



# RAPPORT

Kontaktperson RISE

Karin Pettersson  
Samhällsbyggnad  
010-516 54 71  
karin.pettersson@ri.se

Datum

2020-12-08

Beteckning

Sida

1 (26)

## Framtida produktionsscenarier för det svenska elsystemet – sammanställning av tidigare studier

**RISE Research Institutes of Sweden AB**  
**Samhällsbyggnad - Systemomställning och tjänsteinnovation**

Utfört av

Karin Pettersson

### RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress	Besöksadress	Tfn / Fax / E-post
Box 24036	AWL Sven Hultins	010-516 50 00
400 22 GÖTEBORG	plats 5, vån 4	033-13 55 02
	412 58 GÖTEBORG	info@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE i förväg skriftligen godkänt annat.

## Innehåll

Introduktion.....	4
Bakgrund.....	4
Syfte .....	4
Avgränsningar.....	5
Tidsperspektiv.....	5
Beskrivning av inkluderade studier.....	5
Syfte .....	8
Typ av scenarier.....	8
Tidsperspektiv.....	8
Studerat system och använda modeller.....	8
Antaganden om användning, produktion, export och import.....	9
Beskrivning av inkluderade scenarion .....	9
Elproduktionen i de olika scenarierna.....	11
2030.....	11
2045.....	13
Utvecklingen för olika kraftslag.....	15
Kärnkraft .....	15
Vattenkraft .....	16
Vindkraft.....	16

Termisk (bio)kraft(värme) .....	18
Solkraft.....	19
Övriga kraftslag.....	19
Måluppfyllelse .....	19
Systemkostnad .....	20
Slutsatser från studierna .....	21
Sammanfattning .....	23
Kort syntes av resultaten från scenarierna .....	23
Referenser .....	26
Inkluderade studier.....	26
Övriga referenser.....	26

## Introduktion

### Bakgrund

Sommaren 2017 beslutade riksdagen om att införa ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige med nya klimatmål till 2030, 2040 och 2045, en klimatlag och ett klimatpolitiskt råd (Regeringskansliet, 2017). Det långsiktiga klimatmålet innebär att Sverige senast år 2045 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, för att därefter uppnå negativa utsläpp. Ambitionen är att Sverige ska bli världens första fossilfria välfärdsland.

Avseende elsystemet så finns i Energiöverenskommelsen (Regeringskansliet, 2016), som nåddes mellan fem riksdagspartier i juni 2016, ett mål om 100 % förnybar elproduktion till år 2040. Målet innebär att Sverige år 2040 inte längre använder kärnkraft eller fossila bränslen för elproduktion. Det medför att avfall, som idag innehåller ungefär 50% fossila delar, samt restgaser från stålindustrin inte används för att producera el. Enligt Energiöverenskommelsen ska Sverige också vara nettoexportörer av el.

Flera branscher lyfter fram elektrifiering som en viktig del för att bli fossilfria, vilket kan leda till att elanvändningen kommer att öka i framtiden trots kontinuerlig eleffektivisering. Elanvändningen antas öka i transportsektorn, där en betydande del av person- och godstransporterna antas bli elbaserade, service- och företagssektorn, där bland annat utbyggnaden av datahallar antas bli stor i Sverige samt processindustrin, där flera branschers processer antas ställas om från fossila bränslen till fossilfri el.

Förutom en omställning till fossilfrihet och/eller förnybar produktion, med till stor del variabla källor som vind- och solkraft, och möta ett ökat elbehov, finns dessutom behov av att de närmaste 20-30 åren ersätta stor del av befintlig produktion som når sin ekonomiska livslängd samt investera i elnätet och överföringskapaciteter. Detta skapar en planeringsutmaning eftersom det tar tid att bygga både produktionsanläggningar och elnät.

Det finns flera olika studier som har tagit fram scenarier för hur Sveriges framtida elproduktion kan se ut. Då studierna ofta skiljer sig åt avseende till exempel syfte, metod, studerat system, tidsperspektiv och antaganden kan det vara svårt att jämföra dess resultat.

### Syfte

Syftet med den här rapporten är att sammanställa studier avseende framtida produktionsscenarier för det svenska elsystemet. Studierna beskrivs och jämförs avseende syfte, metod, huvudsakliga antaganden samt resultat och slutsatser.

## Avgränsningar

Rapporten fokuserar på framtida scenarier som beskriver elproduktionen i Sverige på årsbasis. Beskrivning av installerad effekt och effektbalans är oftast en del av de studier som inkluderas i den här rapporten, men kommer inte beskrivas närmare här. Transmission- och distributionsledet är inte inkluderat. Total elanvändning redovisas översiktlig i relation till produktionen i de inkluderade scenarierna. Rapporten innehåller endast översiktliga beskrivningar av antaganden, beräkningsförutsättningar och resultat. För mer detaljer hänvisas till de enskilda studierna. Inkluderade studier är publicerade från 2016 och framåt.

## Tidsperspektiv

I rapporten redovisas scenarier för år 2030 (eller 2035 i de fall 2030 inte är inkluderat i en viss studie) och 2045 (alternativt 2050 eller 2040 i de fall 2045 inte är inkluderat i en viss studie). Huvudfokus är på år 2045.

## Beskrivning av inkluderade studier

Följande studier har inkluderats i denna rapport:

1. Scenarier över Sveriges energisystem 2018, Energimyndigheten 2019
2. 100 procent förnybar el, Delrapport 2 - Scenarier, vägval och utmaningar, Energimyndigheten 2019
3. Fyra framtider – Energisystemet efter 2020 (Explorativa scenarier), Energimyndigheten 2016
4. Färdplan fossilfri el – analysunderlag - En analys av scenarier med kraftigt ökad elanvändning, NEPP 2019
5. Sveriges framtida elproduktion - En delrapport - IVA-projektet Vägval el, IVA 2016
6. Långsiktig marknadsanalys 2018 (LMA 2018), Svenska kraftnät 2019
7. Kraftsamling Elförsörjning - Långsiktig Scenarioanalys, Qvist Consulting för Svenskt Näringsliv 2020

Det är de studier som har hittats som presenterar framtida produktionsscenarier för Sveriges elsystem och som är publicerade från 2016 och framåt. Till ovanstående rapporter finns i flera fall andra delrapporter eller bakgrundsrapporter. Vissa rapporter utgör i sig också underlag till andra sammanställningsrapporter eller slutrapporter.

I Tabell 1 och Tabell 2 beskrivs inkluderade studier med avseende på syfte, vilken typ av scenarier som tas fram, tidsperspektiv, studerat system, använda modeller, hantering av omgivande system (utanför Sverige) samt antaganden, eller ansats, kring elproduktion och elanvändning.

Tabell 1. Beskrivning av studie 1-4.

Studie	Syfte	Typ av scenarier	Tidsperspektiv	Studerat system	Använda modeller	Hantering av omgivande system	Elanvändning, elproduktion samt export/import
1	Huvudsyftet med scenarierna är att utifrån dagens energisystem och befintliga styrmedel visa på energianvändning och tillförsel framöver. Scenarierna utgör en del av underlaget för rapportering till Europeiska kommissionen av hur Sveriges framtida växthusgasutsläpp kan komma att utvecklas.	Scenarierna är till sin karaktär <i>prediktiva</i> (förutsägande). Utifrån dagens förutsättningar, och med variation av ett antal parametrar som resulterar i olika scenarier, visa på framtida utveckling. Rapporten betonar att scenarierna inte är prognoser, men de kan fortfarande betraktas som prediktiva för de olika förutsättningarna som antas för varje scenario.	2020-2050	Hela Sveriges energisystem	TIMES-Nordic, EMEC för ekonomiska förutsättningar	Tar genom scenarierna hänsyn till olika omvärldsfaktorer.	Elanvändningen såväl som elproduktionen är ett resultat som varierar mellan de olika scenarierna och åren.
2	Syftet är att måla upp olika bilder av hur ett 100 procent förnybart elsystem kan se ut, vad som skulle kunna få oss att nå dit och vilka utmaningar och möjligheter det innebär.	<i>Måluppfyllande</i> (100% förnybart elsystem).	2040-talet/2045	Svenska elsystemet	Apollo	Avgränsat till att titta på Sverige. Tillgänglig information om andra länder avseende produktion, användning och överföringskapacitet, men inga känslighetsanalyser.	Elanvändningen antas öka till 160 TWh/år och elexporten sätts till 20 TWh/år, vilket ger en årlig produktion på 180 TWh/år i alla scenarier.
3	Studien har arbetat med scenarier för att föreställa sig hur framtidens energisystem kan komma att se ut, beroende på vad samhället tycker är viktigt när det gäller energi.	Scenarierna som utvecklats är <i>explorativa</i> (utforskande/undersökande) och ger ett brett perspektiv på möjliga utvecklingsvägar för det svenska energisystemet.	2035, 2050	Hela Sveriges energisystem	Markal och Apollo. Scenarierna är dock uppskattade <u>utan</u> hjälp av modeller. Modellsimuleringar har sedan gjorts för att simulera scenarierna och för att kunna göra konsekvensanalyser av dem.	Omvärlden har stor påverkan i modellerna. Omvärlden har samma utveckling oavsett scenario.	Olika antagande om nivå på elanvändning såväl som elproduktion för de olika scenarierna och åren.
4	Huvudsyftet har varit att – i en scenario- och modellstudie – analysera hur elsektorn kan producera och distribuera den ökade mängd fossilfri el som efterfrågas i framtiden, hur leveranssäkerhet och effektillgänglighet kan säkras på kort och lång sikt samt hur stora systemkostnaderna är för detta.	<i>Måluppfyllande</i> (100% förnybart eller fossilfritt elsystem efter 2040).	2015-2045	Rapporten fokuserar på det svenska elsystemet, men i modelleringen har hela energisystemet i Sverige, såväl som Norden och Nordeuropa ingått.	Times och Apollo	Fokus ligger på det svenska energisystemet men i alla dessa scenarier hanteras även utvecklingen i Norden och övriga Nordeuropa.	Elanvändningen antas öka till 190 TWh/år 2045. Olika resulterande produktion i de olika scenarierna med antagande om att Sverige ska vara nettoexportörer ett normalår.

Tabell 2. Beskrivning av studie 5-7.

Studie	Syfte	Typ av scenarier	Tidsperspektiv	Studerat system	Använda modeller	Utanför Sverige	Elanvändning, elproduktion samt export/import
5	Syftet har varit att skissa på några olika alternativ för hur Sveriges elförsörjning kan se ut på lång sikt och kommentera vad som krävs för att dessa ska kunna realiseras.	<i>Måluppfyllande</i> (100% fossilfritt elsystem över året).	2030-2050	Svenska elsystemet	Inga använda modeller i studien. Det resultat som presenteras visar en övergripande potential där begränsad hänsyn har tagits till miljöaspekter och ekonomi.	-	Det ska inom landet årligen produceras en lika stor mängd fossilfri el som det förbrukas, vilket antas vara 160 TWh/år.
6	Syftet har varit att undersöka t ex överföringsbehov, effektillräcklighet och balansering av/för kraftsystemet. Scenarierna ställs upp som utgångspunkt för analys av vilka utmaningar som olika möjliga utvecklingsvägar kan innebära för kraftsystemet, samt vilka åtgärder som kan behövas för att möta utmaningarna. Samtliga scenarier i LMA utgår från dagens kraftsystem och elmarknad, samt fattade beslut om framtida åtgärder.	Scenarierna är till sin karaktär <i>prediktiva</i> (förutsägande). Utifrån dagens förutsättningar, och med variation av ett antal parametrar som resulterar i olika scenarier, visa på framtida utveckling. Rapporten betonar, precis som i fallet med studie 1, att scenarierna inte är prognoser, men de kan fortfarande betraktas som prediktiva för de olika förutsättningarna som antas för varje scenario.	2030, 2040	Nordepartas elsystem	Svenska kraftnäts elmarknadsmodeller BID3 och EMPS	Nordepartas elsystem studeras och handel mellan länder tillåts enligt givna överföringskapaciteter. Scenarierna speglar olika utvecklingar i Sverige, men ingen känslighetsanalys görs av utvecklingen i de andra länderna som ingår i modellen.	Elanvändning antas vara mellan 142-180 TWh/år beroende på scenario. Elproduktionen varierar också mellan de olika scenarierna.
7	I denna studie utforskas konturerna av hur ett kostnadsoptimalt fossilfritt svenskt kraftsystem år 2045 kan se ut. Ambitionen är att underlaget ska användas för att kunna utveckla konkreta rekommendationer för att Sverige ska kunna övergå till ett fossilfritt samhälle med bästa konkurrenskraft för den svenska ekonomin.	<i>Måluppfyllande</i> (fossilfri ekonomi 2045).	2045	Svenska elsystemet	GENX	En förenklad modell för elhandel med Sveriges grannländer har använts som en del av underlaget för systemdimensioneringen. Samtliga modelleringar som använder handel som en del av systemdimensioneringen använder ett handelsförhållande som motsvarar 100 % fossilfri el på årsbasis i grannländerna år 2045, och tillåter enbart import av fossilfri el. I vissa scenarier tillåts ingen handel med grannländer.	Elanvändningen antas öka till minst 200 TWh/år. Olika antaganden om möjligheten till import i olika scenarier, vilket resulterar i något olika elproduktion (och framförallt installerade effekter).

## Syfte

Som framgår av beskrivningarna i Tabell 1 och Tabell 2 har de inkluderade studierna delvis lite olika syften. Studie 1, till exempel, utgör en del av underlaget för rapportering till Europeiska kommissionen av hur Sveriges framtida växthusgasutsläpp kan komma att utvecklas. Huvudsyftet med scenarierna där är att utifrån dagens energisystem och befintliga styrmedel visa på energianvändning och tillförsel framöver. Studie 3 målar upp olika framtidsbilder för hur Sveriges energisystem kan komma att se ut, beroende på vad samhället tycker är viktigt när det gäller energi. Merparten av de andra studierna tittar på olika framtida scenarier, oftast avseende förnybara och/eller fossilfria elsystem, och studerar och diskuterar i olika utsträckning, och på delvis olika sätt, vad som krävs för att uppnå respektive utvecklingsväg/scenario och vad det innebär för möjligheter och utmaningar.

## Typ av scenarier

Det finns flera sätt att ta fram framtidsscenarier. De kan exempelvis vara explorativa (utforskande/undersökande), prediktiva (förutsägande) eller måluppfyllande. Majoriteten av de inkluderade studierna (4 av 7 studier) är måluppfyllande och tar fram scenarier där elproduktionen i framtiden (mellan 2040-2050 beroende på studie) är förnybar och/eller fossilfri. Den stora skillnaden mellan scenarier som studerar fossilfri elproduktionen jämfört med de som studerar endast förnybar, är kärnkraftens roll. Där scenarier som fokuserar på fossilfri elproduktion tillåter fortsatt användning av befintlig kärnkraft och/eller investering i ny kärnkraft.

Scenarierna som utvecklats i studie 3 är explorativa (utforskande/undersökande) och ger ett brett perspektiv på möjliga utvecklingsvägar för det svenska energisystemet. Scenarierna förutsäger inte den mest sannolika utvecklingen, och behöver inte heller uppfylla befintliga miljö- och klimatmål. De ska i stället beskriva en utveckling av energisystemet som följer av vilken prioritering som blir viktigast i respektive framtid.

Scenarierna i studie 1 och 6 är till sin karaktär prediktiva (förutsägande). Utifrån dagens förutsättningar, och med variation av ett antal parametrar som resulterar i olika scenarier, visa på framtida utveckling. I rapporterna betonas att scenarierna inte är prognoser, men de kan fortfarande betraktas som prediktiva för de olika förutsättningarna som antas för varje scenario.

## Tidsperspektiv

Tidsperspektivet i de olika studierna sträcker sig från idag fram till 2050. Vissa studier modellerar och visar resultat för var 5:e år från nu fram till 2050 (exempelvis 1 och 4) medan andra gör nedslag ett par specifika år (exempelvis 3 och 6). Flera av studierna fokuserar på ett år (2045/2050) (exempelvis 2 och 7).

## Studerat system och använda modeller

Fyra av de sju inkluderade studierna fokuserar endast på elsystemet, medan tre av studierna inkluderar hela energisystemet. De som endast fokuserar på elsystemet använder oftast en eller flera elmarknadsmodeller (listade i Tabell 1 och Tabell 2 ovan). I studie 3 används dock inte modeller för att ta fram scenarierna, utan för att analysera dem. I studie 5 används inte modeller alls. Den mest frekvent använda elmarknadsmodell är Apollo som simulerar kraftmarknaden upp till timnivå



utifrån en förutbestämd produktionsmix. De studier som studerar hela energisystemet (1, 3 och 4) använder en energisystemmodell tillsammans med en elmarknadsmodell. Undantaget är studie 1 som inte har använt en specifik elmarknadsmodell. Använda energisystemmodeller är Times (1 och 4) och Markal (3). Times- och Markalmodellerna är investeringsmodeller som beräknar den mest kostnadseffektiva utvecklingen av energisystemet givet alla de alternativ som står till buds och andra satta förutsättningar.

Alla inkluderade studier är fokuserade på det svenska el- eller energisystemet. Men i olika grad tar studierna hänsyn till omvärlden. I studie 4 och 6 studeras hela Nordeuropas energi- respektive elsystem. I studie 1 tar man genom scenarierna, där man varierar olika parametrar, hänsyn till omvärldsfaktorer såsom priser på utsläppsrätter och olika energibärare. I studie 2 görs antagande baserat på tillgänglig information avseende närliggande länders produktion, användning och överföringskapacitet, men inga känslighetsanalyser görs. I studie 3 konstateras att omvärlden har stor påverkan i modellerna, men omvärlden har samma utveckling oavsett scenario. I studie 7 har en förenklad modell för elhandel med Sveriges grannländer använts som en del av underlaget för systemdimensioneringen.

## Antaganden om användning, produktion, export och import

Elanvändningen bedöms i de allra flesta scenarier att öka från dagens nivå på ca 140 TWh/år. I flera scenarier för 2045 bedöms elanvändningen ha ökat kraftigt, upp till ca 200 TWh/år till följd av en ökad användning i transportsektorn (där en betydande del av person- och godstransporterna antas vara elbaserade), service- och företagssektorn (där bland annat utbyggnaden av datahallar antas bli stor i Sverige) samt processindustrin (där flera branschens processer antas ställas om från fossila bränslen till fossilfri el). I alla studier är elanvändningen ett antagande, utom i 1 där det är ett resultat av modelleringarna. Flera studier har samma antagande avseende elanvändningen i alla scenarier (1, 2, 4 och 7), medan andra har olika antagande beroende på scenario (3 och 6).

Elproduktionen är i de flesta studier ett resultat och varierar mellan de olika scenarierna i studien. I studie 3, med undersökande scenarier, är inte elproduktionen ett resultat utan olika nivåer antas i de olika uppmålad framtidsscenarierna. I två studier, 2 och 4, finns ett antagande om att Sverige ska vara nettoexportörer av el. I studie 2 sätts en nivå på exporten för alla scenarier, vilket tillsammans med antagen elanvändning ger en nivå på produktionen (samma i alla scenarier). I studie 4 är det också ett villkor att Sverige ska vara nettoexportörer av el, men nivån är ett resultat och varierar mellan de olika scenarierna. I studie 5 sätts produktionen utifrån antagandet att den på årsbasis ska vara samma som användningen.

I studie 7 finns olika ansatser vad beträffar möjligheten till handel med grannländer. I några scenarier är detta inte möjligt och således måste användningen mötas med inhemsk produktion i dessa scenarier.

## Beskrivning av inkluderade scenarier

Tabell 3 och Tabell 4 beskriver scenarierna i de inkluderade studierna. En del studier innehåller många, eller väldigt många, scenarier och ett urval har därför gjorts i de fallen.

Tabell 3. Beskrivning av scenarierna i referens 1-4.

Studie	Scenarionamn	Beskrivning
1		6 olika scenarier är inkluderade, varav 5 påverkar elsystemet. Utgående från grundscenariot (Referens EU) görs känslighetsanalyser för viktiga parametrar som därmed utgör de andra scenarierna. Baserat på resultaten har 3 olika scenarier valts ut (flera av scenarierna ger väldigt lika resultat).
	Referens EU	Scenariot är det som i klimatrapporeringen kallas för referensscenariot. Förutsättningar från EU-kommissionen över prisutveckling för utsläppsrätter och fossila bränslen används.
	Lägre energipriser	I scenariot antas ett lägre pris på fossila bränslen samt utsläppsrätter, i övrigt samma förutsättningar som i <i>Referens EU</i> .
	Högre elektrifiering	I detta scenario undersöks hur energisystemet påverkas av en högre grad av elektrifiering. Scenariot använder samma priser på fossila bränslen samt utsläppsrätter som i <i>Lägre energipriser</i> .
2		Tre olika huvudscenarier är inkluderade (varianter av dessa undersöks i känslighetsanalyser, dessa inkluderas dock inte i den här rapporten) som speglar olika sätt att uppnå ett 100% förnybart elsystem till 2040-talet. Alla scenarier har ungefär lika mycket elproduktion från vattenkraft, men skiljer sig avseende utbyggnaden av vindkraft, solkraft respektive biokraftvärme.
	Vindscenariot	I detta scenario står vind i fokus och merparten av den förnybara elen som byggs är vindkraft. Mycket vindkraft är en förutsättning för ett 100% förnybart elsystem, men den nivån som undersöks i detta scenario (90 TWh) kräver en djupare analys av vad som är möjligt och inte. Avgörande drivkrafter är sjunkande priser på vindkraft men också tillståndsprocesser, acceptans och planeringsförutsättningar. Förutom huvudscenariot för vindkraft, som inkluderats här, utreds ett par varianter av det med avseende på lokaliseringen av vindkraften över landet.
	Solscenariot	I det här scenariot står elproduktion från sol i fokus och ökar kraftigt från dagens nivå (till 25 TWh). Fortfarande mycket vindkraft också. Drivkrafter för scenariot är sjunkande priser på solet, starkt folkligt stöd, korta ledtider, tillgång till ytor med lågt alternativvärde och ett intresse att främja lokal och småskalig elproduktion.
	Kraftvärmescenariot	I det här scenariot står kraftvärme i fokus och ökar kraftigt från dagens nivå (till 35 TWh). Drivkraft i detta scenario skulle kunna vara att elpriset ökar vilket gör både elproduktion mer lönsam samtidigt som fjärrvärme blir mer konkurrenskraftigt jämfört med el för uppvärmning.
3		Rapporten visar 4 möjliga energiframtider med avseende på identifierade knäckfrågor för energiområdet i form av: energihushållning, elsystemet, transporter, bioenergi och olika aktörers roll och ansvar i omställningen av energisystemet.
	Forte	I Forte är det viktigt att samhället ser till att energipriserna är låga framför allt för industrin. Välfärden bygger på ekonomisk tillväxt och att det finns jobb. Säker tillgång till energi är också en av Fortes huvudprioriteringar.
	Legato	I Legato handlar det om att minska energisystemets miljöpåverkan och om att bidra till att lösa en global fråga. Där är det viktigt med ekologisk hållbarhet och global rättvisa, vilket präglar lösningarna.
	Espressivo	Espressivo bygger mycket på egna initiativ och konsumenter som vill ha individuella lösningar och flexibilitet. Här är grön energi en stark drivkraft. Decentralisering, småskalig egenproduktion och att köpa tjänster är viktiga inslag i Espressivo.
	Vivace	Vivace har starkt klimatfokus. Sverige har valt att bli ett föregångsland när det gäller grön tillväxt och utvecklar exportmarknaden för miljöteknik och bioindustri, vilket skapar nya typer av jobb.
4		Tre olika scenarier för att uppnå ett 100% förnybart och/eller fossilfri elproduktion efter år 2040.
	Förnybart centraliserad	100% fossilfri och förnybar elproduktion, företrädesvis central produktion. Produktion som baseras på vatten-, vind-, bio- och solkraft. Kännetecknas av centrala koncentrerade kraftanläggningar långt från förbrukaren. Drivkrafter för scenariot är mindre engagerade elkunder, AI får större roll, mindre tillit till marknadslösningar.
	Förnybart decentraliserad	100% fossilfri och förnybar elproduktion, större andel decentraliserad produktion. Produktion som baseras på vatten-, vind-, bio- och solkraft. Kännetecknas av lokala kraftanläggningar nära förbrukaren. Drivkrafter för scenariot är engagerade elkunder, vilja att vara självförsörjande och högre tillit till marknadslösningar.
	Förnybart och kärnkraft	100% fossilfri elproduktion med både förnybart och kärnkraft. Produktion som baseras på förnybart och kärnkraft genom livstidsförlängningar av kvarvarande sex reaktorer. Drivkrafter för scenariot är att kärnkraft teknisk och ekonomiskt kan leva bortom 60 år. Övriga drivkrafter mellan de två andra scenarierna.

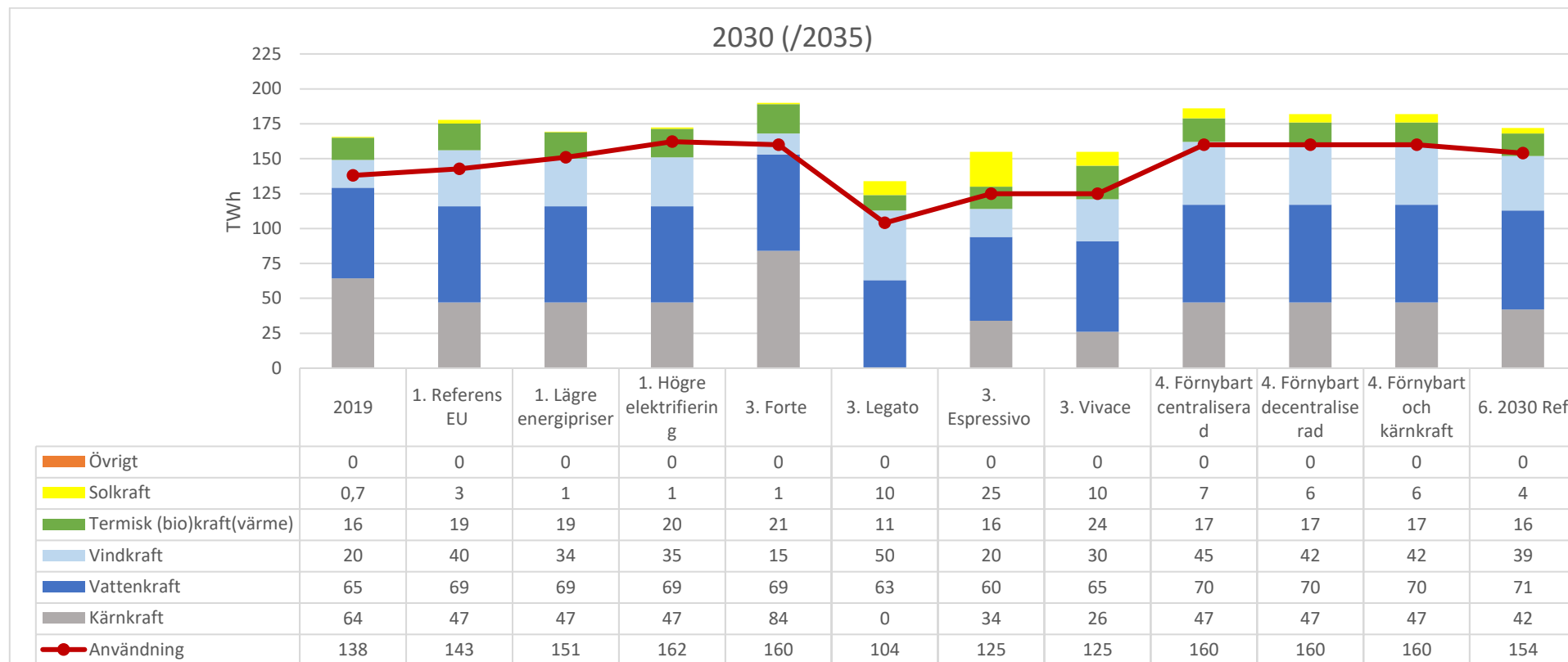
Tabell 4. Beskrivning av scenarierna i referens 5-7.

Studie	Scenarionamn	Beskrivning
5	Fyra scenarier är inkluderade, där olika alternativ hårdras med hänsyn till potentialer som identifierats för de olika kraftslagen. För varje scenario finns en låg-, en medel- och en högvariant. Det är medelvarianten som redovisas i denna rapport och som också fokuseras på i studien.	
	Mer sol och vind	Alternativet baseras på en stor andel icke-planerbar kraft.
	Mer biokraft	Alternativet baseras på en stor mängd biokraft.
	Ny kärnkraft	Alternativet baseras på att det byggs nya kärnkraftverk som primärt ersätter de anläggningar vi har idag.
	Mer vattenkraft	Alternativet baseras på att det är möjligt att bygga ut vattenkraften.
6	LMA2018 har utgått från tre scenarier, ett referensscenario och två kompletterande scenarier. Referensscenariot utgör en "bästa uppskattning" och de kompletterande scenarierna har utarbetats för att vidga utfallsrummet i resultaten, med andra ingångsvärden och med en annan metodik. Tillsammans utgör de på så sätt en bredare grund för analys.	
	Referensscenariot (Ref)	Vidareutvecklats från gemensamma nordiska scenarion som antar en relativt snabb utveckling mot ett förnybart energisystem vilket leder till högre elanvändning som möts av utbyggnad av vind- och solkraft. Priset på utsläppsrätter stiger något samtidigt som subventioner till förnybara energikällor fortsätter.
	Högscenario	De ingångsvärden till funktionen som skiljer scenarierna åt är elanvändning, bränslepris och pris på utsläppsrätter. Dessa värden är höga för högscenario.
	Lågscenario	Motsvarande värden som är höga för högscenario, är låga för lågscenario.
7	Scenarier för att uppnå ett 100% fossilfritt elsystem till år 2045. Tre scenariefamiljer är inkluderade i studien: teknikneutrala system (TN), ingen driftförlängning av kärnkraft (N) och 100% förnybart (F). Grunden i rapporten är tolv teknikneutrala scenarier/modelleringar. Därtill finns ytterligare tio fall vardera i de andrascenariefamiljerna. Baserat på resultaten har här valts ut fyra scenarier från rapporten, två teknikneutrala och två förnybara. Samtliga scenarier är av robusthetsskäl gjorda för ett år med låg tillgång på vattenkraft, så kallat torrår.	
	TN05-SMR	Huvudsakliga antaganden i scenariot är låg kostnad för sol, vind & lager, låg kostnad för ny kärnkraft inkl. små modulära reaktorer (SMR), hög flexibilitet, handel tillåten, låg kalkylränta
	TN-04	Huvudsakliga antaganden i scenariot är låg kostnad för sol, vind & lager, medel kostnad för ny kärnkraft, SMR ej inkluderad, medel flexibilitet, handel ej tillåten, hög kalkylränta
	F05	Huvudsakliga antaganden som i scenario TN05-SMR, fast ingen kärnkraft tillåten.
	F02	Huvudsakliga antaganden som i scenario TN04, fast ingen kärnkraft tillåten.

## Elproduktionen i de olika scenarierna

2030

Figur 1 visar scenarier för Sveriges årliga elproduktion per kraftslag år 2030 (alternativt 2035). I figuren visas också den årliga elanvändningen.



Figur 1. Scenarier för Sveriges årliga elproduktion och användning år 2030 (alternativt 2035).

I de flesta scenarier för 2030 har den totala årliga elproduktionen ökat, till som mest ca 190 TWh/år (i scenariot 3. Forte). De flesta scenarier har en produktion mellan ca 170-185 TWh/år (samtliga scenarier i studie 1, 4 och 6). Vi kan dock se en minskning i flera scenarier i studie 3, speciellt Legato som handlar om att minska energisystemets miljöpåverkan och lösa en global fråga och där elproduktionen uppgår till 134 TWh/år. Samtliga scenarier för 2030 har en lägre

elanvändning än produktion på årsbasis och därmed är Sverige i alla scenarier nettoexportörer av el<sup>1</sup>. Scenarierna för 2030, med undantag för de i 3, är relativt lika. Detta gäller både avseende produktion (både total produktion och produktionen från olika kraftslag) och användning av el. Syftet med scenarierna i 3 är att måla upp framtidsbilder som är väldigt olika och vi kan därmed se en stor variation mellan scenarierna. Det är också den studie som är äldst (tillsammans med 5, publicerad 2016) och som till skillnad från de andra studierna i Figur 1 inte avser 2030, utan 2035. En observation som kan göras är att det scenariot i 3, ”Forte”, som har avsevärt högre elanvändning jämfört med de andra scenarierna i 3, har en elanvändning som ligger i linje med flertalet av de andra scenarierna för 2030.

För 2030 kan vi avseende produktion generellt se mest signifikanta skillnader, jämfört med idag, avseende produktionen från kärnkraft och vindkraft. Produktionen från kärnkraft minskar betydligt i alla scenarier utom i ”3.Forte” där den ökar (studie 7 som inkluderar scenarier som även tillåter ny kärnkraft, har inte resultat för 2030). I nästan alla scenarier ökar produktionen från vindkraft betydligt jämfört med idag.

## 2045

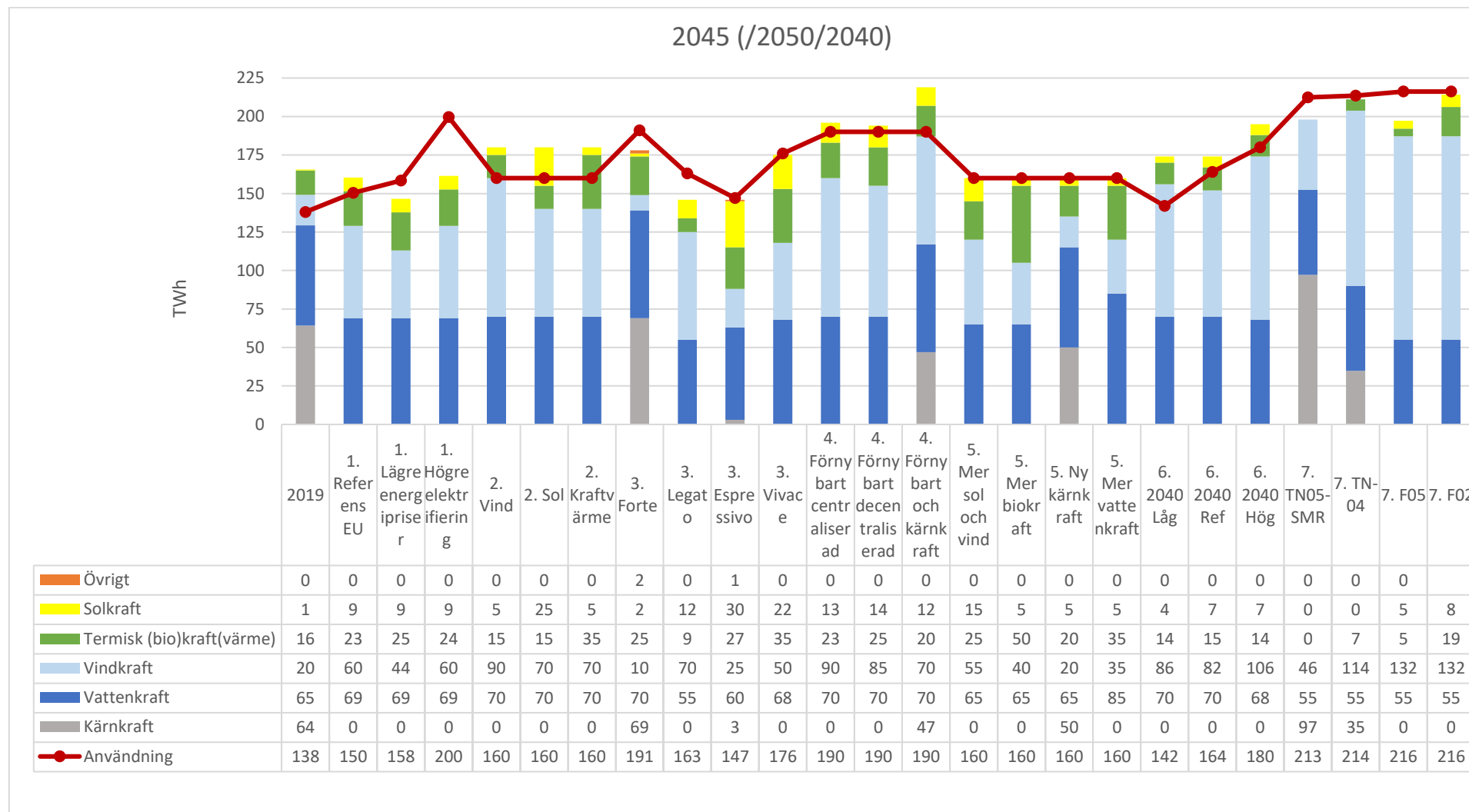
Figur 2 presenterar scenarier för Sveriges årliga elproduktion per kraftslag år 2045 (alternativt 2050 eller 2040). I figurerna visas också den totala elanvändningen i respektive scenario.

I majoriteten av scenarierna för 2045 ökar elproduktionen klart jämfört med dagens nivå. Detta kan främst ses för scenarierna i studie 4 och 7, där ökningen i samtliga scenarier är större än 20%. Störst är ökningen i scenariot ”4. Förnybart och kärnkraft”, där produktionen uppgår till totalt 219 TWh/år. Även scenarierna i studie 2 och 6 uppvisar samtliga en signifikant ökning av den totala elproduktionen. För scenarierna i studie 3 ökar elproduktionen i två av scenarierna (Forte och Vivace) och minskar i två av scenarierna (Legato och Espresso). Scenariot ”3. Espresso” har lägst elproduktion av alla scenarier med 135 TWh/år. För scenarierna i studie 1, som samtliga har en något högre produktion 2030 jämfört med idag, är produktion 2045 på samma eller lägre nivå jämfört med idag.

I samtliga scenarier för 2030 är elproduktion klart större än elanvändningen och Sverige är nettoexportörer av el. I scenarierna för 2045 är dock situationen betydligt mer varierande. Störst skillnad mellan produktion och användning har scenario ”1. Högre elektrifiering”, där det finns ett importbehov på 38 MWh/år. Scenariot speglar en situation som utgår från dagens förutsättningar (till exempel avseende beslutade styrmedel), men med en låg nivå på energipriser och en hög elektrifiering av samhället. Denna kombination resulterar alltså i ett kraftigt importbehov av el. Störst nettoexport uppvisas i scenarierna ”4. Förnybart och kärnkraft” och ”6. 2040 Låg”, där exporten uppgår till ungefär 30 TWh/år. Skillnaden mellan produktion och användning är något större i ”6. 2040 Låg”, men en del av elen (3 TWh/år) ”spills”. Så är även fallet i flera andra scenarier, bland annat scenariot ”6. 2040 Hög” med ett spill på 8 TWh/år. Detta beror på överproduktion av förnybara energikällor under en del timmar som inte möter någon elanvändning och som nätet inte klarar av att överföra vidare.

---

<sup>1</sup> I studie 3 finns inte elanvändningen i respektive scenario specificerad för 2030. Dock anges att nettoexporten är mellan 20-40 TWh i samtliga scenarier. En elanvändning som ger en export på 30 TWh/år har lagts in i alla scenarier i 3.



Figur 2. Scenarier för Sveriges årliga elproduktion och användning år 2045 (alternativt 2050 eller 2040).

Studie 4, som studerar scenarier med kraftigt ökad elanvändning (190 TWh/år), har som villkor att Sverige ska vara nettoexportörer av el på årsbasis, men den resulterande nivån är olika i de olika scenarierna. I scenarierna "Förnybart centraliserad" och "Förnybart decentraliserad" är nivån på exporten runt 5 TWh/år (jämfört med de 30 TWh/år som nämnts för "4. Förnybart och kärnkraft"). Scenarierna i studie 4, tillsammans med scenarierna i studie 7 och scenarierna "1. Högre elektrifiering" och "3. Forte" är de scenarier med högst elanvändning. Elanvändningen ligger i dessa scenarier på 190-200 TWh/år (siffrorna för scenarierna från studie 7 som redovisas i Figur 2 inkluderar förluster och är därför något högre). Som redan delvis beskrivits skiljer sig elbalansen mellan dessa scenarier, med allt från en stor import i "1. Högre elektrifiering" till en stor export i "4. Förnybart och kärnkraft". Av scenarierna i studie 7, har två scenarier ("TN04" och "F02") en produktion som motsvarar användningen, då det i dessa scenarier inte tillåts någon handel med andra länder. De andra två scenarierna i studie 7 ("TN05-SMR" och "F05") har ett importbehov på 15 respektive 19 TWh/år. Det ska dock betonas att scenarierna i 7 är gjorda för ett år med låg tillgång på vattenkraft (så kallat torrår). För ett normalår blir situationen annorlunda och i de flesta scenarier matchar då produktion och användning varandra på årsbasis.

Scenarierna för 2030 visar på hur långt utvecklingen i ett visst scenario kommit vid den tidpunkten, vilket är en bit på väg mot resultaten för 2040-talet. Scenarierna för 2040-talet uppvisar således naturligt större skillnader än de för 2030. För 2030 uppvisade alla scenarier, med undantag av de från studie 3, liknande resultat för produktion (både total produktion och produktionen från olika kraftslag) och användning av el. Som beskrivits här är så inte fallet för 2045 beroende på att utvecklingen gått längre än 2030 vilket resulterar i större skillnader. Dessutom finns nu scenarier från ytterligare tre studier (2, 5 och 7) jämfört med för 2030.

För 2045 kan vi avseende produktion generellt se, precis som för 2030, mest signifikanta skillnader jämfört med idag, avseende elproduktionen från kärnkraft och vindkraft. De flesta scenarier för 2045 inkluderar ingen elproduktion från kärnkraft. Dock har flera studier, främst studie 7, men också studie 3, 4 och 5 scenarier som inkluderar kärnkraft. Elproduktionen från vindkraft ökar i samtliga scenarier utom ett. Med några få undantag är ökningen mycket kraftig. I nästan alla scenarier ökar elproduktionen från solkraft, dock varierar nivån kraftigt mellan olika scenarier.

## Utvecklingen för olika kraftslag

Nedan beskrivs utvecklingen för olika kraftslag kort. Fokus ligger på det längre perspektivet till 2040-talet.

### Kärnkraft

Elproduktionen från kärnkraft var 2019 64 TWh och utgjorde 39% av den totala elproduktionen. De flesta scenarier för 2045 inkluderar, som nämnts, ingen elproduktion från kärnkraft. Detta blir i flera studier och/eller scenarier en konsekvens av att man studerar alternativ för ett 100% förnybart elsystemet. I studie 1 sker en utfasning av befintlig kärnkraft till 2050 och i samtliga scenarier är nyinvesteringar olönsamma. I de scenarier som innehåller kärnkraft, med undantag för de i studie 3 ("Forte" och Espresso), är scenarierna måluppfyllande. Dessa scenarier har som mål att uppnå ett 100% fossilfritt (ej nödvändigtvis förnybart) elsystem.

I scenarierna ”4. Förnybart och kärnkraft” och ”5. Ny kärnkraft” är elproduktionen från kärnkraft 47 respektive 50 TWh/år, alltså en liten bit under dagens produktionsnivå. ”4. Förnybart och kärnkraft” tillåter en livstidsförlängning av befintliga kvarvarande reaktorer, medan ”5. Ny kärnkraft” baseras på att det byggs nya kärnkraftverk som primärt ersätter de anläggningar vi har idag.

I scenarierna i 7, ”TN05-SMR” och ”TN-04”, är elproduktionen från kärnkraft 97 respektive 35 TWh/år. ”TN05-SMR” bygger på antagande om låg (som det är benämnt i rapporten) kostnad för ny kärnkraft, inklusive möjlighet att bygga små modulära reaktorer till låg kostnad, samt låg kalkylränta. ”TN-04” bygger på en antagen medelkostnad för ny kärnkraft, SMR inkluderas inte och kalkylräntan är högre. I de teknikneutrala (TN) scenarierna från 7 finns även möjlighet till livstidsförlängning av existerande reaktorer. Av de 97 TWh/år som produceras från kärnkraft i ”TN05-SMR” är 53 TWh/år produktion i existerande kärnkraftverk och 44 TWh/år utgör produktion i nya kärnkraftverk. För scenariot ”TN-04” utgörs all elproduktion från kärnkraft av redan nu existerande kärnkraft.

### Vattenkraft

Elproduktionen från vattenkraft var 2019 65 TWh och utgjorde 39% av den totala elproduktionen. Produktionen från vattenkraft är den av alla kraftslag som varierar minst mellan olika scenarier. Många scenarier har en produktionsnivå strax över dagens (68-70 TWh/år). Detta gäller till exempel samtliga scenarier i studie 1, 2, 4 och 6. Oftast beror den lilla produktionsökningen på att effekthöjningar i befintliga kraftstationer genomförts.

Elproduktionen från vattenkraft är som lägst i scenarierna i studie 7 (tillsammans med scenario ”3. Legato”), där produktionen i samtliga scenarier uppgår till 55 TWh/år. Detta kan förklaras av, som nämndes ovan, att modelleringarna i studie 7 är gjorda för ett år med låg tillgång på vattenkraft.

Ett scenario sticker ut åt andra hållet. I scenariot ”5. Mer vattenkraft”, uppgår elproduktionen från vattenkraft till 85 TWh/år (inget annat scenario ligger över 70 TWh/år). Alternativet baseras på att det är möjligt att bygga ut vattenkraften. Det kan ske genom effektiviseringar av befintliga kraftverk, utbyggnad i redan exploaterade älvar och vattendrag, samt utbyggnad i orörda älvar. För en produktion av 85 TWh/år krävs dock ingen utbyggnad i hittills skyddade älvar. Det krävs dock om produktion ska bli ännu större (i studien finns ett högsenario med produktion av 95 TWh/år från vattenkraft som inte är inkluderat här). Det ska i detta sammanhang betonas att scenarierna i studie 5 visar en övergripande (teknisk) potential där begränsad hänsyn har tagits till miljöaspekter och ekonomi.

### Vindkraft

Elproduktionen från vindkraft var 2019 20 TWh och utgjorde 12% av den totala elproduktionen. Elproduktionen från vindkraft ökar i samtliga scenarier för 2045 utom ett. Med några få undantag är ökningen mycket kraftig. I fyra av scenarierna är vindkraftsproduktionen över 100 TWh/år. I ”7. F05” och ”7. F02” uppgår produktionen till 132 TWh/år. I ”7. TN-04” och ”6. 2040 Hög” är produktionen 114 respektive 106 TWh/år. Två scenarier har en vindkraftsproduktion på 90 TWh/år: ”2. Vind” och ”4. Förnybart centraliserad”. I flera scenarier ligger vindkraftsproduktionen på 70 TWh/år: ”2. Sol”, ”2. Kraftvärme”, ”3. Legato” och ”4. Förnybart och kärnkraft”. Scenarierna ”3. Forte” och ”3. Espresso” sticker ut med en produktion på 10 respektive 25 TWh/år. Annars är de scenarier med lägst vindkraftsproduktion ”1. Lägre energipriser”, ”5. Mer biokraft” och ”7. TN05-SMR” (40-46 TWh/år). Även om det finns undantag åt båda hållen, kan man se ett visst samband mellan när en studie är publicerad och nivån på elproduktion från vindkraften. Flera av de scenarier med högst vindkraftsproduktion är relativt nyligen publicerade, medan flera av de scenarier med lägst elproduktion från vindkraft är från studier som är lite äldre. En annan observation som kan göras är att



flera av de scenarier som innehåller kärnkraft, ”3. Forte”, ”4. Förnybart och kärnkraft”, ”5. Ny kärnkraft” och ”7. TN05-SMR” har en relativt sett mindre produktion från vindkraft. Nivån i ”4. Förnybart och kärnkraft” ligger dock klart högre än i de andra nämnda scenarierna med kärnkraft, men lägre jämfört med de andra scenarierna i studie 4 (70 TWh/år jämfört med 90 TWh/år). Undantaget till detta är det andra scenariot från studie 7 med betydligt mindre kärnkraftproduktion än i ”TN05-SMR”, ”TN-04”, där produktionen från vindkraft, som nämnts, är 114 TWh/år.

De flesta scenarier är helt eller till stor del dominerade av utbyggnad av landbaserad vindkraft. Scenarierna i studie 1 är helt baserade på utbyggnad av landbaserad vindkraft, medan för flera av scenarierna i studie 7 utgör havsbaserad vindkraft ungefär 45% av vindkraftsproduktionen vilket motsvarar 60 TWh/år. I studie 4 är det endast ett av scenarierna, ”Förnybart centraliserad” som har produktion från havsbaserad vindkraft (ca 5 TWh år 2045). I studie 2 är produktionen från havsbaserad vindkraft 10 TWh/år i alla scenarier. I studie 6 varierar produktionen från havsbaserad vindkraft mellan scenarierna (5-20 TWh/år). Högst är det i scenariot ”2040 Hög” med 20 TWh/år. I de utvalda scenarierna från studie 7 finns ett scenario utan havsbaserad vindkraft, ”TN05-SMR”. I de andra scenarierna är produktionen från havsbaserad vindkraft mycket hög: 60 TWh/år i ”F05” och ”F02” och 39 TWh/år i ”TN-04”. Utifrån detta kan man konstatera att de fyra scenarier med allra högst produktion från vindkraft, över 100 TWh/år, har en betydande produktion från havsbaserad vindkraft. Produktionen från landbaserad vindkraft utgör i dessa scenarier mellan 72 och 86 TWh/år, med högst produktion i ”6. 2040 Hög”. Detta scenario, tillsammans med scenariot ”4. Förnybart centraliserad” har en liknande nivå av produktion av landbaserad vindkraft (totalt 90 TWh/år vindkraft, varav 5 TWh/år havsbaserad vindkraft).

Scenariot ”2. Vind” har en total vindkraftsproduktion om 90 TWh/år, varav 80 TWh/år är landbaserad vindkraft. Det är alltså ett av de scenarier med allra högst produktion av landbaserad vindkraft. Studien konstaterar att mycket vindkraft är en förutsättning för ett 100% förnybart elsystem och att det finns flera drivkrafter som skulle kunna innebära att vindkraften dominerar vår framtida elproduktion. En central är att vindkraft både på land och tillhavs fortsätter att bli billigare och att den förstnämnda redan idag byggs utan stöd. Dock betonar de att uppnå 90 TWh/år kräver en djupare analys av vad som är möjligt, inte minst med tanke på att vindkraften som finns idag ska ersättas under 2040-talet eller tidigare. Bland nyckelfaktorer för en kraftig utbyggnad nämns teknikutvecklingen mot större och effektivare turbiner, vilket leder till att det krävs färre verk för att producera samma mängd el. Men det är inte bara lönsamheten som är avgörande för vindkraftens utveckling utan också faktorer som tillståndprocesser, acceptans och planeringsförutsättningar.

Studie 6, där alla scenarier har en kraftig utbyggnad av vindkraften (86-106 TWh/år), lyfter att vindkraft är det kraftslag som kräver lägst elpris för att kunna motivera nyetablering och följaktligen det kraftslag som ser den största tillväxten fram till år 2040 i samtliga scenarier. Trots att elbehov samt priser på bränsle och utsläppsrätter ligger relativt lågt i lågsceariot (vilket bör medföra ett lågt elpris och minskad lönsamhet) byggs mer vind i lågsceariot jämfört med referenssceariot. I högscenariot sker en kraftig byggnation av havsbaserad vindkraft. En stor osäkerhet i scenarierna är var de förväntade nya vindkraftparkerna kan komma att byggas.

I studie 7 är nivåerna på havsbaserad vindkraft betydligt högre i flera scenarier jämfört med någon annan studie. Scenarierna i studie 7 har alla stor elproduktion och domineras av vattenkraft, vindkraft och i de teknikneutrala scenarierna också av kärnkraft, medan de flesta scenarier har låg eller ingen produktion från kraftvärme och solkraft. I studien har inga begränsningar ansatts vad gäller möjlig framtida kapacitet av havsbaserad vindkraft (vilket det gjorts för landbaserad vindkraft). Den havsbaserade vindkraften är, som nämnts, högst i de förnybara scenarierna ”F05” och ”F02” med 60 TWh/år, medan i scenariot ”TN05-SMR”

med mycket hög produktion från kärnkraft är den obefintlig. Scenariot ”TN-04” som inte innehåller någon ny kärnkraft, har en produktion på 39 TWh/år från havsbaserad vindkraft.

### Termisk (bio)kraft(värme)

Elproduktionen från termisk (bio)kraft(värme) var 2019 knappt 16 TWh och utgjorde 9% av den totala elproduktionen. För 2045 varierar produktionen kraftigt mellan olika scenarier, från 0 TWh/år i ”7. TN05-SMR” till 50 TWh/år i ”5. Mer biokraft”. Produktionen utgörs i flertalet scenarier helt eller till mycket stor del av biokraftvärme i industrin och kraftsektorn, men i en del scenarier är en del av råvaran av fossilt ursprung (främst avfall och industriella restströmmar) (till exempel i studie 1) och i en del scenarier finns även inslag av biokondenskraft (till exempel i ”5. Mer biokraft”).

I studie 7 varierar inslaget av biokraftvärme mellan scenarierna från 0-19 TWh/år. Modelleringen av el från kraftvärme i studie 7 är bristfällig på grund av att de ekonomiska förutsättningarna för investeringar i biokraftvärme styrs mer av situationen på värmeförsörjningssidan (som inte modelleras) än på elförsörjningssidan (som modelleras). Investeringskosten för biokraftvärme inom systemoptimeringen har därför justerats i ett spann från dess fulla kostnad ända ner till ingen kostnad alls (då den antas finnas på plats utanför optimeringen, likt vattenkraften). När kraftvärmen ställs utanför optimeringen, vilket kan vara relevant då hänsyn även bör tas till andra aspekter av kraftvärmen (värmeleveransen) bidrar kraftvärmen med 5–9% av den framtida produktionen, medan en inkludering i optimeringen leder till en mindre, eller ingen, andel.

Scenariot med allra högst termisk kraftproduktion från biobränslen är ”5. Mer biokraft” med en produktion på 50 TWh/år. Detta scenario bygger på att det kommer ny kraftvärmeteknik, både storskaliga anläggningar med betydligt högre elverkningsgrader än dagens anläggningar, och småskaliga kraftvärmeverk. Dessutom betonas att elproduktionen behöver göras oberoende av värmeunderlaget, genom installation av extra kylmöjligheter, trots att kondenskraftverk är en dyrare lösning och inte medger ett lika effektivt bränsleutnyttjande. Frågan om ökad konkurrens om bioråvaran, vilket kan begränsa detta alternativ diskuteras också i studie 5.

De flesta scenarier har en produktion från termisk (bio)kraft(värme) som ligger mellan ca 15-25 TWh/år. Flera scenarier ligger kvar på dagens nivå runt 15 TWh/år (alla scenarier i studie 6 samt vind- och solscenariot i studie 2). I studie 2 bedöms kraftvärmen ligga kvar på dagens nivå. Värmeunderlag och lönsamhet ansågs begränsande för framtida kraftvärmeproduktion. Det är endast med höga fossilbränslepriser (möjligt i kombination med låga biobränslepriser) och begränsningar i utbyggnaden av andra kraftslag som småskalig kraftvärme och tillfällig kondenskraft kan vara aktuell. Bara med starkt sjunkande priser för förgasningstekniken kan sådan vara aktuell. Studien betonar dock att på 2040-talet och framåt bedöms incitamenten och lönsamheter för ökad kraftvärme vara högre, förutsatt att det finns värmeunderlag. I studie 4 ökar produktion av kraftvärme till 2045 till mellan 20-23 TWh/år. Värdet av att elproduktion i städer med ansträngd effektsituation ökar, vilket bedöms förbättra villkoren för kraftvärmen. Befintliga biokraftvärmeverk förväntas kunna öka sin produktion till cirka 4 000 fullasttimmar vilket är högre än vad många biokraftvärmeverk producerar med idag.

## Solkraft

Elproduktionen från solkraft var 2019 0,7 TWh och utgjorde 0,4% av den totala elproduktionen. Precis som för biokraftvärmen så varierar mängden elproduktion från solkraft också kraftigt mellan olika scenarier för 2045, från 0 TWh/år i ”7. TN05-SMR” till 30 TWh/år i ”3. Espresso”.

I de teknikneutrala scenarierna i studie 7, ”TN05-SMR” och ”TN04”, är bidraget från solkraft marginellt, trots antagande om låg produktionskostnad. Detta beror dels på att produktionen av solkraft över året är starkt anti-korrelerad med elbehovet samt att korrelationen mellan produktionen från svensk solkraft och grannländernas solkraft är mycket hög.

Scenariot ”3. Espresso”, med en produktion på 30 TWh/år från solet bygger på en framtid med egna initiativ och konsumenter som vill ha individuella lösningar och flexibilitet, grön energi är en stark drivkraft, decentralisering, småskalig egenproduktion och att köpa tjänster är viktiga inslag. Ett annat scenario med hög elproduktion från solet är ”2. Mer sol”. Detta scenarios drivkrafter är sjunkande priser, starkt folkligt stöd, korta ledtider, tillgång till ytor med lågt alternativvärde och ett intresse av att främja lokal och småskalig elproduktion. Det betonas att det troligen behövs någon typ av styrmedel för att nå dessa nivåer, då utmaningen ligger i att merparten av den årliga produktionen från solet ligger under sommarhalvåret, då elpriserna är som lägst.

I de flesta scenarier ligger produktionen av solet mellan 5-15 TWh/år. I scenarierna i studie 4 ligger den mellan 12-14 TWh/år. I scenariot ”Förnybart decentraliserad” lagras el genom att batterier laddas under de timmar överskottet av el är som störst. I scenariot ”Förnybart centraliserad” regleras vattenkraftens produktion till en lägre nivå jämfört under perioder med stor förnyelsebar produktion från vindkraft och solkraft. Detta möjliggörs genom ökad flexibilitet i vattenkraften. Noterbart är även att vattenkraftens produktionsmönster ändras i det avseende att vattenkraften producerar mer el på natten när solkraftsproduktionen är obefintlig och mindre el på dagen då solkraftsproduktionen är som högst. Detta är tvärtom jämfört med vattenkraftens produktionsmönster idag som i första hand balanserar variationer i efterfrågan på el mellan dag och natt.

## Övriga kraftslag

Det finns endast inslag av andra kraftslag än de som hittills presenterats i två scenarier, ”3. Vivace” och ”3. Legato”. Där finns inslag av 1-2 TWh vågkraft år 2050. I studie 7 inkluderades möjligheten till kraftproduktion i ett kombinatorgasverk med koldioxidavskiljning och lagring, men detta alternativ kom inte med i något av de modellerade scenarierna.

## Måluppfyllelse

Majoriteten av de inkluderade studierna (2, 4, 5 och 7) är måluppfyllande och tar fram scenarier där elproduktionen i framtiden (mellan 2040-2050 beroende på studie) är förnybar och/eller fossilfri. De andra studiernas scenarier har inte de målen.

I studie 1, som utgår från dagens förutsättningar och sedan varierar olika parametrar i de olika scenarierna, har inget scenario som är förnybart till år 2040. Då finns en del kärnkraft kvar samt en del el producerad med fossila bränslen. 2050, som redovisas här, är dock alla kärnkraft borta.

I studie 3 beskrivs scenariernas måluppfyllelse utifrån att utsläppsnivån 2045 ska ligga på 85% av nivån jämfört med 1990 (som tillsammans med åtgärder för negativa utsläpp ger en nettonoll-situation). Med utgångspunkt i detta bör det svenska energisystemet uppvisa utsläpp om max 10 miljoner ton koldioxidekvivalenter per årsbasis år 2050. Scenario Legato ligger väl under denna nivå och Vivace ligger i linje med denna nivå.

Studie 2 diskuterar frågan om ett 100% förnybart elsystem är viktigast även om den sista procenten hamnar i andra sektorer. Så länge vi till exempel har fossila inslag i vårt avfall, kommer fossila utsläpp vid förbränning och det totala utsläppen minskar inte om man då skulle styra om från kraftvärme till enbart värmeproduktion (de allokeras bara på ett annat sätt). Samma resonemang gäller industriella restströmmar från (delvis) fossilbaserade processer.

## Systemkostnad

Flera studier inkluderar och redovisar systemkostnaden för olika scenarier. Dock varierar det något mellan olika studier vad som inkluderats i systemkostnaden.

I studie 4 visar analysen att de årliga systemkostnaderna kommer att öka successivt fram till år 2045 i alla scenarier. Ökningen förklaras genom det stora reinvesteringsbehovet som finns i alla scenarier samt investeringar i ny förnyelsebar kraftproduktion. Scenariot ”Förnybart och kärnkraft” har de lägsta systemkostnaderna, både total över hela perioden och för 2045, på grund av lägre kostnader i alla led. Systemkostnaden inkluderar kostnaderna för produktion, elnätet och de systemtjänster som behövs för att förse Sverige med el i framtiden. I systemkostnaden inkluderas kapitalkostnader, rörliga och fasta underhållskostnader, bränslekostnader, systemtjänster samt skatter och avgifter som ämnar motsvara negativa externa effekter. Kostnaderna för produktion av el är de största i alla studerade scenarier. I storleksordningen mellan 55 – 65 % av de årliga kostnaderna står produktion för. Det estimerade investeringsbehovet för produktionskapacitet i Sverige mellan 2021–2050 uppgår till 560-640 miljarder kronor beroende på scenario.

I studie 7 består de totala systemkostnaderna i samtliga fall främst av fasta investeringskostnader. Kostnaden varierar från 320 kr/MWh upp till strax över 500 kr/MWh. De mest kostnadseffektiva systemen är de som tillåter handel som en del av systemdimensioneringen, då de kräver lägre investeringskostnader. När analysen frångår principen om teknikneutralitet och begränsas till enbart förnybar elproduktion stiger de totala systemkostnaderna med i snitt minst 40% jämfört med de teknikneutrala scenarierna. Detta utan att inkludera merkostnader för systemtjänster (vilka inte har prissatts eller inkluderats i optimeringarna). Scenarierna ”TN05-SMR” och ”TN-04” är de teknikneutrala scenarier som har lägst respektive högst systemkostnad. En avgörande skillnad mellan dessa scenarier, som har stor betydelse för systemkostnaden, är nivån på kalkylräntan. Scenarierna ”F05” och ”F02” är de förnybara scenarier med lägst respektive näst högst systemkostnad, också de med olika nivåer på kalkylräntan.

I studie 5 beräknas kostnaden för de fyra olika scenarierna översiktligt till 75-80 miljarder per år (470-500 kr/MWh) beroende av scenario. Det är kostnaderna för själva produktionen, ”grundsystemet”, som är inkluderade. Studien betonar att den totala systemkostnaden för respektive alternativ bör förutom kostnaderna för produktionskapacitet även inkludera nödvändiga investeringar i transmissions- och distributionsledningar, extra reglerkapacitet i till exempel gasturbiner, förbrukningsflexibilitet och eventuellt även i energilager.

## Slutsatser från studierna

Tabell 5 och Tabell 6 presenterar utdrag av slutsatser från de inkluderade studierna. I de studier som inkluderar hela energisystemet har slutsatser för endast elsystemet lyfts ut. De flesta studier har som beskrivits i Tabell 1 och Tabell 2 ett bredare syfte än att endast ta fram produktionsscenarioer, vilket också speglas i slutsatserna som också inkluderar aspekter exempelvis kring vad som krävs av elsystemet i framtiden.

Tabell 5. Utdrag av slutsatser från studie 1-4.

Studie	Utdrag av slutsatser
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sveriges elproduktion ökar till 2035 för att sedan minska.</li> <li>- Sverige är nettoexportörer av el i de flesta scenarier med exporten minskar mot 2050.</li> <li>- Vid kraftigt ökad elanvändning blir dock Sverige en stor nettoimportör av el.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Det är fullt möjligt att ha ett 100% förnybart elsystem eftersom:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- utbud och efterfrågan möts under större delen av åren i scenarierna</li> <li>- stor potential av konkurrenskraftig förnybar el iii) stor potential av flexibilitet</li> <li>- elmarknaden kommer att ge betydligt mer incitament för flexibilitet när behovet uppstår.</li> </ul> </li> <li>- Men det behövs mer insatser, till exempel:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- att elpriset behöver styra mot systemvänlighet</li> <li>- försörjningstrygghet och behovet av systemtjänster behöver bevakas</li> <li>- elnätet måste fortsätta utvecklas och bli mer flexibelt</li> </ul> </li> <li>- Vinscenariot lyfts upp som de mest sannolika scenariot att byggas på marknadsmässiga grunder. Scenariot har många fördelar avseende kostnad, miljö och elsystem.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Goda förutsättningar för stor export av el i alla scenarier på grund av stor utbyggnad av landbaserad vindkraft tillsammans med god överföringskapacitet</li> <li>- Elpriserna är avgörande för investeringarna,</li> <li>- Stor påverkan av koldioxidpriset (påverkar elpriset)</li> <li>- Utbyggnad av kärnkraft och havsbaserad vindkraft förutsätter stöd</li> <li>- Den modellerade marknaden fungerar i alla scenarier</li> <li>- Nya produktionssystem ställer krav på robusthet</li> <li>- Ökat elberoende i alla scenarier</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Studiens huvudslutsats är att elsektor kan möta den kraftigt ökade efterfrågan på el som kan bli följd av andra branschers allt större elektrifiering. Studien visar också att detta kan göras på ett långsiktigt hållbart sätt, både sett till kostnad, leveranssäkerhet och elkvalitet samt klimat och miljö.</li> <li>- Efterfrågan på el kan öka med över 50 TWh till år 2045 vid en accelererad elektrifiering</li> <li>- Flera olika fossilfria utvecklingsvägar för den svenska elproduktionen är möjliga</li> <li>- Gemensamt för alla utvecklingar är en fortsatt kraftig utbyggnad av vindkraften</li> <li>- Även solkraften byggs ut i samtliga scenarier</li> <li>- Finns den politiska och ekonomiska möjligheten till livstidsförslängning av kärnkraften, så är den kostnadseffektiv att nyttja.</li> <li>- Finns den politiska, ekonomiska och miljörättsliga möjligheten till storskalig effektökning av vattenkraften, så utnyttjas den fullt ut.</li> <li>- Stora satsningar krävs för att säkra effektbalans, leveranssäkerhet och systemtjänster</li> <li>- Den totala systemkostnaden ökar i samtliga scenarier och domineras av produktionskostnader.</li> <li>- I samtliga scenarier krävs det betydande investeringar i elproduktion.</li> <li>- Betydande ny- och reinvesteringar i elnätet krävs, oavsett scenario</li> <li>- Kostnader för systemtjänster är små i jämförelse med produktion och nät, men inte obetydliga</li> <li>- Efterfrågefleksibilitet blir allt viktigare i det framtida elsystemet</li> </ul>

Tabell 6. Utdrag av slutsatser från studie 5-7.

Studie	Utdrag av slutsatser
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Det finns goda möjligheter för ett fossilfritt elsystem 2030–2050, baserat på vattenkraft, biobränslen, sol- och vindkraft eller ny kärnkraft.</li> <li>- Sverige kan välja flera vägar till ett fossilfritt kraftsystem.</li> <li>- En förenklad ekonomisk jämförelse visar att det är endast marginella skillnader i snittkostnaden för de olika alternativen. Då har hänsyn inte tagits till skilda behov av investeringar i överföringskapacitet och effektreserver. Dessa investeringar varierar mellan de olika produktionsalternativen, och kan vara omfattande.</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elproduktion från vind- och solkraft spelar en viktig roll för att möjliggöra omställningen och i de tre scenarier som presenteras sker en kraftig utbyggnad av dessa energikällor fram mot år 2040</li> <li>- Sverige och Norden är 2040 fortsatt nettoexportör av el och handelsflödena går i medeltal från Norge och norra Sverige vidare söder- och österut.</li> <li>- Utbyggnaden av ny överföringskapacitet mellan Norden och övriga Europa måste fortsätta mellan 2030 och 2040, utöver det som redan är planerat för 2020-talet, för att effektivt kunna nyttja systemets produktionsresurser.</li> <li>- Utvecklingen i scenarierna medför en försämrad effekttillräcklighet.</li> <li>- Volatiliteten i kraftsystemet ökar i scenarierna, vilket ställer nya krav på systemtjänster och driften av systemet.</li> <li>- Ökande utmaningar med att upprätthålla kraftsystemstabilitet</li> <li>- Scenariovariationen i LMA2018 visar på vikten att det finns incitament för marknadens aktörer att matcha produktion med elanvändning. Utan förbrukningsflexibilitet och lagring finns det en stor risk att elpriser, risken för effektbrist och behovet av investeringar i elnätet blir betydligt högre än vad de är idag.</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Studiens huvudslutsats är att med ett teknikneutralt angreppssätt så kommer det framtida svenska kraftsystemet kunna leverera leveranssäkerhet och klimatneutralitet på ett konkurrenskraftigt sätt.</li> <li>- Det kostnadsoptimala framtida teknikneutrala svenska kraftsystemet består på årlig produktionsbasis i huvudsak av till ungefär lika stora delar bibehållen vattenkraft, vindkraft samt bibehållen och ny kärnkraft.</li> <li>- De fullt teknikneutrala scenarierna väljer i samtliga fall investeringar i driftförlängning av all existerande svensk kärnkraft.</li> <li>- När analysen begränsas till enbart förnybara kraftkällor stiger de totala systemkostnaderna med i snitt minst 40% jämfört med den teknikneutrala scenarierna, utan någon inkludering av merkostnader för systemtjänster.</li> </ul>

## Sammanfattning

Den här rapporten har sammanställt studier avseende framtida produktionsscenarioer för det svenska elsystemet från de senaste fem åren. Studierna har beskrivits och jämförts avseende syfte, metod, huvudsakliga antaganden, resultat och slutsatser. Huvudfokus har varit på scenarier från år 2045, men även scenarier för 2030 har inkluderats. Merparten av de inkluderade studierna avser måluppfyllande scenarier och studerar olika utvecklingar mot ett 100% förnybart och/eller fossilfritt elsystem. En del av studierna studerar hela Sveriges energisystem, där elsystemet är en del. Merparten av studierna är fokuserade på elsystemet och studerar och diskuterar många olika aspekter förutom själva produktionen som varit i fokus i den här rapporten, inklusive aspekter som effektbalans, distribution, balansering av elsystemet, behov av systemtjänster och överföringskapacitet.

### Kort syntes av resultaten från scenarierna

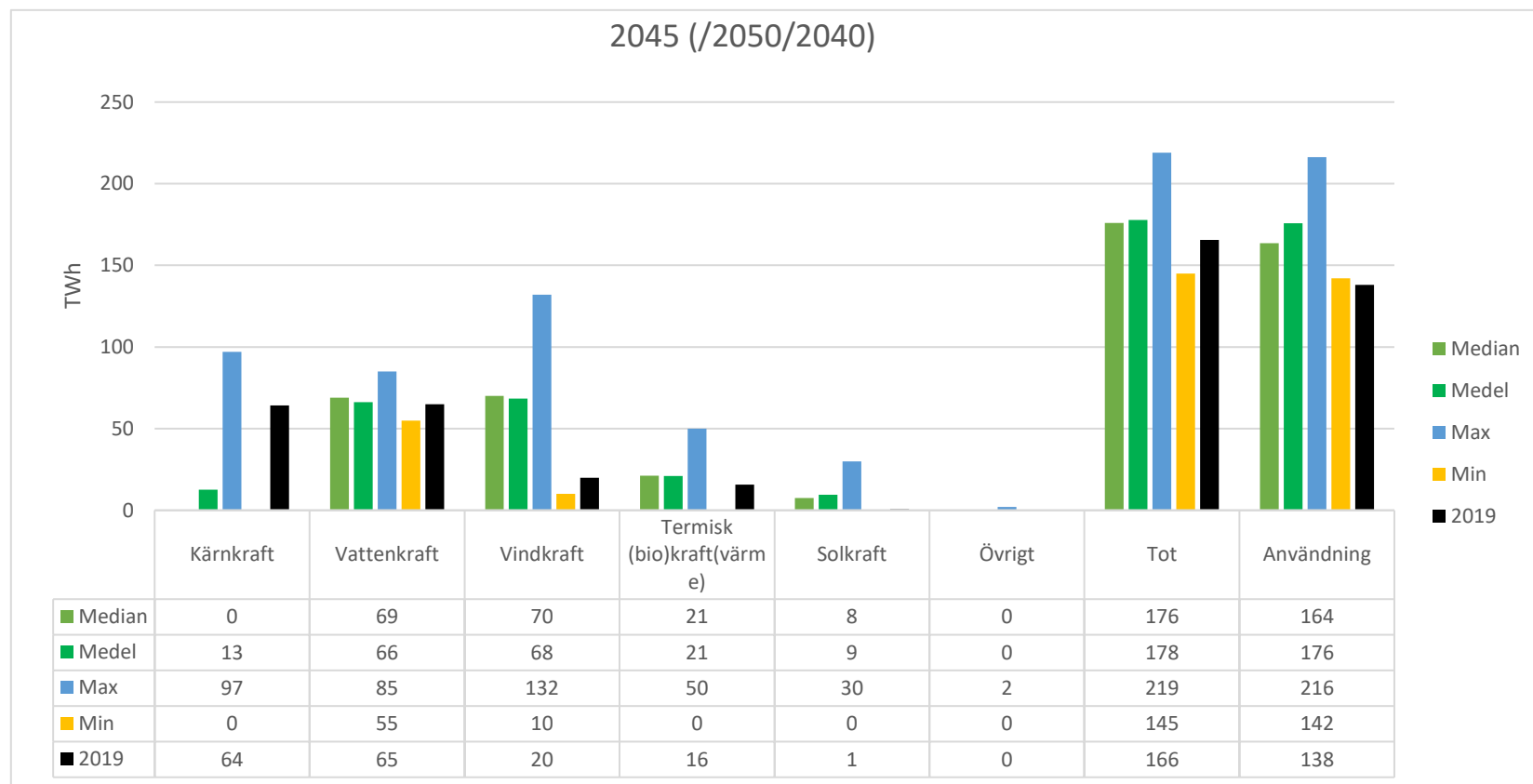
Snittet för samtliga scenarier för år 2045 ger en total produktion om 178 TWh/år och en användning på 176 TWh/år. Merparten av scenarierna uppvisar således en ökad produktion, såväl som användning, av el jämfört med idag. Den högsta elproduktionen som uppvisas är knappt 220 TWh/år. För 2030 är samtliga scenarier nettoexportörer av el, medan det för 2045 finns en stor variation mellan olika scenarier med allt från ett kraftigt importbehov till ett kraftigt elöverskott som kan exporteras på årsbasis. I medeltal är det alltså ett system med ungefär lika stor produktion som användning.

Figur 3 visar median-, medel-, max- och minvärdet för elproduktion från olika kraftslag samt total produktion och elanvändning i scenarierna för år 2045 jämfört med produktion och användning år 2019.

Av figuren framgår att medel- och medianvärdet av alla scenarier ligger nära varandra för alla kraftslag utom för kärnkraften. Elproduktion från kärnkraft saknas i merparten av scenarierna för 2045, antingen på grund av att scenarierna som studeras bygger på 100% förnybar elproduktion eller på att kärnkraften inte är tillräckligt lönsam. Det finns dock flera scenarier som inkluderar möjlighet till livstidsförlängning av befintlig kärnkraft (produktion mellan 35-47 TWh/år från kärnkraft i dessa scenarier) och där detta leder till minskade systemkostnader jämfört med scenarier som inte inkluderar den möjligheten. Scenariot med högst elproduktion från kärnkraft (97 TWh/år) inkluderar också ny kärnkraft. Detta scenario bygger på om antagande om låg investeringskostnad för ny kärnkraft, inklusive små modulära reaktorer. Om en något högre nivå på investeringskostnaden (medelnivå) för ny kärnkraft antas, att små modulära reaktorer inte är tillgängliga samt att kalkylräntan är högre, byggs ingen ny kärnkraft.

För vattenkraften så ligger produktionen i merparten av scenarierna på en nivå strax över dagens produktionsnivå (68-70 TWh/år). Oftast beror den lilla produktionsökningen på att effekthöjningar i befintliga kraftstationer genomförts. Scenarierna i en studie är genomförda för ett torrår, det är därifrån minimivärdet avseende vattenkraftsproduktion kommer ifrån. Vid normalår ligger även produktionen i dessa scenarier i nivå med merparten av de andra scenarierna och produktionen från vattenkraft är den av alla kraftslag som varierar klart minst mellan olika scenarier.





Figur 3. Median-, medel-, max- och minvärdet för elproduktion från olika kraftslag samt total produktion och användning i scenarierna för år 2045 jämfört med produktion och användning år 2019.

Elproduktionen från vindkraft ökar i samtliga scenarier för 2045 utom ett. Med några få undantag är ökningen mycket kraftig. De flesta scenarier är helt eller till stor del dominerade av utbyggnad av landbaserad vindkraft. Den högst produktionen från landbaserad vindkraft är ungefär 85 TWh/år och återfinns i ett par scenarier. Men det finns också flera scenarier som ligger strax därunder med en produktion mellan 70-80 TWh/år av landbaserad vindkraft. Som framgår av



Figur 3 är medianvärdet för den totala vindkraftsproduktionen 70 TWh/år. I de flesta scenarier utgör havsbaserad vindkraft en mindre del (upp till 10 TWh/år), men gemensamt för de scenarier med mycket hög vindkraftsproduktion, över 100 TWh/år, är att bidraget från havsbaserad vindkraft är högre (20-60 TWh/år). I de scenarier med allra högst produktion från havsbaserad vindkraft (40-60 TWh/år) är ingen begränsning för utbyggnaden av havsbaserad vindkraft satt. Bland nyckelfaktorer för en kraftig utbyggnad nämns att vindkraft både på land och tillhavs försätter att bli billigare och teknikutvecklingen mot större och effektivare turbiner. Men det är inte bara lönsamheten som är avgörande för vindkraftens utveckling utan också faktorer som tillståndsprocesser, acceptans och planeringsförutsättningar.

För termisk (bio)kraft (värme), framförallt biokraftvärme i industrin och fjärrvärmesystem, varierar produktionen för 2045 kraftigt mellan olika scenarier (0-50 TWh/år). En del av orsaken till de stora variationerna och den obefintliga produktionen från kraftvärme i vissa scenarier beror på att endast elsystemet studeras och inte de kopplade delarna av energisystemet där själva värmeunderlaget till kraftvärmen finns (elproduktionen bär hela kostnaden). Utvecklingen av värmeunderlaget tas upp som en nyckelfaktor för kraftvärmens fortsatta utveckling i de flesta studier. De flesta scenarier har en produktion från termisk (bio)kraft (värme) som ligger mellan ca 15-25 TWh/år, alltså i nivå eller en bit över dagens produktion. Utbyggnad av kraftvärmen tillsammans med ökad drifttid står då ofta bakom ökningarna. För att nå kraftigt ökad produktion från kraftvärme, vilket få scenarier har, krävs ny kraftvärmeteknik med betydligt högre elverkningsgrader (till rimliga kostnader) samt möjlighet till kondensdrift.

Precis som för biokraftvärmen så varierar mängden elproduktion från solkraft också kraftigt mellan olika scenarier för 2045 (0-30 TWh/år). I de flesta scenarier ligger produktionen av solel dock mellan 5-15 TWh/år. För att hantera den anti-korrelation som finns mellan elbehovet och elproduktionen från solkraft används till exempel batterier för att lagra el då överskott uppstår och vattenkraftens produktionsmönster ändras så att mer el produceras på natten när solkraften är obefintlig. Dessa möjligheter finns inte på samma sätt i alla scenarier och leder då till låg eller obefintlig produktion av el från solkraft. Scenarier med mycket hög produktion av solkraft karaktäriseras förutom av sjunkande priser av decentralisering, individuella lösningar med småskalig lokal egenproduktion och flexibilitet samt tillgång till ytor med lågt alternativvärde.

## Referenser

### Inkluderade studier

1. Scenarier över Sveriges energisystem 2018, ER 2019:07, Energimyndigheten 2019.

*Energimyndigheten gör vartannat år långsiktiga scenarier över energisystemet. Denna rapport från 2019 är den senast publicerade.*

2. 100 procent förnybar el, Delrapport 2 - Scenarier, vägval och utmaningar, ER 2019:06, Energimyndigheten 2019.

*Energimyndigheten har på senare år bedrivit ett projekt kring ett framtida 100% förnybart elsystem. Denna rapport är en av två rapporter från projektet.*

3. Fyra framtider – Energisystemet efter 2020 (Explorativa scenarier), Energimyndigheten 2016.

*2016 tog Energimyndigheten fram fyra framtidsscenarier om energisystemet efter 2020.*

4. Bruce m.fl. Färdplan fossilfri el – analysunderlag - En analys av scenarier med kraftigt ökad elanvändning, NEPP 2019.

*Inom ramen för Fossilfritt Sverige har många branscher och aktörer samlats kring färdplaner för hur de ska bli fossilfria. Energiföretagen Sverige har tagit fram "Färdplan el – för ett fossilfritt samhälle" i samarbete med Fossilfritt Sverige. North European Energy Perspectives Project (NEPP) har tagit fram denna underlagsrapport som färdplanen baseras på.*

5. Sveriges framtida elproduktion - En delrapport - IVA-projektet Vägval el, IVA 2016.

*Sveriges elproduktion 2030–2050 är en delrapport inom IVA-projektet Vägval el och har utarbetats av Arbetsgruppen för elproduktion.*

6. Långsiktig marknadsanalys 2018 (LMA 2018), Svenska kraftnät 2019.

*Svenska kraftnät uppdaterar vartannat år långsiktsscenarier för Nordeuropas elsystem. Denna rapport från 2019 är den senast publicerade.*

7. Kraftsamling Elförsörjning - Långsiktig Scenarioanalys, Qvist Consulting för Svenskt Näringsliv 2020.

*Inom ramen för projektet Kraftsamling Elförsörjning har Qvist Consulting (med hjälp av andra) tagit fram denna rapport åt Svenskt Näringsliv.*

### Övriga referenser

Det klimatpolitiska ramverket, Regeringskansliet 2017.

Överenskommelse om den svenska energipolitiken, Regeringskansliet 2016.