



# Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem

Delrapport 1: Framtidens elsystem  
och Sveriges förutsättningar

*ER 2018:16*



Energimyndighetens publikationer kan beställas eller laddas ner via [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se), eller beställas via e-post till [energimyndigheten@arkitektkopia.se](mailto:energimyndigheten@arkitektkopia.se)

© Statens energimyndighet

ER 2018:16

ISSN 1403-1892

Juni 2018

Upplaga: 40 ex

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma

# Förord

Målet om att Sverige ska ha 100 procent förnybar elproduktion år 2040 är ett viktigt steg för att få ett långsiktigt uthålligt energisystem. Omställningen av det svenska elsystemet är nödvändig för att elproduktionen till stor del behöver ersättas eller förnyas de närmaste 20–30 åren samtidigt som det sker en fortsatt elektrifiering av energisystemet och en internationalisering av energimarknaderna och de regelverk som styr dem.

Att göra någon exakt prognos över hur det framtida elsystemet ser ut är egentligen inte möjligt. Men vi tror att det både går och är betydelsefullt att utifrån dagens kunskap försöka måla upp en bild av ett elsystem med 100 procent förnybar elproduktion, hur vägen dit kan se ut och vilka centrala utmaningar vi ser.

Energimyndigheten har därför initierat denna studie för att kunna analysera frågan närmare. Detta är en delrapport i projektet och vi kommer att fortsätta att analysera framtidens elsystem, med scenarier och ett brett samhällsperspektiv, med målsättningen att vara klara våren 2019.



Caroline Asserup

Avdelningschef



Martin Johansson

Projektledare

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	3
<b>1 Inledning</b> .....	7
1.1 Bakgrund .....	7
1.2 Syfte.....	8
1.3 Metod.....	8
1.4 Avgränsningar .....	9
<b>2 Vägen till år 2045</b> .....	10
2.1 Nedläggning av anläggningar .....	10
2.2 Elanvändning .....	12
2.3 Förnybar elproduktion .....	17
2.4 Ledtider och generationsväxling .....	19
2.5 Ett stort behov av nya anläggningar .....	22
<b>3 Sveriges förutsättningar</b> .....	24
3.1 Teknisk potential för förnybar el .....	24
3.2 Den faktiska potentialen beror på många faktorer .....	26
3.3 Elsystemet förändras .....	27
3.4 Tillståndsprocessen har betydelse.....	31
3.5 Resurser och hållbarhet har betydelse för omställningen.....	37
3.6 Näringslivet både påverkar och påverkas.....	41
3.7 Ekonomisk potential och lönsamhet .....	42
3.8 Energimyndighetens bedömningar inför vidare studier .....	45
<b>4 Betydelsen av omvälvande systemförändringar</b> .....	47
4.1 Teknikutveckling går allt snabbare.....	47
4.2 Om förnybar energi blir överlägset billigast .....	48
4.3 Om allt elektrifieras .....	50
4.4 Om det finns obegränsad flexibilitet.....	51
4.5 Om det sker disruption bland elsystemets aktörer.....	52
4.6 Hur mycket och hur fort .....	53

# Sammanfattning

Under de närmaste 20–30 åren finns ett stort reinvesteringsbehov av elsystemet, oavsett inriktning mot förnybar energi eller ej, eftersom anläggningar med en sammanlagd årsproduktion på över 100 TWh kommer att ha nått sin troliga livslängd. Omställningen till ett elsystem baserat på 100 procent förnybar elproduktion drivs både av den politiska ambitionen och av att dessa elproduktionskällor blir allt mer konkurrenskraftiga.

Att sikta mot ett elsystem helt baserat på förnybar energi är något helt annat än att bara öka inslaget av olika förnybara energislag. Systemfrågor blir överordnade och det är inte ändamålsenligt att fokusera på vilken nivå olika kraftslag ska ha. Elsystemet med sina två sidor av tillförsel och användning förändras i grunden. Ett förnybart elsystem har andra egenskaper än det system vi varit vana vid. Produktionen blir mer variabel och de rörliga kostnaderna blir lägre medan behovet av infrastruktur kommer att öka. Dessa förändringar är nödvändiga att hantera om vi ska kunna hantera miljö- och klimatproblematiken och gå i en riktning som de globala Agenda 2030-målen pekar ut. Fossila bränslen är inte längre ett realistiskt alternativ och i dagsläget bedöms ny kärnkraft inte vara lönsam.

Hur vi använder el, när vi använder el och var vi använder el kommer att förändras. En fortsatt elektrifiering av industrin och fordonssektorn, internationalisering av elmarknaden, samtidigt som antal mikroproducenter ökar, innebär en tätare sammankoppling av hela energisystemet och mellan producent och användare. Utvecklingen drivs av allt från teknisk utveckling till en vilja om ett hållbarare samhälle och tryggare energiförsörjning. Det kommer att innebära utmaningar men också möjligheter, inte minst nya lösningar för att tillgodose samhällets och energikundernas behov och krav.

Sverige har *mycket bra förutsättningar för förnybar el* av olika slag, med våra stora ytor, långa kuststräckor, tillgänglig vattenkraft, tillgång till biobränsle och välutbyggda fjärrvärmenät. Detta skapar också flera olika möjligheter till vad den framtida förnybara elproduktionen kan bestå av.

Den goda utgångspunkten gör att *tekniken inte sätter gränserna* för hur mycket el som kan produceras från de konventionella förnybara kraftkällorna (vind, sol, vatten och biokraft). Utan det är istället de avvägningar som måste göras utifrån andra politiska mål så som försörjningstrygghet, ekologisk hållbarhet och konkurrenskraft som påverkar mest. Vi vill ha ett elsystem med hög leveranssäkerhet, som ger låg miljökostnad både i ett svenskt och internationellt perspektiv och samtidigt betala rimliga priser för vår el.

Sammantaget gör detta att Energimyndigheten vill *lyfta upp några utmaningar för att nå målet om 100 procent förnybar elproduktion* på ett sätt som är hållbart för hela energisystemet och samhället.

## Vi kommer att ha ett stort behov av ny elproduktion efter år 2030

Nedläggning av ett stort antal anläggningar innebär att nya anläggningar med en sammanlagd årsproduktion på mellan 60–120 TWh kommer att behöva byggas fram till år 2045. Oavsett vilka typer av kraftanläggningar som byggs kommer det att kräva stora investeringar.

Vår bedömning är att den stora utbyggnaden *främst behöver ske från mitten av 2030-talet* och att den årliga utbyggnadstakten då behöver vara *tre till sex gånger så hög som dagens*. Om dagens utbyggnadstakt å andra sidan fortsätter i samma takt kommer vi sannolikt få ett mycket stort överskott av el runt år 2030 vilket skapar andra utmaningar. Det innebär att vi just nu behöver fokusera mer på hur vi skapar förutsättningar för omställningen på längre sikt framför att driva på en stor utbyggnad av förnybar el idag.

## 100 procent förnybar elproduktion

Utgångspunkten för den här studien är att studera förutsättningarna för ett elsystem baserat på 100 procent förnybar energi som är i linje med regeringens mål om 100 procent förnybar elproduktion. Målet formulerades första gången i den energiöverenskommelse mellan fem riksdagspartier som gjordes under juni 2016 och är en del av propositionen om energipolitikens inriktning från april 2018.

## Elsystemet förändras på flera sätt

Ett 100 procent förnybart elsystem *kommer sannolikt innehålla en stor mängd variabel kraft*. Även om en stor geografisk spridning och en mix av olika kraftslag kan minska variabiliteten i elsystemet kan vi inte på samma sätt som idag förlita oss på att elproduktionen står för den flexibilitet som efterfrågas. Därmed kommer lager, nationella och gränsöverskridande elnät och elanvändare att få en större roll samtidigt som vattenkraften och kraftvärmen sannolikt får en än större betydelse än idag.

Det sker också *en elektrifiering av andra delar av energisektorn*. Fler elfordon, nya typer av industrier så som serverhallar, fortsatt urbanisering, en på sikt möjlig elektrifiering av stål- och cementindustrin samt ny teknik, som gör att vi använder el annorlunda, skapar en större osäkerhet för hur elsystemet kommer att se ut år 2045, både avseende hur mycket el som används och när.

Sammankopplingen av olika sektorer och nya elanvändare skapar möjligheter att på flera olika sätt tillgodose samhällets och elkundernas behov. Men en förändring i flera delar av systemet samtidigt medför också en utmaning vid exempelvis planering av framtidens elnät eller vilken typ av flexibilitet som kommer att efterfrågas.

## Vi kommer behöva mycket vindkraft vilket kräver utrymme

För att möjliggöra 100 procent förnybar elproduktion krävs med stor sannolikhet *en hög andel vindkraft*. Eftersom vindkraft främst begränsas av tillståndsprocessen är det centralt att den fungerar effektivt om målet ska nås. Det finns ett behov av att se över om viss planering av vindkraft ska göras på en regional eller nationell nivå. Effektiva avvägningar behöver göras mellan den globala miljönytta som vindkraften ger och den lokala miljöpåverkan som vindkraften bidrar till. Eftersom behovet av vindkraft kommer att vara ännu större närmare 2040-talet behöver vi *säkerställa att det finns platser med goda vindförhållanden* både på land och till havs där det går att bygga vindkraft för att använda våra resurser på ett effektivt sätt.

## Viktigt med en fungerande marknad med tydliga spelregler

Sveriges förutsättningar för förnybar el är goda och därför kommer det att finnas en *konkurrens om utbyggnaden av förnybar el* men också mellan olika flexibilitetslösningar. Med den utgångspunkten kommer regelverk och marknader att behöva utvecklas för att säkerställa såväl kostnadseffektivitet som försörjningstrygghet. Om spelreglerna inte är långsiktiga eller tydliga för nya affärsmodeller kommer färre aktörer att våga ta risker till nya lösningar. Det gäller också att fundera kring vilka styrmedel som är samhälls-ekonomiskt motiverade utifrån ett systemperspektiv och inte enskilda kraftslag.

## Planering för ett förnybart elsystem måste påbörjas nu

Vi behöver planera redan idag för att det ska finnas bra förutsättningar för utbyggnad av förnybar el och elnät på sikt. *Från planering till idrifttagning kan i det i många fall ta ett decennium* och många beståndsdelar kommer dessutom att finnas kvar i elsystemet under överskådlig tid.

## Risker vid en stor och snabb omställning

Elsystemet är i många avseenden trögrörigt *med lång omställningstid*. Även om pris-signaler och lönsamhet tillsammans med regelverk i första hand ska driva utvecklingen framåt kan det finnas risker att detta inte fungerar optimalt när elsystemet ska genomgå en relativt snabb förändring under 2030-talet. Ett exempel kan vara att det finns pris-signaler för utbyggnad av ny produktion men att *ledtider i både utbyggnaden av kraft och nät medför flaskhalsar som försenar utbyggnaden*, eller gör att den helt uteblir.

Under perioden före den större utbyggnaden, med god tillgång till el och flexibilitet, kommer en hel del investeringar genomföras i elsystemet i både kraftvärme, vattenkraft och elnät. Prissignaler och lönsamhet kan då mycket väl innebära att exempelvis kraftvärme investerar i ren värmekraft och att vattenkraftverk enbart investerar i upprustning av anläggningar. När väl behovet av flexibilitet och ny förnybar el blir stor kan de oftast långa livstiderna på anläggningarna medföra att det inte på lång tid görs nya investeringar.

## Ett 100 procent förnybart elsystem måste också vara hållbart

Hållbarhets- och resursfrågor är centrala. Vi måste hitta en resurseffektiv väg fram där miljökonsekvenserna av ny elproduktion är så liten som möjligt, både i Sverige och internationellt. Det är dock inte givet att valet står mellan antingen miljö eller energi. I många fall finns möjligheter till synergier och samexistens. Vi behöver dock acceptera en viss påverkan på oss människor och vår miljö för att kunna skapa ett leveranssäkert elsystem till rimliga kostnader. Detta kan exemplifieras med vattenkraften vars reglerförmåga är centralt för vårt elsystem samtidigt som det kraftigt påverkar våra vatten-drag. Eller vindkraft, som har en stor potential i Sverige, men beroende på konkurrens med andra intressen finns det risk att den kan behöva byggas med försämrade förutsättningar, om energiproduktionen inte prioriteras. Detta leder i sin tur till ökade kostnader och att fler vindkraftverk måste byggas, och därmed ta mer resurser i anspråk.

## **Vi ska analysera dessa frågor vidare ur ett brett samhällsperspektiv**

Den här rapporten är första delen av myndighetens arbete med att analysera förutsättningarna för ett 100 procent förnybart elsystem. I nästa del kommer vi bygga scenarier utifrån olika antaganden baserade på 100 procent förnybar elproduktion och analysera dessa i ett systemperspektiv, för att kunna identifiera vilka möjligheter och utmaningar som finns. De delar från denna rapport som framför allt kommer att fördjupas är kostnader för olika alternativ, lönsamhet för olika förnybara kraftkällor och resurseffektivitet. Denna bredare analys kommer att presenteras under våren 2019.



# 1 Inledning

Detta är den första delen av två i en egeninitierad studie om ett elsystem med 100 procent förnybar elproduktion. Nästa del kommer att rapporteras under våren 2019.

I Sverige finns det en stor potential för förnybar el till en relativt låg kostnad och goda möjligheter att ställa om till ett 100 procent förnybart elsystem. Men vägen dit kan se ut på flera olika sätt och det finns många olika val som kan göras i fråga om styrmedel, tekniker, anpassning av elsystemet, planering och när i tiden produktion ska byggas. Olika vägval kommer innebära olika utmaningar och konsekvenser för ett framtida elsystem.

Energimyndigheten har beslutat att i denna studie analysera de olika vägarna fram och titta på de möjligheter och utmaningar som finns ur ett bredare samhällsperspektiv.

## 1.1 Bakgrund

Klimat- och hållbarhetsfrågor har länge legat till grund för politisk inriktning och för mål som finns på och kopplar till energiområdet, både på global och regional nivå. Vid klimatmötet i Paris i december 2015 enades till exempel 196 av världens länder om ett nytt klimatavtal som är bindande för alla länder och börjar gälla 2020. Agenda 2030 är ett annat exempel på global enighet och som bland annat syftar till att säkerställa ett varaktigt skydd för planeten och dess naturresurser. Inom EU finns beslutade mål för 2020 och en energistrategi till 2030 som legat och ligger till grund för energipolitiken i Europa. Sedan hösten 2014 finns föreslagna mål för klimat- och energipolitiken till 2030 som för närvarande förhandlas men ambitionen att öka användningen av hållbar och förnybar energi är tydlig.

I ett bredare perspektiv har EU och Sveriges energipolitiska grundpelare länge varit ekologisk hållbarhet, konkurrenskraft och försörjningstrygghet. Kopplat till försörjningstrygghet påverkas elsystemet samtidigt av strategier som också riktar sig mot elsystemet. Ett sådant exempel är gällande säkerhetspolitiska strategi och uppbyggnaden av ett civilt försvar som båda lyfter upp vikten av ett robust energisystem för att förebygga, motstå och hantera störningar. Vidare lyfts att ett minskat beroende av fossila bränslen förbättrar försörjningstryggheten.

Mot bakgrund av ovan nämnda inriktningar och i samband med Energikommissionens arbete nåddes i juni 2016 en energiöverenskommelse mellan fem riksdagspartier som bland annat innefattar ett mål om 100 procent förnybar elproduktion till år 2040 vilket är ett centralt mål och anledning till detta arbete.

Frågan om framtidens elsystem har analyserats i många rapporter från Energimyndigheten och mer nyligen i till exempel Fyra Framtider, Kontrollstation 2017 för elcertifikatsystemet och Havsbaserad vindkraft 2017. Även om 100 procent förnybar el diskuterats i dessa rapporter har detta inte varit huvudsyftet med analyserna. Resultatet från studierna har dock gett en större insikt i framtida utmaningar och konsekvenser med 100 procent förnybar el. Samtidigt har det inte funnits möjlighet att publicera någon rapport där Energimyndigheten kunnat sammanfatta eller utveckla resultaten i ett bredare perspektiv.

I en förstudie som genomfördes hösten 2017 beslutades att denna fördjupade studie ska genomföras och resultera i två rapporter. Detta är den första delen som beskriver vägen till 100 procent förnybar el och Sveriges förutsättningar. Nästa del kommer att publiceras våren 2019 och kommer bland annat innehålla scenarier, fördjupade analyser samt konsekvenser av dessa.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att öka kunskapen om hur nuläget för förnybar el i Sverige ser ut, hur vi kan nå ett elsystem med 100 procent förnybar el och hur vägen dit kan se ut. Eftersom målet åsyftar produktion av el kommer detta få en större fokus i studien än exempelvis elanvändning. Det är också i huvudsak elsystemet som analyseras även om kopplingar till andra delar av energisystem diskuteras. I denna delrapport kommer fokus främst vara på hur elsystemet i stort kan utvecklas och vilka förutsättningar Sverige har för utbyggnad av förnybar el.

Resultatet ska visa på de möjligheter vi har utifrån dagens kunskap om samhället, teknik och kostnader samt hur de utvecklats hittills. Detta gör det möjligt att enklare senare uppdatera studien med nya förutsättningar.

Resultat kan medföra förslag på fortsatta utredningar inom ett eller flera områden, framförallt när det gäller konsekvenserna av 100 procent förnybar elproduktion.

## 1.3 Metod

Metoden för studien är att i ett första steg måla upp en bild av det framtida elsystemet och se på de förutsättningar som Sverige har för att nå målet om 100 procent förnybar elproduktion. Det är också detta som presenteras i denna delrapport. Nästa steg i studien är att göra scenarier för olika utfall av ett elsystem med 100 procent förnybar elproduktion. Dessa scenarier ska både analyseras i elmarknadsmodeller och kvalitativt utifrån resurseffektivitet, miljöpåverkan, kostnad mm. Processen ska så långt det går vara iterativ. Det vill säga att utifrån resultaten gå tillbaka till de ursprungliga antagandena och reflektera över om dessa var rimliga. Utifrån hela processen kan sedan generella diskussioner föras om vilka begränsningar, utmaningar och möjligheter som finns.

I förstudien konstaterades vidare att Sverige sannolikt har kärnkraft kvar år 2040 med utgångspunkt från att ägarna strävar efter få lönsamhet under 60 år. För att underlätta analysen av hur ett elsystem med bara förnybar el ser ut och vad som krävs har tidpunkten för studien ett slutdatum år 2045 istället för det politiska mållåret år 2040. I praktiken kan dock kärnkraften läggas ner både tidigare och senare.

Denna rapport är indelad i tre kapitel varav de två första kommer att användas för vidare studier i nästa del. Det sista kapitlet har en mer utforskande karaktär och beskriver betydelsen av omvälvande systemförändringar. Detta kommer inte att utforskas vidare i nästa del.

### **1.3.1 Anläggningars livslängd**

Utgångspunkten från energimyndigheten är att anläggningar ska byggas och drivas av aktörer på el- och energimarknaden. I rapporten antas därför alltid livslängden på anläggningar vara den ekonomiska. Aktörer kommer endast att reinvestera och fortsätta driva en anläggning så länge det anses lönsamt. I ett elsystem under förändring kan nya förutsättningar innebära att den ekonomiska livslängden förändras. Detsamma gäller även nya regelverk, styrmedel och krav. De uppskattningar som görs i rapporten ska därför ses som ungefärliga.

### **1.4 Avgränsningar**

Projektet syftar inte till att lösa alla utmaningar. Detta innebär att det inte kommer att finnas förslag på optimala styrmedel, lösningar på acceptans-, miljö- och nätfrågan eller ange vilka de bästa flexibilitetsresurserna är. Däremot kan resultatet ge övergripande slutsatser som kan peka på olika vägval.

## 2 Vägen till år 2045

Vi befinner oss just nu i en förändring av elsystemet. Detta gäller inte bara elproduktionen utan även elanvändningen. I en större omställning kan det vara svårt att se vad som väntar i framtiden särskilt då redan dagens teknik kan erbjuda en hel del olika möjliga vägar fram, vilket väcker tankar om vad som kan väntas i framtiden med nya tekniska lösningar och innovationer. I kapitel 4 förs en bredare diskussion om dessa tekniksprång och förändrade förutsättningar.

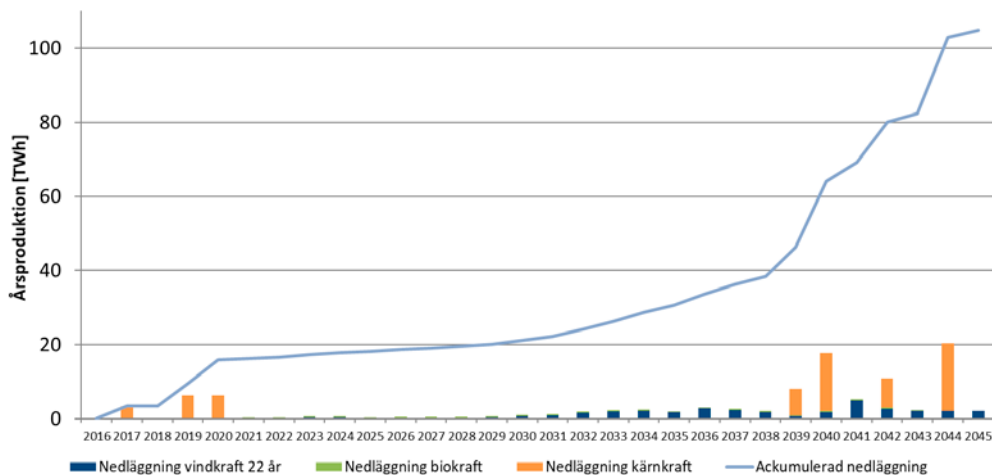
Något som är viktigt att ha med sig när vägen framåt ska ritas upp är att den inte kommer att vara rak. Att exempelvis försöka rita upp hur elproduktionen ser ut år 2045 utifrån hur elanvändningen och våra behov ser ut idag blir lika fel som att rita upp elanvändningen i framtiden utifrån hur elproduktionen ser ut idag. Vilka investeringar som görs i exempelvis flexibilitet, elproduktion eller elanvändning kommer att drivas av energimarknaderna och de behov som energikunder efterfrågar. Detta är i sin tur beroende av regelverk, styrmedel, politiska ambitioner, opinioner, vår uppfattning om vad som är rätt eller fel samt vad som händer i vår omvärld.

På vägen fram kommer nya utmaningar att dyka upp och vi kommer att komma in i nya faser där vi gång på gång frågar oss vad som är hållbart eller kostnadseffektivt. Samtidigt är levtider och livslängder långa för många komponenter i elsystemet. Vid planering av infrastruktur, nya anläggningar, industrier eller nya affärslösningar kan det därför vara viktigt att redan nu ha en uppfattning om hur elsystemet ser ut och vilka regelverk som gäller i framtiden.

Något enkelt svar finns inte men med detta kapitel vill Energimyndigheten ge vår första bedömning av hur elsystemet kan utvecklas fram till år 2045. Vi kommer sedan att titta på hur Sveriges förutsättningar för förnybar el ser ut i kapitel 3.

### 2.1 Nedläggning av anläggningar

Elsystemet i Sverige har ständigt utvecklats sedan den första elproduktionsanläggningen togs i drift i mitten av 1880-talet. Sedan 1920-talet har mycket av utvecklingen på elproduktionssidan varit en utbyggnad av nya elproduktionsanläggningar eller underhåll av befintliga. Först byggdes vattenkraften, sedan kärnkraften, därefter kraftvärme och nu mestadels vindkraft och sol. Förutom några undantag har få anläggningar lagts ner och behövt ersättas helt, även om en hel del anläggningar konverterats från fossilt till biobränsle och avfall. Fram till år 2045 finns dock en utmaning med att många anläggningar når sin förväntade livslängd. Figur 1 visar att det rör sig om upp mot 105 TWh i ackumulerad årsproduktion. Detta gäller inte bara kärnkraft utan även biokraft och den befintliga vindkraften, och troligen även en viss del av den vindkraft som byggs de närmaste åren. Till detta tillkommer också ett generellt investeringsbehov i vattenkraften. Figuren visar att det efter den planerade utfasningen av fyra kärnkraftsreaktorer till och med år 2020 främst är efter år 2030 som livslängderna förväntas uppnås.

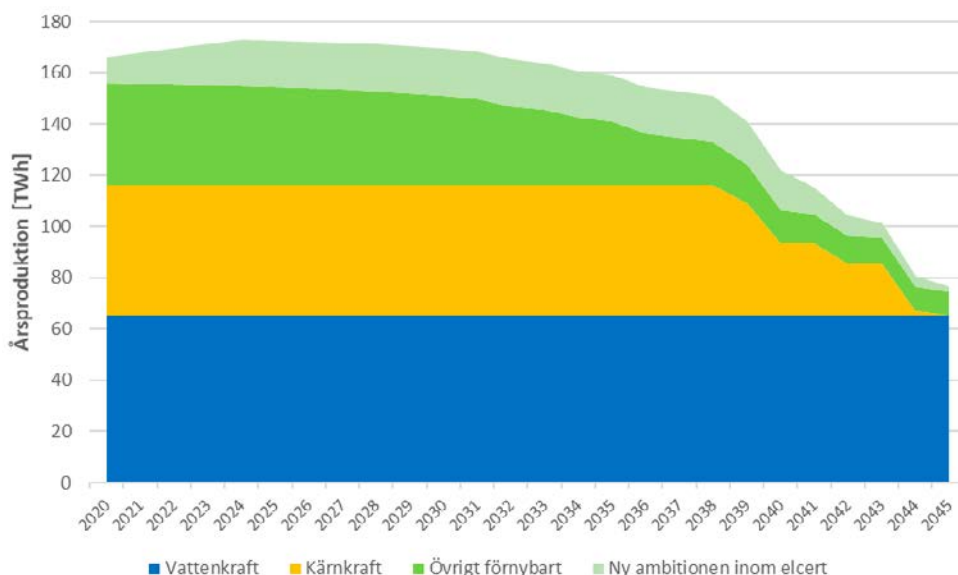


Figur 1. Elproduktion som når sin förväntade livslängd per år och kraftslag samt ackumulerat för samtliga kraftslag.

Källa: Energimyndigheten.

Att en mängd anläggningar förväntas nå sin livslängd till år 2045 ger en indikation på att en stor omställning är på gång i den svenska elproduktionen. I figur 2 visas Sveriges totala årsproduktion av el om inga nya anläggningar byggs och alla anläggningar drivs under sin bedömda livslängd. Beroende på vilken elanvändning och export vi kommer att ha kan det totala behovet av elproduktion skilja sig åt.

Värt att notera är att det finns osäkerheter i siffrorna. Tekniken sätter inte alltid gränsen utan snarare hur länge det är ekonomiskt lönsamt att fortsätta köra anläggningen och genomföra reinvesteringar. Det innebär att både vindkraften och kärnkraften kan ha både kortare och längre livslängd än vad som antagits här.



Figur 2. Elproduktion i Sverige om nedlagda anläggningar inte ersätts med nya.

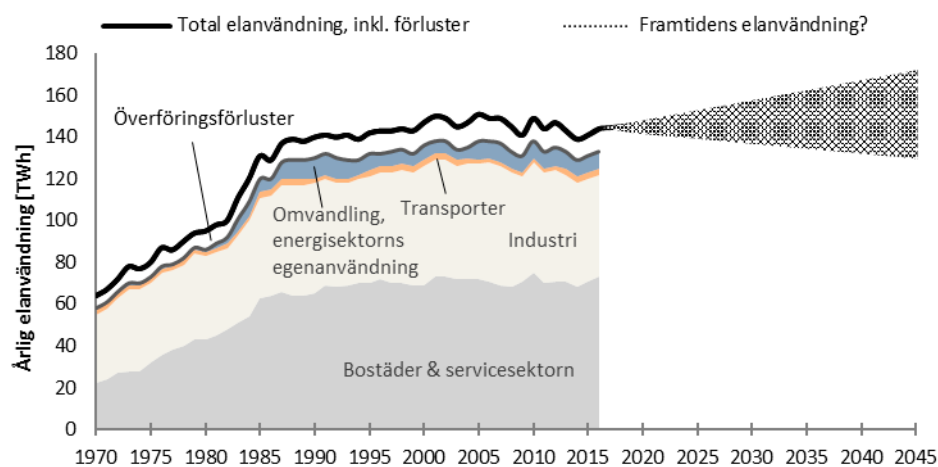
Källa: Energimyndigheten

Det är samtidigt inte bara årsproduktionen av el som försvinner med nedläggningen av anläggningen. Det är också effektillgänglighet, svängmassa och den geografiska placeringen av kraftproduktionen som förändras. Beroende på vad som ersätter den nedlagda produktionen kommer olika utmaningar för elsystemet. Det rör sig om en stor omställning med stora investeringar oavsett vilken elmix vi kommer att ha i framtiden. Det är också sannolikt att elproduktionens mix och funktion ser annorlunda ut mot vad den gör idag, särskilt i ett elsystem med 100 procent förnybar elproduktion.

## 2.2 Elanvändning

För att kunna uppskatta vilken elproduktionskapacitet som kommer behövas fram till 2045 är det viktigt att försöka förstå hur elbehovet kommer att utvecklas. Den framtida elanvändningen går inte nödvändigtvis att förutspå genom att blicka bakåt, men den kommer med största sannolikhet inte heller vara helt fränkopplad de mönster vi ser idag. Med avsikten att ge en tydligare bild av hur olika delar av samhället kan påverka framtidens elbehov beskrivs därför först elanvändningens utveckling fram till idag och vilka faktorer som har drivit den. Därefter följer resonemang om hur elanvändningen kan förändras fram till 2045.

Elanvändningen i Sverige har legat relativt konstant mellan 140 och 150 TWh per år under de senaste 30 åren, inklusive förluster. Från 1970 till slutet av 80-talet skedde dock en kraftig ökning. I figur 3 visas Sveriges totala årliga elanvändning mellan 1970 och 2016 och möjliga utvecklingsvägar fram till 2045.



Figur 3. Elanvändningen 1970–2016 och ett utvecklingsspann till 2045.

Källa: Energimyndigheten.

### 2.2.1 Elanvändningen fram till idag

Elanvändningens utveckling kan dels förklaras av faktorer vi inte har direkt kontroll över, som befolkningsökning, ekonomisk tillväxt och teknikutveckling, och dels av faktorer vi kan påverka, till exempel hur många hushållsapparater vi har och vilken bil vi köper. Vilka faktorer som påverkar hur behovet av el förändras beror till stor del på vad elen används till, och vilka alternativa energikällor som finns tillgängliga, och varierar följaktligen mellan (och inom) de olika användarsektorena.

I tabell 1 visas de faktorer som haft stor betydelse för hur elanvändningen förändrats över tid. Effekten av hur de olika faktorerna utvecklas märks inte alltid omedelbart. För att elpriset ska ha en märkbar effekt på elanvändningen behöver priset både ha varit lågt i förhållande till alternativa bränslepriser under en tid, och förväntas fortsätta vara lågt. Utöver de faktorer som nämns i tabellen påverkas elanvändningen även av utvecklingen inom andra marknader, såväl som av globala trender och mål.

Tabell 1. Olika faktorerers påverkan på elanvändningen

	Bostäder & lokaler	Industri	Transport
Befolkningsutveckling	+	+	+
Ekonomisk utveckling	+	+	+
Teknikutveckling	+	+	+
Strukturförändringar	+	+	+
Användarens preferenser	+/-		+/-
Politiska mål & styrmedel	+/-	+/-	+/-
Elpris (inkl. relativpriser)	-	-	
Energieffektivisering	-	-	

Anm: Ett plustecken innebär att det finns en positiv korrelation mellan faktorn och elanvändningen och ett minustecken innebär det motsatta. En befolkningsökning medför till exempel att elanvändningen ökar (+), medan en elprisökning medför att elanvändningen minskar (-). Både ett plus- och ett minustecken betyder att faktorn kan påverka utvecklingen åt olika håll. Tecknets storlek visar om faktorn har haft en stor eller liten effekt på elanvändningen.

Källa: NEPP, 2018<sup>1</sup> (omarbetad av Energimyndigheten).

Med en årlig elanvändning på runt 70 TWh står bostäder och lokaler för över hälften av den slutliga elanvändningen i Sverige. Knappt en tredjedel av elen används för uppvärmning (elvärm) och resten används för apparater, maskiner och belysning (hushållsel) samt till olika typer av fasta installationer (driftel). Eftersom användningen av elvärm bland annat beror på utomhustemperaturen varierar den stort över året, men är relativt jämnt fördelad över dygnet. Användningen av hushållsel styrs å andra sidan av när vi befinner oss i hemmet och är därför högre på morgonen och på kvällen, men jämnare fördelad över året.

Från 1970 till slutet av 80-talet ökade sektorns elanvändning drastiskt till följd av att många fastighetsägare övergick från att värma husen med oljepannor till att använda el, samtidigt som antalet hushållsapparater, hemelektronik och andra elkrävande installationer ökade. Sedan mitten av 90-talet har elvärmen minskat stadigt, framförallt till följd av den utbredda konverteringen till värmepumpar. Användningen av hushållsel och driftel har däremot fortsatt öka fram till idag, även om ökningen har dämpats av att apparaterna blivit mer energieffektiva. Totalt sett har de uppåtgående och nedåtgående trenderna under de senaste drygt 30 åren tagit ut varandra. Detta har lett till att sektorns totala elanvändning varit relativt oförändrad, trots att befolkningen ökar i en allt snabbare takt.

<sup>1</sup> NEPP (Bruce, J. m.fl.) Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket (ny) flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? (Version för hearing den 12 april, 2018.)

Industrins årliga elanvändning har precis som elanvändningen i bostäder och lokaler varit förhållandevis oförändrad under lång tid.<sup>2</sup> Mellan 1970 och 2007 ökade elanvändningen med i genomsnitt två procent per år och under de senaste tio åren har trenden varit svagt nedåtgående, förutom en större dipp i samband med lågkonjunkturen 2009. 2016 uppgick elanvändningen till 49 TWh och utgjorde därmed ungefär 40 procent av den slutliga elanvändningen. Inom många branscher är elanvändningen konjunkturberoende snarare än säsongberoende, framförallt de med elintensiva tillverkningsprocesser. Industrins elanvändning är relativt jämnt fördelad över året, förutom i mitten av sommaren när delar av produktionen ligger nere.

Även om industrins elanvändning förändras långsamt totalt sett har strukturomvandlingar mellan och inom branscher lett till skiften i den inbördes fördelningen. Det kan till exempel handla om förändrade produktionsprocesser till följd av teknikutveckling, att elpriset förändras i förhållande till priser på andra energikällor, eller att nya/andra typer av produkter efterfrågas. Ett exempel är massa- och pappersindustrin, där en minskad efterfrågan på papper och kartong, tillsammans med en ökad energieffektivisering, har bidragit till att elanvändningen minskat under de senaste tio åren. Eftersom massa- och pappersindustrin står för över 40 procent av industrins totala elanvändning har förändringar inom den branschen en betydande påverkan på industrins totala elanvändning. Inom andra branscher har elanvändningen istället ökat till följd av att tillverkningsprocesser automatiseras. Trots ökningen står dessa branscher fortfarande för en liten del av industrins totala elanvändning.

Elanvändningen i transportsektorn har i princip legat konstant runt 2–3 TWh sedan 70-talet, vilket motsvarade två procent av Sveriges slutliga elanvändning 2016. Statistiken omfattar dock bara bantrafikens<sup>3</sup> elanvändning. Det innebär att den el som används för att ladda el- och hybridfordon inte ingår.<sup>4</sup> Energimyndigheten uppskattar att 70 GWh el användes för laddbara fordon 2017, vilket är en exponentiell ökning från 2011, då användningen uppskattades till 1 GWh, men fortfarande lite i förhållande till Sveriges totala elanvändning.

## 2.2.2 Framtidens elanvändning

Framtidens elanvändning beror delvis på hur de faktorer som historiskt har påverkat elanvändningen utvecklas, men även på andra faktorer som kan vara svåra att förutse idag. Som en effekt av så kallade tekniksprång kan elbehovet inom små eller stora segment antingen öka eller minska plötsligt.<sup>5</sup>

I ett antal scenarier som togs fram av NEPP 2015<sup>6</sup> varierar elanvändningen stort beroende på vilka antaganden som görs. I de två mest extrema fallen sjunker elanvändningen till

<sup>2</sup> I industrin ingår alla branscher inom tillverkningsindustrin och gruvindustrin. Tillverkningsindustrin omfattar alla branscher med SNI-kod 10–33 (enligt Svensk näringslivsindelning; SNI 2007) och gruvindustrin omfattar branscher med SNI-kod 05-09.

<sup>3</sup> Tåg, spårvagnar och tunnelbana.

<sup>4</sup> I statistiken kan den el som används för att ladda el- och hybridfordon antingen ingå i bostäder och servicesektorn eller i industrin, beroende på om fordonet laddas i hemmet eller i anslutning till en (industri-) arbetsplats.

<sup>5</sup> Olika tekniksprång som kan leda till omvälvande systemförändringar beskrivs i Kapitel 4.

<sup>6</sup> NEPP, North European Power Perspectives, 2015. Elanvändningen i Sverige 2030 och 2050. Slutrapport till IVA Vägval el.



under 90 TWh per år, respektive stiger till närmare 250 TWh per år, till 2050. I referensscenariot, som beskrivs som det mest troliga, antas elanvändningen uppgå till 155 TWh 2050. I uppskattningarna ingår dock inte överföringsförluster i elnäten, som historiskt sett utgjort drygt 7 procent av den totala elanvändningen. Om vi för enkelhetens skull antar att detta även kommer gälla i framtiden kan elanvändningen i NEPP:s referensscenario från 2015 räknas om till 166 TWh inklusive förluster. I en senare rapport från 2018<sup>7</sup> har NEPP reviderat sitt tidigare referensscenario till cirka 155 TWh inklusive förluster.

Energimyndigheten har också analyserat den framtida elanvändningen i olika långsiktiga scenarier,<sup>8</sup> men till skillnad från NEPP:s scenarier lyfts inget scenario fram som det mest sannolika.<sup>9</sup> I Energimyndighetens scenarier varierar elanvändningen 2050 mellan 138 och 152 TWh inklusive förluster, beroende på vilka förutsättningar som antas. I scenariot med högst elanvändning antas elpriserna ligga på ungefär samma låga nivå som idag samtidigt som en storskalig ökning av elbilar sker, medan den lägre elanvändningen är ett resultat av framförallt högre elpriser. Energimyndigheten kommer att göra nya scenarier under året, vilka kan komma att användas som underlag till analyser i nästa del av detta projekt.

IVA<sup>10</sup> bedömer att elanvändningen mellan 2030 och 2050 kan uppgå till 128–165 TWh, exklusive förluster. Bedömningen baseras bland annat på NEPP:s scenarier från 2015 som nämns ovan. Ett urval av de antaganden som ligger till grund för bedömningen är att en storskalig utbyggnad av CCS kan leda till ett ökat elbehov i storleksordningen 2–5 TWh, en kraftig ökning av datacenterverksamhet kan öka elanvändningen med 6–10 TWh och att en stark befolkningstillväxt kan leda till en ökning på 8–11 TWh. Med samma antagande som tidigare gällande överföringsförluster motsvarar IVA:s bedömning en framtida elanvändning mellan 137 och 177 TWh, inklusive förluster.

Utifrån de storleksintervall som anges i tidigare studier kan det konstateras att den framtida elanvändningen är svår att uppskatta, men också att det inte är orimligt att anta att användningen kommer att öka. Utöver de exempel som redan nämnts kan en total elektrifiering av fordonsflottan kräva ytterligare 13 TWh el<sup>11</sup> och en potentiell elektrifiering av delar av stålindustrin uppskattas öka elanvändningen med 15 TWh år 2045.<sup>12</sup> Dessutom tillkommer faktorer som gör utvecklingen än mer svårbedömd. Effektivare elanvändning dämpar generellt ökningen, medan konjunkturförändringar, politiska beslut, elpriser samt priser på alternativa energikällor kan styra utvecklingen åt olika håll. Som tidigare nämnts kan även tekniksprång vi inte känner till idag komma att ha en stor effekt.

<sup>7</sup> NEPP (Bruce, J. m.fl.) Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket (ny) flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? (Version för hearing den 12 april, 2018)

<sup>8</sup> Energimyndighetens publikation Scenarier över Sveriges energisystem 2016 (ER 2017:06).

<sup>9</sup> Energimyndighetens långsiktiga scenarier används som underlag för klimatrapporteringen och baseras på olika förutsättningar från EU-kommissionen. Dessa förutsättningar är inte nödvändigtvis de mest troliga förutsättningarna för just Sverige, utan syftet är att kunna jämföra olika länder.

<sup>10</sup> IVA (2016). Framtidens elanvändning – En delrapport.

<sup>11</sup> IVA (2016). Framtidens elanvändning – En delrapport.

<sup>12</sup> Källa: Broschyren ”Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017”

### 2.2.3 *Befintliga variationer väntas öka*

Det är inte bara hur mycket el som används under ett år som är intressant ur ett elsystems-perspektiv, utan även när över dygnet och året och var i landet förbrukningen sker. Även toppeffekten, den högsta elanvändningen under en och samma timme, har betydelse eftersom den styr dimensioneringen av elsystemet.

Den framtida toppeffekten har uppskattats till närmare 29 000 MW av IVA,<sup>13</sup> medan NEPP<sup>14</sup> bedömer att den kan uppgå till 30 000 MW, vilket kan jämföras med dagens knappt 28 000 MW. Det är med andra ord troligt att vi i framtiden kommer behöva ytterligare elproduktionskapacitet eller flexibilitet jämfört med idag för att kunna täcka elbehovet även under de timmar behovet är som störst.

Enligt NEPP<sup>15</sup> kommer de maximala timvisa variationerna i elanvändningen öka från ca 2 500 MW idag till ca 4 400 MW 2040. Det kan bland annat förklaras av att den personberoende delen av effektbehovet väntas öka, medan den apparatberoende delen väntas minska. Till den personberoende delen hör den el vi använder under vår vakna tid i hemmet, medan den apparatberoende delen beskrivs som oberoende av vår aktiva närvaro.

Energimyndighetens långsiktiga scenarier från 2016<sup>16</sup> stödjer NEPPs antaganden, även om resonemangen inte framförs på samma sätt. I scenarierna bedöms användningen av hushållsel och driftel i bostäder öka, medan konverteringar från direktverkande el till andra uppvärmningssätt väntas leda till en minskad användning av elvärme. Eftersom den el som används för uppvärmning står för den största delen av säsongsvariationen i elanvändningen blir följden troligen en jämnare förbrukning över året.

Det finns dessutom redan idag stora regionala och lokala skillnader i elanvändningen och dessa kan komma att förstärkas i framtiden till följd av befolkningstillväxten och förändrade konsumtionsmönster. Figur 4 illustrerar hur elanvändningen var fördelad mellan Sveriges kommuner 2016.

I storstadsregioner som Stockholm, Göteborg och Malmö är elförsörjningen redan ansträngd, samtidigt som inmatningen av el till åtminstone Stockholm är begränsad. Även om projekt för att förbättra överföringskapaciteten pågår, kommer problemen inte vara åtgärdade förrän mitten av 2020-talet, vilket leder till ett större behov av att involvera användarsidan. Tillgången till efterfrågefleksibilitet och lagringsresurser kan alltså vara extra viktig att säkerställa här.<sup>17</sup> Lokal elproduktion från till exempel solceller kan bidra till att lösa överföringsutmaningar men löser i det här fallet inte problemet i och med att den produktionen är högst på sommaren när förbrukningen är som lägst. Efterfrågefleksibilitet förekommer redan idag, men inte i någon större utsträckning.

---

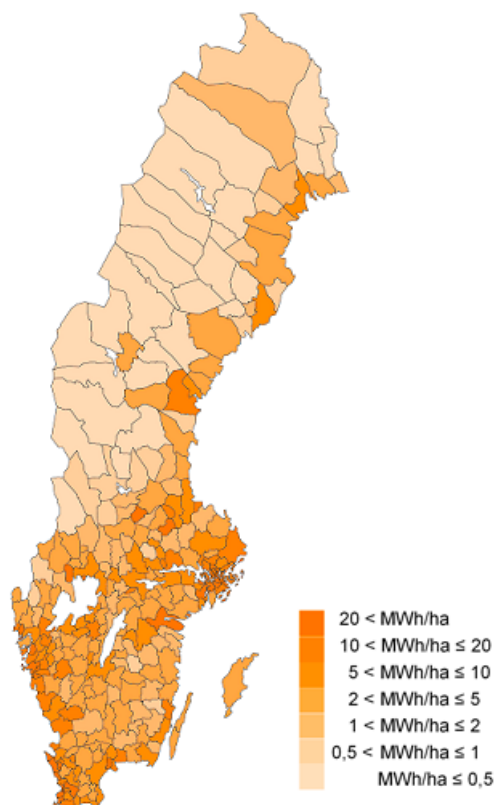
<sup>13</sup> IVA (2016). Framtidens elanvändning – En delrapport.

<sup>14</sup> NEPP (Bruce, J. m.fl.) Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket (ny) flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? (Version för hearing den 12 april, 2018)

<sup>15</sup> NEPP (Bruce, J. m.fl.) Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket (ny) flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? (Version för hearing den 12 april, 2018)

<sup>16</sup> Energimyndighetens publikation Scenarier över Sveriges energisystem 2016 (ER 2017:06).

<sup>17</sup> NEPP (Bruce, J. m.fl.) Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket (ny) flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? (Version för hearing den 12 april, 2018)



Figur 4. Elanvändning i förhållande till landareal (MWh/ha) 2016.

Källa: Energimyndigheten och SCB.

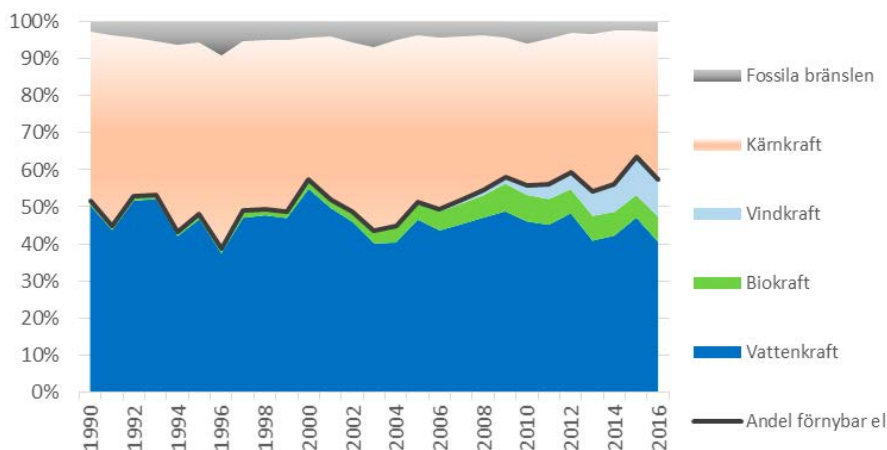
## 2.3 Förnybar elproduktion

För att få en storleksordning på omställningen i elsystemet krävs en uppskattning av hur mycket förnybar el som kan behöva byggas fram till år 2045. I ett marknadsperspektiv kan det vara vanskligt att prata om vilket behov av ny el vi har då det styrs av konkurrens, lönsamhet och betalningsvilja hos elkunder. Men på lång sikt spelar också politiska ambitioner roll för utvecklingen och ses i denna studie som förutsättningar.

### 2.3.1 Dagens elproduktion och andel förnybar elproduktion

Andelen förnybar elproduktion i förhållande till total elproduktion var 58 procent under 2016. Andelen varierar mellan åren beroende på hur produktionen ser ut i de olika kraftslagen där framförallt vattentillgång och vattenkraftproduktionen har stor påverkan på andelen vilket visas i figur 5. År med en hög andel förnybar elproduktion som t.ex. 2015 och 2000 var år med ovanligt hög vattenkraftsproduktion medan 1996 och 2003 var torra år med låg produktion och låg andel förnybart.

Andelen fossil elproduktion var knappt 3 procent under 2016 och har varierat mellan 2 och 3 procent under de senaste 5 åren. Ungefär hälften av den fossila delen utgörs av fossila delen av avfall samt restgaser. Skillnaden mellan förnybar och fossil andel utgörs av kärnkraft som var 40 procent under 2016.



Figur 5 Andel producerad el samt andel förnybar el i förhållande till totalt producerad el, 1990–2016, procent

Källa: Energimyndigheten

### 2.3.2 Vad är och innebär målet

Målet om 100 procent förnybar elproduktion formulerades första gången i den energiöverenskommelse<sup>18</sup> mellan fem riksdagspartier som gjordes under juni 2016. Regeringen presenterade en proposition<sup>19</sup> om energipolitikens inriktning i april 2018 där målet finns med samma formulering som i överenskommelsen.

*Målet år 2040 är 100 procent förnybar elproduktion. Detta är ett mål, inte ett stoppdatum som förbjuder kärnkraft och innebär inte heller en stängning av kärnkraft med politiska beslut. Vidare står det att det är rimligt att Sverige är nettoexportör av elektricitet även på sikt.*

Målet med 100 procent förnybar elproduktion nås inte om det finns kärnkraft eller fossil produktion kvar då målet ska beräknas som producerad förnybar el i förhållande till totalt producerad el vilket går att läsa i propositionen om energipolitikens inriktning. Målet innebär att Sverige år 2040 inte längre använder fossila bränslen som kol, olja och naturgas för elproduktion. Det innebär också att avfall, som idag innehåller fossila delar,<sup>20</sup> samt att restgaser<sup>21</sup> från stålindustrin inte heller används för att producera el år 2040.

Att vara nettoexportör av el antas betyda att Sverige ska sträva efter att åtminstone inte vara nettoimportörer på årsbasis. De senaste 5 åren har Sverige nettoexporterat mellan 10 och 23 TWh vilket också skulle kunna ses som en riktlinje för hur export ska hanteras inom ramen för denna studie. Om betydelsen av skrivelsen ska läsas som att det är rimligt att Sverige på grund av goda förutsättningar kommer att vara nettoexportör eller om det är rimligt att vi aktivt ska verka för att bli det är oklar.

<sup>18</sup> <http://www.regeringen.se/artiklar/2016/06/overenskommelse-om-den-svenska-energipolitiken/>

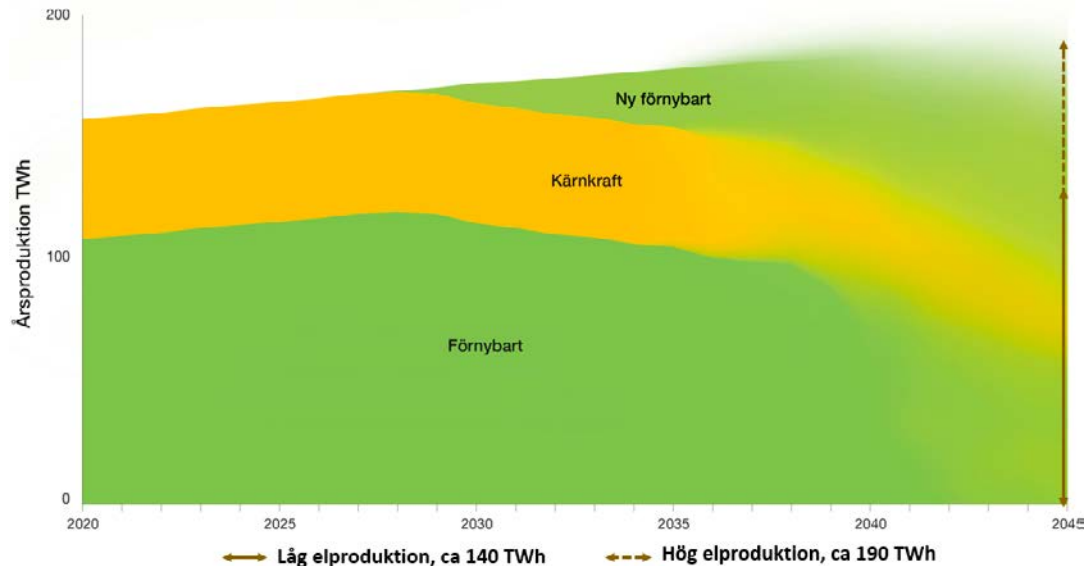
<sup>19</sup> <http://www.regeringen.se/rattsdokument/proposition/2018/04/prop.-201718228/>

<sup>20</sup> Andelen fossilt i avfall är cirka 50 procent i den senast gjorda analysen från 2016.

<sup>21</sup> Restgaser från stålindustrin uppkommer vid ståltillverkning och används för till el- och värmeproduktion istället för att facklas bort.

### 2.3.3 Behovet av förnybar elproduktion kan variera stort

Hur mycket förnybar el som behöver byggas till 2045 kommer som tidigare nämnts att bero på faktorer som elanvändningens utveckling, hur mycket av nuvarande produktion som hinner läggas ned, när i tiden detta sker, om det sker en nettoexport, hur stor den i så fall är och hur stor kärnkraftsproduktionen är. I figur 6 nedan illustreras elproduktion för att ge en bild av hur behovet av ny förnybar elproduktion kan variera.



Figur 6. Exempel på hur utvecklingen av elproduktion kan se ut till år 2045.

Källa: Energimyndigheten

Det kan behövas omkring 100–120 TWh ny förnybar elproduktion till år 2045, med en ökad elanvändning och fortsatt hög export. Med låg elanvändning och lite export rör det sig istället om cirka 60–80 TWh ny förnybar el. I båda fall behövs det mesta av den nya elproduktionen först efter år 2030. Behovet kan dock tidigare- eller senareläggas om livslängden på existerande anläggningar är kortare eller längre samt beroende på när elanvändningen ökar. Utifrån dagens elmarknad är det ett beslut som först och främst tas av de enskilda aktörerna även om dessa kan direkt eller indirekt påverkas av exempelvis regelverk och styrmedel.

Utbyggnaden från år 2009 fram till idag har legat på i runt 2–3 TWh per år och beräknas fortsätta i den takten fram till år 2021 enligt uppgifter om anläggningar som är under byggnation. Fortsätter denna takt kommer vi med i så fall ha ett årligt elöverskott på mellan 40–60 TWh runt år 2030. Å andra sidan kommer vi då bara komma upp till runt 60 TWh ny elproduktion till år 2045 vilket sannolikt inte kommer att vara tillräckligt. Skulle utbyggnaden ske mer i linje med när behovet uppstår behöver det årligen byggas anläggningar med en årsproduktion på mellan 6–12 TWh de sista 10–15 åren innan år 2045.

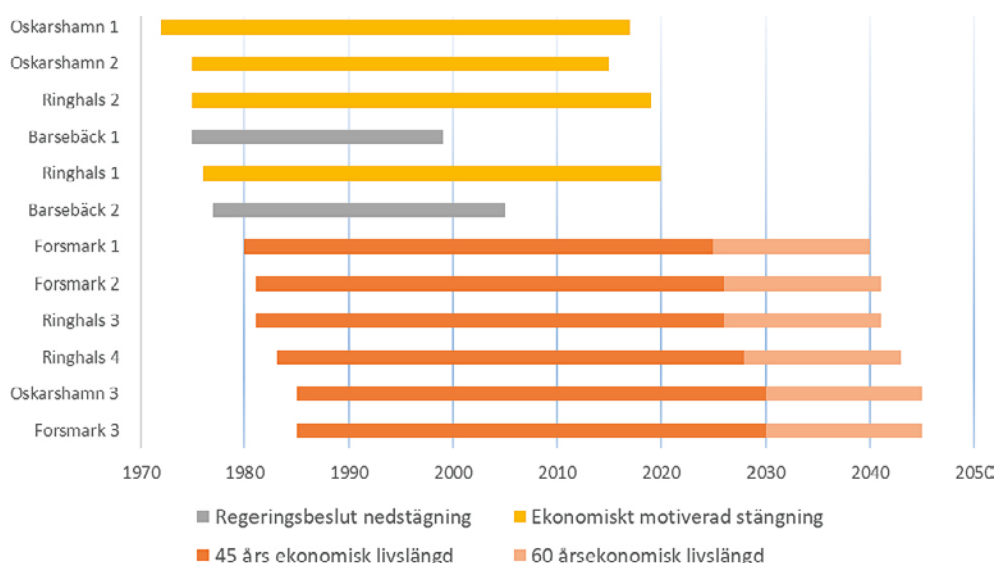
## 2.4 Ledtider och generationsväxling

Alla anläggningar har en ekonomisk livslängd. Rent tekniskt varierar slitaget med driftförhållanden och investeringar i underhåll. Anläggningar renoveras i större eller mindre etapper och komponenter byts ut löpande. Den tekniska livslängden för ett kraftverk har därför här definierats som sammanfallande med den ekonomiska. Den ekonomiska livs-

längden definieras som den tid då förutsättningarna för underhåll och reinvesteringar är tillräckligt goda för fortsatt drift och är egentligen svår att uppskatta då de ekonomiska förutsättningarna förändras med tiden.

Investeringscykeln för dagens elproduktionskapacitet är grovt skattat 20–40 år. Livslängden kan uppgå till 60 år för kärnkraftverk förutsatt att reinvesteringar och underhåll kan räknas hem. I figur 7 illustreras kärnkraftens livslängder i Sverige.

För vattenkraftverk har många delar av kraftverket en livslängd på upp till 100 år förutsatt att underhållet sköts.<sup>22</sup> Många av Sveriges stora vattenkraftverk byggdes under mitten av förra århundrandet men vissa, t.ex. Olidan (i Göta älv), Porjus (i Luleälven) och Älvkarleby (i Dalälven) byggdes alla i början av 1900-talet med det huvudsakliga syftet att producera el till järnvägen och närliggande industrier.<sup>23</sup>



Figur 7 Kärnkraftens faktiska och prognostiserade drifttid.

#### 2.4.1 Hur ersätter vi åldrande anläggningar – nyprojektering eller generationsväxling

Nedläggningar är en naturlig del av omställningen i ett tekniskt system. Vi kan dela in kraftbyggnad i två typer: nyetableringar och generationsväxling. Nyetablering innebär att mark som tidigare inte använts för kraftproduktion tas i anspråk. Generationsväxling innebär att tidigare ianspråktagen mark och befintlig infrastruktur nyttjas. Inom t.ex. vattenkraft är detta mycket vanligt då infrastruktur såsom damm och kraftverksbyggnad ofta har mycket långa tekniska livslängder medan generator och turbin ofta byts i befintlig anläggning.

Generationsväxling förekommer även inom värmekraften. Kraftvärme lokaliseras ofta med stor hänsyn till befintlig infrastruktur men inte alltid på samma tomt som tidigare. Nästa generations pannor anpassas för andra bränslen vilket ställer nya logistikkrav och kan göra etableringar i andra lägen mer lönsamma och samhällsekonomiskt motiverade.

<sup>22</sup> Handbook Utility Management, Bausch 2009, kap. 9.4

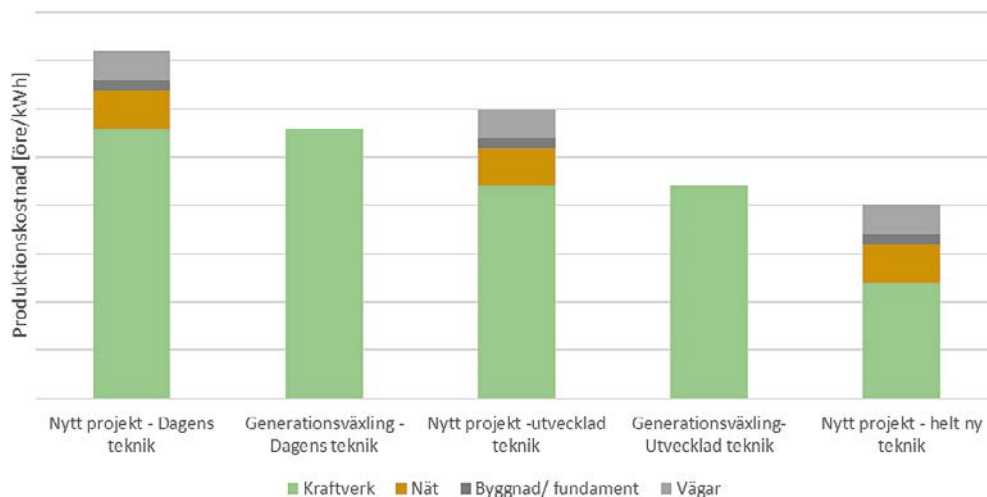
<sup>23</sup> <https://powerplants.vattenfall.com/sv/alvkarleby>

Nya kärnkraftverk får bara byggas på befintliga platser men några kända investeringsbeslut finns inte.

När vindkraften behöver ersättas kommer valet stå mellan nyprojektering eller generationsväxling. Eftersom vindkraften idag har utvecklats betydligt, särskilt med avseende på storlek är vår bedömning att förutsättningarna för att använda liknande verk, eller ens samma plats, i dagsläget är små. Sannolikheten blir större att vi i framtiden kan använda samma plats och infrastruktur som tidigare. Men teknikutvecklingen har fortsatt, och förutsätter, vilket gör att det finns och kommer att finnas en storlekskillnad mellan de verk som ska ersättas och de nya verken. På sikt kommer troligen teknikutvecklingen ha stannat av så pass att enskilda verk i en vindkraftspark kontinuerligt kan ersättas när de tjänat ut. Förutsatt att anläggningen fortfarande har tillstånd kan parken på så sätt uppnå en mycket lång livslängd.

I figur 8 visas den ekonomiska logiken för valet mellan nyprojektering eller generationsväxling. Stapeln längst till vänster visar kostnaden för en ny anläggning på en ny plats. Den besparing som görs om en anläggning ersätts med en exakt likadan som förut är den infrastruktur som redan finns på plats.

Med åren kan teknikutvecklingen leda till att kostnaden för ett modernt verk är lägre än den teknik som byggdes ursprungligen. Beroende på om kostnadsbesparingen för den nya tekniken är tillräckligt stor kan samma plats användas igen men med viss ny infrastruktur. I vissa fall kan den nya tekniken eller en helt annan teknik vara så pass mycket billigare att det är bättre att bygga på en helt ny plats med ny infrastruktur. Exempel på detta kan vara när dagens vindkraft ska ersätta små vindkraftverk från 2000-talets början eller när förnybar elproduktion ersätter kärnkraftverk. Det kan också vara så att den nya tekniken inte går att använda på samma plats och då beror valet mellan nyetablering eller generationsväxling på om det är mer lönsamt att bygga med den äldre tekniken på samma plats än ny teknik på ny plats.



Figur 8. Illustration över när det lönar sig med generationsväxling, nyetablering eller tekniksifte.

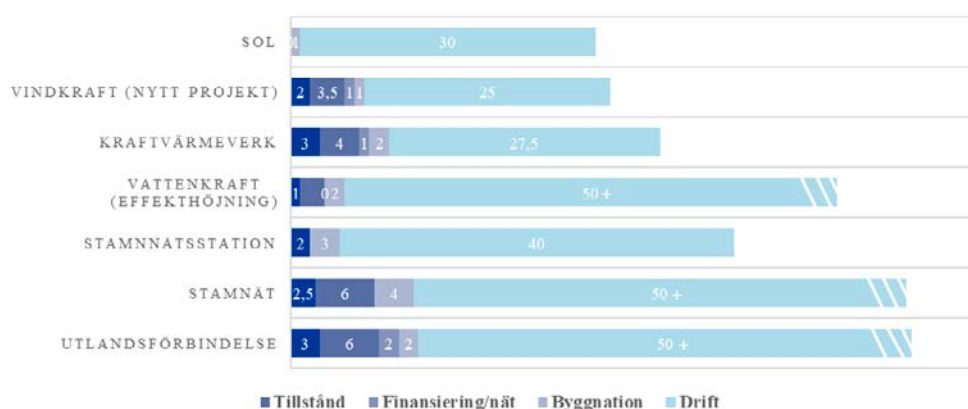


## 2.4.2 Ledtiderna i kraftsystemet är ofta långa

Ledtider för kraftprojekt varierar alltid med lokala förutsättningar men i figur 9 visas genomsnittliga siffror för olika några olika kraftslag och elsystemskomponenter. Solkraft sticker ut med korta ledtider men i övrigt tar det 5–10 år att från planeringsstart till drift men kan i vissa fall ta längre tid än så. Detsamma gäller även vid etablering av nya nät.

En lång ledtid innebär att förutsättningar kan ha förändrats en hel del från det att projekteringen startat. I kombination med att större komponenter i elsystemet har långa drifttider, i vissa fall upp mot 100 år (vattenkraft och elnät) så finns en viss tröghet i systemet.

Detta innebär att de regelverk mm som sätter ramarna för elsystemet behöver vara långsiktiga och att de kommer i god tid. Med utgångspunkt från att vi ska bygga runt 100 TWh el från år 2030–2045 med kompletterande infrastruktur eller andra flexibilitetsresurser behöver vissa av dessa börja planeras redan år 2020. Samtidigt kommer sådant som redan idag finns på plats, är under byggnation eller planeras att i stor utsträckning finnas kvar även år 2045.



Figur 9 Ledtider [år] för några olika komponenter i elsystemet.

Källa: Intervjuer med nyckelpersoner inom kraftbranschen

## 2.5 Ett stort behov av nya anläggningar

En översiktlig analys av vägen till ett 100 procent förnybart elsystem visar en ganska stor skillnad i resultatet beroende på vilka antaganden som görs. Utifrån Energimyndighetens bedömning finns det ändå några tydliga drivkrafter. Sannolikt kommer det att krävas ny förnybar elproduktion på runt 100 TWh fram till år 2045. I stora delar en följd av att många äldre anläggningar läggs ner. Dessutom tyder mycket på att den stora utbyggnaden kommer att behövas först under 2030-talet och framåt.

Hur vårt elsystem ser ut och vad det kommer att bestå av kommer att drivas av ett antal faktorer. En av de viktigaste är elmarknaden. Sedan elmarknaden avreglerades är det upp till marknadens aktörer att utifrån elkundens efterfrågan utveckla elsystemet. Det råder enkelt uttryckt en konkurrens om både utbyggnad av nya anläggningar och flexibilitet. Denna konkurrens sträcker sig inte bara till elproduktionsanläggningar utan även till elanvändare och olika lager. I ett vidare perspektiv kan detta även utvidgas till andra marknader som på olika sätt kan tillgodose el- och energikunders önskemål.



Detta kan vara allt från värme- och transportsystemet till elsystem i andra länder som har förbindelse med Sverige.

I det perspektivet är det lönsamhet som i huvudsak kommer att driva utvecklingen framåt. Det innebär i teorin att marknaden kan skapa ett mycket stort antal vägar fram. Men en marknad begränsas av vad som är tekniskt möjligt, hur den är designad och av regelverk. Samtidigt byggs stamnät, utlandsförbindelser och lokala nät av andra aktörer, styrda av andra regelverk.

I ett bredare perspektiv har också EU och Sveriges energipolitiska grundpelare länge varit försörjningstrygghet, konkurrenskraft och ekologisk hållbarhet vilket nu ska fastställas som övergripande mål enligt regeringens proposition om energipolitikens inriktning.<sup>24</sup>

Dessa mål ger också betydelsefulla förutsättningar för hur ett 100 procent förnybart elsystem kan se ut. För just elsystemet kan målet exempelvis brytas ner på ett sådant sätt att det ska finnas en hög leveranssäkerhet för el, att omställningen behöver vara kostnadseffektiv samt konsekvenserna för miljön begränsas.

Idag finns redan ett antal styrmedel, lagar och tillståndsförfaranden både från EU och Sverige som syftar till att bidra till dessa mål. Vissa begränsar marknaden, så som tillståndprocesser eller den svenska effektreserven. Andra kan vara till för att ändra på konkurrensförhållandet för att styra utvecklingen mot önskat håll. Exempel på detta är elcertifikatsystemet eller EU:s handelssystem för utsläppsrätter.

Vi kommer också att på vägen fram till år 2045 gå in i nya faser av omställningen, med nya tekniker och nya förutsättningar. Därför är det viktigt att regelbundet ifrågasätta vad som är ett bra eller dåligt sätt att uppnå målen.

Nästa avsnitt tar upp Sveriges förutsättningar där bland annat potentialen för olika kraftslag analyseras. I många fall är det snarare intäkter från elmarknaden, dess utformning eller de energipolitiska målen som ger oss förutsättningarna för vägarna fram till år 2045, än potentialen för specifika tekniker.

---

<sup>24</sup> Prop. 2017/18:228

## 3 Sveriges förutsättningar

Sverige har tillgång till stora energiresurser i form av goda vindlägen både på land och till havs, vattendrag, bioråvara och solinstrålning. I Sverige finns dessutom resurser i form av välutbyggd infrastruktur för el- och värmedistribution och stora obebyggda ytor.

För att vidare diskutera olika vägar för att nå ett 100 procent förnybart elsystem behövs bedömningar av hur stor del av dessa tillgängliga naturresurserna som det är rimligt att anta att vi kan konvertera till elenergi. Begreppet potential för energiproduktion används för att konkretisera vilka möjligheter som finns för den här konverteringen. När det gäller potentialbedömningar är det viktigt att poängtera att dessa alltid beror på gjorda antaganden och vilka begränsningar som tas hänsyn till.

Begreppet potential är i sig ett vitt begrepp och behöver delas in i olika nivåer, så som tillgängliga resurser, teknisk potential, praktisk genomförbar potential och ekonomisk potential, där varje nivå behöver definieras för att vara användbar. Dessutom bör en potential hänföras till vilket årtal som avses. Detta kapitel avser inte att exakt dela in Sveriges potential av olika kraftslag i olika nivåer utan snarare utifrån dessa begrepp försöka bedöma vad som är en rimlig utbyggnad av de olika kraftslagen fram till år 2045 och vad som är de stora begränsningarna.

### 3.1 Teknisk potential för förnybar el

Med teknisk potentialen avses hur stor del av den maximala årliga energiresursen som kan konverteras till användbar energi med mogen och tillgänglig teknik. Hänsyn tas även här till rent fysiska begränsningar så som att det inte går att bygga kraftverk på vägar eller i nationalparker.<sup>25</sup>

Sveriges geografiska förutsättningar med stora obebyggda ytor, långa kuststräckor och höga medelvindhastigheter gör att den tekniska potentialen för vindkraft till land och till havs är stor. Bedömningar som gjorts visar på att det rör sig om hundratals TWh per år till land och tusentals TWh per år till havs<sup>26,27</sup>. Även för el från solcellsanläggningar är den tekniska potentialen stor. Runt 40 till 50 TWh per år<sup>28,29</sup> har bedömts vara möjligt bara med anläggningar på tak i goda sollägen. För anläggningar på mark bedöms exempelvis tekniska potentialen på enbart marginaljordbruksmark (obrukad jordbruksmark) till drygt 130 TWh per år.<sup>30</sup>

<sup>25</sup> Boyle, G. Renewable Energy, Power for a sustainable future, 2004.

<sup>26</sup> Blomqvist, P. et al (2008) Vindkraft i framtiden. Möjlig utveckling i Sverige till 2020, Elforsk.

<sup>27</sup> Sweco (2017) Havsbaserad vindkraft – potential och kostnader.

<sup>28</sup> Kjelsson, E. (2000). Potentialstudie för byggnadsintegrerade solceller i Sverige. Rapport 2. Analys av instrålningsnivåer på byggnadsytor, Lunds Tekniska Högskola.

<sup>29</sup> Kamp, S. (2013). Sveriges potential för elproduktion från takmonterade solceller. Teoretisk, teknisk och ekonomisk analys, Uppsala Universitet.

<sup>30</sup> Norberg, I. et al. (2015) Solel i lantbruket – realiserbar potential och nya affärsmodeller. JTI, Lantbruk & Industri nr 433.

Sol- och vindkraft nyttjar alltså båda naturresurser som finns i ett överskott i förhållande till Sveriges elanvändning. Att tala om teknisk potential för dessa kraftkällor blir därmed ganska ointressant, det är inte troligt att de rent fysiska faktorerna begränsar vad som kan komma att byggas ut.

För biokraft sker en konvertering till användbar elenergi från lagrad energi i form av skogsråvara och annan bioenergi. Användningen av biobränslen kan därför begränsas av hur mycket uttag av råvaran som är möjlig och hur mycket av detta som finns tillgängligt för elproduktion. Även teknik för konverteringen påverkar den tekniska potentialen.

Idag sker produktion av el från biobränslen huvudsakligen i kraftvärmeverk i fjärrvärme och industri. Produktionskapaciteten i dagens anläggningar är idag cirka 23 TWh per år men produktionen har av olika skäl legat på runt 14 TWh de senaste fem åren. Enligt bedömningar från branschorganisationen Svebio finns möjligheter för en teoretisk ökning av kraftvärmeproduktion med 25 till 30 TWh per år utöver dagens nivå till 2040 utan att tillgången på råvaran blir begränsande, detta kräver dock en viss teknikutveckling, främst av dagens teknik.<sup>31,32</sup> Sker en mer betydande teknikutveckling där dagens kraftvärmeteknik ersätts med andra tekniker har den tekniska potentialen bedömts kunna öka ytterligare. Inom projektet Vägval el gör IVA bedömningen att vi i framtiden har en potential att kunna producera så mycket som 60 TWh per år i framtiden.<sup>33</sup> Detta rör sig dock om en avsevärd teknikutveckling, utbyggda kraftvärmesystem och betydligt effektivare elproduktion i både storskaliga och småskaliga kraftvärmesystem.<sup>34</sup>

Potentialen för el från kraftvärme påverkas också i stort av utvecklingen av värmeunderlag och tillgång till biobränsle. Energimyndigheten har dock inte inom ramen för denna studie tittat närmare på konkurrenssituationen för fjärrvärme, uppvärmningsalternativ eller skogsråvaran i sig och hur detta påverkar den långsiktiga potentialen.

Även för vattenkraften finns rent fysiska begränsningar genom att det krävs tillgång till ett vattendrag och nederbörd. Det är tekniskt möjligt att öka vattenkraftens produktion. Exempelvis gör IVA-projektet Vägval el bedömningen att en ökning av 30 TWh per år är möjlig.<sup>35</sup> Denna potential kommer dock i huvudsak från en utbyggnad av de nationalälvarna som är skyddade enligt svensk lag.

I samband med målet om ett 100 procent förnybar elproduktion har vattenkraftens roll som reglerresurs allt mer lyfts fram. Därmed finns det skäl för att resonera kring effektpotential istället för energipotential när det gäller vattenkraft. Vattenkraften har förmåga att på ett kostnadseffektivt sätt hantera större och mer oförutsägbara svängningar i produktionen som blir verklighet med en ökande andel variabel kraft i elsystemet.

Sveriges totala installerade vattenkraftseffekt är ca 16 200 MW, men eftersom inte alla vattenkraftverk kan utnyttjas fullt ut samtidigt antas att 13 700 MW är den totala effekt som är möjlig att utnyttja momentant. I en undersökning från Skellefteå kraft har den tekniska potentialen för effektutbyggnad av redan utbyggda älvsträckor räknats ut till 3 900 MW. Denna effektökning sker genom att flaskhalsar i älvsträckor byggs bort och

---

<sup>31</sup> Svebio, Ett 100 procent förnybart elsystem kräver en betydande andel biokraft, 2015

<sup>32</sup> Här bör påpekas att avfall och torv bedöms som biobränslen i rapporten.

<sup>33</sup> IVA, Vägval el, 2016

<sup>34</sup> Bedömningen utgår i huvudsak från värmeunderlag och tekniska förutsättningar för produktionen, men menar att bioråvaran kan finnas tillgänglig från svenskt skogsbruk.

<sup>35</sup> Ibid

att hela älvsträckningarna optimeras. Beräkningarna bygger på att effektökningen sker i befintliga kraftstationer och med befintliga fallhöjder. Siffran ska ses som en indikation om effekthöjning i befintliga vattenkraftstationer och det finns risk att siffran är över-skattad eftersom hänsyn till specifika förutsättningar för varje älv och kraftstation inte tagits.<sup>36</sup>

Förutom faktisk effektökning går det att utnyttja magasinen mer flexibelt, vilket innebär att vattenkraftens topp effekt ökar ytterligare och minimieffekten antas kunna minska. Det förutsätter dock ändrade miljödomar med exempelvis minskade minimitappningar.

De kraftslag som hittills diskuterats är sådana som redan idag finns i det svenska elsystemet. Det är värt att nämna att även andra elproduktionstekniker kan komma att få en betydelse i framtiden. De tekniker som ännu inte är kommersialiserade på den svenska marknaden, så som vågkraft och el från geotermisk energi kommer dock inte ingå vidare i den här studien utan kommenteras bara kort här.

Sveriges vågklimat gör att potentialen för vågkraft är begränsad här i förhållande till andra länder, så som Storbritannien. Ocean Energy Center har uppskattat att den skulle kunna vara runt 10 TWh per år.<sup>37</sup>

Även elproduktion från geotermisk energi som bygger på att nyttja värme lagrad i berggrunden är en teknik som på lång sikt kan kommersialiseras i Sverige. I dagsläget har Sverige dock mycket begränsad potential för elproduktion från geotermisk energi jämfört med länder med tunn jordskorpa eller där det finns vulkanism. För att nå temperaturer lämpliga för elproduktion, högre än 120 °C, krävs i Sverige borrhinar till 6–7 km djup. Geoenergi och geotermi bidrar inte idag till elproduktionen i Sverige.<sup>38</sup> På längre sikt kan tekniker för elproduktion vid lägre temperaturer komma att ändra på detta.

### 3.2 Den faktiska potentialen beror på många faktorer

Praktiskt begränsas den tillgängliga tekniska potentialen av ytterligare faktorer så som tillgång till elnätet, överföringsbegränsningar, begränsningar i elsystemet till följd av hög intermittens eller acceptans för användande av land- och vattenområden eller olika typer av tekniker.<sup>39</sup> Det är oftast problematiskt att kvantifiera den praktiskt genomförbara potentialen. Faktorer som påverkar potentialen i positiv eller negativ riktning kan förändras i takt med att elsystemet och samhället utvecklas. Exempelvis kan tekniska lösningar möjliggöra för elsystemet att hantera en högre andel variabel produktion. Det spelar även roll hur den totala sammansättningen av energisystemet ser ut, varför det är svårt att särskilja potentialen för enskilda kraftslag. Dessutom kommer lönsamhet att vara centralt för vad som faktiskt byggs ut, även om inte alla investeringar sker med självklar ekonomisk rationalitet då exempelvis miljöfrågor kan vara en drivkraft.

<sup>36</sup> Sweco, 100 % förnybart – en rapport till Skellefteå kraft, 2017

<sup>37</sup> <https://www.chalmers.se/en/areas-of-advance/energy/Documents/Energidagen%202012/Lars%20Bergdahl.pdf>

<sup>38</sup> Geologisk information för geoenergianläggningar – en översikt. SGU-rapport 2016:16

<sup>39</sup> Boyle, G. Renewable Energy, Power for a sustainable future, 2004

I figur 10 illustreras det komplexa sambandet mellan hur stor utbyggnaden av ett visst kraftslag kan förväntas bli beroende på en rad faktorer. I praktiken finns fler faktorer och samband där kopplingen till andra energisystem och deras utveckling bör nämnas särskilt. Alla faktorer kan också sägas påverkas av olika politiska mål.



Figur 10. Exempel på ett antal viktiga faktorer som påverkar hur mycket av ett visst kraftslag som byggs ut i ett 100 procent förnybart elsystem.

Anm: Figuren är inte heltäckande och visar inte på samtliga kopplingar mellan faktorerna.

Lönsamheten är starkt sammankopplad med de faktorer som kategoriseras in under praktiskt genomförbar potential på så vis att den beror på systemfaktorer så som tillgängligheten till energiresursen och hur produktionen från energiresursen kan nyttjas och värderas i systemet. I kommande kapitel följer en fördjupning av hur olika frågor har en påverkan på vilken potential för olika kraftkällor som finns i det svenska systemet.

### 3.3 Elsystemet förändras

Ett elsystem med 100 procent förnybar elproduktion kommer att ha andra egenskaper än dagens elsystem och för att upprätthålla hög leveranssäkerhet behövs både nya tekniska lösningar men också utveckling av regelverk, marknadslösningar och affärsmodeller. I det här avsnittet berörs de utmaningar som finns med en stor andel variabel elproduktion i ett elsystem.

Det är högst sannolikt att det rent tekniskt är möjligt att hantera omställningen, utmaningen ligger snarare i att göra det på ett resurseffektivt sätt. Det svenska och nordiska elsystemet karakteriseras idag av hög leveranssäkerhet, tillgång till billig reglerkraft i form av vattenkraft och en stark sammankoppling mellan de olika ländernas elnät. Detta utgör goda förutsättningar för att uppnå 100 procent förnybar elproduktion. Då vi går mot en mer integrerad europeisk elmarknad är det också avgörande vad som sker i våra grannländer och hur sammankopplingen av Europas elnät och elmarknader utvecklas.

#### 3.3.1 Systemstabilitet

Med systemstabilitet menas systemets förmåga att motstå störningar vid till exempel bortfall av en stor last eller produktionsenhet. Systemstabiliteten kan delas upp i frekvensstabilitet, spänningsstabilitet och vinkelstabilitet. Stabilitet är i sig ingen ny utmaning utan

har alltid varit en grundläggande fråga för elsystemets funktion. Skillnaden är att de variabla kraftslagen som vind och sol har andra egenskaper och inte naturligt bidrar till systemets stabilitet på samma sätt som vattenkraft, kärnkraft och kraftvärme. Systemet behöver designas efter de nya egenskaperna och det uppkommer behov av nya eller utvecklade s.k. systemtjänster, alltså tjänster för att upprätthålla systemstabiliteten.

Sol- och vindkraft bidrar inte naturligt till trögheten i elsystemet. En ökad andel av dessa kraftslag leder alltså till minskad svängmassa i systemet och därmed minskad tålighet mot störningar. Det finns en gräns för hur mycket av dessa kraftslag som kan finnas i systemet om stabiliteten ska upprätthållas utan att några andra åtgärder vidtas. Svenska kraftnät och de andra nordiska stamnätsoperatörerna bedömer att sannolikheten att svängmassan i systemet kommer understiga tillräckliga nivåer<sup>40</sup> ökar i viss utsträckning redan till 2025 och framförallt vid torrår.<sup>41</sup> Sweco visar i sin rapport ”100 % förnybart” att dagens nivåer på svängmassa understigs ett stort antal timmar per år i ett scenario med 75 TWh vind och 10 TWh sol.<sup>42</sup> Dock ska man komma ihåg att förutom svängmassan beror stabiliteten också på utformningen av övrig frekvensreglering. Andra åtgärder som kan möjliggöra höga andelar av sol och vind är att begränsa den största störningen som systemet behöver dimensioneras för eller att använda syntetisk svängmassa eller mycket snabb frekvensreglering från till exempel vindkraft eller batterier.

För att systemstabiliteten inte ska bli en begränsande faktor för andelen vind och sol i elsystemet finns behov av att skapa incitament som möjliggör tillgång på systemtjänster på ett kostnadseffektivt sätt. En annan viktig aspekt är också att de behov som kommer att finnas i framtidens elsystem till viss del ska tillgodoses av anläggningar som byggs redan idag. Att utforma regelverk och marknadslösningar som möter framtidens behov är därför nödvändigt och en stor utmaning.

### **3.3.2 Variabilitet och behov av flexibilitet**

En ökad andel variabel kraft i systemet påverkar variationerna i det som brukar kallas nettolasten, vilket är den del av efterfrågan som kvarstår när produktionen från vind och sol räknats bort. Det är denna del av förbrukningen som systemet behöver klara av att hantera. Variationerna finns också i flera olika tidsskalor, från sekunder till säsong och det behöver finnas resurser för att hantera alla dessa.

Variabiliteten skiljer sig åt mellan olika kraftslag och också mellan olika tidsskalor. Produktionsmixen får därför betydelse för påverkan på kraftsystemet. Som exempel visar studien ”Flexibilitet – i en ny tid” att en ökning av mängden solex från 7 TWh till 15 TWh och motsvarande minskning av vindkraften skulle leda till minskad variabilitet på veckonivå medan behovet av årsreglering ökar betydligt.<sup>43</sup> Också enskilda energislags bidrag till nettolastens variabilitet kan minskas. Geografisk utbredning påverkar variabiliteten för både vindkraft och solex, men vindkraftens variabilitet minskar i större utsträckning med den geografiska utbredningen. Ökat antal fullasttimmar och andel havsbaserad vind är också betydande faktorer för att minska vindkraftens variabilitet.<sup>44</sup>

<sup>40</sup> Begreppet tillräckliga nivåer baseras på att de hittills lägsta nivåerna varit tillräckliga

<sup>41</sup> SvK och m.fl., ”Challenges and opportunities for the nordic power system,” 2016

<sup>42</sup> SWECO, ”100% förnybart – En rapport till Skellefteåkraft,” 2017

<sup>43</sup> Bruce, J, m.fl., ”Flexibilitet – i en ny tid”, 2018

<sup>44</sup> J. Olausson, ”Scenarios and time series of future wind power production i Sweden,” 2015

I rapporten ”Flexibilitet – i en ny tid” undersöks hur behovet av flexibilitet i olika tidskalor utvecklas i omställningen till 100 procent förnybar elproduktion. Resultaten visar att behovet av balansering ökar både i de kortare tidskalorna (timme) och de längre (veckor). Samtidigt påpekas i rapporten att det finns gott om möjliga lösningar och att mycket handlar om att skapa ekonomiska och regelmässiga förutsättningar för olika åtgärder.<sup>45</sup> I några andra rapporter lyfts variationerna på medellång tidsskala fram som den största utmaningen i det nordiska systemet.<sup>46,47</sup>

För att hantera variabiliteten finns behov av att öka flexibiliteten i systemet. Flexibilitet kan finnas både i produktion, nät, lager och användning. Den enskilt viktigaste källan till flexibilitet i det nordiska systemet är vattenkraften som står för den mesta av reglerbidraget i alla tidskalor från timme till säsong.<sup>48</sup> I framtiden kan det dock uppstå situationer då vattenkraftens flexibilitet inte räcker till.<sup>49</sup>

Kraftvärmens förmåga att bidra till flexibilitet beror av många faktorer. Tillgång till topplastproduktion och bidrag till frekvensregleringen bedöms som två sätt för kraftvärmens att bidra till flexibilitet. Hantering av överskottsproduktion från sol- och vind bedöms som mindre sannolikt.<sup>50</sup>

Stor potential finns också att skapa ökad flexibilitet på användarsidan, i näten och i form av lagring. Se avsnitt 4.4 för en diskussion kring utvecklingen av flexibilitetsresurser. Det är också sannolikt att nya aktörer på elmarknaden kommer att bidra till lösningar genom till exempel mer lokal och regional optimering av elproduktion och elanvändning. Se mer om detta i avsnitt 4.5 om nya aktörer i energisystemet.

### 3.3.3 Effekt

Effektbrist uppstår i systemet när det inte finns tillräckligt med resurser för att möta en viss efterfrågan, resurserna kan bestå av både produktionsresurser och av förbrukare som är beredda att minska sin efterfrågan. För att kunna nyttja resurserna på rätt plats vid rätt tid är också tillräcklig överföringskapacitet en avgörande faktor när man pratar om effektbrist.

Svenska kraftnät har i sin systemutvecklingsplan studerat ett 100 procent förnybart scenario med 67 TWh vindkraft och 7 TWh solel. Analyserna visar på ett ökat antal timmar med effektbrist (höga priser) framförallt i elområdena SE3 och SE4. Under dessa timmar kommer någon form av flexibilitet krävas på marknaden<sup>51</sup>

Även effektöverskott kan bli en utmaning framförallt i scenarier med hög andel solel där det under sommarmånaderna kan uppträda situationer med hög produktion och låg förbrukning. Ett visst spill av produktion kan vara en lösning men överproduktion kan också komma att hanteras genom lagring, export eller förändrad elförbrukning.

<sup>45</sup> Bruce, J, m.fl., ”Flexibilitet – i en ny tid”, 2018.

<sup>46</sup> J. Olausson, ”Net load variability in the Nordic countries with highly or fully renewable power system,” 2016.

<sup>47</sup> SvK, ”Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion.,” 2015.

<sup>48</sup> Energimyndigheten och m.fl., ”Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet,” 2016.

<sup>49</sup> S. kraftnät och m.fl., ”Challenges and opportunities for the nordic power system,” 2016.

<sup>50</sup> NEPP, ”Reglering av kraftsystemet med ett stort inslag av variabel produktion,” 2016.

<sup>51</sup> Svenska kraftnät, ”Systemutvecklingsplan 2018–2027”, 2017.

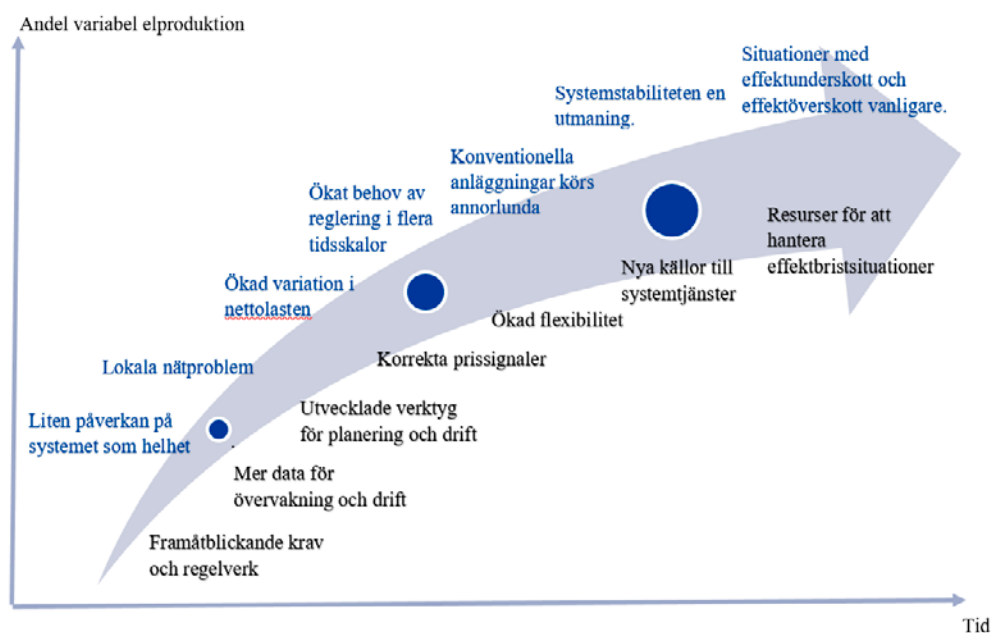


### 3.3.4 Elnätskapacitet

En mer decentraliserad elproduktion och förändrad elanvändning kommer i stor grad att påverka lokalnäten. Framförallt när det gäller solelsproduktion kan lokalnäten vara en begränsande faktor innan effekterna av en ökad andel solel märks på systemnivå. Studier visar att i stadsnät är överbelastning av ledningar oftast det största problemet medan spänningsökningar är den begränsande faktorn i landsbygdsnät. Acceptansgräns är en term som används för att beskriva hur stor andel solel som kan anslutas i ett lokalnät innan gränsen för något kvalitetsmått överskrids. I rapporten ”Utbyggnad av solel i Sverige – möjligheter, utmaningar och systemeffekter” menas att det handlar om ganska stora andelar solel, motsvarande flera TWh i årsproduktion, som kan anslutas i svenska lokalnät innan problem uppstår.<sup>52</sup> I rapporten tas också upp som jämförelse att i flera länder i Europa (Tyskland, Spanien, Italien) uppgår andelen solel till mer än 5 procent av den totala elanvändningen. Att öka acceptansgränsen är framförallt en kostnadsfråga och det finns flera möjliga åtgärder med olika kostnadsnivåer.

### 3.3.5 Hur stora blir utmaningarna och när

Omställningen kommer inte att ske över en natt och de olika utmaningarna för elsystemet kan uppkomma vid olika tidpunkter och i olika stor omfattning beroende på många olika faktorer. När olika vägval ska göras på vägen mot 100 procent förnybart elsystem är det viktigt att ta hänsyn till detta. T.ex. kan det ta lång tid att utveckla nya marknadslösningar, implementera nya tekniska krav och förändra regelverk. En snabb förändring av elproduktionen, t.ex. nedläggning av flera kärnkraftverk inom en kort tidsperiod, kan också i sig utgöra en stor utmaning för elsystemet.



Figur 11 Exempel på hur elsystemets egenskaper och behov kan förändras över tid och med ökad andel variabel elproduktion.

Anm: Figuren visar en schematisk bild över i vilken ordning de olika utmaningarna kan uppkomma men detta är beroende av det aktuella elsystemet och kommer att analyseras vidare i den kommande studien.

<sup>52</sup> Energiforsk, ”Utbyggnad av solel i Sverige – möjligheter, utmaningar och systemeffekter,” 2016



### **3.3.6 Elmarknaden**

Elsystemet kan alltså på olika sätt vara begränsande för potentialen av olika former av förnybar el. På den avreglerade elmarknaden ska dock lönsamhet i största mån styra investeringar och på så sätt är det den som i första hand är begränsande snarare än tekniska begränsningar i elsystemet.

Elmarknadernas funktion är att på olika sätt prissätta det behov elkunder har eller de krav som samhället har på elsystemet. Den största marknaden med mest omsättning är spotmarknaden som idag prissätter per timma (12–36 timmar före drifttimmen) och medför att det till exempel är mer lönsamt att producera timmar när det finns mer knapphet. Motsvarande gäller också att använda mindre el vid samma timme även om det för många hushållskunder inte blir direkt då de flesta elavtal är fastpriser på år eller rörligt elpris som oftast innebär fasta priser på månadsbasis.

Fram till drifttimmen handlas el på intradagsmarknaden och under drifttimmen finns reglerkraftmarknaden där systemoperatören avropar bud för att balansera utbud och efterfrågan. Efter drifttimmen sker en balansavräkning. I varje givet ögonblick ska det också råda balans vilket innebär att reglera frekvensen i elnätet till 50 Hertz. För att klara detta handlas olika reserver upp av Svenska kraftnät.

De olika marknaderna innebär att kostnader och intäkter per kWh skiljer sig åt mellan kraftslag och aktörer, men även mellan olika elanvändare och lagringsmetoder. Sveriges indelning i fyra elområden innebär också att dessa kostnader skiljer sig åt geografiskt.

Vidare finns nättariffer, anslutningsavgifter och nätnytta som också medför en skillnad i intäkter beroende på var i nätet en anläggning ska anslutas.

Det finns sammanfattningsvis en rad prissignaler som styr omställningen av elsystemet. Dessa prissignaler bör leda till att lönsamheten för en viss typ av elproduktion, eller annan komponent i elsystemet, sätter begränsningar för potentialen innan elsystemet i sig gör det. Olika ekonomiska styrmedel, regelverk eller marknadsdesign kan dock innebära att så inte alltid är fallet.

I en tid av stor omställning kan vi behöva ifrågasätta om marknaderna är designade på ett sådant sätt att vi får det elsystem vi efterfrågar, inom ramen för målet om 100 procent förnybar elproduktion. Vissa systemtjänster som idag inte prissätts kan behöva prissättas i framtiden. Det behöver också analyseras om intäkter och kostnader fördelas på ett riktigt sätt mellan det som är ”bra” eller ”dåligt” för elsystemet. Detsamma gäller även designen av styrmedel.

## **3.4 Tillståndsprocessen har betydelse**

Förutsättningarna för att beviljas miljötillstånd är en faktor som kan påverka potentialerna för de olika förnybara kraftslagen. Undantaget är solelanläggningar, eftersom det inte krävs miljötillstånd för att uppföra dem. I vissa kommuner krävs dock bygglov, men det bedöms inte ha någon påverkan på solelpotentialen. Därför kommenteras inte solelanläggningar mer i detta avsnitt.

### **3.4.1 Vattenkraft**

Den 12 april 2018 överlämnade regeringen en proposition om omprövning av vattenkraft till riksdagen, som föreslås träda i kraft 1 januari 2019. Syftet med lagförslaget är

att se till att EU:s ramdirektiv för vatten och miljöbalkens krav uppfylls, vilket i sin tur ska leda till att all vattenkraft i Sverige uppfyller moderna miljökrav.

En viktig uppgift i lagförslaget är att ta fram en nationell plan för omprövning av vattenkraften. Planen ska tas fram av Energimyndigheten, Havs- och vattenmyndigheten och Svenska kraftnät gemensamt. Den ska ange vilka verksamheter som bör omprövas och när omprövningen senast bör ha påbörjats. Planen ska också redovisa hur avvägningar ska göras för att värna både vattenmiljön och energisystemnyttan. Den nationella planens avvägningar ska sedan användas i omprövningarna av svenska vattenkraftverk då de ska förses med moderna miljövillkor.

#### Påverkan på vattenkraftens utbyggnad

Ett mål med den nya vattenkraftslagstiftningen är att reglerna för omprövning av vattenkraft ska förenklas så långt det är möjligt eftersom tillståndsärenden för vattenkraft normalt innebär långa handläggningstider. Tillståndsprocessen för nybyggnation av vattenkraft berörs dock inte av den nya lagstiftningen och väntas därför fortsatt vara lång och komplicerad.

Enligt det nya lagförslaget är det främst genom effekthöjning i befintliga vattenkraftverk som utbyggnaden ska ske. Det är dock svårt att bedöma hur många kraftverksägare som kommer utnyttja den möjligheten eftersom det ofta saknas ekonomiska incitament. Med gällande lagstiftning har risken för att få stränga miljövillkor vid en omprövning av miljötillstånden vid en kapacitetsutbyggnad gjort att många anläggningsägare valt att inte investera i en kapacitetsutbyggnad.

Den kommande omprövningen av alla vattenkraftsanläggningar i Sverige innebär även en risk, sett ur ett energisystemperspektiv, då införande av moderna och ofta strängare miljökrav kan leda till att produktion och flexibilitet från vattenkraften kommer att minska. I propositionen anges att avvägningar ska göras för att värna *både* vattenmiljön och energisystemnyttan. Hur dessa avvägningar kommer att göras och utfallet av dem återstår att se. I den nationella strategin för vattenkraft och vattenmiljö från 2014, enades Energimyndigheten och Havs- och vattenmyndigheten om ett begränsande planeringsmål för miljöförbättrande åtgärder på 2,3 procent av vattenkraftens årsproduktion, motsvarande 1,5 TWh.

Ett annat mål med den nya lagstiftningen är att skapa förutsättningar för en mer samordnad effektutbyggnad genom att pröva älvsträckor i ett sammanhang. En svårighet med att nå en sådan samordnad prövning är dock att det ofta finns flera verksamhetsutövare i en älv och att dessa historiskt sett sällan har samordnat sig innan omprövning. En annan svårighet är vattenkraftens långa ledtider. En turbin- och generators livslängd beräknas till 40–50 år, och när en sådan kapitalintensiv investering gjorts finns inga incitament att exempelvis öka slukförmågan före det att turbinens livslängd har nåtts.

#### 3.4.2 Kraftvärme

Biokraft, biogas och kraftvärme med biobränslen eller avfallsbränslen har i dagsläget inte några stora problem att få tillstånd. Detta kan delvis bero på att det inte sker någon betydande nyetablering. Nybyggnation innebär ofta en sorts generationsväxling då gamla anläggningar byts ut. Lämpliga industritomter är då redan etablerade och det sker inte någon avsevärd förändring för människor och närmiljön.

De konflikter som är kända är främst i Stockholmsområdet och stora städer. Det kan bero på att konkurrensen om mark är starkare i storstadsregionerna eller att det företrädesvis är i växande städer som nyetableringar blir aktuella. Acceptansproblematik har inneburit ett politiskt tryck som lett till att anläggningar nekats bygglov. Således är den lokala opinionen en faktor. De skäl som anges för bristande acceptans är teknikberoende. Rädsla för lukt från biogasanläggningar, oro över ökade transportmängder och därmed associerat buller och utsläpp samt markanvändningskonflikter i de fall då ny tomtmark behövt etablerats. Erfarenhetsmässigt upplevs inte emissionsfrågan som speciellt oroande för närboende och allmänhet.

Eftersom biokraftanläggningarna alltid kräver bygglov finns en acceptansrisk. Lokalpolitiker kan agera konservativt av rädsla för opinion och därför neka anläggningen tillstånd. För miljöprövningen finns sällan några betydande hinder annat än att vissa villkor kan upplevas onödigt fördyrande. Emissioner och andra frågor kan i princip alltid hanteras i miljöprövningsprocessen.

### **3.4.3 Vindkraft**

Tillståndsprocessen kan enkelt uttryckt påverka potentialen av vindkraft på två sätt. Dels genom att vissa vindkraftsprojekt inte får tillstånd alls och dels genom att tillståndet medför villkor om hur anläggningen utformas, vilket kan påverka lönsamheten.

För vindkraftverk är vindförhållanden en av de viktigaste faktorerna vid val av lokalisering. Medelvindhastigheten på platsen påverkar hur stor produktionen blir från vindkraftverket, vilket i sin tur är avgörande för produktionskostnaden för vindkraftselen.

Den tekniska utvecklingen som skett inom vindkraftsområdet har till stor del varit inriktad på att öka produktionen från vindkraftsturbinerna genom att öka storleken i alla avseenden, såväl vad gäller installerad effekt, navhöjd som rotordiameter. Genom högre torn nås högre vindhastigheter och lägre turbulens vid navhöjd, dessutom ger det möjlighet att installera större rotor. Större rotor fångar mer vind och levererar högre effekt till generatorm. Energin i vinden ökar med kvadraten på vindhastigheten. Vid en ökning med 1 m/s ökar produktionen med omkring 25 procent.

Den tekniska utvecklingen av vindkraftsturbinerna har gått snabbt. Bara för några år sedan installerades främst turbiner på 2 MW som hade en totalhöjd på högst 150 meter. Idag är det vanligt med turbiner som har en installerad kapacitet på 3–4 MW, en rotordiameter på 125–140 meter och en totalhöjd på ca 200 meter eller mer. Utvecklingen mot allt större turbiner ser ut att fortsätta.

#### Miljöfrågor i tillståndsprocessen

Att välja lämplig lokalisering för en verksamhet är inte bara viktigt för att få tillstånd en effektiv vindkraftsproduktion, det är ett krav i miljöbalken och gäller all miljöfarlig verksamhet. Lämplig lokalisering är där ändamålet kan uppnås med minsta intrång och olägenheter för människors hälsa och miljön. Miljöbalkens syfte är att främja en hållbar utveckling, och regelverket ska tillämpas så att mark, vatten och fysisk miljö i övrigt används så att en utifrån ekologisk, social, kulturell och samhällsekonomisk synpunkt långsiktigt god hushållning tryggas. Därför är valet av lokalisering en central fråga i miljöprövningen.

Vanliga frågeställningar som vägs in i besluten för vindkraftsparker som rör påverkan på miljön och människors hälsa är:

- påverkan på skyddade arter (exempelvis fåglar och fladdermöss),
- påverkan på ev. närliggande områdesskydd (t.ex. Natura 2000-områden, naturreservat eller nationalparker),
- buller från verksamheten.

Miljöbalkens krav kan således innebära begränsningar av utnyttjande av vindkraftspotentialen, om utnyttjande av potentialen leder till/ riskerar att leda till skada på miljön eller människors hälsa.

Ledtider i tillståndsprocessen

Ledtiderna i tillståndsprocessen är långa från det att en ansökan om tillstånd lämnas in till det att verken uppförs samtidigt som teknikutvecklingen går snabbt. Därför är det viktigt att tillstånden för att uppföra vindkraftverk utformas så att de ger utrymme för att utnyttja bästa möjliga teknik. I många tillstånd som beviljades för cirka 5 år sattes den maximala höjden för vindkraftverken till 150 meter, utifrån de turbin typer som var aktuella på marknaden då. Detsamma gäller även fast lokalisering av enskilda verk eller antal verk i en park som behöver ändras om nya större och effektivare turbiner utvecklats sedan tillståndet beviljats. Idag innebär sådana begränsningar att de mest kostnads-effektiva vindkraftverken som finns på marknaden inte kan installeras, vilket i sin tur kan leda till att tillståndet inte tas i anspråk.

Det finns metoder, så som boxmodellen, där den exakta utformningen av vindparken bestäms i samråd med tillsynsmyndigheten först vid uppförande. Den metoden har dock lett till avslag för vissa tillståndsansökningar.

Tillståndsgivna verk idag

I dag finns drygt 150 tillstånd för vindkraftparker på land som ännu inte har tagits i anspråk, vilka skulle kunna producera 15–20 TWh om de realiserades. Vidare finns sju tillståndsgivna havsbaserade vindkraftparker, som skulle kunna producera cirka 10 TWh om de uppfördes. Flera av dessa tillstånd löper dock ut 2018–2020, såvida de inte ansöker om förlängning. Orsaken till att dessa tillstånd för både landbaserad och havsbaserad inte har utnyttjats har inte undersökts närmare, men känt är att flera av dem saknar koncession för elnätsanslutningen. Andra tillstånd har en totalhöjd för vindkraftverken som är betydligt lägre än de verk som finns på marknaden idag. Det är också troligt att flera av dessa tillstånd aldrig kommer att tas i anspråk för att platserna inte uppfyller de förutsättningar som krävs för lönsamhet.

Det finns också ett antal landbaserade och havsbaserade vindkraftsprojekt motsvarande cirka 80 TWh<sup>53</sup> respektive 20 TWh som startat tillståndsprocessen men inte fått tillstånd ännu.

---

<sup>53</sup> Produktionskostnader för vindkraft 2016:17

Möjligheten till nya tillstånd på sikt

På kort sikt begränsar alltså inte antal givna tillstånd utbygganden av vindkraft utan det är snarare lönsamheten för enskilda projekt. Men på längre sikt behövs fler tillstånd för att få till stånd en stor utbyggnad av vindkraft i Sverige.

Det finns tecken på att konflikterna mellan vindkraften och andra markanvändningsintressen har ökat. Idag har flera projekt stoppats på grund av risk för negativ påverkan på fågelpopulationer. Ett annat centralt hinder är konflikter med Försvarmaktens intressen. Som exempel på det pekade Försvarmakten i december 2017 ut fyra så kallade lågflygningsområden, som sammanlagt täcker 15 procent av Sveriges landyta. I dessa områden har Försvarmakten nu ställt sig negativ till vindkraftsetableringar som de tidigare inte har haft några invändningar emot. Detta mot bakgrund av att de bedöms innebära en negativ påverkan på Försvarets möjligheter att öva lågflygning i dessa områden. Hur tillståndsmyndigheterna kommer att väga Försvarmaktens intressen mot andra intressen är inte klart idag, men erfarenheterna visar att det är mycket svårt att förverkliga projekt som Försvarmakten ställt sig negativ till.

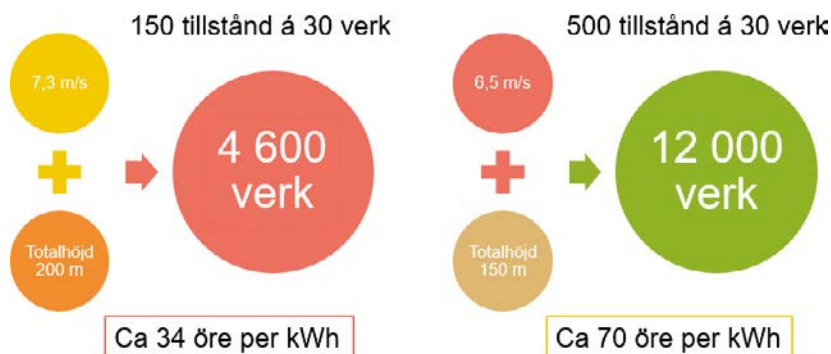
När det gäller den havsbaserade vindkraften har arbetet med att ta fram havsplaner för Sveriges vattenområden, som Havs- och vattenmyndigheten ansvarar för, visat att det finns påtagliga konflikter mellan vindkraften och i första hand Försvarmaktens intressen även till havs. Havsplanerna redovisar den användning av vattenområdena som bedöms vara den mest lämpliga och planerna ska vara vägledande vid beslut om tillstånd för olika verksamheter till havs. I de havsplaner som nu är ute på samråd har ett tiotal av Energimyndighetens utpekade riksintresse för vindbruk (områden som har synnerligen goda förutsättningar för havsbaserad vindkraft), vägts bort gentemot Försvarmaktens intressen. Energimyndighetens bedömning är därför att energiintressena inte tillgodoses i tillräcklig utsträckning i havsplanerna.

I takt med att vindkraften byggs ut ökar risken för att intressemotsättningarna blir större, exempel kan vara artskyddsfrågor, ljudstörningar eller påverkan på landskapsbild. De långa ledderna i tillståndsprövningen innebär också en utmaning i att få processen att starta i tid, så att produktionen finns på plats när den behövs. Utmaningen kan bli större när huvuddelen av den förnybara elen ska byggas efter år 2030.

Tillståndsprocessen påverkar även resurseffektivitet och kostnader

Som tidigare nämnts påverkar vindläget och tillståndets eventuella begränsningar lönsamheten för vindkraftsprojekt. Dessa frågor kan kombineras och sättas i ett systemperspektiv.

Om vi utgår från att det kommer att behövas minst 60 TWh vindkraft år 2040 för att uppnå 100 procent förnybar elproduktion så kommer det att behöva uppföras 4 600 verk om vi utnyttjar dagens turbinteknik. Om vi istället skulle utnyttja gårdagens (2011) turbintyper, på grund av begränsningar i tillstånd och sämre vindlägen skulle de krävas 3 gånger så många verk. Det skulle i sin tur innebära att det behöver planeras för och tillståndsprövas tre gånger så många vindkraftparker (nästan 500 istället för 150 parker). Genom att använda bästa teknik blir produktionskostnaderna 50 procent lägre och vindkraftverkens omgivningspåverkan och ytanspråk begränsas tack vare färre verk, vilket illustreras i figur 12.



Figur 12 Exempel på antal landbaserade vindkraftverk som krävs för att producera 60 TWh i bra vindlägen med den teknik anläggningar som tas i drift år 2020 har jämfört med ett sämre vindläge med teknik från år 2011.

### 3.4.4 Svårt och tidskrävande att få tillstånd för nya elledningar

Möjligheterna att utnyttja kraftslagets potentialer påverkas även av tillgången till elnät med ledig kapacitet för att ansluta produktionsanläggningarna. Under lång tid har det svenska elsystemet kunnat ta emot nya kunder och det har varit oproblematiskt att anslutas till elnätet. Den situationen har förändrats och det finns idag stora utmaningar med att möta behovet av ny elproduktion och användning. Nätutbyggnaden sker i takt med produktions- och förbrukningstakten. Det anses inte samhällsekonomiskt försvarbart att bygga ut nätet så att det finns överkapacitet, eftersom nätet då inte utnyttjas optimalt. Det innebär att väl fungerande tillståndprocesser, regelverk och lagstiftning inom elnätsområdet är nödvändigt om inte elnätet ska utgöra ett hinder för utbyggnaden av förnybar energi. I dag tar processen att etablera en ny kraftledning lång tid, Svenska Kraftnät räknar med 10 till 15 år, där majoriteten av tiden läggs på att utreda och få erforderliga tillstånd.

### 3.4.5 Demokratisk förankring

Den demokratiska förankringen är en viktig utgångspunkt för alla stora samhällsförändringar, det gäller även för den omställning som just nu pågår på energiområdet.

Nationellt är det folkliga stödet för energiomställningen och satsningarna på mer förnybar energi fortsatt starkt. SOM-institutet vid Göteborgs universitet mäter sedan många år tillbaka energi-opinionen Sverige. I den senaste undersökningen från 2017 uppger drygt 80 procent av de tillfrågade att de har en positiv inställning till både vattenkraft och vindkraft. När det gäller frågan om vilka energislag som svenska folket vill satsa mer på hamnar förnybara energislag i topp. Drygt 80 procent av de som deltog i undersökningen vill satsa mer på solkraft, för de övriga kommersiellt etablerade förnybara kraftslagen är motsvarande siffra 61 procent för vindkraft, 43 procent för vattenkraft och 37 procent av de svarande vill se mer satsningar på biobränsle.

Men för att nya energianläggningar ska komma till stånd är det också viktigt att det finns ett demokratiskt stöd lokalt, eftersom det är de folkvalda församlingarna som beslutar om mark- och vattenanvändningen i den egna kommunen. Särskilt uttalat är detta för ny vindkraft. Där krävs sedan 2009 en aktiv tillstyrkan från berörd kommun, i samband med tillståndsprövningen enligt miljöbalken (se miljöbalken 16 kap 4 §) för att tillstånd till vindkraftsparken ska kunna ges. En lokal opinion mot en tänkt etablering

kan på det sättet, genom de folkvalda församlingarna, påverka möjligheten att kunna genomföra en planerad utbyggnad av ny vindkraft. Därför är också lokal acceptans en särskilt viktig fråga att ha med sig när vindkraftens roll i energiomställningen diskuteras.

Alla kommuner ska ha en aktuell översiktsplan, och där anges den långsiktiga strategin för markanvändningen i den egna kommunen. Efter dialog med kommuninvånarna i olika steg fastställs översiktsplanen av kommunfullmäktige. Den blir därmed en viktig del i den lokala demokratiska processen. Energimyndigheten förordar att även lämpliga områden för vindkraft tas upp i planen. Det ökar förutsättningarna för en lokalt förankrad utbyggnad av vindkraft. Det kan också fungera styrande för projektering av ny vindkraft. För projektörerna är ett utpekade område en signal om att det finns goda förutsättningar för att få ett tillstånd beviljat. Rättspraxis visar också att översiktsplaner som omfattar vindkraft har en stor betydelse vid prövning av vindkraftsärenden.<sup>54</sup> Forskning visar tydligt att det är viktigt att medborgare är delaktiga i planeringsprocessen av ny vindkraft och att de kan påverka den för att skapa en god förankring.<sup>55</sup>

Utbyggnaden av förnybar energi motiveras bland annat utifrån ett regionalt eller globalt miljöperspektiv, och det är på denna skala de positiva effekterna kan ses. I själva tillståndsprocessen är det däremot de negativa miljöeffekterna som står mest i fokus. Det är i denna avvägning mellan positiva och negativa effekter som insatser för att exempelvis stärka den lokala nyttan när vindkraft byggs ut kan ses.

#### **3.4.6 Samlad bedömning av tillståndens påverkan på potentialen**

Det är främst vindkraft som i större utsträckning påverkas av tillståndsprocesser. Att försöka bedöma i hur stor utsträckning är dock svårt.

Ett extremfall är att inga nya tillstånd ges. Eftersom all dagens vindkraft måste prövas om skulle dessa i så fall inte kunna generationsväxlas. Då återstår bara de redan tillståndsgivna projekt som ännu inte realiserats vilket maximalt uppgår till 25–30 TWh år 2045. Flera av tillstånden kommer dock som tidigare nämnt troligen inte realiseras av andra skäl.

Ett annat extremfall är att alla tillståndsansökningar istället godkänns och realiseras. Då kan produktionen istället uppgå till väl över 130 TWh. Till det kan det tillkomma nya tillståndsansökningar.

Inga av dessa två utfall är särskilt troliga men tillståndsprocessen kommer vara avgörande för hur mycket vindkraft vi kommer att ha i det framtida elsystemet.

### **3.5 Resurser och hållbarhet har betydelse för omställningen**

Alla energislag, både fossila och förnybara, har en påverkan på miljön och är mer eller mindre resurseffektiva. I en rapport från konsultföretaget Ecofys som tagits fram på uppdrag av EU-kommissionen har de externa miljökostnaderna per producerad megawattimme för olika kraftslag inom EU undersökts vilket visas i figur 13. De största påverkansfaktorerna över alla kraftslag är klimatpåverkan, utarmning av ändliga resurser, giftighet för människor, partikelutsläpp samt användning av jordbruksmark.

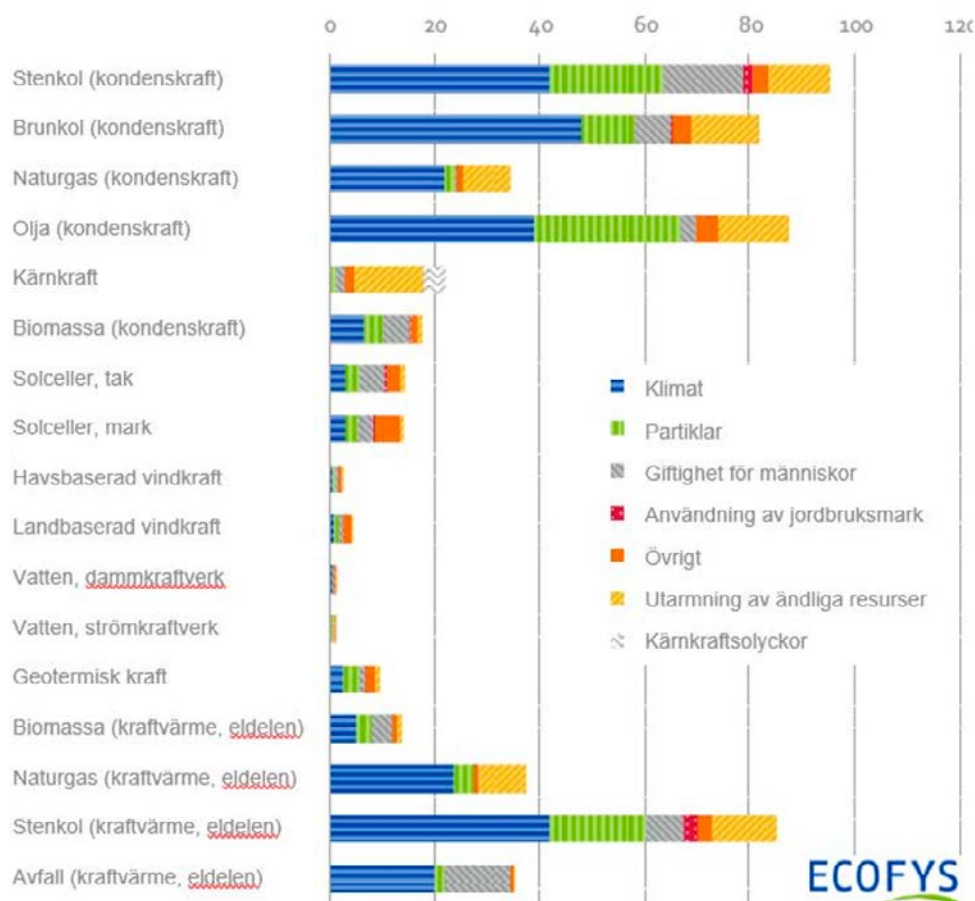
<sup>54</sup> Se myndighetens skrivelse om kommunal tillstyrkan Dnr 2016-4752.

<sup>55</sup> Se bl.a. Naturvårdsverkets rapport 6497 från Vindval om vindkraftens påverkan på människors intressen.



Externa miljökostnaderna är högst för de fossila energislagen följt av kärnkraft. Vad gäller förnybara energislag så är miljökostnaderna högst för solceller och biokraft.

Förnybart är alltså normalt i alla avseenden bättre för miljön än fossila kraftslag, men i ett system med 100 procent förnybar elproduktion blir det viktigt att jämföra kraftslagen utifrån resurs- och hållbarhetsperspektiv, för att minimera miljökostnaderna för elsystemet. Det är dock inte givet att valet står mellan antingen miljö eller energi. I många fall finns möjligheter till synergier och samexistens.

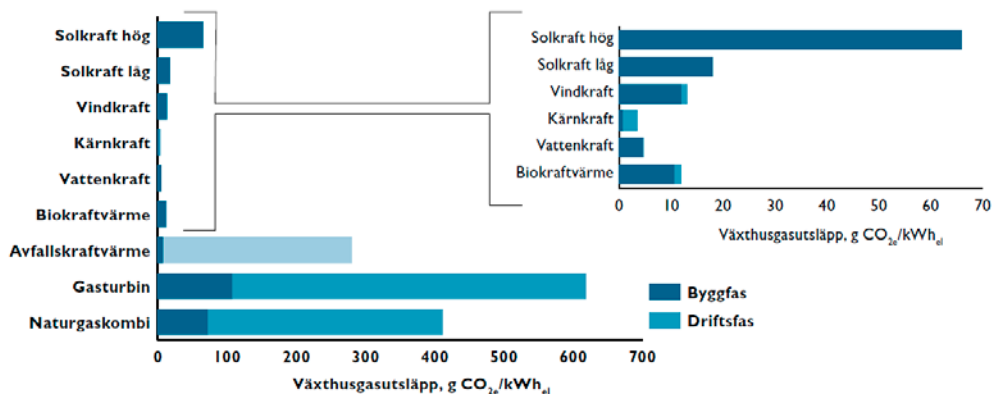


Figur 13 Externa kostnader €2012/Mwh för olika kraftslag inom EU.

Källa: Ecofys

Figur 13 från Ecofys bör gärna jämföras med figur 14 som visar på växthusgasutsläpp från svensk elproduktion i ett livscykelperspektiv. Här är det tydligt att växthusgasutsläppen från förnybara källor generellt är låga, och nära noll i driftfasen. Det är alltså i tillverknings- och byggfasen de flesta utsläpp från förnybar elproduktion sker och där åtgärder bör sättas in. Samtidigt tillverkas få produktionsanläggningar i Sverige, vilket innebär att miljöpåverkan beror till stor del på tillverkningslandets energimix samt dess miljölagstiftning. En jämförelse mellan figurena pekar även på att det finns andra miljöfrågor än växthusgasutsläpp som blir viktiga vid utbyggnad av förnybar el.





Figur 14. Utsläpp av växthusgaser från olika kraftslag.

Källa: IVA vägval el, sammanställd utifrån Miljöfakta boken 2011

### 3.5.1 Vattenkraft

Vattenkraften har låga växthusgasutsläpp vid drift och bidrar med reglerförmåga vilket kan främja utbyggnad av annan variabel förnybar elproduktion. Vattenkraftens största miljöpåverkan beror på de förändringar av vattendragens flöden, ekologiska funktion och upplevelsevärden som sker under installation och drift samt av anskaffning och tillverkning av det material och komponenter som krävs för att bygga vattenkraftverket. Vattenkraften påverkar vattendrag negativt via fördämningar, torrfåror, flödesvariation, reglerade sjöar samt kraftverkskanaler vilka ändrar vattendragens naturliga funktion. Ett vattenkraftverk utgör ett vandringshinder för fisk och hinder för transport av organismer och organiskt material, förändrade flödesmönster och vattennivåer, vilket leder detta till stora förändringar både lokalt och på avrinningsområdesnivå där storskaliga processer förändras.

### 3.5.2 Solkraft

Solceller har en låg miljöpåverkan under själva driftsfasen. Den största påverkan på miljön sker under tillverkningen av solceller då de innehåller material som är energikrävande att framställa och vissa material är även potentiellt toxiska. Då produktionsprocesserna är energikrävande beror växthusgasutsläppen till stor del på den energimix som används vid tillverkningen. Tunnsolceller kräver mindre energi i tillverkningen och mindre resurser totalt sett, men innehåller i många fall sällsynta och miljöfarliga material, exempelvis sällsynta jordartsmetaller och kadmium. Kisel-solceller är mer energikrävande att tillverka och kräver mer resurser totalt sett.

Även återvinning av solceller är energikrävande och kan potentiellt ge upphov till miljöskadliga utsläpp om det sker på ett felaktigt sätt i länder som saknar lagstiftning för hantering av elektroniskt avfall. Då tillgången på flera av de material som idag används i solceller är begränsad är det viktigt att återvinna dem. Då de solceller som säljs i Sverige tillverkas utomlands sker den största miljöpåverkan utanför landets gränser. Hur stor miljöpåverkan är beror till stor del på tillverkningslandets energimix och miljölagstiftning.

### 3.5.3 Biokraftvärme

Kombinerad produktion av el och värme med biobränsle utgör generellt ett effektivt resursutnyttjande. Ett kraftvärmeverks miljöpåverkan består i utsläppen från förbränningen, odling och transporter av biobränslen, anskaffning och tillverkning av det material och komponenter som krävs för att bygga kraftvärmeverket. Biomassans ursprung är av stor betydelse för hållbarheten. För att produktion och konsumtion av biomassa för energi eller andra ändamål ska vara hållbar får den inte orsaka avskogning eller på annat sätt minska kolförråden i ett landskapsperspektiv. Hållbar bioenergi får inte heller minska den biologiska mångfalden, minska markens långsiktiga produktionsförmåga, försämra kvaliteten hos mark eller vatten eller orsaka skadliga utsläpp av föroreningar.<sup>56</sup>

I Sverige används till största del restprodukter från skogsindustrin till energiproduktion och frågan är vilka nivåer av uttag av skogsrester som inte negativt påverkar förutsättningarna för att bioenergin ska vara hållbar. Avverkningsrester (grot och stubbar) kan potentiellt bidra hållbart med ca 27 TWh när alla miljömål beaktas.<sup>57</sup> Vidare finns potential att öka användning av avverkningsrester från gallrad skog samt av biobränslen från jordbruket både i form av rest- och biprodukter samt odling av energigrödor.

Förbränning i kraftvärmeverk orsakar utsläpp av luftföroreningar såsom kolväten, kväveoxider och partiklar. Utsläppen varierar med bränslet och förbränningstekniken. Kraftvärmeverk är stora anläggningar vilka omfattas av krav på rening av förbränningsgaserna.

### 3.5.4 Vindkraft

Landbaserad vindkraft har låg klimatpåverkan och rätt placerad även en låg direkt miljöpåverkan. Vindkraftverk innebär dock en förändring av landskapet som påverkar växter, djur och människor. I vissa fall kan känsliga biotoper störas och även fågellivet samt fladdermöss kan påverkas.<sup>58</sup> Vindkraften kan därutöver upplevas som störande på landskapsbilden och vissa människor reagerar negativt på ljudeffekter. Den största miljöpåverkan för vindkraft kommer från tillverknings- och byggnadsfasen, i många fall sker tillverkningen utomlands och miljöpåverkan beror av tillverkningsland och metoder. Många vindkraftverk använder också sällsynta jordartsmetaller som det på sikt kan komma att bli brist på.

Havsbaserad vindkraft har en liknande miljöpåverkan som den landbaserade, med skillnaden att energiåtgången och utsläppen är större under tillverkningsfasen då det krävs kraftigare förankring i fundament i djupt vatten. Miljöpåverkan kan skilja sig åt mellan vilka typer av fundament som används. I byggfasen sker arbeten i form av muddring och pålning vilket påverkar djur- och växtliv på botten negativt under en period. Placering av fundament på havsbotten kan ha en positiv effekt på marina organismer genom den så kallade ”reveffekten”. Elektromagnetiska fält från undervattensledningar kan ha effekt på ålar när de vandrar. Buller från vindkraftverk till havs kan ha en lokal effekt på djurlivet men bedöms vara marginell. Liksom för landbaserad finns en liten risk att fåglar kolliderar med verken.

<sup>56</sup> Black-Samuelsson S, Eriksson H, Henning D, Janse G, Kaneryd L, Lundborg A och Niemi Hjulfors L. 2017. Bioenergi på rätt sätt – om hållbar bioenergi i Sverige och andra länder. Rapport av Skogsstyrelsen, Energimyndigheten, Jordbruksverket och Naturvårdsverket. Rapport 10, Skogsstyrelsen. 2017

<sup>57</sup> Energimyndigheten 2018, Miljöpåverkan av skogsbränsleuttag, ER2018:02

<sup>58</sup> Vindval, 2015. Vindkraft och miljö, Vindvals lägesrapport 2015, Stockholm: Naturvårdsverket.

### 3.5.5 Anpassningar av elsystemet

För att upprätthålla effektbalans och trygga leveranssäkerheten vid en ökad andel förnybar elproduktion så kan ytterligare tekniklösningar behövas. Exempelvis via energilager såsom batterier eller vattenkraftsdammar (effekter beskrivs ovan). Även kemisk lagring såsom power-to-gas där man omvandlar el till gas för att senare kunna nyttjas i gasturbiner vid behov.

Vid användning av batterier bedöms litiumjonbatterier bli den dominerande tekniken. Litiumjonbatterier är energikrävande att tillverka och innehåller metaller som litium vilket redan idag förekommer i låga halter och kan komma bli brist på framöver. Växthusgaspåverkan beror i stort på energimixen vid tillverkningen samt hur återvinning av batterier kan komma till stånd. I dagsläget finns ingen kommersialiserad metod för att utvinna litium ur batterier.

Power-to-gas tekniken är än så länge på demonstrationsstadiet. Där kan koldioxid från industriella processer omvandlas med hjälp av vätgas producerad av el (via elektrolys med vatten) till metangas som kan användas inom transportsektorn eller till elproduktion. Tekniken är energikrävande och växthusgasutsläppen beror på vilken elmix som används. En förutsättning är att överskottsproduktion av förnybar el samt att restströmmar av koldioxid från industrin används vilket då kan minska utsläppen av växthusgaser.

Miljöpåverkan av att Sverige ibland måste importera el från Europa beror av vilken energimix som använts i Europa för att producera elen. Vid ett läge där Sverige exporterar förnybar el kan det ha en positiv effekt om det möjliggör för fossila produktionsanläggningar i Europa att minska sin produktion eller lägga ner. En förutsättning för export är att det finns kapacitet att föra över kraft inom Sverige, från Sverige och även i de länder som importerar el. Om kraft blir instängd kan den på olika sätt medföra annan påverkan på resurseffektivitet såsom låga elpriser, att el måste spillas eller att befintliga förnybara anläggningar inte längre blir lönsamma och måste läggas ner.

För transmissionssystemet är det generellt materialfasen med utvinning av råvaror och produktion av material samt byggnationsfasen med avverkning, anläggning och materialtransport som står för den största resurs- och materialåtgången.

Miljöeffekter för olika scenarier av ett 100 procent förnybart elsystem kommer att studeras vidare i nästa del av denna studie.

## 3.6 Näringslivet både påverkar och påverkas

Det svenska näringslivet har också en påverkan på framtidens elsystem ur flera olika perspektiv och därmed också på potentialen av olika kraftslag. Näringsliv är egentligen ett sammanfattande ord för all värdeskapande verksamhet vilket också gör det till den största förbrukaren av el. I det perspektivet påverkas utvecklingen av elsystemet av de behov som näringslivsverksamhet har i egenskap av elkund och vilken betalningsvilja som finns för att tillgodose dessa. En stark drivkraft som troligen kommer att fortsätta även fram till år 2045 är leveranssäkerhet till konkurrenskraftiga priser. Hur pass mycket elsystemet kommer att anpassa sig till det näringsliv som vi har idag eller hur mycket näringslivet kommer att anpassa sig till ett förändrat elsystem kan därför ses som en marknadsfråga.

Utöver själva kundperspektivet är näringslivet på olika plan en stark opinionsbildare. Önskemål från näringsliv kan bli till politik och slutligen regelverk.

Stora delar av näringslivet är redan och kommer att fortsätta vara en del av omställningen till 100 procent förnybar elproduktion. Med utgångspunkt från att företag vill skapa goodwill genom att ha en låg miljöpåverkan eller kunna sälja produkter med en låg miljöbelastning kan omställningen också locka till sig nya näringsverksamheter. Det kan exemplifieras med att företag utanför energisektorn bygger förnybar elproduktion eller köper förnybar el med långsiktiga bilaterala avtal.

Om nya näringsverksamheter lockas av förnybar elproduktion kan acceptansen för förnybar el öka både lokalt och i opinionen vilket i sin tur kan öka möjligheten att bygga förnybar el i Sverige.

### 3.7 Ekonomisk potential och lönsamhet

Den ekonomiska potentialen för ett kraftslag är egentligen vad som är lönsamt utifrån en given intäkt. Ofta jämförs produktionskostnaden med ett skattat elpris och eventuella stöd. Redan i den beräkningen kan det vara viktigt att poängtera att produktionskostnader förändras med tiden. Detta sker på grund av att teknikutveckling eller andra kostnadsbesparingar men också på grund av att räntor och avkastningskrav förändras och skiljer sig åt mellan kraftslag och olika aktörer. Även intäkten från elsystemet förändras med tiden och skiljer sig åt mellan kraftslagen, då de producerar vid olika tidpunkter och har olika grad av förutsägbarhet och möjlighet att planeras.

Att blicka framåt mot 2040-talet och utifrån lönsamhet bedöma vilka tekniker och anläggningar som de runt 100 TWh som ska byggas ska bestå av kräver ett annat angreppssätt än att bara reflektera över ekonomisk potential. Dagens intäkter från elmarknaden ger en ganska låg ekonomisk potential medan en fördubbling av elpriset skulle ge en potential större än behovet av ny elproduktion.<sup>59</sup> Istället kan utgångspunkten vara att det finns en konkurrens mellan kraftslagen både avseende uppfyllandet av målet om 100 procent förnybar elproduktion och de behov som elsystemet har.

Beroende på vad som byggs, när det byggs och var i elsystemet det byggs samt vem som står för systemkostnader (som beror på marknadsdesign) så kommer det vara olika typer av anläggningar och förnybara kraftslag som är lönsamma eller inte.

#### 3.7.1 Produktionskostnader för olika kraftslag.

Produktionskostnaden för el med olika tekniker uttrycks ofta med nyckeltalet långsiktig marginalkostnad (LCoE) i kr per kWh. Hänsyn tas då till i stort sett alla parametrar som påverkar investeringskostnader, driftkostnader och energiutbyte. Det finns flera studier som jämför produktionskostnaden mellan olika tekniker men eftersom teknikutvecklingen för sol och vindkraft är betydande tenderar siffror att relativt snabbt bli daterade.

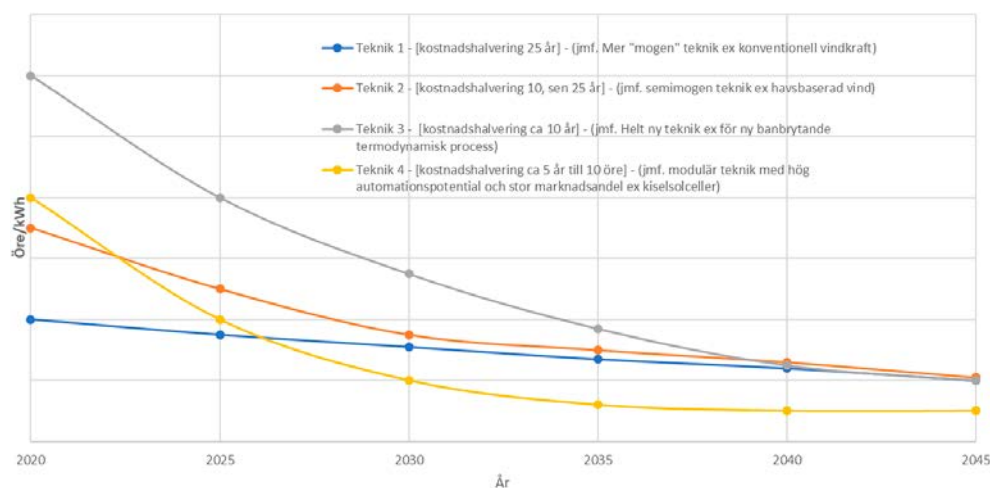
Några gemensamma nämnare för produktionskostnader för alla kraftslag är att storleken på anläggningen har betydelse, där större anläggningar oftast har lägre produktionskostnad. Kalkylräntan, som beror av exempelvis bankränta, avkastningskrav och risk, skiljer sig åt mellan aktörer, produktionslag och förändras med tiden. En ökning av kalkylräntan från 3 procent till 10 procent fördubblar produktionskostnaden antaget en avskrivningstid på 10 år.

<sup>59</sup> Havsbaserad vindkraft, Energimyndigheten, 2017. Produktionskostnad för vindkraft i Sverige, Energimyndigheten, 2016

Idag är produktionskostnaden för förnybar el på samma nivå eller lägre än kommersiell kraft. Landbaserad vindkraft uppskattas till exempel av Energimyndigheten ha en kostnad på lägre än 40 öre per kWh vilket gör den till det kraftslag som idag har den lägsta produktionskostnaden vid nybyggnation.

När framtidens produktionskostnad ska bedömas för en viss anläggningstyp måste åtminstone två parametrar analyseras. Den ena är hur mycket som redan byggts ut. Om de bästa vindlägena eller de storskaliga fjärrvärmenätens kapacitet redan tagits i anspråk kommer produktionskostnaden vara högre än om de inte gjorts. Den andra är om teknikutvecklingen leder till en generellt sett minskad produktionskostnad.

Beroende på vilken teknik som avses kan kostnadsutvecklingen vara mycket olika. Serieproducerad teknik tenderar att ha en prismässig halveringstid om inte råvarukostnaden förändras. I figur 15 illustreras kostnadsutvecklingen på fyra hypotetiska, relativt nya, tekniker som kan liknas vid de tekniker som idag dominerar utbyggnaden av förnybar el. Nyckelfaktorer är råvarukostnader och graden av automation och serieproduktion.



Figur 15. Produktionskostnadsutveckling för nyare tekniker.

Anm: Även mycket mogna tekniker kan ha en viss kostnadsutveckling men redovisas inte här som exempel.

För alla tekniker kan olika krav på miljö, teknik, säkerhet eller systemtjänster innebära kostnader. Det betyder att den verkliga kostnadsminskningen inte nödvändigtvis behöver bli så stor. För väl utvecklade tekniker där kostnadsutvecklingen är mycket mindre, så som vattenkraft och kärnkraft, kan det innebära att produktionskostnaden snarare är högre i framtiden. Som tidigare nämnts kan också en fortsatt utbyggnad innebära att de mest lämpliga platserna blir upptagna vilket också kan göra att den faktiska produktionskostnaden för enskilda projekt inte blir lika låg som i figur 15.

### 3.7.2 Intäktsanalys

Produktionskostnaden för ett kraftslag ger en indikation på vilken intäkt som krävs per kWh för att ett projekt ska vara lönsamt. Som beskrevs i avsnitt 3.3.6, medför elmarknadens olika prissignaler att intäkter för elproduktionsanläggningar kan skilja sig åt mellan exempelvis kraftslag, aktör eller geografiskt läge. Det innebär att det

krävs en analys av intäkter för olika anläggningar för att kunna göra en lönsamhetsbedömning, men även för att kunna diskutera ett eventuellt stödbehov.

Att intäkterna för ett specifikt kraftslag minskar medför att dess ekonomiska potential också minskar. Tidigare studier har exempelvis visat att en stor utbyggnad av vindkraft under 2020-talet kan innebära 35 procent lägre intäkter för vindkraft på årsbasis jämfört med spotpriset på el<sup>60</sup> medan kraftvärmeverk och vattenkraft generellt fick något högre intäkter. Slutsatsen från rapporten var att sannolikheten för att vindkraft ska vara lönsamt på 2020-talet minskade betydligt om utbyggnaden var stor.

Att göra samma analys för ett 100 procent förnybart elsystem år 2045 är dock svårare. Delvis för att tekniker på olika sätt utvecklas och får ändrade produktionsprofil, till exempel driven av just förändrade intäkter. Men svårigheten ligger också i en osäkerhet i hur resten av elsystemet utvecklas. Vilka andra elproduktionskällor som byggs ut, hur elanvändningen ser ut, vilka lagermöjligheter som finns och hur elnätet utvecklas kommer att vara centralt för intäkterna. En effektutbyggnad av vattenkraft kan exempelvis göra behovet av annan flexibilitet mindre och/eller möjliggöra för högre intäkter för variabel kraft. En mer geografisk spridning av vindkraft, både på land och till havs och utanför Sverige, ger mindre variabilitet och kan ge högre intäkter. Nya elledningar både inom Sverige och till andra länder skapar förutsättningar för att utbudet av el kan efterfrågas längre ifrån produktionen.

Vår bedömning är att den potential som påverkas mest av intäkterna är den för solel vid en stor utbyggnad. Produktionen sker till stor del under sommarhalvåret då efterfrågan på el är lägre. En mindre utbyggnad kan dock gynnas av att produktionen är som störst vid den tidpunkten när efterfrågan är som störst. Ett exempel på en större utbyggnad är att 20 TWh solceller (13 procent av dagens totala elproduktion) motsvarar cirka 20 GW i installerad effekt. Om 70 procent är tillgänglig mitt på dagen under soliga somrardagar produceras 14 GW solel samtidigt som den totala efterfrågan då sällan överstiger 15 GW. Dessutom kan nättarifferna komma att förändras så att även de som har solel och nyttjar nätet på sommaren betalar för detta. Exempelvis genom ökade fasta avgifter eller mer dynamiska tariffer som speglar knapphet på lokalnätet.

Intjäningsförmågan för solcellsproducenter vid en storskalig solcellsexpansion har undersökts i en studie från Profu. Genom olika modellkörningar görs där bedömningen av att 3–8 GW solceller (grovt sett motsv. ca 3–8 TWh) kan vara en kostnadseffektiv nivå av solel till 2035 givet dagens stödnivåer.<sup>61</sup>

I sammanhanget vill vi gärna poängtera att skillnaden i intäkter för olika kraftslag på grund av elmarknaden är något som långsiktigt är bra för elsystemet då det leder till en konkurrens om utbyggnaden av 100 procent förnybar el och flexibilitet i hela elsystemet och energisystemet. Det är snarare viktigare att se till att marknadsdesign och regelverk styr mot att åtgärder som är bra för elsystemet får betalt och tvärtom. Så länge vi samtidigt styr mot ett 100 procent förnybart.

Hur mycket potentialen begränsas av intäkterna och hur stora effekterna är i ett 100 procent förnybart elsystem behöver studeras vidare vilket ska göras i nästa steg i detta projekt.

---

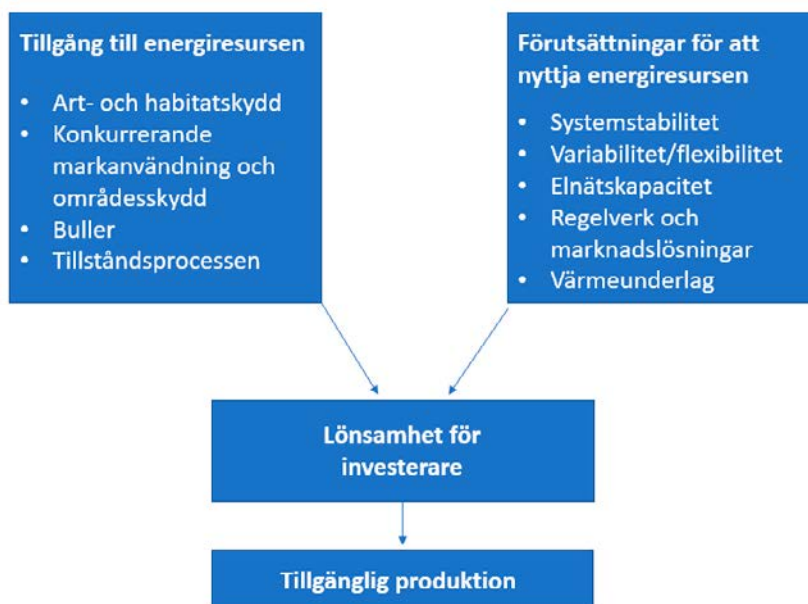
<sup>60</sup> Havsbaserad vindkraft – en analys av samhällsekonomi och marknadspotential, Energimyndigheten, 2017

<sup>61</sup> Axelsson, E. (2017) Utbyggnad av solel i Sverige. Utmaningar och systemeffekter. Profu inom Energiforsk



### 3.8 Energimyndighetens bedömningar inför vidare studier

Energimyndigheten har i ovanstående avsnitt diskuterat och definierat faktorer som kommer att påverka förutsättningarna för att bygga ut olika kraftkällor till 2045 som är målår för den här studien. Det kan konstateras att Sverige generellt har en mycket god tillgång på energiresurser, men att det samtidigt finns faktorer som kan begränsa möjligheterna att använda dem för energiproduktion. Faktorer som kan påverka utbyggnaden för olika kraftkällor och hur dessa kan påverka vilken produktion som kan byggas ut illustreras i figur 16.



Figur 16 Illustration av hur olika faktorer som kan påverka vilken produktionsutbyggnad som kan bedömas som tillgänglig för olika energikällor.

I tabell 2 nedan görs en bedömning av inom vilka intervall energiproduktion från olika kraftkällor kommer undersökas i vidare studier. Detta ska inte tolkas som en skarp gräns för utbyggnaden eller en potentialbedömning utan som Energimyndighetens bedömning av vad som utifrån de antaganden som görs för denna studie ses som realistiskt och mest intressant att undersöka framåt. Det bör även, liksom tidigare konstaterats, påpekas att utbyggnaden av ett visst kraftslag är direkt beroende av hur elsystemet i stort ser ut och av vilka andra kraftslag som finns tillgängliga för utbyggnad. Tabellen bör alltså inte tolkas som att maximal tillgänglig ökning i produktion är möjlig för alla energikällor samtidigt. Vår bedömning är ändå att vid en stor utbyggnad av förnybar el är vindkraft det kraftslag med störst potential trots en utmaning med tillstånd.

Naturligtvis är det troligt att både elproduktionsteknikerna i sig och andra påverkande faktorer kommer att ha förändras i större eller mindre mån till 2045, men det måste samtidigt konstateras att dessa processer kan ta tid. Ambitionen är här inte huvudsakligen att undersöka extremfall där olika trender och tendenser dras till sin spets. Istället är ambitionen att närmare undersöka utfall av olika möjligheter som vi redan idag kan konstatera finns. För en beskrivning av faktorer som bedöms radikalt kunna ändra spelplanen se kapitel 4. Att dessa i någon mån kommer ha påverkan på energisystemet råder det ingen tvekan om.

Tabell 2 Energimyndighetens bedömning inför kommande studier av inom vilka intervall produktion från olika kraftkällor kan vara tillgänglig till år 2045.

Kraftslag	Produktion 2017 [TWh]	Bedömning av tillgänglig ökad produktion till år 2045 [TWh/år]	Motivering
Vattenkraft	64	0	Ny utbyggnad bedöms inte troligt.
Kraftvärme	15 <sup>1</sup>	0–30	Idag starkt beroende av värmeunderlag och lönsamhet, med andra ekonomiska förutsättningar finns andra tekniska möjligheter.
Landbaserad vindkraft	17	20–100	Möjligheten att få nya tillstånd att bygga anläggningar i goda vindlägen bedöms som avgörande.
Havsbaserad vindkraft	0,6	0–40	Möjligheten att få nya tillstånd bedöms som avgörande.
Solkraft	0,2 <sup>2</sup>	3–30	Lönsamhet och efterfrågan på av elproduktion vid en större utbyggnad bedöms som avgörande.

<sup>1</sup> Inkluderar produktion från kraftverk som inte drivs på biobränsle.

<sup>2</sup> Schablonberäknad utifrån en produktion på 950 kWh/kW baserad på den totala installerade effekten 2017.



## 4 Betydelsen av omvälvande systemförändringar

Hittills i rapporten har vi utgått från vår kunskap idag och försökt uppskatta våra behov i framtiden och hur olika trender kan tänkas påverka det framtida elsystemet i Sverige. Men de trender vi ser idag kan också leda till stora teknikskiften, eller game-changers. I det här kapitlet resonerar vi mer kring hur några pågående eller möjliga utvecklingsriktningar kan förändra elsystemet och förutsättningar mer påtagligt både på nationell och internationell nivå. Även om de game-changers som beskrivs nedan kan ses som positiva för omställningen till förnybart så följs de åt av nya utmaningar, som exempel att med digitalisering följer utmaningar kring datasäkerhet. Lika väl som game-changers kan verka positivt för omställningen kan andra vara motverkande.

### 4.1 Teknikutveckling går allt snabbare

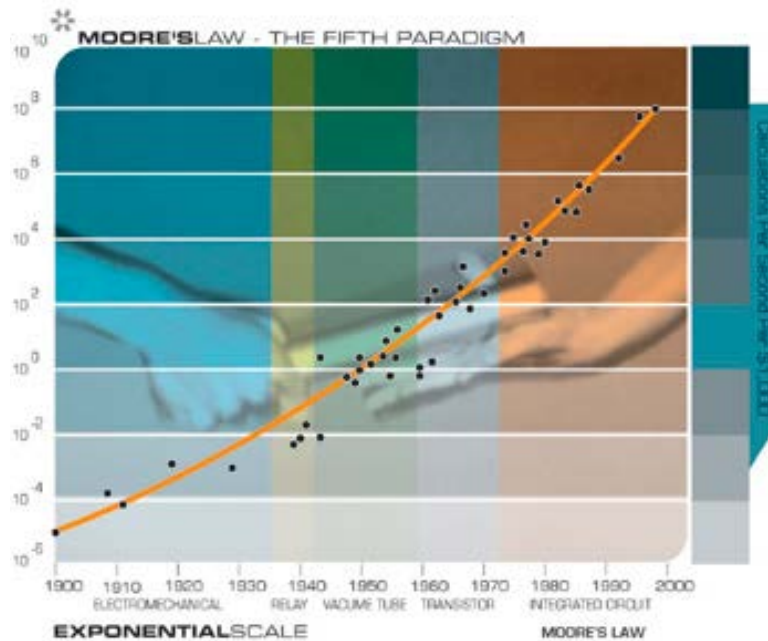
Vi befinner oss i en tid då teknikutveckling går allt snabbare. Världen har förändrats på ett radikalt sätt på flera områden bara på de senaste årtiondena. Utvecklingen inom data och IT är ett tydligt exempel på detta. Den allt snabbare utvecklingstakten har sin grund i att teknikutvecklingen inom ett antal områden sker exponentiellt. Datachip är det mest kända exemplet med Moores Lag som säger att antalet transistorer som får plats på ett chip växer exponentiellt med en takt av en fördubbling var 24:e månad. Nu börjar vi nå de fysiska begränsningarna för Moores lag då transistorerna snart bara är några atomer stora. Det behöver inte betyda att gränsen för utvecklingen av datakraft är nådd. Innan Moores lag och dagens integrerade kretsar fanns andra tekniker för att utföra databeräkningar som också uppvisar samma exponentiella tillväxt av beräkningskraft och när de fysikaliska begränsningarna för en teknik har nåtts har en ny teknik utvecklats.

Det är oerhört svårt att förutspå framtiden och vilka utvecklingsvägar som kan vara möjliga och sannolika i scenarion där utveckling sker exponentiellt. Det beror på att när utvecklingen väl har tagit fart så går den väldigt snabbt medan den är långsam till en början. Därför kan det vara svårt att se exponentiell tillväxt innan den sker eftersom den lätt kan förväxlas med ett linjärt förlopp till en början. Historien med riskorn på schackbrädet<sup>62</sup> är ett exempel som visar på vilken svindlande tillväxt som exponentiell tillväxt leder till efter en stund.

Inom energisektorn kan vindkraftens utveckling tas som ett bra och tydligt exempel på exponentiell utveckling. Tekniken började utvecklas och implementeras under 80- och 90-talet men det var få framtidsscenarier som förutspådde ett verkligt stort genomslag för tekniken. Det pekades på svårigheterna med att integrera denna variabla teknik i elsystemet och det fanns de som talade om 10 TWh som en gräns för vad som var möjligt. Idag har vi 17 TWh vindkraft i det svenska elsystemet och mycket talar för en utveckling där vindkraften blir ett dominerande inslag i den svenska elproduktionsmixen, vilket den redan är i exempelvis Danmark och Irland.

---

<sup>62</sup> Ett riskorn läggs på den första rutan, två på den andra, fyra på den tredje osv. Resultatet på den 64:e och sista rutan blir då drygt 18 triljoner riskorn (ungefär 1 000 gånger världens årsproduktion av ris 2010).



Figur 17. Moores lag var inte det första utan det femte paradigmet som bidrog till exponentiell utveckling av beräkningskraft.

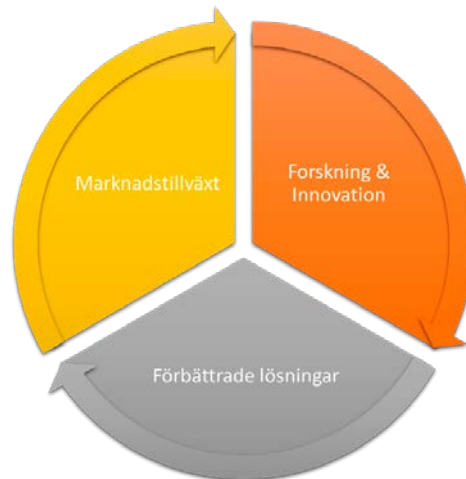
Källa: The Law of Accelerating Returns, Ray Kurzweil (<http://www.kurzweilai.net/the-law-of-accelerating-returns>).

Det är alltså väldigt svårt att göra långsiktiga scenarier för ett system som befinner sig i en omställningsprocess där vissa gamla lösningar är på väg ut och nya lösningar är på väg in. Det är också viktigt att vara medveten om att scenarier kan ha en direkt påverkan på aktörer inom området. Befintliga aktörer i ett system kan vara begränsade av att, oavsiktligt eller avsiktligt, inte se möjligheterna hos alternativen. Scenarier kan ha en viktig funktion för att visa på möjligheterna med alternativa utvecklingsvägar och skapa legitimitet åt dessa alternativ. Men scenarier kan också ha en begränsande effekt på i samhället om de inte lyckas fånga möjligheterna i ett systemskifte.

Beskrivningar av teknikutveckling och paradigmskiften fokuserar ofta mycket på själva tekniken. Det finns dock alltid en användare av tekniken som påverkas av faktorer som beteenden, normer, lagar, regler osv. Utöver den tekniska mognaden för en lösning är dessa faktorer avgörande i omställningen.

## 4.2 Om förnybar energi blir överlägset billigast

Utvecklingen inom solkraftområdet är än mer imponerande än vindkraften och utvecklingen inom området sedan solcellerna uppfanns på 50-talet är ett bra exempel på hur dynamiken i ett system med exponentiell tillväxt fungerar. Till en början var kostnaderna enorma och den enda möjliga tillämpningen var på satelliter och rymdfarkoster där funktionen som tekniken erbjöd var nödvändig för att lösa strömförsörjningen. Tack vare detta första tillämpningsområde kunde tekniken utvecklas vidare, produktionsvolymerna öka och kostnaderna sänkas. Det leder i sin tur till att nya tillämpningsområden öppnas, i detta fall som strömförsörjning på platser utanför elnätet som fyrar, båtar, etc. På så vis skapas cirklar av positiv återkoppling och utvecklingen har fortsatt till att solkraft idag byggs för storskalig elproduktion och är det billigaste elproduktionslaget på flera håll i världen.



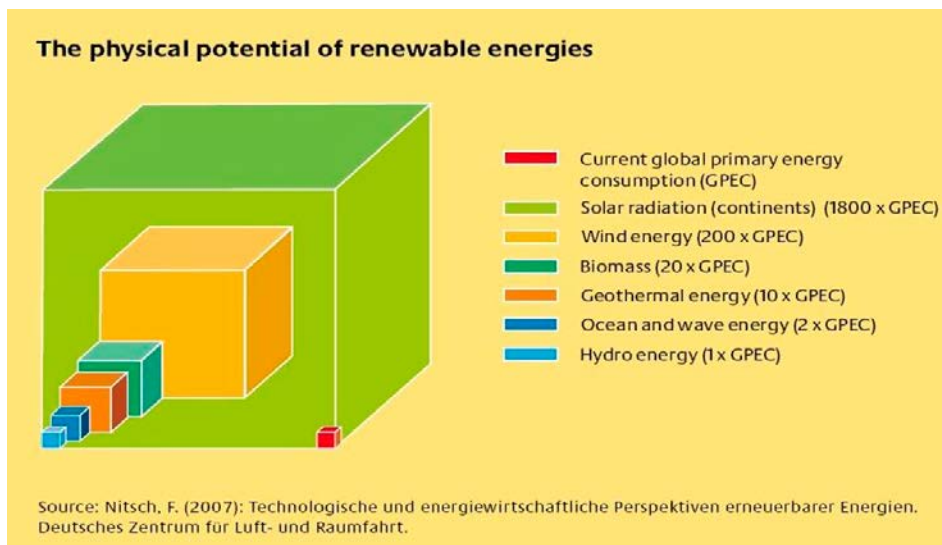
Figur 18. Enkel illustration av den förstärkande återkopplingsloopen mellan teknikutveckling och marknadstillväxt.

Precis som i exemplet ovan med hur beräkningskraften utvecklats så är potentialen stor för nya utvecklingsvägar både i form av effektivitetsförbättringar men också i form av nya produkter så som direkt produktion av energi. En framtid där solenergin blir så billig att den används överallt och det inte finns någon anledning att välja ett material som inte producerar solenergi då vi bygger något är i högsta grad möjlig. En sådan utveckling kommer att innebära en verklig game-changer för hela energisystemet och samhället i stort.

Det finns flera andra förnybara energitekniker med stor potential och det mest troliga är att vi kommer få se en blandning av olika lösningar på olika håll i världen där blandningen i ett specifikt område avgörs av lokala förutsättningar. Utvecklingen inom området geotermisk elproduktion är en potentiellt banbrytande förnybar energiteknik med stor potential. Utvecklingen av borrheter och effektiva termodynamiska kraftsystem<sup>63</sup> har potential att bli en ny konkurrenskraftig källa för kontinuerlig elproduktion dygnet runt, året om.

Poängen är att energi inte kommer att vara en knapp resurs i framtiden på samma sätt som energi i form av fossila bränslen har varit och är en knapp resurs i dagens energisystem. På så vis frikopplas även energianvändningen från klimatpåverkan.

<sup>63</sup> Det svenska företaget Climeon har utvecklat ett nytt termodynamiskt kraftsystem för att tillvarata lågvärdig värme och omvandla den till el på ett effektivt sätt och har förutom att de har sålt enheter för att tillvarata spillvärme på fartyg och industrin också tecknat avtal om att leverera geotermiska elproduktionsanläggningar i Kanada, USA, Island och Tyskland. Tekniken är en game-changer i sig som öppnar upp för nya möjligheter till omvälvande utveckling av energisystemet.



Figur 19. Fysisk potential för olika förnybara energislag i jämförelse med globala energianvändningen.

Källa: Nitsch, F (2007). Technologische und energiewirtschaftliche perspektiven erneuerbarer energien. Deutsches zentrum fur luft- und raumfahrt.

### 4.3 Om allt elektrifieras

Elektrifiering framträder allt tydligare som en möjliggörare inom allt fler sektorer för att åstadkomma klimatneutralitet och resurseffektivitet. I dagens energisystem är fortfarande bränslen i olika former den dominerande energibäraren. Om förnybar energi blir överlägset billigast, vilket beskrivs i avsnitt 4.2, så skapas god tillgång på billig förnybar el. Samtidigt medför de förnybara lösningarna att det blir allt lättare för elanvändare att ta kontroll över sin energisituation genom att själva bli elproducenter vilket beskrivs i avsnitt 4.5. Sammantaget blir elektrifiering ett intressant alternativ inom allt fler områden. Ibland för att det helt enkelt är en effektiv lösning och ibland för att det erbjuder en lösning på klimatpåverkan och resursanvändning.

I transportsektorn är elektrifieringstrenden tydlig. Elektrifieringen av vägtransporter är i högsta grad inne i en exponentiell tillväxtfas. Omställningen drivs dels av ett behov av att skapa en renare stadsmiljö i många storstäder runt om i världen men också av att elfordon blir billigast ur ett livscykelperspektiv. Med den fortsatta utvecklingen av batterier och lättillgänglig el kommer elfordon bli överlägsna fossilbränsleddrivna fordon. Stadsbussar är ett exempel där många städer redan påbörjat eller planerar att elektrifiera bussflottan och där omställningen nu går väldigt fort.

Utöver transportsektorns omställning är omställningen av olika industriprocesser till fossilfrihet och resurseffektivitet en stor utmaning. Stål- och cementproduktion utgör en betydande del av dagens CO<sub>2</sub>-utsläpp i Sverige. För bara några år sedan sågs CO<sub>2</sub>-lagring som den realistiska utvägen men idag undersöks möjligheter för nya fossilfria processer där tillgången till billig förnybar el är en nyckel till att få det att fungera. Hybrit-projektet som syftar till att utveckla en vätgasbaserad järnproduktion är ett spännande exempel. Det skapas också ny industriverksamhet som kommer kunna dra nytta av tillgången på förnybar el. Serverhallar ser vi redan hur de etableras och försöken till etablering av storskalig batteritillverkning i Sverige är ett annat. Ett ytterligare exempel på en industrigren med stor potential är återvinning och cirkulära materialflöden. När energi inte

längre kommer vara en begränsning så kommer istället begränsningen av andra resurser att bli tydligare. Det är till exempel jungfruliga råvaror av olika slag som metaller och mineraler, mark (jordbruksmark mm) och inte minst rent vatten. Resurseffektivitet och cirkulära flöden kommer vara centralt för att uppnå ett hållbart samhälle. Tillgången till förnybar el och elektrifiering kommer vara en möjliggörare för etablering av nya industrier inom detta område.

Utöver föregående exempel så utgör jordbruket den tredje stora utmaningen för omställningen till ett fossilfritt och hållbart samhälle. Till skillnad från de två tidigare exemplen så har elektrifieringen och omställningen av livsmedelsproduktionen inte diskuterats så mycket än, åtminstone inte i energisammanhang. Behoven av omställning är mycket stora, inte bara ur klimatperspektiv utan även ur ett markanvändnings- och resursperspektiv där tillgången på livskraftiga jordar utarmas allt mer. Förutom elektrifiering av redskapen och processerna så kan även elektrifiering bana väg för helt nya odlingsmetoder. Så kallad vertikal odling inomhus har helt andra förutsättningar<sup>64</sup> att skapa hållbara system som inte utarmar våra resurser. Än en gång är tillgången på tillförlitlig förnybar energi (i detta fall både el och värme) nyckeln.

Sammantaget finns det flera möjligheter som pekar på att trenden där effektiviseringar har balanserat ökad elanvändning, och den totala elanvändningen i Sverige har legat på en jämn nivå, kan brytas och att elanvändningen kan komma att öka framöver.

Avslutningsvis skapar inte bara omställningen till förnybar energi förutsättningar för elektrifiering utan elektrifiering skapar även förutsättningar för mer förnybar energi. Genom att allt fler verksamheter elektrifieras skapas större möjligheter till samverkan och styrning som möjliggör den flexibilitet som ett system med mycket variabel elproduktion behöver. Vilket leder oss till nästa game-changer.

#### 4.4 Om det finns obegränsad flexibilitet

Utvecklingen av det förnybara elsystemet går mot allt större inslag av variabel elproduktion i form av framförallt vind- och solkraft. Utmaningen och den begränsande resursen blir då inte tillgången på el utan tillgång till rätt mängd el vid rätt tid och plats, dvs systemets förmåga att erbjuda flexibilitet blir den begränsande faktor som avgör hur mycket förnybar variabel el vi kan integrera i systemet.

Precis som 10 TWh vindkraft i Sverige tidigare sågs som en övre gräns av en del så ses idag 20 TWh solkraft lika utmanande. Hela övergången till ett 100 procent förnybart elsystem är en stor utmaning just på grund av att de variabla produktionsteknikerna kommer bli ett dominerande inslag i det systemet. Det finns olika lösningar för att skapa den flexibilitet som krävs för att hantera detta och precis som för de förnybara produktionsteknikerna sker utvecklingen av nya lösningar på detta område också exponentiellt. Batteritekniken befinner sig i ett mycket spännande utvecklingsläge där produktionsvolymerna (på samma sätt som för solceller för drygt tio år sedan) väntas öka kraftigt, med efterföljande kostnadssänkningar att vänta. Det handlar inte bara om batterier utan en mängd av olika lagringslösningar som utvecklas runt om i världen just för att behovet blir allt mer uppenbart.

---

<sup>64</sup> Grödornas livsmiljöer kan kontrolleras fullständigt de kan därför förädlas mot högre näringsvärde istället för motståndskraft och inga bekämpningsmedel krävs. Det blir minskad vattenförbrukning och övergödning genom cirkulär system och en kontrollerad miljö. Det blir också mer yteffektivt då LED belysning och flera våningar kan användas.

Det blir också naturligt att vi, när vi allt mer tappar förmågan att styra på produktions- sidan, utvecklar förmågan att styra på konsumtionssidan med så kallad efterfråge- flexibilitet. Digitaliseringsrevolutionen med internet of things, big data, block chain och så vidare skapar också helt nya möjligheter för smarta lösningar som inte kräver aktivt engagemang av oss människor i systemet. De verktyg som digitaliseringen erbjuder är i många fall möjliggöraren för utvecklingen inom områden som mobilitet/transport, tillverkning/industri, byggsektorn/fastigheter och inte minst energisystemet (i traditionell mening). Vi ser också hur regelverk och politik börjar öppna upp för att främja denna utveckling. EU's så kallade vinterpaket och förslaget om "Energy citizens" är ett bra exempel som tydligt visar på denna politiska vilja.

*"All consumers across the EU will be entitled to generate electricity for either their own consumption, store it, share it, consume it or to sell it back to the market. These changes will make it easier for households and businesses to become more involved in the energy system, to better control their energy consumption and respond to price signals."*

Vi kan också med stor sannolikhet anta att om det uppstår tidpunkter då elpriset går mot noll så kommer det uppstå nya affärsmodeller och verksamheter som utnyttjar detta utbud.

Flexibilitet är en kritisk faktor för att möjliggöra 100 procent förnybar elproduktion. Därför kan vi räkna med en enorm utveckling inom detta område framöver och det är inte osannolikt att anta att denna utveckling möjliggör en obegränsad tillgång på flexibilitet i energisystemet. Det är en avgörande game-changer för möjligheterna att integrera förnybar och variabel el så som vind och sol i elsystemet.

#### **4.5 Om det sker disruption bland elsystemets aktörer**

Distribuerad el, digitalisering, flexibilitetslösningar, m.m. skapar helt nya möjligheter för nya aktörer att agera på elmarknaden. Från att ha tydligt ha skiljt på produktion och användning kommer det nu bli mer sammankopplat och samma aktörer kommer att kunna vara både konsumenter och producenter (s.k. prosumenter). Det innebär att vi kan förvänta oss många nya affärsmodeller, aktörer etc framöver.

Nu börjar också samhällets institutioner att acceptera och verka för istället för mot förändringen, precis som intentionerna i vinterpaketet visar. Det innebär ytterligare en förstärkande faktor som kan läggas till i bilden från figur 18 om positiv återkoppling i teknikutveckling och implementering. Dvs nya lösningar som utmanar det befintliga systemet kommer inledningsvis att motarbetas av det befintliga systemet och de regler som anpassats för det men i takt med att den nya lösningen mognar och dess fördelar blir uppenbara så kommer samhällets institutioner att anpassa sig för att främja det nya istället och det är då utvecklingen kan ta fart på allvar.

Det är svårt att förutsäga på vilka sätt de ändrade förutsättningarna för aktörerna kommer att påverka och vilka aktörer som kommer att leda utvecklingen. Det kommer alldeles säkert ha stor påverkan på hur elsystemet och dess aktörer kommer att se ut i framtiden. För att nå klimatmål och Parisöverenskommelsen så kommer stora delar av fossila tillgångar att behöva lämnas i marken och därmed avskrivna deras värde. Skiftet i investeringar från den fossila till den förnybara är i full gång både hos stora och små företag men kan också medföra att tidigare bolag i energisektorn försvinner och ersätts av

andra. De traditionella energibolagen har börjat undersöka nya affärsmodeller som passar det nya energisystemet och nya aktörer och aktörer från andra branscher dyker upp och utmanar befintliga strukturer.

Det är lätt att vara teknikorierad i beskrivningar av vilka förändringar som kommer att vara avgörande för framtidens samhälle men människan är så klart i centrum som användare av alla lösningar. Därför kommer våra värderingar, normer, beteenden osv vara helt centrala för vilken framtida utveckling vi kommer att få av vårt samhälle. Utvecklingen mot att fler aktörer, och inte minst enskilda användare av energi, kommer få större möjligheter att påverka och agera i energisystemet skapar större möjligheter för dessa värderingar att få genomslag. Det kommer också göra det enklare att skapa regionala och lokala system.

#### **4.6 Hur mycket och hur fort**

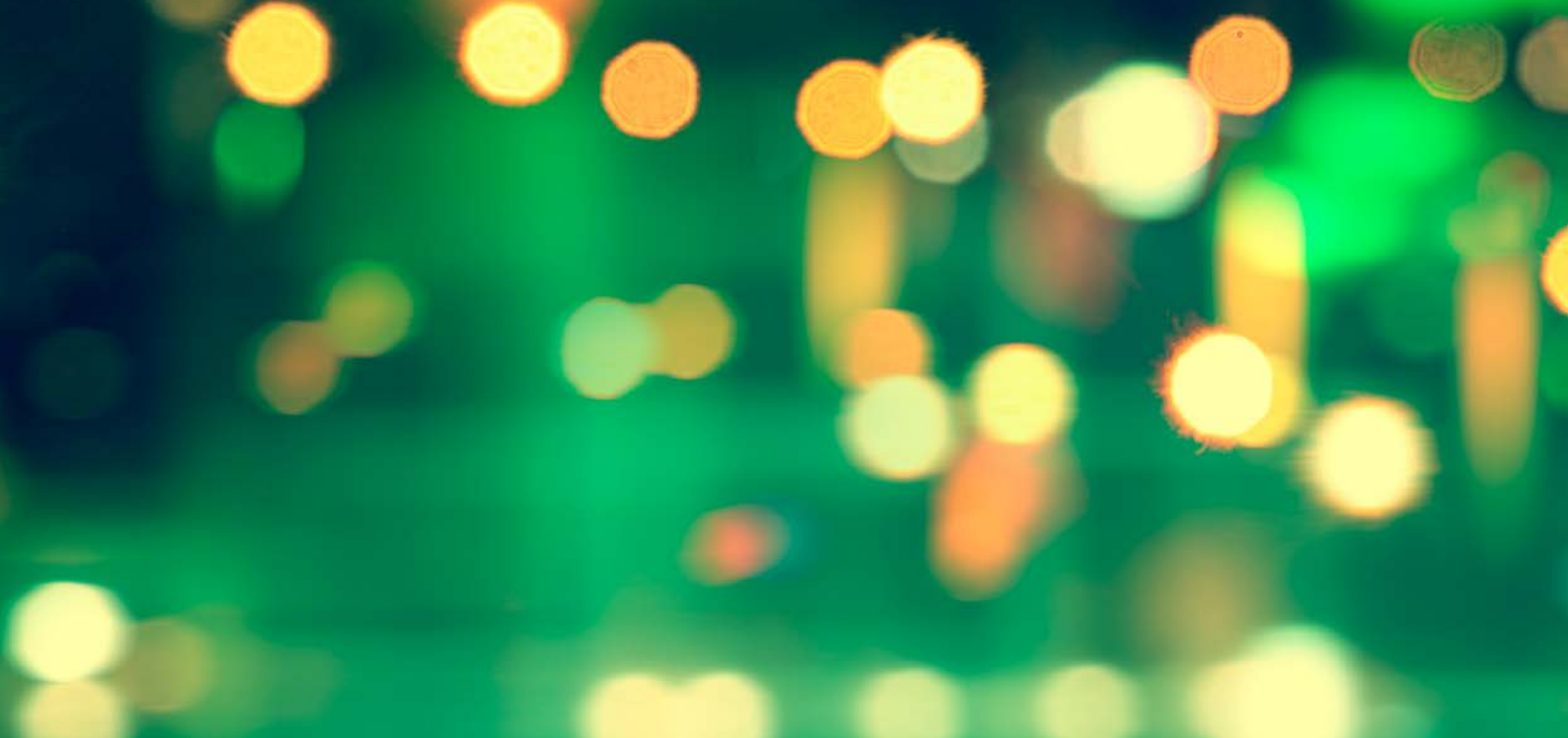
De fyra trender som beskrivits ovan är redan idag framträdande på olika sätt och de kommer utan tvivel att påverka utvecklingen inom energisektorn på ett avgörande sätt. Exakt på vilket sätt, i hur stor omfattning och hur fort är så klart svårare att förutse. Den exponentiella utvecklingstakten gör ofta att vi underskattar tiden för nya lösningar att mogna men också underskattar hur fort omställningen verkligen går när den väl sker.

Diskussionen i detta avsnitt innehåller som sagt redan kända trender. Dessa game-changers kommer också att skapa möjligheter för helt nya utvecklingsvägar och det kommer uppstå helt nya game-changers som idag inte är kända. Djupare analyser av dessa mer långsiktiga och fundamentala förändringarna av vårt samhälle görs inte i denna studie.<sup>65</sup>

---

<sup>65</sup> Läs gärna Energimyndighetens rapport Fyra framtider för mer explorativa scenarier som byggs upp utifrån vilka drivkrafter som blir styrande i samhället framöver.





## **Ett hållbart energisystem gynnar samhället**

Energimyndigheten har helhetsbilden över tillförsel och användning av energi i samhället. Vi arbetar för ett hållbart energisystem som är tryggt, konkurrenskraftigt och har låg negativ påverkan på hälsa, miljö och klimat.

Det innebär att vi:

- tar fram och förmedlar kunskap om effektivare energianvändning till hushåll, företag och myndigheter,
- ger utvecklingsstöd till förnybara energikällor, smarta elnät och framtidens fordon och bränslen,
- ger möjligheter till tillväxt för svenskt näringsliv genom att stödja förverkligandet av innovationer och nya affärsidéer,
- deltar i internationella samarbeten, bland annat för att nå klimatmålen,
- hanterar styrmedel som elcertifikatsystemet och handeln med utsläppsrätter,
- tar fram nationella analyser och prognoser, samt ansvarar för Sveriges officiella statistik på energiområdet.



Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna  
Telefon 016-544 20 00, Fax 016-544 20 99  
E-post [registrator@energimyndigheten.se](mailto:registrator@energimyndigheten.se)  
[www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se)