Scenarierna bygger på modelleringar IEA:s "World Energy Model" som är en simuleringsmodell för det globala energisystemet (IEA, 2019b).

Stated Policies Scenario (benämndes i tidigare WEO-publikationer "New Policies Scenario"), som kan sägas vara WEO:s huvudscenario, syftar till att ge en bild av effekterna av aktuell utveckling i energi- och klimatpolitiken (IEA, 2019b). Scenariot tar hänsyn till policies och åtgärder som påverkar energimarknaderna till mitten av 2019 samt inkluderar i viss utsträckning tillkännagivna policy-förslag, planer och åtaganden som ännu inte satts i verket. Scenariot antar en implementering av tillkännagivna planer och åtaganden (till exempel nationella åtaganden utlovade vid Parisavtalet), men implementeringen är återhållsam i fråga om exempelvis omfattning och tidpunkt för genomförandet. Detta med motiveringen att många institutionella, politiska och ekonomiska hinder finns och att annonserade åtaganden i många fall saknar ordentliga planer för hur de skall genomföras (IEA, 2019b).

Current Policies Scenario inkluderar policies och åtgärder som påverkar energimarknaderna till mitten av 2019, men tar (till skillnad från Stated Policies Scenario) inte hänsyn till ännu inte implementerade planer (IEA, 2019b). Scenario syftar till att ge en referensutveckling givet att underliggande trender i energiefterfrågan och tillförsel inte förändras och utan ytterligare policyåtgärder.

Sustainable Development Scenario togs med för första gången i WEO 2017 (dessförinnan inkluderas det så kallade "450 Scenario" som det huvudsakliga reduktionsscenario) (IEA, 2019b). Scenariot syftar till att visa en möjlig utvecklingsväg som möter nå tre mål som kopplar till centrala delar av FN:s "Sustainable Development Goals": global tillgång till energitjänster till 2030, klimatmål i enlighet med Parisavtalet, och reduktion av energirelaterade luft-

¹ Kapitlet beskriver det vid arbetets genomförande (våren 2020) senaste versionerna av WEO och ETP. Under hösten 2020 har nya publikationer av WEO och ETP utkommit. Dessa har emellertid inte varit möjliga att inkludera i den här genomgången.

föroreningar i enlighet med avsevärda förbättringar i global luftkvalité (IEA, 2019b).

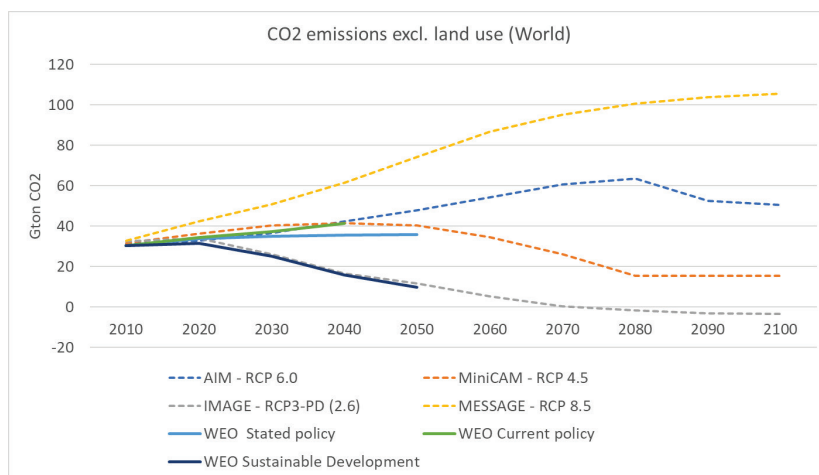
5.1.1 CO₂-emissioner

Stated Policies Scenario visar ingen topp i energirelaterade CO₂-emissioner till 2040 utan de globala utsläppsnivåerna fortsätter istället att öka. Dagens trend mot mer effektiv energianvändning och energitekniker med låg lägre CO₂-intensitet övervinner i detta scenario inte effekterna av en ökande energiefterfrågan från en växande ekonomi och befolkning. För att nå de minskade emissionsnivåerna i Sustainable Development Scenario krävs betydligt ambitiösare policy-åtgärder än vi ser idag (IEA, 2019a).

Sustainable Development Scenario avser att vara i linje med Parisavtalet som har mål att hålla ökningen i global medeltemperatur tydligt under 2°C (i jämförelse med förindustriell nivå) och att eftersträva att begränsa ökningen till 1,5°C. För att nå detta mål krävs att en utsläppstopp nås inom snar framtid och att utsläppen därefter reduceras kraftigt för att nå netto-nollutsläpp i andra halvan av detta århundrade (IEA, 2019c).

IEA anger att utsläppstrenden i Sustainable Development Scenario innebär att temperaturnivån kan hållas under 1,8°C med 66% sannolikhet (eller under 1,65°C med 50% sannolikhet) (IEA, 2019c). Globala CO₂-emissioner sjunker från 33 miljarder ton per år 2018 till ca 10 miljarder ton år 2050. IEA anger vidare att scenariot är i linje med att nå nettonollutsläpp 2070 (IEA, 2019a). För att uppnå en 50% chans att nå 1,5°C temperaturökning år 2100 inom scenariot krävs att utsläppen efter 2070 fortsätter nedåt, och alltså blir negativa (IEA, 2019a). I Stated Policies Scenario stiger utsläppen till ca 36 miljarder ton 2050 (IEA, 2019a).

I Figur 11 jämförs WEO-scenariernas utsläppsnivåer med RCP-scenariernas utsläppsnivåer. Sustainable Development Scenario ligger här nära RCP2,6. Fram till och med 2050 (så långt som en jämförelse är möjlig) ligger Stated Policies Scenario något under RCP4.5. Current Policies Scenario ligger till och med 2040 nära både RCP4.5 (Mini CAM) och RCP6.0 (AIM) som inom denna tidshorisont inte divergerar nämnvärt.



Figur 11. Global energirelaterade CO₂-utsäpp i WEO 2019-scenarier och RCP-scenarier (IEA, 2019a och RCP Database, 2009).

5.1.2 Energisystemets utveckling

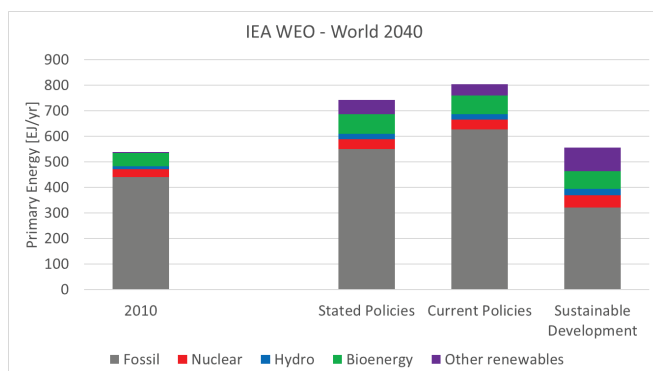
I Stated Policies Scenario ökar primärenergianvändning med ungefär 25% till 2040 från 2018. Detta innebär en medelökning på ungefär 1% per år, vilket är lägre än tidigare år (ungefär 1,3% mellan 2010 och 2018) såväl som i jämförelse med Current Policies Scenario (ca 1,3% mellan 2018 och 2040) (IEA, 2019a).

Förnybara energislag och naturgas står för den största ökningen i primärenergianvändning i Stated Policies Scenario. Kolanvändningen minskar, men totalt sett är den fossila bränsleanvändningen större år 2040 än år 2018. Olje användningen stiger till en början men ökningen planar ut mot slutet av perioden som en följd av ökad bränsleeffektivitet och elektrifiering inom transportsektorn. Andelen fossilt år 2040 är uppgår till ca 75% mot ca 80% år 2018. (IEA, 2019a).

I Sustainable Development Scenario leder strikta energieffektiviseringspolicies till en minskad primärenergianvändning. År 2040 är primäranvändning 7% lägre än 2018, vilket innebär en minskning på ca 0,3% per år. Detta trots en likvärdig ekonomisk utveckling som i de andra scenarierna. I detta scenario ses också en kraftigt minskande fossilbränsleanvändning, i synnerhet gällande kol. Fossilandelen uppgår i detta scenario till ca 60% år 2040 (IEA, 2019a).

Utsläppsreduktionen i Sustainable Development Scenario i förhållande till Stated Policies Scenario uppnås till största delen genom effektivisering och ökad användning av förnybart. Dessa står tillsammans för ca 70% av utsläppsreduktionen till 2050 (IEA, 2019b). CCS samt CCU (carbon capture and utilisation) står för ca 10% av utsläppsreduktionen år 2050 (IEA, 2019b).

Figur 12 presenterar primärenergianvändningen för de tre scenarierna år 2040 i jämförelse med år 2010.



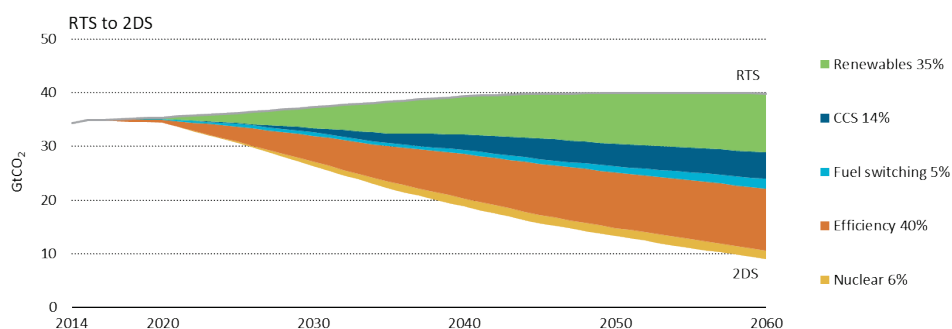
Figur 12. Primärenergi i WEO 2019-scenarier år 2040 i jämförelse med år 2010 (IEA, 2019b).

5.2 ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES

ETP 2017 presenterar ett basscenario som kallas "Reference Technology Scenario" som tar hänsyn till nuvarande energi- och klimatåtaganden. Ett annat scenario, "2°C Scenario" (2DS), visar en utvecklingsväg som är i linje med en begränsning av den globala medeltemperaturen till 2 °C jämfört med förindustriell nivå. I rapporten finns även ett ytterligare ett scenario, med striktare reduktion än 2DS, kallat "Beyond 2°C Scenario" (B2DS). B2DS visar hur den globala energisektorn kan bli klimatneutral till 2060 (IEA, 2017).

Figur 13 (hämtad från IEA, 2017) visar CO₂-utsläpp för RTS och 2DS-scenarierna, samt åtgärder för utsläppsreduktion 2DS i förhållande till 2DS. I jämförelse med WEO:s Sustainable Development Scenario så är utsläppsreduktion i 2DS något långsammare; utsläppsnivån för 2050 i Sustainable Development Scenario på ca 10 GtCO₂ uppnås i 2DS ett knappt årtionde senare (se avsnitt 5.1.1). Förhållandet och omfattning av olika åtgärder/tekniker för utsläppsreduktion i 2DS är likartad med WEO 2019 Sustainable Development scenario, med ett stort fokus på effektivisering och förnybar energi (figur 11).

Avseende energitillförsel så uppvisar RTS-scenariot år 2060 en primärenergianvändning på 843 EJ med en fossilandel på ca 67% (IEA, 2017). Motsvarande utfall för 2DS är 664 EJ och 35% (IEA, 2017).



Figur 13. Globala CO₂-emissioner för RTS- och 2DS-scenarier, samt typ av utsläppsreduktioner i 2DS. Figur är hämtad från IEA (2017).

6 EU-scenarier

I detta kapitel presenteras scenarier som EU-kommissionen har låtit ta fram för analyser inom energi, transport och klimat. EU Reference Scenario (avsnitt 5.1) är ett referensscenario som studerar effekterna av nuvarande EU-politik. Olika versioner av scenariot har publicerats med 2–4 års mellanrum under 2000-talet. De så kallade EUCO-scenarierna (avsnitt 5.2) studerar effekterna av EU:s energi- och klimatmål till 2030.

6.1 EU REFERENCE SCENARIO

EU Reference Scenario uppdaterades senast 2016 och dessförinnan 2013. EU Reference Scenario 2016 skall spegla effekterna av EU-policies på energi- och transporttrender samt utsläpp av växthusgaser till och med år 2050. Detta görs för EU som helhet samt för varje enskilt EU-land. Scenariot inkluderar projektioner av indikatorer som till exempel andelen förnybar energi och nivå av energieffektivitet (EU, 2016a).

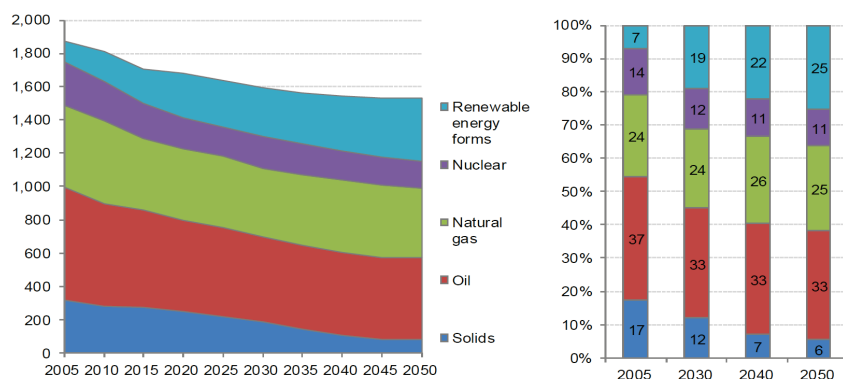
Scenariot avser att vara en projektion av vart nuvarande policies och marknadstrender är sannolikt att leda. Det avser inte att vara en prognos utan istället att vara en referens mot vilken nya policy-förslag kan utvärderas (EU, 2016a). Scenariot inkluderar lagligt bindande åtaganden/policies för tiden för framtagandet av scenariot, men inte exempelvis EU:s klimat- och energimål för 2030 (EU, 2016c).

Modelleringsarbetet som scenariot bygger på har letts av National Technical University of Athens (E3MLab). Energisystemmodellen PRIMES är central i framtagandet av scenariot, men även ett flertal kompletterande modeller används, till exempel GEM-E3 för makroekonomisk modellering, Prometheus för modellering av internationella bränslepriser och GAINS för luftföroreningar (EU, 2016a).

6.1.1 Energisystemets utveckling

EU Reference Scenario 2016 visar en betydande energieffektivisering under den studerade perioden, och uppvisar en fortsatt frikoppling mellan primärenergi-användning och ekonomisk utveckling (BNP). Figur 14 (hämtad från EU, 2016c) visar utvecklingen av EU:s brutto-energianvändning, där en nedåtgående trend ses fram till ca 2040 då användningen stabiliseras.

Olja står för den största delen i energimixen, vilket drivs av en betydande ökning av transporter under perioden. I elproduktionsmixen växer användningen av förnybart kraftigt, vilket också avspeglas i andelen förnybart i primärenergianvändningen som är den kategori som ökar mest (Figur 14). Biobränslen fortsätter att dominera EU:s inhemska förnybara produktion, men andelen sol och vind i den förnyelsebara energimixen ökar från 17% år 2015 till 36% år 2050 (EU, 2016c). Andelen för naturgas och kärnkraft håller sig relativt konstant i primärenergimixen under perioden.



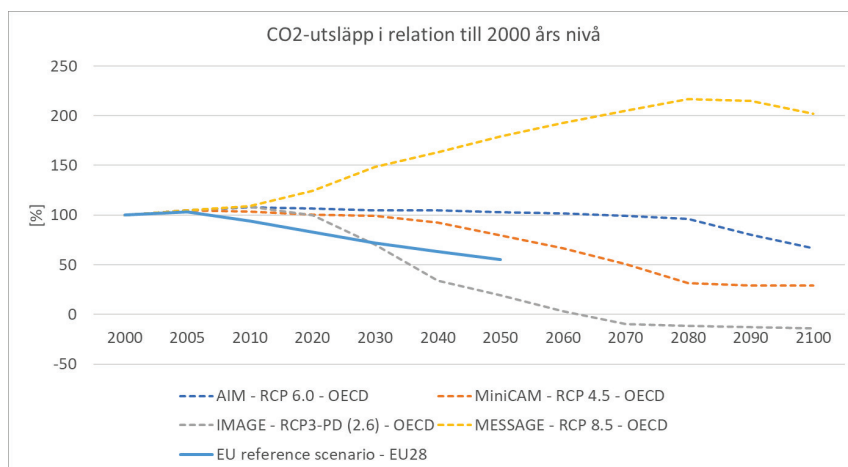
Source: PRIMES

Figur 14. EU28 brutto-energianvändning i EU Reference Scenario 2016, i Mtoe till vänster och andelar till höger. Figur är hämtad från EC (2016).

6.1.2 CO₂-emissioner

EU Reference Scenario 2016 visar en minskning av växthusgasutsläpp under perioden, men långsiktiga klimatmål nås inte (EU, 2016c). År 2030 är de totala växthusgasutsläppen 35% lägre än 1990 och år 2050 är de 48% lägre. Transportsektorns utsläpp håller sig relativt konstanta under perioden och är 2050 den sektor med högst andel växthusgasutsläpp (ca 1/3 av totala utsläpp) (EU 2016b). Värme- och elsektorn visar en kraftig utsläppsminskning under perioden, ca 70% minskning mellan 2010 och 2050 (EU 2016b).

Figur 15 visar utvecklingen av CO₂-utsläpp relativt år 2000 för dels EU-28 i EU Reference Scenario 2016 och dels för OECD i RCP-scenarierna (se också kapitel 2) (OECD är den närmast jämförbara regionen mot EU i RCP-databasen). EU Reference Scenario hamnar i mitten av seklet i denna jämförelse under utsläppsnivån i RCP4.5, men långt ifrån det mer ambitiösa RCP2,6-scenariot.



Figur 15. CO₂-utsläpp från energianvändning och industri relativt år 2000. För EU28 för EU Reference Scenario 2016 och för OECD-länderna för RCP-scenarierna. (baserad på RCP Database (2009) och EU (2016b)).

6.2 EU-CO-SCENARIER

I syfte att utvärdera effekterna av EU:s klimat- och energimål för 2030 har EU-kommissionen låtit utveckla en grupp scenarier som kallas EUCO-scenarier (EU, 2019). Det senaste EUCO-scenariot, "EUCO3232.5", presenterades 2019 och syftar till att modellera effekterna av att nå ett energieffektivitetsmål på 32,5% och ett mål om andel förnyelsebar energi på 32%. Dessa mål är i linje med överenskommelsen "Clean energy for all European package" (EU, 2020) och kompletterar tidigare 2030-mål om en minskning av inhemska växthusgasemissioner på minst 40% jämfört med 1990 (EU, 2019). Tidigare EUCO-scenarier inkluderar EUCO27 och EUCO30 vilka studerar energieffektivitetsmål på 27% respektive 30% i enlighet med tidigare mål inom EU.

Liksom för EU Reference Scenario är PRIMES-modellen ett centralt verktyg i framtagandet av EUCO-scenariernas energisystemutveckling. För att studera makroekonomiska aspekter av scenarierna används modellerna GEM-E3 och E3ME (EU, 2020).

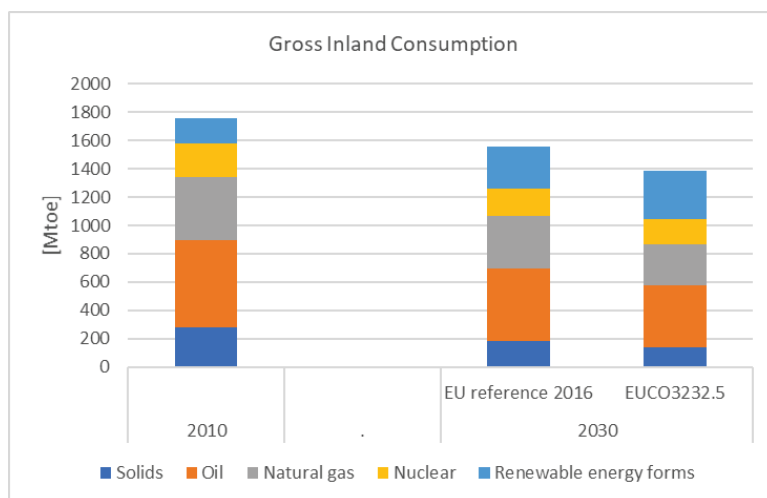
EUCO3232.5 avspeglar en kostnadseffektiv utvecklingsväg för att nå 2030-mål i en kontext med nuvarande och skärpta policy-åtgärder (EU, 2019). Scenariot bygger på EU reference scenario, men med ytterligare påförda policies och åtgärder. Dessa är i modellen inkluderade på ett förenklat/stiliserat sätt och på samma sätt för alla EU-länder. Det påpekas att nationella resultat skall ses utifrån detta perspektiv (EU, 2019).

Energieffektiviseringsmålen i EUCO3232.5 är ett mål både för total primärenergi-användning och för slutlig energianvändning i 2030, beräknat som en reduktion med 32,5% mot 2007 års baseline-scenario för 2030. Förnybarhetsmålet avser en 32% andel förnybart slutlig energianvändning (brutto) (EU, 2019).

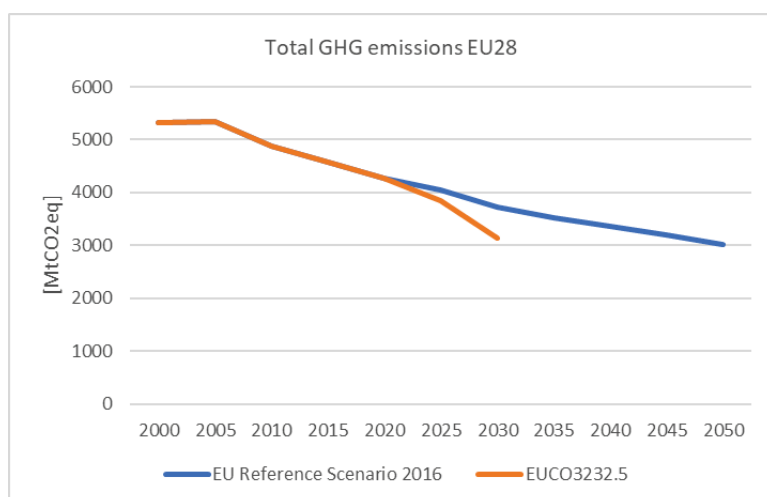
6.2.1 Energianvändning och växthusgasutsläpp

Figur 16 (baserad på EU, 2016b samt EU, 2019) visar av EU:s brutto-energi-användning år 2030 för EUCO3232.5 scenariot i jämförelse med EU Reference Scenario 2016. I jämförelse med referensscenariot visar EUCO-scenariot en minskning av fossil bränsleanvändning på ca 20% samtidigt som förnyelsebar energi ökar med ca 15%.

Figur 17 (baserad på EU, 2016b samt EU, 2019) jämför växthusgasutsläpp för EUCO3232.5 med EU Reference Scenario 2016. EUCO3232.5 uppvisar en i jämförelse med referensscenariot kraftig minskning av växthusgaser efter 2020 och uppnår år 2030 en nivå som i referensscenariot uppnås först 15–20 år senare.



Figur 16. EU28 brutto-energianvändning år 2030 i EU Reference Scenario 2016 och EUCO3232.5 (figur baserad på EU (2016b) och EU (2019))



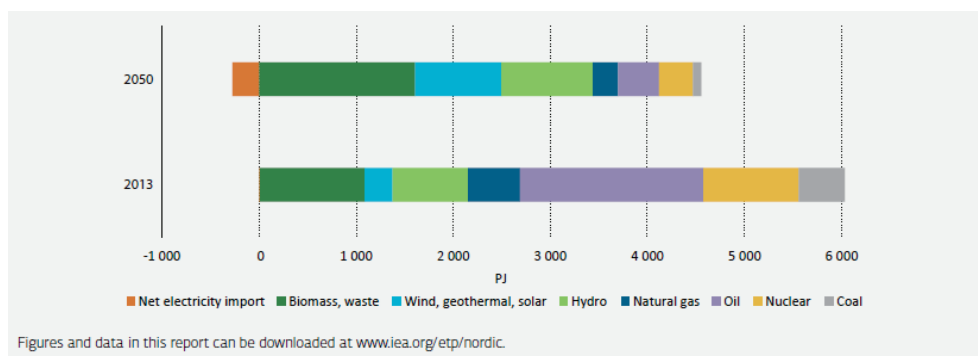
Figur 17. EU28 växthusgasutsläpp i EU Reference Scenario 2016 och EUCO3232.5 (figur baserad på EU (2016b) och EU (2019))

7 Svenska och nordiska scenarier

I detta kapitel redogör vi för ett urval av energisystemscenarier som har Norden eller Sverige som systemgräns, och hur dessa scenariostudier kopplar till klimatfrågan.

7.1 NORDIC ETP

Nordic ETP (Energy Technology Perspectives) är en nordisk forskningsstudie som hittills utförts vid två tillfällen, 2013 (NETP, 2013) respektive 2016 (NETP, 2016). Studien finansierades av Nordisk Energiforskning och genomfördes i samverkan med IEA och den modellgrupp som finns på plats där. Huvuddelen av arbetet utfördes av ett antal universitet, forskningsinstitut, forskningsföretag och konsultföretag från samtliga fem nordiska länder. I studien från 2013 analyserade man en utveckling för de nordiska energisystemen mot bakgrund av tre olika klimatscenarier, en ökning av den globala medeltemperaturen på 4°C, en ökning på 2°C samt en utveckling som för de nordiska länderna leder till nettonoll-utsläpp av CO₂ till år 2050 (förutsätter 2°C-målet för resten av världen). Nettonoll-målet för de nordiska länderna antogs tillåta en viss import av utsläppskrediter (15%). I studien från 2016 knöt man analysen ännu närmare nettonoll-målet för de nordiska länderna och utnyttjade klimatscenariot med en global medeltemperaturökning på som mest 4°C som ett referensscenario i jämförande syfte. I Figur 18 visar vi ett resultatexempel från NETP (2016), nämligen primärenergitillförseln i de fem nordiska länderna år 2013 och år 2050 i nettonoll-scenariot. Man kan se att primärenergitillförseln minskar med ca 25% till 2050 (exklusive nettoexport). Energitillförseln från fossila energislag minskar avsevärt medan framförallt vindkraft och biobränsleanvändningen ökar rejält.



Figur 18. Primärenergitillförsel i de fem nordiska länderna 2013 och 2050 baserat på CNS-scenariot (nettonoll-utsläpp av växthusgaser i Norden). Källa: NETP, 2016.

7.2 NEPP

Ett annat forskningsprojekt som har haft Norden (eller norra Europa) som systemgräns är NEPP-projektet (Nordic European Energy Perspectives Project; NEPP, 2019a; <http://www.nepp.se>). NEPP-projektet har genomförts i olika skepnader, etapper och i olika konstellationer men har genomgående präglats av det nordiska perspektivet, systemtänk, tvärvetenskap, ett helhetsgrepp på samtliga

energimarknader och den långsiktiga utvecklingen för energisystemen (se även NEPP, 2016; NEP, 2010; NEP, 2006; och Nordleden, 2003). Scenarioanalysen har varit mycket omfattande och scenarierna har spänt över allt från en utveckling så gott som helt utan energi- och klimatpolitisk styrning (gäller framförallt de tidigaste etapperna) till scenarier som antas möta de uppställda klimatpolitiska målen i Parisavtalet från 2015 eller EU-kommissionens mål om nettonollutsläpp för hela EU till 2050. I den senaste (pågående) etappen utgör målet nettonollutsläpp, eller rent av fossilfrihet, till 2045 i Sverige en viktig grundpelare för scenarioanalysen. Som en viktig komponent för att nå det målet har en omfattande elektrifiering inom framförallt industri och transporter fått ökad uppmärksamhet, något som också har studerats i detalj i den pågående etappen av NEPP.

I Del 2 av denna rapport beskriver vi närmare några av modellresultaten för el- och fjärrvärmeförsörjningen i Sverige som har tagits fram inom ramarna för den pågående etappen av NEPP. Dessa resultat utgör också ett viktigt underlag i syntesarbetet i KLIMPEN-projektet.

7.3 ENERGIMYNDIGHETEN

När det gäller den långsiktiga utvecklingen för det svenska energisystemet så utgör Energimyndighetens återkommande (vartannat år) "Långsiktiga scenarier" (tidigare "Långsiktsprognoser") ett viktigt exempel på energiscenariostudier (Energimyndigheten, 2019a). Dessa scenarioarbeten görs inom ramarna för Sveriges klimatrapporering till EU-kommissionen. Utgångspunkten för scenarierna är en konsekvensanalys av den förda energi- och klimatpolitiken. Det finns med andra ord ingen klimatrelaterad målbild utan scenarierna beskriver en utveckling för det svenska energisystemet, fram till 2050, givet de befintliga styrmedlen. Analysen kompletteras generellt med en uppsättning känslighetsanalyser avseende exempelvis BNP-utveckling (energibehov), bränslepriser och annat som i första hand har med det tekniska energisystemet att göra.

Energimyndigheten studerar också scenarier med en tydlig målbild, där ett sådant exempel är studien "Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem", Energimyndigheten (2019b). I det scenarioarbetet är själva utgångspunkten att elsystemet i det här fallet ska vara helt förnybart till 2050 i syfte att, enligt Energimyndigheten, öka kunskapen om förnybar el och hur en utveckling mot ett sådant mål kan komma att se ut.

7.4 ENERGIBRANSCHENS FÄRDPLANER

Även energibranschen har på senare år tagit fram egna scenarier för den långsiktiga utvecklingen, exempelvis inom ramen för de så kallade färdplanerna för fossilfrihet. Dessa har både drag av detaljerade scenarioanalyser, med tillhörande konsekvensanalys av olika vägval eller utvecklingar, och mer övergripande "visioner" och åtaganden i syfte att bidra till att Sverige som helhet kan möta mål inom energi- och klimatområdet. Inom ramen för regeringsinitiativet Fossilfritt Sverige har ett 20-talet branscher tagit fram färdplaner för hur de ska bidra till att Sverige blir ett fossilfritt välfärdssamhälle. Färdplanerna är initierade

och drivs av de respektive branscherna själva, i de flesta fall av en branschorganisation.

Under 2018 tog uppvärmningssektorn fram sin färdplan.² Arbetet leddes av Profu, inom ramen för forskningsprojektet Värmemarknad Sverige³, i tätt samarbete med ett 50-tal representanter för sektorn, såsom fastighetsägare, energibolag, värmepumpsbolag, teknikleverantörer, kommuner och branschorganisationer. Ett 100-tal organisationer har ställt sig bakom färdplanen, vars vision är: uppvärmningssektorn ska vara fossilbränslefri år 2030. År 2045 ska sektorn vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen. Samverkan är ett viktigt medel för att åstadkomma omställningen. Några av de utmaningar som lyfts fram i färdplanen är fortsatt potential för energieffektivisering i fastigheter, minska mängden fossil plast i avfallet och åstadkomma negativa utsläpp.

Under vintern 2020 lanserade även elsektorn en färdplan, framtagen av Energiföretagen Sverige.⁴ Färdplan el fokuserar på hur energibranschen ska kunna möjliggöra en nationell energiomställning, i alla sektorer, bort från fossila bränslen. Samtidigt åtar sig branschen att avveckla de sista två procenten fossila bränslen i den svenska elproduktionen till senast 2030. Flera av branscherna som tagit fram egna färdplaner lyfter fram elektrifiering som en viktig del för att bli fossilfria. Det pågår dessutom en elektrifiering av fordonsflottan och en etablering av nya elintensiva verksamheter, exempelvis datahallar, vilket tyder på att elanvändningen kommer öka i framtiden trots kontinuerlig eleffektivisering.

² http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2020/06/ffs_frdplan-fossilfri-uppvrmnin_200622.pdf

³ <http://www.varmemarknad.se/>

⁴ http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2020/01/frdplan_elbranschen.pdf

8 Diskussion och slutsatser

Det finns en stor mängd framtidsscenarier med koppling till energi och klimat. I denna genomgång har vi berört ett antal scenarioarbeten som på senare tid har haft ett betydande genomslag i energi- och klimatforskning och/eller energipolitisk debatt på ett internationellt eller nationellt plan. De internationella scenarier som inkluderats har begränsats till scenarier som används och/eller tagits fram av IPCC, IEA och EU-kommissionen. Som framgår har genomgången inte syftat till att vara heltäckande ur den aspekt att alla scenariostudier av betydelse skulle beröras – det finns en stor mängd scenarier med hög kvalité som här inte har omnämnts.

Genomgången har visat att det finns en stor vidd i scenariernas beskrivning av den framtida utvecklingen av det energisystemet. Detta är naturligt när det handlar om framtidsstudier som sträcker sig årtionden fram tiden, ibland ändå till slutet av århundradet.

Det finns några viktiga centrala orsaker till skillnader mellan olika energiscenarier:

- Scenarierna baseras på olika modeller som hanteras av olika modellerings-team. Modellerna kan ha olika uppbyggnad, ha olika funktion och syfte. De kan ha olika systemgränser och därmed omfatta olika delar/sektorer av system kring energi, socio-ekonomi och klimat. Vidare kan de innehålla olika antaganden och inputdata kring exempelvis potentialer och kostnader. Inputdata kan till viss del samordnas, men sällan fullt ut på grund av bland annat modellernas inbyggda olikheter.
- Scenarierna har olika klimatambition. Som genomgången har visat görs i globala energiscenarier ofta en distinktion mellan referensscenario och reduktionsscenarier. Referensscenarierna har typiskt en låg nivå av klimatambition med inga eller få klimatpolicies, och/eller så avser de avspegla dagens policy situation. Reduktionsscenarier innebär generellt ett ytterligare påslag av klimatåtgärder och/eller policies (till exempel en ökad CO₂-kostnad). Nivån för utsläppsreduktion i reduktionsscenarierna kan i sin tur variera från låg till hög.
- Scenarierna bygger på olika antaganden om socio-ekonomiska aspekter och samhällstrender (BNP, befolkningstillväxt, demografi med mera), vilket får konsekvenser för exempelvis efterfrågan på energitjänster. Detta är aspekter som i de flesta fall behandlas utanför själva energisystemmodellering och antagandena kan vara mer eller mindre klart uttalade. SSP-scenarierna (kapitel 4) är ett exempel på en systematisering av denna typ av scenarioparametrar.

Trots att det finns en stor vidd inom scenarioresultat så konstaterar flera studier att stringenta reduktionsmål kräver mer kraftfulla policies än vad vi ser idag, och att ett flertal olika åtgärder krävs ur energitillförselsynpunkt. Gällande de globala scenarierna så pekar flera på kort/medellång sikt ut vikten av energieffektivisering och uppskalning av förnybar energi, där vind, sol och bioenergi är centrala alternativ. På längre sikt blir CCS allt viktigare i många scenarier, och även negativa utsläpp inklusive BECCS blir i flertalet scenarier en förutsättning för att

nå klimatambitioner i nivå med Parisavtalet. Även kärnkraft ökar i många scenarier på global nivå.

Kopplingen mellan och energisystemmodellering och klimatmodellering baserat på RCP-scenarierna kan sägas vara indirekt till sin karaktär. Detta på så sätt att RCP-scenarierna som används som input till klimatmodellering inte utgör kompletta integrerade scenarier med en viss specifik utveckling av energisystemet och/eller socio-ekonomisk utveckling.

Då RCP-scenarierna står relativt självständigt så tycks risken att de skall bli utdaterade på grund av utvecklingar på energisystemmodelleringssidan mindre än vad som annars varit fallet. Med tanke på att strålningsdrivningsnivåerna i RCP-scenarierna valdes för att representera ett litteraturunderlag av energiscenarier vid en viss tidpunkt, bör emellertid utveckling inom energisystemmodellerings-området (och därmed ett förändrat litteraturunderlag) kunna leda till att vissa nivåer av strålningsdrivning visar sig vara mer relevanta att studera ur ett klimatmodelleringsperspektiv än andra. Man kan även tänka sig att det kan uppkomma ett behov av att såväl lägga till/byta ut RCP-scenarier med andra strålningsdrivningsnivåer än de som nu finns. Exempelvis finns ett antal energisystemscenarier i litteraturen utan något direkt motsvarande RCP.

DEL 2: Scenarier för det svenska el- och fjärrvärmesystemet

Som nämnts i inledningen, utgör denna rapport ett bakgrundsunderlag till det pågående forskningsprojektet "Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet" ("KLIMPEN"). I detta forskningsprojekt utgör klimatförändringarnas påverkan på olika energislag den ena dimensionen i en sammansatt risk- och sårbarhetsanalys för det framtida svenska energisystemet. Den andra dimensionen utgörs av den roll som de olika energislagen kan komma att få i det framtida svenska energisystemet. Ju större andel av energiförsörjningen ett specifikt energislag kan tänkas få i framtiden desto viktigare kommer det specifika energislagets utsatthet för (eller robusthet mot) klimatförändringar att vara för hela energisystemets samlade riskbild och sårbarhet.

Syftet med Del 2 i denna rapport är att ge underlag för arbetet inom KLIMPEN-projektet med avseende på de olika energislagens framtida roll och betydelse för energiförsörjningen. Vi begränsar oss till el- och fjärrvärmeproduktionen i Sverige och fokuserar särskilt på de elproduktionsslag som uppmärksammas i KLIMPEN, nämligen vindkraft, kärnkraft, vattenkraft, kraftvärme och solel. I dessa beräkningar har vi inte tagit hänsyn till klimatförändringar men väl en lång rad andra omvärldsfaktorer.

1 Metod och omvärldsscenarioer

För att analysera den framtida utvecklingen för det svenska el- och fjärrvärmesystemet utnyttjar vi i denna studie en energisystemmodell, TIMES-NORDIC (modellen handhas och uppdateras löpande av Profu). Även om vi här endast utnyttjar modellresultaten för el- och fjärrvärmesystemens utveckling i Sverige, så är TIMES-NORDIC en modell som beskriver hela det stationära energisystemet i Sverige samt el- och fjärrvärmesektorn i de övriga länderna som ingår i modellbeskrivningen (Norge, Danmark, Finland, Tyskland, Polen, Estland, Lettland och Litauen; se Figur 1). Genom att använda TIMES-NORDIC fångar vi in påverkan på energisystemens utveckling fram till 2050 från ett antal viktiga omvärldsfaktorer såsom energibehov, pris och tillgång på olika bränslen, styrmedel samt teknisk utveckling. TIMES-NORDIC-modellen används löpande inför Energimyndighetens återkommande analyser av den långsiktiga utvecklingen för Sveriges energisystem där den senaste analysen rapporterades tidigt 2019 (Energimyndigheten, 2019). Även Naturvårdsverket utnyttjar regelbundet TIMES-NORDIC för att analysera effektiviteten i de svenska energi- och klimatpolitiska styrmedlen, senast i samband med den sjunde nationalrapporten (Naturvårdsverket, 2017). Sist men inte minst, är TIMES-NORDIC ett viktigt verktyg inom det pågående forskningsprojektet NEPP där man analyserar olika utvecklingsvägar för det svenska och det nordeuropeiska energisystemet. Som en del i NEPPs forskningsarbete har TIMES-NORDIC även utnyttjats som en av flera metoder inom ramarna för Energiföretagen Sveriges färdplan för fossilfri el (NEPP, 2019b).



Figur 1: Geografisk systemgräns för TIMES-NORDIC-modellen.

1.1 TVÅ OMVÄRLDSSCENARIER

Utgångspunkten för vår analys är två olika omvärldsutvecklingar: ett Basscenario med en omvärldsutveckling som i allt väsentligt följer det som antas i Energimyndighetens referensscenario i den långsiktiga scenarioanalysen som gjordes 2019 och ett Klimatscenario som dels bygger på en elbehovsutveckling som

i huvudsak följer elbranschens färdplan för en omfattande elektrifiering (från 2019), och dels utgår från att EU och resten av världen i stort sett når de klimatpolitiska målen som följer av Parisavtalet från 2015, det vill säga en begränsning av den globala temperaturökningen till under två grader jämfört med den förindustriella nivån.⁵ Det antas leda till mycket höga priser på CO₂, över 100 EUR/t efter 2035, vilket inte minst påverkar elprisutvecklingen. Det förstnämnda scenariot, Basscenariot, ska istället först och främst ses som en konsekvensanalys av den förda politiken med de styrmedel som finns på plats samt är på gång att införas. Även om detta scenario leder till en minskning av växthusgasutsläppen, i vissa sektorer till och med omfattande minskningar, så nås inte de långsiktiga målen inom EU, det vill säga netto-nollutsläpp till år 2050. För att detta ska uppfyllas måste ytterligare styrmedel finnas på plats och/eller ytterligare tekniska genombrott i en omfattning som inte antas ingå i Basscenariot men alltså väl i Klimatscenariot.

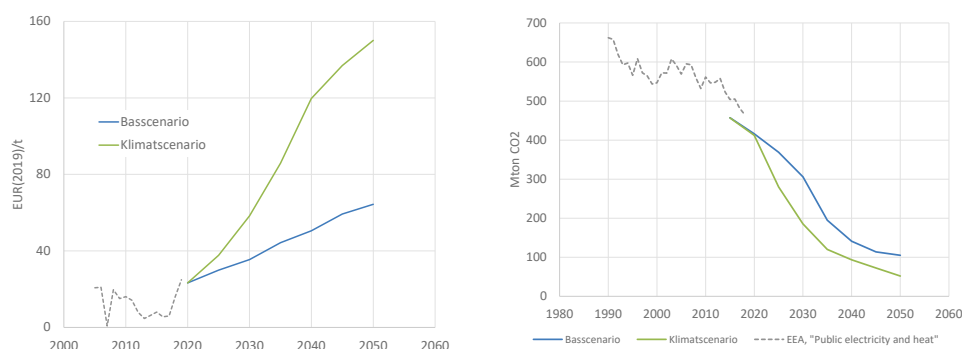
1.2 TVÅ VIKTIGA SCENARIOSKILJANDE PARAMETRAR: KLIMATPOLITIK OCH ELEKTRIFIERING

Som nämnts, så skiljer sig våra två scenarier framförallt med avseende på klimatambition och, delvis som en konsekvens av detta, med avseende på elektrifieringens omfattning. Klimatpolitikens tyngd beskrivs framförallt med olika prisnivåer på utsläppsrätter för CO₂, se Figur 2. I Klimatscenariot antas priset passera 120 EUR/t runt 2040 medan det ligger runt 50 EUR/t i Basscenariot. Dessa prisnivåer är hämtade ur IEAs senaste World Energy Outlook (IEA, 2019) där IEAs huvudscenario, "Stated Policies", anger riktningen för vårt Basscenario och där IEAs scenario "Sustainable Development" har använts som utgångspunkt för prisutvecklingen i vårt Klimatscenario. Förutom priset på CO₂ utnyttjar vi också WEO (2019) för att bestämma prisutvecklingen på de internationella fossilbränslemarknaderna. Detta medför att priserna på de fossila bränslena i Klimatscenariot ligger under det som antas i Basscenariot till följd av den klart lägre efterfrågan i det förstnämnda scenariot. På grund av de betydligt högre CO₂-priserna blir dock kostnaden för att använda fossil energi avsevärt högre i Klimatscenariot än i Basscenariot.

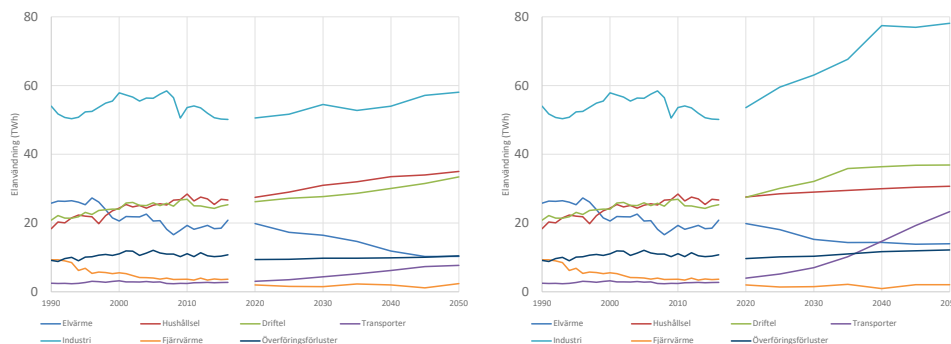
I Figur 2 redogör vi också för de beräknade CO₂-utsläppen i bägge scenarier för det modellerade systemet som omfattar hela det svenska stationära energisystemet (exklusive transporter) samt el- och fjärrvärmeförsörjningen i de övriga länderna som omfattas av modellbeskrivningen (se Figur 1). I figuren kan man se att CO₂-utsläppen minskar relativt snabbt i bägge scenarier och att minskningen kommer längst i Klimatscenariot. Vi kan med andra ord konstatera att den prisutveckling som förutsätts i Basscenariot räcker för att åstadkomma en rejäl minskning av utsläppen inom el- och fjärrvärmesystemen i Nordeuropa. Den stora utmaningen ligger sannolikt inom industri och transporter, två sektorer som inte omfattas av modellverktyget sånär som på den svenska industrin (och delar av basindustrin i Finland).

⁵ Det Klimatscenario som vi presenterar här är i många avseenden snarlikt de tre scenariovarianter som tas upp i Färdplansunderlaget. Men det finns vissa skillnader som gör att beräkningsresultaten inte är helt liktydiga.

En (kraftigt) ökad elanvändning tillsammans med en ökad andel väderberoende elproduktion och samtidig utfasning av de sista fossila bränslena ställer stora krav på elsystemet, inte minst avseende effektbalanseringen och kapaciteten i elnäten. Vårt Klimatscenario förutsätter alltså en sådan utveckling och elbehovet i Sverige bedöms öka från dagens 140 TWh/år till 190 TWh år 2045 (se en sektorsvis uppdelning i Figur 3). Detta sifferunderlag har tagits fram av forskningsprojektet NEPP, där man också analyserade hur elsektorn kan producera och distribuera den ökade mängd fossilfri el som efterfrågas i framtiden, hur leveranssäkerhet och effekttillgänglighet kan säkras på kort och lång sikt samt hur stora systemkostnaderna är för detta.



Figur 2: Diagrammet till vänster visar antagandena för prisutvecklingen på CO₂ i respektive scenario. Diagrammet till höger visar CO₂-utsläppen i det modellerade systemet "Nordeuropa" i Bassscenario respektive Klimatscenario. De modellerade sektorerna i "Nordeuropa" omfattar i stor utsträckning (men inte helt och hållet) el- och fjärrvärmeförsörjningen varför man indikativt kan jämföra med statistik för allmän el- och värmeförsörjning från EEA/IPCC⁶



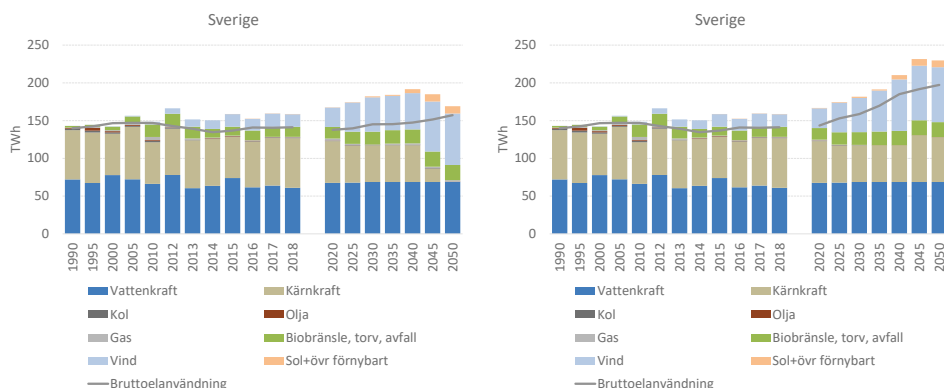
Figur 3: Elanvändning i Sverige, per sektor, i Bassscenario (till vänster) och i Klimatscenario (till höger)

⁶ Allmän (eng "public") el- och värmeförsörjning omfattar enligt IPCCs riktlinjer summan av CO₂-utsläpp från el- och värmeproduktion (kondenskraft, kraftvärme och hetvattenpannor) vars primära syfte är att förse allmänheten med el eller (fjärr)värme. Dessa anläggningar kan ägas av privata eller offentliga aktörer. Generellt hamnar därmed utsläppen från industriellt mottryck och privat uppvärmning inom respektive sektor, det vill säga industri respektive hushåll, och inte inom allmän el- och värmeförsörjning.

2 Elproduktionen

Beräkningsutfallet med avseende på den svenska elproduktionen i bägge våra omvärldsscenarioer redovisas i Figur 4 nedan. I bägge scenarioer är det framförallt vindkraft som byggs ut. I kombination med en långsamt ökande elförbrukning i Basscenariot så leder detta till ett omfattande elöverskott på årsbasis, åtminstone fram till 2040 innan den befintliga kärnkraften avvecklas av åldersskäl (60 års livslängd antas). Det gör att den årliga nettoexporten av el blir relativt stor, omkring 30-40 TWh beroende på modellår. I Klimatscenariot blir det årliga överskottet lägre till följd av en väsentligt högre elförbrukning. Den totala elproduktionen är i Klimatscenariot också klart större än i Basscenariot, till följd av en större vindkraftproduktion men också till följd av att nyinvesteringar i kärnkraft är lönsamma i Klimatscenariot efter 2040 (vi återkommer till kostnader för ny kärnkraft längre fram). Det förklaras av att elpriset är högre i Klimatscenariot till följd av en högre efterfrågan men i kanske ännu större utsträckning till följd av ett avsevärt högre pris på CO₂.

Även om båda scenarierna generellt karaktäriseras av ett årligt elöverskott i Sverige så innebär det i bägge fall att nettoimporten under vissa perioder inom ett år kan vara betydande.



Figur 4: Elproduktionen i Sverige i Basscenariot (till vänster) och i Klimatscenariot (till höger).

I de följande kapitlen fördjupar vi oss något i de olika elproduktionsslagen som är särskilt intressanta inom "KLIMPEN"-projektet.

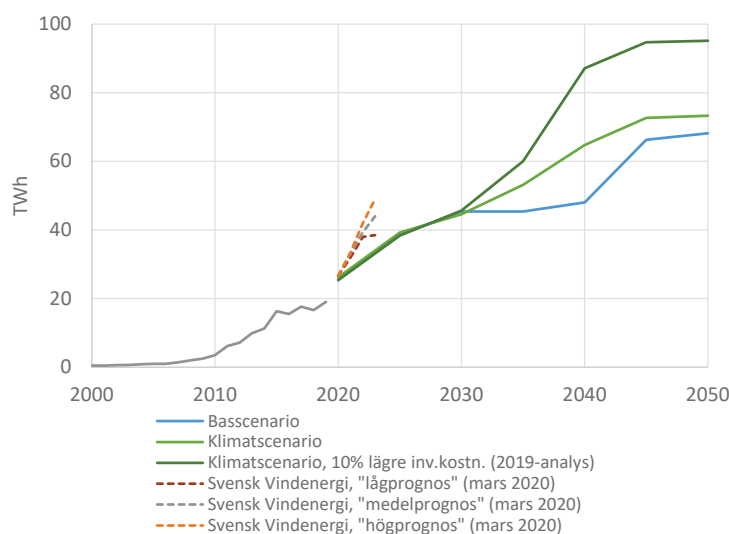
2.1 VINDKRAFT

Vindkraften är det kraftslag som byggs ut framför alla andra. Från dagens omkring 20 TWh till mellan 50-60 TWh år 2040 i Basscenariot och omkring 70 TWh samma år i Klimatscenariot. Det senare skulle innebära att vindkraften blir det största enskilda kraftslaget i Sverige på lång sikt.

I modellverktyget ansätts en kostnad- och utbudskurva för ny vindkraft på land och till havs, där de olika kostnadssegmenten styrs av framförallt vindtillgång men även i viss mån av avstånd till närmaste anslutningspunkt. I våra bägge omvärlds-

scenarier antar vi att kostnadsstrukturen för ny vindkraft ser likadan ut i dag som i framtiden, det vill säga vi räknar inte med ytterligare kostnadsreduktioner inom respektive kostnadsklass. I en känslighetsanalys från en något tidigare analysomgång inom NEPP-projektet (med vissa smärre skillnader i beräkningsförutsättningar gentemot det som antas här) så antog vi en kostnadsreduktion för ny vindkraft på 10% mellan 2020 och 2030 (därefter samma kostnad). Resultatet av den modellberäkningen återfinns också i Figur 5, som visar på en total vindkraftproduktion på 90-100 TWh efter modellår 2040. Antagandet om teknisk utveckling och framtida investeringskostnader har därmed en betydande påverkan på slutresultaten i synnerhet för kapitalintensiva tekniker som vindkraft (och solel). En tioprocentig kostnadsreduktion i investeringskostnad för europeisk landbaserad vindkraft är också vad IEA antar i sin modellanalys (dock mellan 2018 och 2040) i samband med WEO 2019.⁷ Kostnadsläget för landbaserad vindkraft i Europa enligt IEA är dock avsevärt högre än det vi antar för svensk/nordisk vindkraft i vår modellbeskrivning.

Som en avslutande jämförelse kan vi också nämna branschorganisationen Svensk Vindenergis färdplan (Svensk Vindenergi, 2019) mot ett 100% förnybart svenskt elsystem år 2040 där man anger att vindkraften bör stå för minst 90 TWh, vilket därmed ligger nära vårt "högfall" i Figur 5.



Figur 5: Vindkraftproduktionens utveckling i Sverige baserat på ett urval av scenariostudier och vindkraftbranschens egen prognos (Svensk Vindenergi, "Statistics and forecast Q1 2020")

2.2 KÄRNKRAFT

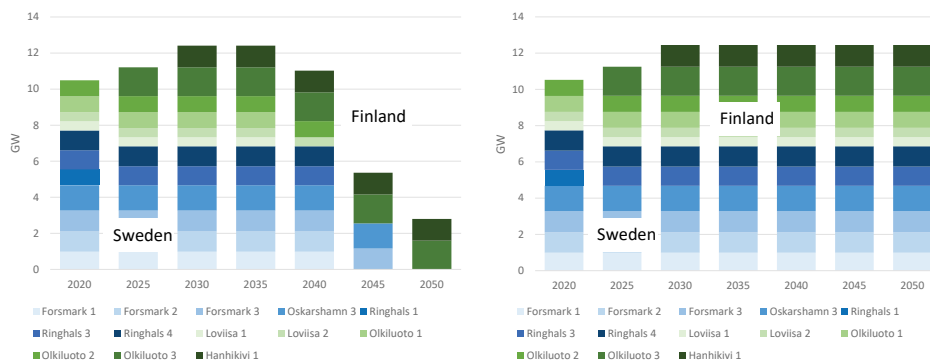
Även efter det att Ringhals 1 stängde efter årsskiftet 2020/2021 (och dessförinnan stängningen av Ringhals 2 vid årsskiftet 2019/2020) så kommer den installerade kärnkraftskapaciteten på den nordiska elmarknaden att öka till följd av att den femte reaktorn i Finland ansluts till elnätet troligen under 2021 (World Nuclear News, 2020). Räknar vi dessutom med att det påbörjade arbetet (alla nödvändiga

⁷ IEA, World Energy Model – Techno-economic inputs, <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/techno-economic-inputs#abstract>

tillstånd är dock i skrivande stund ännu ej på plats) med Finlands sju reaktor, Hanhikivi 1, går i mål innan 2030 så ökar kapaciteten ytterligare. Det förutsätter dock att den tekniska livslängden på de befintliga reaktorerna uppgår till åtminstone 60 år, se Figur 6. En reaktors totala livslängd är reaktorspecifik och beror på både teknisk status och ekonomisk lönsamhet men även av politik. Om vi istället antar 80 års livslängd för samtliga nordiska reaktorer så kommer alla dessa att vara tillgängliga till åtminstone 2050 (Figur 6).

Av modellpraktiska skäl har vi i våra scenarioberäkningar antagit att alla återstående reaktorer har en livslängd på 60 år. Dessutom tillåts nyinvesteringar i modellbeskrivningen. Med antagandet om att ny kärnkraft på längre sikt kostar omkring 55-60 öre/kWh så blir ny kärnkraft lönsam i Sverige i vårt Klimatscenario men inte i vårt Basscenario (se Figur 4). Det beror både på de höga elpriserna i Klimatscenarioet men också på det faktum att effekt med hög tillgänglighet premieras av modellverket i synnerhet när andelen variabel elproduktion ökar samtidigt som elbehovet också ökar (markant).

Sett över bägge våra scenarier och på mycket lång sikt erhåller vi ett utfallsrum som både inkluderar en avveckling av svensk kärnkraft (Basscenarioet) och en utbyggnad av ny kärnkraft (Klimatscenarioet). När det gäller nyinvesteringar så har vi valt att begränsa dessa så att den samlade kapaciteten i Sverige inte överstiger dagens kapacitet plus effekten från både Ringhals 1 och 2. Detta medför att den samlade svenska kärnkraftsproduktionen ligger på drygt 60 TWh år 2045 i Klimatscenarioet, det vill säga ungefär lika mycket som producerades under 2019.



Figur 6: Befintliga reaktorer och anläggningar under konstruktion i Sverige och Finland, givet ett antagande om 60 års teknisk livslängd (till vänster) respektive 80 års teknisk livslängd (till höger). Åldern är räknad från det att respektive reaktor anslöts till elnätet.

Vi har i denna analys inte inkluderat livstidsförlängningar bortom 60 år för de befintliga anläggningarna som en möjlig option att reinvestera i kärnkraft. Livstidsförlängningar är sannolikt en mycket billigare åtgärd än nyinvesteringar vilket därmed skulle kunna bli lönsamt även i Basscenarioet med relativt sett lägre elpriser.⁸ Eftersom de äldsta reaktorerna som fortfarande är i drift i världen idag

⁸ Quist S. (2020), "Modellering av svensk elförsörjning - Teknisk underlagsrapport, Metodik och Ingångsvärden" uppskattar den specifika kostnaden för livstidsförlängning till 80 års drifttid till runt 6000-12000 SEK/kW el beroende på reaktor. Detta ligger klart under vårt antagande på ca 50 000 SEK/kW el för nyinvesteringar.

inte är äldre än ca 50 år så saknas det dock verkliga erfarenheter av drifttider längre än så.

2.3 VATTENKRAFT

När det gäller svensk vattenkraft så har vi inte gjort några specifika antaganden kring vare sig konsekvenser av den pågående miljöprovningsprocessen eller, som nämnts tidigare, klimatförändringarnas påverkan på tillrinningen. Bägge dessa faktorer kan komma att få viss betydelse för den svenska vattenkraftens produktionsförmåga i framtiden. Istället har vi utgått från dagens normalårsproduktion på 67 TWh per år (vi räknar genomgående med normalår i modellberäkningarna) och antar dessutom att produktionsförmågan kan öka med knappt en TWh på lång sikt genom investeringar. Utfallet för vattenkraftproduktionen är detsamma i bägge våra scenarier. Det innebär därmed att vattenkraften även på lång sikt antas utgöra ett betydande kraftslag i den svenska elförsörjningen men flankeras av en vindkraftproduktion och, i Klimatscenarioet, en kärnkraftproduktion som är i samma storleksordning på årsbasis. Den betydande vattenkraftproduktionen i Sverige (och i Norden) med dess goda reglerförmåga utgör naturligtvis en stor fördel vid en storskalig utbyggnad av variabel elproduktion.

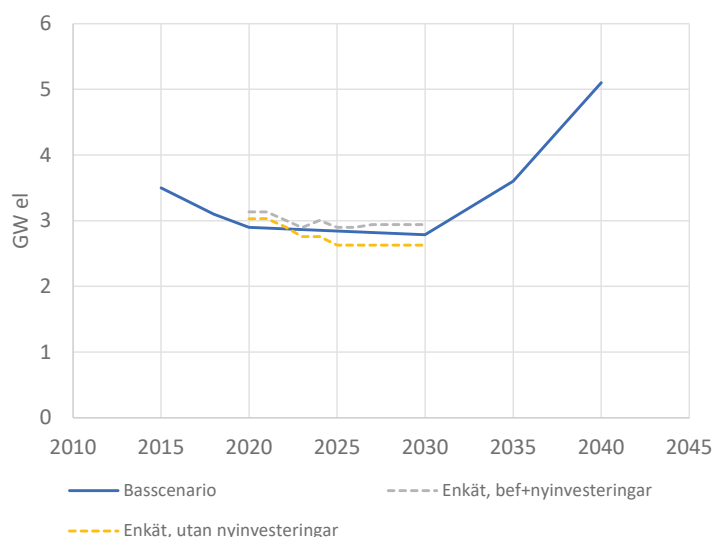
I en av scenariovarianterna i NEPP-projektets underlagsarbete till elbranschens färdplan antog man möjligheten till en riktad satsning på effekthöjning i de stora vattenkraftverken på upp till 4 GW, det vill säga totalt omkring 20 GW i installerad effekt. En sådan åtgärd skulle tydligt stärka den långsiktiga effektbalansen och reglerförmågan. Den årliga elproduktionen från vattenkraften antogs däremot vara oförändrad.

2.4 KRAFTVÄRME

Eleffekten i svenska kraftvärmeverk inom fjärrvärmesektorn uppgår idag (2018) till omkring 3000 MW el medan elproduktionen från kraftvärmeverken har legat på ca 8-9 TWh de senaste åren.⁹ Trots att kraftvärme i grund och botten är ett resurs- och klimateffektivt sätt att producera el och fjärrvärme så är kraftvärmens position under press. Det beror delvis på utvecklingen på elmarknaden i stort med en kraftig utbyggnad av variabel elproduktion som bitvis lett till en press nedåt på elpriset, men också på andra faktorer såsom politiska skatte- och styrmedelsinitiativ som lett till en ökad osäkerhet inför inte minst nyinvesteringar men också till förtida avveckling av viss befintlig kapacitet. Den något negativa bilden av kraftvärmens fortsatta position på den svenska el- och fjärrvärmemarknaden bekräftas av en intervjustudie som utfördes av Profu och på uppdrag av Energiföretagen Sverige under 2018/2019 (se Figur 7). Våra modellberäkningar indikerar att elproduktionen i de svenska kraftvärmeverken i såväl Basscenarioet som Klimatscenarioet fram till 2030 endast kommer att ligga någon enstaka TWh över dagens produktion, medan den installerade effekten till och med kan komma att minska något (se Figur 7).

⁹ Energiföretagen Sveriges statistik

På längre sikt, efter 2030, indikerar modellberäkningarna att elproduktionen och eleffektbidraget från svensk kraftvärme åter kan öka som en följd av stigande elpriser i synnerhet under vinterperioden då kraftvärmeverken normalt producerar. Beroende på den tekniska utvecklingen för förgasningstekniker baserade på fasta biobränslen eller beroende på inställningen till högeffektiv naturgaseldad kraftvärme - två alternativ med ett högt elutbyte på givet fjärrvärmeunderlag - kan kraftvärmen enligt modellberäkningarna komma att stå för 4-5 GW i produktionseffekt runt 2040. Men kommersialiseringspotentialen för förgasningstekniker är idag mycket osäker samtidigt som fjärrvärmebranschen förbundit sig att göra fjärrvärmeproduktion fossilfri vilket därmed skulle utesluta naturgas på längre sikt. Å andra sidan kan utnyttjningstiden i nya konventionella biobränsleeldade kraftvärmeverk komma att öka i takt med stigande elpriser, vilket därmed skulle kunna leda till ökad elproduktion utan att den installerade eleffekten ökar i motsvarande utsträckning. Detta är också något som bekräftas av modellberäkningarna.



Figur 7: Installerad kraftvärmekapacitet (el) i fjärrvärmesystemen baserad dels på modellberäkningar för Basscenariot och dels på enkätsvar från en omfattande intervjustudie under 2018/2019.

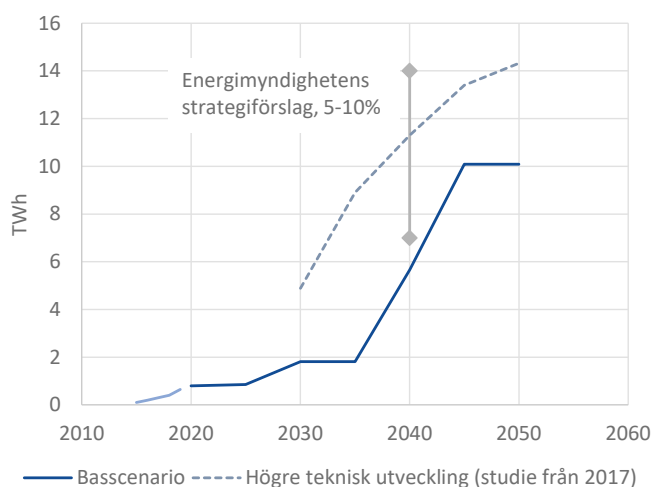
2.5 SOLEL

Den installerade kapaciteten för nätanslutna solelinstallationer var ca 700 MW vid 2019 års utgång (Energimyndigheten, 2020a). Med ett antagande om en utnyttjningstid på omkring 900 timmar så är vi därmed uppe i drygt 600 GWh per år. Intresset för en fortsatt utbyggnad är stort vilket inte minst indikeras av ansökningarna om investeringsstöd som inkommit till Energimyndigheten så här långt under 2020 (Energimyndigheten, 2020b).

I våra modellberäkningar gör vi ingen *prognos* för den fortsatta utbyggnaden av solel i Sverige. Istället är beräkningsutfallet ett resultat av lönsamma investeringar (i ett systemperspektiv) givet våra kostnadsantaganden och givet de olika omvärldsfaktorerna som väljs i samband med varje modellberäkning. En avgörande faktor för beräkningsutfallet är stödsystemen. Vi antar här att investeringsstödet (ROT-avdrag) tas bort inom kort och att skattereduktionen för den el som säljs till nätet (den så

kallade "60-öringen") försvinner till 2030. Detta är naturligtvis antaganden som är behäftade med stora osäkerheter. Dessutom gör vi en bedömning av värdet på egenförbrukningen som, förutom den undvikna kostnaden för den inköpta elen, även omfattar elskatt samt rörlig elnätsavgift (som man alltså inte behöver betala om man utnyttjar solexproduktionen för eget bruk). För icke-privata anläggningar, exempelvis större markplacerade anläggningar, ser kalkylen lite annorlunda ut. Å andra sidan är den specifika investeringskostnaden för sådana installationer klart lägre än för de mindre takanslutna anläggningarna. Våra antaganden leder till en utveckling i Basscenariot som redovisas i Figur 8 nedan. I verkligheten tillkommer ytterligare drivkrafter, förutom de rent ekonomiska, för investeringsviljan i solex och som vi inte kvantifierar i modellbeskrivningen. Det handlar om miljötänk, känslan av ökad självförsörjning och, inte minst, ett uttryck för gruppbeteende. Det sistnämnda kan till exempel handla om att man "agerar på samma sätt som sina grannar". Dessa drivkrafter är sannolikt starka och kan innebära att vi underskattar utvecklingen de kommande åren.

På längre sikt, runt 2040, når vi i Basscenariot en solexproduktion på omkring 6 TWh. Utfallet för Klimatscenariot är av samma storleksordning. När det gäller investeringskostnaden för solex så antar vi generellt att den minskar över tid till följd av fortsatt teknisk utveckling, typiskt med 30% mellan 2020 och 2040 (jämför med det tidigare resonemanget för vindkraft). I en tidigare känslighetsanalys från 2017 med samma modellverktyg men i övrigt andra förutsättningar bland annat ett antagande om en snabbare kostnadsreduktion, i storleksordningen 50% mellan 2020 och 2040 så hamnade beräkningsutfallet på över 10 TWh år 2040 (se den streckade kurvan i Figur 8; Energiforsk, 2017). Även om resultaten inte är direkt jämförbara så indikerar detta att en mer positiv syn på den tekniska utvecklingen än den vi antagit här (i Basscenariot och i Klimatscenariot) kan medföra klart större volymer solex i Sverige i ett lite längre tidsperspektiv. Som jämförelse kan vi även nämna Energimyndighetens förslag till solexstrategi som anger att 5-10% av den totala elanvändningen i Sverige skulle kunna tillgodoses med solex (Energimyndigheten, 2016). Räknat på en stagnerande elförbrukning (ungefär som i vårt Basscenario) så motsvarar det omkring 7-14 TWh (också inritat i Figur 8).



Figur 8: Solexproduktionen i Basscenariot samt en känslighetsanalys från en tidigare studie (Energiforsk, 2017). Dessutom är Energimyndighetens förslag till solexstrategi från 2016 markerat i diagrammet.

3 Produktionseffekt

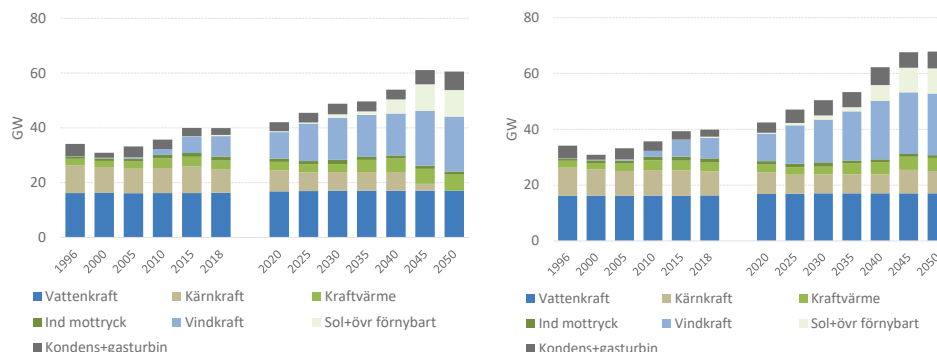
I föregående kapitel uppehöll vi oss vid årlig elproduktion, det vill säga "TWh". En annan viktig dimension för elsystemet är att el ska kunna tillföras i en omfattning som efterfrågas av marknaden *i varje tidpunkt*. Detta har sålunda med effekt att göra. Effektfrågan har fått ökad aktualitet i takt med att andelen variabel förnybar elproduktion med begränsad styrbarhet har ökat och kommer fortsätta att öka (så som vi visade i föregående kapitel) samtidigt som det finns tecken på att en del av den styrbara termisk elproduktionen kan komma att få problem med lönsamheten (stängningen av de fyra reaktorer R1, R2, O1 och O2 är talande exempel). Det sistnämnda är en följd av de senaste årens elpriser som inte i tillräcklig utsträckning motiverar fortsatt drift eller nyinvesteringar. Det finns också termisk styrbar effekt som fasas ut av andra skäl, exempelvis klimatskäl och då inte minst bland Sveriges grannländer som exempelvis i Tyskland där regeringen aviserat att all kolkraft ska fasas ut till 2038 och dessutom i en relativt snabb takt.¹⁰

Sammantaget har den ovan beskrivna situationen medfört ett ökat fokus på eleffektfrågan och hur styrbarhet och flexibilitet i det framtida elsystemet kan säkerställas så att leveranssäkerheten även i framtiden förblir på en mycket hög nivå. Rent tekniskt kan behovet av flexibilitet och styrbarhet sannolikt uppfyllas även i ett system där andelen variabel förnybar elproduktion är väsentligt större än idag samtidigt som delar av den tillgängliga termiska eleffekten av olika skäl fasats ut. Efterfrågefleksibilitet, energilager, ökad elproduktionsfleksibilitet för vindkraft och solkraft genom teknisk utveckling, samt förstärkt elöverföring kan troligen hantera en stor del av det framtida flexibilitets- och styrbehovet. Men det är samtidigt svårt att helt bortse från behovet av styrbar termisk elproduktion även i det nordiska elsystemet där vattenkraften utgör en både flexibel och betydande produktionsresurs. I en sådan framtid kan dock den styrbara termiska produktionseffekten delvis se annorlunda ut än dagens anläggningar som ofta byggts för långa drifttider och hög tillgänglighet under ett år.

Även om eleffekt inte är av central betydelse i KLIMPEN-projektet väljer vi här att redovisa modellresultaten även för den svenska produktionseffektens utveckling utifrån de två omvärldsscenarierna, se Figur 9. I figuren kan man se att produktionseffektens bidrag från vindkraft, men även sol, är större än energibidraget i Figur 4. Det förklaras av att effekt-energi-förhållandet för vindkraft och sol är relativt stort jämfört med andra kraftslag. Den *installerade* effekten som visas i Figur 9 kommer med andra ord att växa kraftigt jämfört med idag i bägge scenarierna. Den installerade effekten är dock inte detsamma som den *tillgängliga* effekten. Det handlar istället om effekt som finns tillgänglig när den verkligen behövs för att möta effektbehovet. Rent generellt är effektvärdet (eller

¹⁰ Se exempelvis <https://www.cleanenergywire.org/news/german-govt-adopts-coal-exit-fixes-hard-coal-compensation>.

tillgänglighetsfaktorn)¹¹ hos vindkraft klart lägre än hos styrbar termisk elproduktion. För sol är effektvärdet i princip noll.



Figur 9: Den svenska elproduktionseffektens utveckling i Basscenariot (till vänster) och i Klimatscenariot (till höger)

Modellverktyget kan i egentlig mening aldrig identifiera effektbrist eftersom det i så fall skulle innebära ett olösligt matematiskt problem. Istället investerar modellen i den mest kostnadseffektiva lösningen för att möta även topplastbehovet av el, såväl under normala omständigheter som under mer extrema omständigheter som en tioårs vinter. När det gäller investeringar för att möta topplasteffekten så är TIMES-NORDIC-modellen något konservativ eftersom det i modellbeskrivningen saknas åtgärder på användarsidan, exempelvis lastförskjutning, eller energilager. Den enda åtgärden på användarsidan som ingår i modellbeskrivningen är en konvertering bort från elbaserad uppvärmning till andra uppvärmningsformer. Istället hanteras det maximala eleffektbehovet till den allra största delen av befintlig produktionskapacitet eller investeringar i ny produktionskapacitet (med låg utnyttjningstid, till exempel gasturbiner). Även elimport från Sveriges grannländer kan potentiellt användas för att möta effektbehovet under topplattimmar. Tillgängligheten till import under sådana timmar kan dock diskuteras och beror i mångt och mycket på situationen i våra grannländer som naturligtvis också kan vara ansträngd.

År 2040 uppgår behovet av topplastkapacitet, det vill säga styrbar produktionseffekt med kort utnyttjningstid för att möta det högsta effektbehovet, till ca 4 GW i Basscenariot och runt 6 GW i Klimatscenariot. Siffran för Klimatscenariot hade sannolikt varit större om inte kärnkraften funnits tillgänglig. En andel av denna topplastkapacitet skulle alltså i teorin kunna hanteras med efterfrågefleksibilitet (eller energilager) istället. Efterfrågefleksibilitet har fördelar såsom snabb reaktionsförmåga (om vi förutsätter intelligent styrning) samt sannolikt ett stort antal separata, eller åtskilda, bidrag vilket är positivt för redundansen. En viktig nackdel är dock uthålligheten där produktionskapacitet har ett övertag. I underlaget till elbranschens färdplan (som alltså i många avseende delar beräkningsförutsättningar med vårt Klimatscenario) görs

¹¹ Värdet anger den andel av ett kraftslags installerade effekt som kan förväntas vara tillgänglig under årets topplastimme.

bedömningen att efterfrågefleksibiliteten i ett 2045-perspektiv kan stå för typiskt omkring 35-50%, beroende på scenario, av denna topplastkapacitet.

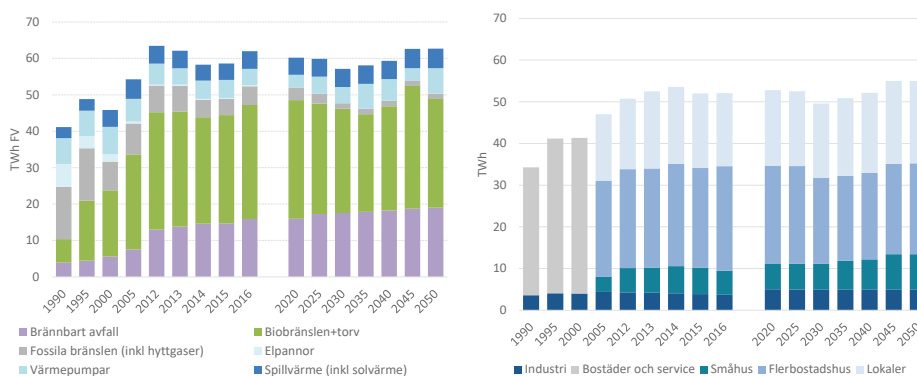
4 Fjärrvärme

Modellverktyget TIMES-NORDIC omfattar också en beskrivning av de svenska fjärrvärmesystemen. Fjärrvärmesystemen hanteras i modellen som ett aggregerat svenskt fjärrvärmesystem vilket innebär att den lokala dimensionen i princip saknas helt. Man ska alltså betrakta modellresultaten som en samlad bild över den svenska fjärrvärmemarknadens långsiktiga utveckling mot 2050.

Till följd av ökad konkurrens från värmepumpar och effektiviseringsåtgärder på värmemarknaden så håller de senaste årens stagnerande tillväxt för fjärrvärmerna i sig enligt modellberäkningarna, se Figur 10. Fram mot 2030 så pekar modellresultaten till och med på en liten nedgång i det samlade fjärrvärmeunderlaget. I verkligheten kan detta skilja sig mellan olika system, till exempel tillväxtregioner kontra regioner med en högre grad av utflyttning samt lokala skillnader i produktionens sammansättning och därmed konkurrenskraft. Utsikterna för det kommande decenniets fjärrvärmeanvändning är också relativt känsliga för olika energiprisutvecklingar.

På längre sikt är de billigaste effektiviseringsåtgärderna uttömda samtidigt som elpriserna stiger till följd av skärpt klimatpolitik. Dessutom antas det totala uppvärmningsbehovet att öka till följd av befolkningsökning och ekonomisk tillväxt vilket medför att fjärrvärmebehovet på mycket lång sikt återigen börjar att öka. Modellberäkningarna pekar också på småhussektorn som en potentiell tillväxtmarknad på längre sikt. Sammantaget, sett över hela analysperioden, blir det dock inga betydande förändringar avseende fjärrvärmebehovet.

När det gäller fjärrvärmeproduktionens sammansättning så sker heller inga dramatiska förändringar i vårt Basscenario. De fossila energislagen fasas ut sånär som på den fossila andelen av det brännbara avfallet, hyttgaser och en mycket liten andel eldningsolja för spetslastproduktion. Biobränslen av olika slag och avfall är de två helt dominerande energislagen såväl idag som i framtiden.



Figur 10: Fjärrvärmeproduktionen per bränsle (till vänster) och fjärrvärmeanvändningen per sektor (till höger) i Basscenariot. Källa 1990-2016: Energimyndigheten.

Skillnaden mellan Basscenariot och Klimatscenariot är liten då elektrifieringen framförallt berör industri och transporter. Dock medför elektrifieringen av järn- och stålindustrin att inte längre hyttgaser används i fjärrvärmeproduktionen. Till-

sammans med det betydligt högre priset på CO₂ leder detta till att det fossila inslaget i fjärrvärmeproduktionen är så gott som noll efter 2030, förutsatt att man bortser från plastinnehållet i avfallet. Avfallsmängderna antas vara något lägre i Klimatscenariot till följd av dels förbättrad utsortering och dels en viss avfallprevention som konsekvens av den striktare klimatpolitiken.

Referenser

- AR5 Scenario Database, 2014. Tillgänglig på <<https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/AR5DB/>>
- Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. et al., 2007. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA.
- Energiforsk, 2017, Utbyggnad av sol i Sverige”, Rapport 2017:376.
- Energimyndigheten (2016), ”Förslag till strategi för ökad användning av sol”, http://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/solen-i-samhället/forslag-till-strategi-for-okad-anvandning-av-sol_webb.pdf.
- Energimyndigheten, 2019a, ”Scenarier över Sveriges energisystem 2018”, ER 2019:07.
- Energimyndigheten, 2019b, ”Vägen till 100 procent förnybart elsystem – Derapport 2: Scenarier, vägval och utmaningar”, ER 2019:06.
- Energimyndigheten 2020a, ”Solcellsstatistik 2019”, <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2020/solcellsstatistik-2019--nu-finns-44-000-solcellsanlaggningar-i-sverige/>
- Energimyndigheten 2020b, ”Stöd för installation av solceller”, http://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/manadsrapporter/2020/solcel-manadsstatistik_maj20.pdf
- EU, 2016a. EU Reference Scenario 2016 - Website information. Tillgänglig på <https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2016_en>
- EU, 2016b. EU Reference Scenario 2016 - Excel sheets with EU and EU country results. Tillgänglig på: <https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2016_en>
- EU, 2016c. EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050 – Main results. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Luxembourg.
- EU, 2019. Technical Note Results of the EU CO₂ 3232.5 scenario on Member States. Tillgänglig på <https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/euco-scenarios_en#euco3232-5>
- EU, 2020. EU CO scenarios. Website information. Tillgänglig på <https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/euco-scenarios_en>

- Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka, 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy. The Energy Journal Special Issue.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008. Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. Journal of Global Environmental Engineering 13, 97-108.
- IEA, 2017. Energy Technology Perspectives 2017, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>
- IEA, 2019a. World Energy Outlook 2019. IEA, Paris.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA, 2019b. World Energy Model documentation 2019 version. IEA, Paris.
 Tillgänglig på < <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/documentation> >
- IEA, 2019c. World Energy Model – Sustainable Development Scenario. Webinformation. Tillgänglig på: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-model/sustainable-development-scenario#abstract>>
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014a. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change . IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC, 2014b. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC.
- Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., et al., 2011. An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. Climatic Change (2011) 109:59–76.
- Naturvårdsverket (2017), Sweden's Seventh National Communication on Climate Change,
<https://www.regeringen.se/49c71f/contentassets/7473906155764a13b9b3e4b5538a4820/swedens-seventh-national-communication-on-climate-change.pdf>
- NEP, 2010, "Towards a sustainable Nordic energy system", ISBN: 978-91-978585-8-8.
- NEP, 2006, "Ten Perspectives on Nordic Energy", ISBN: 91-631-9259-4.

- NEPP, 2016; "88 guldkorn - En sammanfattning av resultat och slutsatser från NEPP:s första etapp".
- NEPP, 2019a (pågående projektetapp), "Energisystemet i en ny tid", halvtidsrapportering för NEPP-projektet, mars 2019.
- NEPP 2019b, "Färdplan fossilfri el – analysunderlag", http://www.nepp.se/pdf/energiforetagens_fardplan_fossilfri_el_analysunderlag.pdf
- NETP, 2013, "Nordic Energy Technology Perspectives – Pathways to a Carbon Neutral Energy Future", IEA/Nordic Energy Research, ISBN:978-82-92874-24-0.
- NETP, 2016, "Nordic Energy Technology Perspectives 2016 – Cities, flexibility and pathways to carbon-neutrality", IEA/Nordic Energy Research, ISBN:978-82-92874-24-0.
- Nordleden, 2003, "Nordleden – Slutrapport för etapp 2", ISBN: 91-631-4327-5.
- O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., et al., 2017: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.
- RCP Database, 2009. Tillgänglig på <<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb> >
- Riahi, K. Gruebler, A. and Nakicenovic N.: 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7, 887-935.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., et al., 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* (2011) 109:33–57.
- Riahi, K., van Vuuren, D., Kriegler, E., et al., 2017a. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 153–168.
- Riahi, K., van Vuuren, D., Kriegler, E., et al., 2017b. Supplementary Material to: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. (*Global Environmental Change* 42, 153–168.)
- SMHI, 2019. Klimatmodeller och scenarier. Tillgänglig på: <<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimatmodeller-och-scenarier> >
- Smith, S.J. and T.M.L. Wigley, 2006. Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy Journal* (Special Issue #3), 373-391.
- SSP Database, 2018. Tillgänglig på <<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>>
- Svensk Vindenergi, 2019, "100 procent förnybart 2040 - Vindkraft för klimatnytta och konkurrenskraft", <https://svenskvindenergi.org/wp->

content/uploads/2019/10/Svensk_Vindenergi_F%C3%84RDPLAN_2040_rev-1.pdf.

Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., et al., 2010. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* (2011) 109:77–94.

van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. et al., 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-006-9172-9.

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al., 2011a. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5-31.

van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M G. J., et al., 2011b. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change* (2011) 109:95–116.

Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science*. 324:1183-1186. May 29, 2009.

World Nuclear News, 2020, <https://world-nuclear-news.org/Articles/TVO-contracts-Framatome-for-Olkiluoto-3-long-term>.

Sökord

Klimatförändringar, energisystem, scenarier

SCENARIER FÖR ENERGI OCH KLIMAT

Klimatförändringen och vad den betyder för vår planet är alltmer i fokus i samhällsdebatten. En viktig pusselbit i den klimatpolitiska forskningen är de olika scenarier för det globala och det regionala klimatet som klimatforskare världen över tar fram och där IPCC har en nyckelroll. Men det finns en stor osäkerhet i beräkningarna bland annat eftersom det handlar om relativt långa tidsrymder och att det saknas kunskap.

Bakom klimatscenarierna finns mängder av energisystemscenarier som i sin tur bygger på antaganden om exempelvis ekonomisk tillväxt, teknisk utveckling, styrkan i den globala och regionala klimatpolitiken och tillgång till bränslen och energiresurser. Här knyter forskarna ihop flera av de internationellt uppmärksammade klimatscenarierna med de bakomliggande energisystemscenarierna.

Resultaten visar hur det framtida energisystemet kan utvecklas och därmed hur betydelsen av olika energislag kan förändras. Dels är rapporten en litteraturgenomgång med en generell och internationell utblick kring energisystemscenarier. Dels görs en modellanalys som är specifikt inriktad på det nordiska och svenska energisystemet och de teknikslag som ingår i projektet Klimatförändringarnas konsekvenser för energisystemet. Rapporten beskriver också ett antal möjliga framtider för den svenska el- och fjärrvärmeförsörjningen mot 2050, baserat på energisystemmodellering.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se