

Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen

En delrapport från IVA-projektet Vägval för klimatet



TEMA :
KLIMAT - RESURSER - ENERGI

SEPTEMBER 2019



Kungl. Ingenjörsvetenskaps
Akademien

Innehåll

Förord	4
Utgångspunkter	6
Observationer	8
Sektorspecifika observationer	12
Sveriges riksdag har satt en tydlig målbild	22
Sverige ska vara en klimatneutral välfärdsnation 2045	23
Sveriges utsläpp av växthusgaser	25
Energisystemet och dess komponenter	25
Förväntningar på energisystemet 2045	26
Hur möter vi behovet av bioenergi?	38
Biobränsle från skog	39
Biobränsle från jordbruk	41
Handel med biobränslen	41
Klimatnytta från biobränslen	41
Negativa utsläpp genom koldioxidinfångning och lagring från bioenergi	42
Utmaningar för att möta bioenergibehoven	43
Hur möter vi behovet av värme?	44
Potentialer för (fjärr-)värme	45
Flexibilitet i värmenäten möjliggör mer variabel elproduktion	46
Fossilfrihet i värmenäten	46
Hur möter vi behovet av el?	48
Klimatpåverkan från elproduktion	49
God teknisk potential för att möta elbehovet	49
Effektbalansering	50
Reglerförmåga	52
Import och export kan stärka reglerförmåga och effektbalansering	53
Systemdrift och driftsäkerhet	54
Kapacitet i elnäten	55
Hur kan stora mängder variabel elproduktion kan integreras?	56
Referenser	66



Förord

»Sverige har som mål att bli klimat-neutralt till 2045. IVA vill bidra med ett helhetsperspektiv i frågan för att det ska bli lättare för olika beslutfattare att väga alternativ mot varandra.«

Sveriges riksdag har beslutat att Sverige ska bli klimatneutralt till 2045. Omställningen har inletts och det finns ett stort engagemang i samhället för att arbeta med hållbarhet och klimatfrågor. IVA vill bidra med ett helhetsperspektiv för att underlätta för olika beslutsfattare att väga alternativ mot varandra. Syftet med IVAs projekt Vägval för klimatet är att ta fram förslag på åtgärder för att Sverige ska uppnå klimatmålen samtidigt som det stärker svensk konkurrenskraft.

Projektet drivs genom fem olika delprojekt:

- Industrisystem
- Transportsystem
- Energisystem
- Jordbrukssystem
- Samhällssystem

Denna delrapport belyser möjligheterna och förutsättningarna för en omställning av energisystemet.

En hållbar utveckling tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjlighet att tillfredsställa sina behov. Hållbar utveckling handlar om ekonomi, miljö och samhälle. Arbetsgruppen har valt att lyfta fram de observationer som bedömts vara de mest relevanta med koppling till ett klimatneutralt och hållbart energisystem som kan tillgodose hela samhällets behov.

Projektet har bedrivits utifrån IVAs projektmodell, i ett gränsöverskridande arbete mellan akademi och näringsliv. Det har också skett i samråd och samarbete med projektets övriga arbetsgrupper samt med ett parallellt IVA-projekt; Resurseffektivitet och cirkulär ekonomi. Vidare har arbetsgruppen utgått från tidigare studier, underlag och aktuella bedömningar om framtida teknik- och kostnadsutveck-

ling. Arbetsgruppen har i sitt arbete observerat utmaningar och förutsättningar för att Sverige ska nå klimatmålen med hög leveranssäkerhet i energisystemet och bibehållen konkurrenskraft.

Arbetsgruppen är väl medveten om att tekniksprång och förändrade marknadsförutsättningar kan förändra förutsättningarna för de analyser och slutsatser som har presenterats.

Stockholm september 2019

Arbetsgruppen för energisystem

Andreas Regnell, Vattenfall (ordförande)

Rose-Marie Ågren, Sweco (projektledare)

Anna Wolf, Power Circle

Erik Dotzauer, Stockholm Exergi, Fortum

Erik Mårtensson, Siemens AB

Filip Johnsson, Chalmers Tekniska Högskola

Gunilla Andrée, Energiföretagen Sverige

Gustav Melin, Svebio

Linda Flink, Svenskt Näringsliv

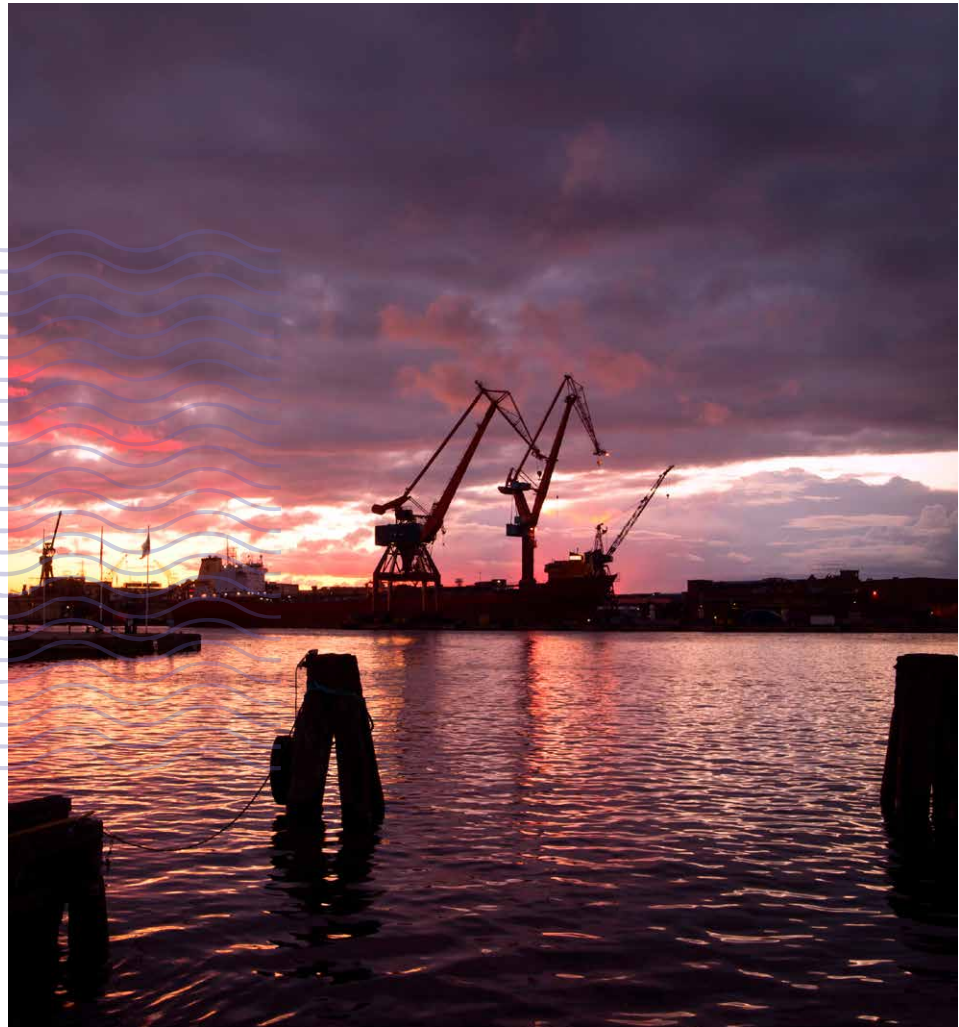
Linus Hellman, Swedegas

Stefan Thorburn, ABB

Sture Larsson, Expert kraftsystem

Arbetet har genomförts under 2018 och 2019.

Arbetsgruppen står bakom rapporten i sin helhet, men alla individer står inte bakom alla formuleringar.



Utgångspunkter

»Sverige har goda förutsättningar för att nå klimatmålen, men det betyder inte att det saknas utmaningar.«

Sveriges riksdag har beslutat att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045, för att därefter uppnå negativa utsläpp. Det röstades igenom av riksdagen den 15 juni, 2017 och ingår som en del i det klimatpolitiska ramverket tillsammans med Energiöverenskommelsen.¹ Överenskommelsen har haft stor betydelse för energisektorns aktörer i form av förutsägbarhet och långsiktighet inom energiområdet och skapar ett ramverk för de stora investeringar som måste göras.

Sverige har goda förutsättningar för att nå klimatmålen, men det betyder inte att utmaningar saknas. Samtidigt pågår en omställning av energi- och transportsystemen i många länder i vår omvärld vilket bidrar positivt till vår omställning.

Den teknikutveckling som nu sker i andra delar av världen, exempelvis kring batterier, solceller, havsbaserad vindkraft, bränsleceller och utveckling av biodrivmedel är områden som Sverige både kommer att kunna bidra till och dra nytta av. Som en del av EU ges Sverige möjlighet att verka i ett större sammanhang, där internationella samarbeten kan bidra till en effektiv omställning av både det svenska energisystemet och energisystemen i andra länder.

En hållbar energiförsörjning med god kvalitet och hög leveranssäkerhet, är nödvändigt för ett modernt och högteknologiskt samhälle som det svenska. I princip alla funktioner i samhället drivs av energi i olika former och är beroende av ett väl fungerande energisystem. Det gäller privatpersoner i hemmet, samhällsservice och transporter likväl som den tunga energiintensiva exportindustrin och andra typer av företag, både stora och små. Kund- och användarperspektivet är därför centralt då det är kunderna som driver efterfrågan på energi och i slutändan ska ha förmåga och vilja att betala.

AVGRÄNSNING

Med klimatneutralitet relaterar arbetsgruppen i denna rapport till det klimatpolitiska ramverket. Arbetsgruppen har avgränsat hållbarhetsperspektivet huvudsakligen till klimataspekter. En analys av övriga hållbarhetsaspekter har inte varit möjligt att genomföra inom uppdraget för denna rapport.

Med energisystemet avses hela infrastrukturen för el, värme och gas, bränslen samt tillförsel och omvandling av energi till olika energibärare som används i bostäder, för transporter, i industrin och för övrig samhällsservice.

Omställningen av energisystemet behöver gå hand i hand med utvecklingen av ett konkurrenskraftigt näringsliv och social stabilitet i en starkt välfärd, även om välfärdsbegreppet kommer att se annorlunda ut än idag. Omställningen kräver medvetna insatser från samhällets olika aktörer, och tydliga politiska ställningstaganden.

Sveriges energisystem har goda förutsättningar att bli klimatneutralt. Jämfört med de flesta andra länder i världen har Sveriges energisystem redan idag en låg klimatpåverkan. Det svenska energisystemets el- och värme-sektorer kännetecknas av flexibel vattenkraft, kärnkraft, stora tillgångar på bioenergi, ett väl utbyggt fjärrvärmesystem som möjliggör samtidig produktion av el och värme, vindkraft som byggs ut snabbt i stor skala, samt ett elnät med en hög leveranssäkerhet. Sammantaget ger det Sverige en god utgångspunkt i det befintliga energisystemet, som behöver tas tillvara och byggas vidare på, samtidigt som större förändringar behövs på flera områden, inte minst behöver energisystemet bättre integreras med transport- och industrisystemen.

¹ Energiöverenskommelse mellan S, M, Kd, Mp och C, i juni 2016, se avsnitt *Energiöverenskommelsen*, sid 23.



Observationer

»För att Sverige ska uppnå klimatmålen krävs en helhetssyn och förmågan att tänka nytt och agera.«

Nedan sammanfattas de viktigaste observationerna från denna rapport (referenser ges i de efterföljande huvudkapitlen).

1. Dagens energisystem kan ställas om till fossilfritt

Det svenska energisystemet kan ställas om till fossilfritt och möjliggör därmed omställningen till ett klimatneutralt och konkurrenskraftigt Sverige 2045. 2017 var den fossila andelen av energitillförseln 27 procent. (Energimyndigheten, 2019) Energisystemet är en förutsättning för i princip alla aktiviteter och verksamheter i ett modernt samhälle. Det binder samman industrier, transporter, bostäder och samhällsservice, genom el, värme och bränslesystemen.

- Det svenska energisystemet har möjlighet att fasa ut de fossila bränslena, genom en väl utbyggd energiinfrastruktur och betydande inhemska, förnybara energitillgångar.
- En starkare och mer flexibel koppling mellan olika sektorer och energibärare är nödvändig för att nå klimatmålen.
- Nya smarta tekniker och flexibla lösningar kan bygga ett mer effektivt och robust energisystem. Det finns en stor teknisk potential i att utveckla kopplingar mellan olika sektorer och energibärare, där el integreras med transport-, industri- och värmesektorerna för att skapa flexibilitet och effektivitet.

- För att klara målen till 2045, krävs att den infrastruktur som finns idag, används så effektivt och klokt som möjligt. Samtidigt måste processer och utveckling snabbas upp för att möjliggöra omställningen till den teknik och de samarbeten som behövs på längre sikt.
- En utmaning är att ledtiderna för att ställa om Sverige till fossilfrihet är långa och kräver stora investeringar.
- Det är viktigt att vi ökar vår kunskap om hur mycket Sverige kan och bör förlita sig på handel med omgivande länder för att kunna balansera elsystemet.

Framtidens energisystem kan se ut på olika sätt beroende på hur kostnader och tillståndsproucesser utvecklas för olika kraftslag och infrastruktur. Hur snabbt och i vilken omfattning nya tekniker implementeras i samhället spelar också en roll.

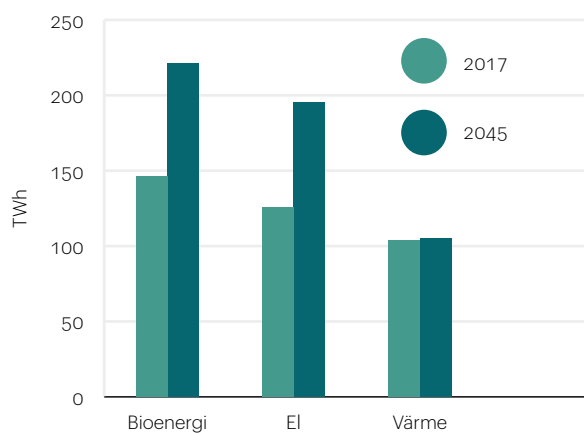
En avgörande fråga för utvecklingen av elsystemet är hur stora resurser som behövs för att alltid kunna balansera det, eventuellt utan kärnkraft, i kombination med mycket omfattande utbyggnad av vind- och solkraft och ökad efterfrågan på el. I denna fråga är bristernas varaktighet en avgörande faktor.

I Tabell 1 sammanfattas de totala bedömningarna för behoven av el, bioenergi och värme 2045, jämfört med 2017. Siffrorna är baserade på dagens kunskap om teknikutveckling och marknadsförutsättningar.

Tabell 1: Bedömning av behovet av el, bioenergi och värme 2045 jämfört med 2017, TWh.

Källa: IVA Vägval för klimatet.

Behov	2017	2045	Ökning	Procentuell förändring
Bioenergi (tillförd)	146 TWh	221 TWh	75 TWh	+50%
El (användning, exkl förluster)	126 TWh	180-205 TWh	54-79 TWh	+40-60%
Värme (användning)	104 TWh	105 TWh	1 TWh	-

**Figur 1:** Efterfrågan på olika energibärare, 2017 och 2045. Efterfrågan på el och bioenergi bedöms öka med cirka 50 procent. Efterfrågan på värme bedöms ligga på en oförändrad nivå, 2045, jämfört med 2017. Källa: IVA Vägval för klimatet

2. Stora förändringar behövs på alla nivåer och det är bråttom

Traditionellt har styrningen av energisystemet varit uppdelat mellan tillförsel, distribution och användning, samt med en tydlig avgränsning mellan till exempel energisektorn och transportsektorn. Denna ordning håller på att förändras. Inträdesbarriärerna på elmarknaden har minskat genom sänkta kostnader för sol och vindkraft, vilket banat väg för nya aktörer. Elektrifieringen och efterfrågan på bioenergi, förändrar också förutsättningarna på energimarknaden.

För att Sverige ska uppnå de klimat- och energipolitiska målen krävs större systemförändringar och förmågan att tänka nytt och agera. Några exempel på behov av förändringar:

- Utsläppen av koldioxid måste halveras mellan år

2020 och 2030 för att globalt ha en chans att hålla jordens uppvärmning till 1,5 grader. Det krävs stora förändringar inom alla områden och i ett högt tempo.

- Ett helhetsperspektiv måste anläggas på energisystemet för att identifiera de mest kostnadseffektiva lösningarna.
- Dagens affärsmodeller, marknadsplatser, styrmedel, regleringar och lagar behöver utvecklas för att möjliggöra ett effektivt, hållbart och marknadsbaserat energisystem.
- Stora investeringar krävs i produktion, överföring, lagring och lösningar för att uppnå en ökad flexibilitet i hela energisystemet, och för att möta förändrade energibehov i industrin och transportsektorn.

- Att öka flexibiliteten i hela energikedjan (produktions- och användarleden, inklusive energilagring och sektorskoppling samt import/export) utgör både stora möjligheter men också stora utmaningar som inbegriper både befintliga och nya aktörer i alla delar av värdekedjan.

Tillståndsprocesserna ska ta hänsyn till behov, värden och miljöaspekter som ibland står i konflikt med målen för att klara energiförsörjningen. Miljölagstiftningen reglerar hur denna hänsyn ska tas. Idag är tillståndsprocesserna långdragna när det gäller att få ny produktion eller överföring på plats. Det är en gemensam utmaning som observerats för alla nya typer av etableringar, oavsett om det handlar om elnät, el-, värme-, biodrivmedelsproduktion eller andra typer av verksamheter som kräver tillstånd. EUs reviderade förnybarhetsdirektiv innehåller krav på kortare processer för miljö tillstånd och nätkoncession för förnybar energi, som ska vara införda i medlemsländernas lagstiftning senast 2021.

- Tillståndsprocesserna behöver effektiviseras så långt som det är möjligt samtidigt som hänsyn tas till lokal miljöpåverkan och andra samhällsintressen.
- Förkortade handläggningstider behöver komma till stånd men får inte innebära att viktig miljö- och intrångshänsyn åsidosätts.

Det svenska energisystemet är kopplat till våra grannländer genom elnätsinfrastrukturen men också med resten av världen genom de internationella bränslemarknaderna. Energitkostnaderna påverkar konkurrenskraften för industrin och kostnaderna för transporter, såväl för privatpersoner som för näringslivet. Den tekniska utvecklingen sker i stor utsträckning i en internationell kontext. För att nya tekniska lösningar ska bli verkligt konkurrenskraftiga behöver de ofta utvecklas för större marknader än för ett enskilt land. Vilka vägar andra länder väljer, kommer att få stor betydelse för Sveriges väg mot klimatneutralitet.

- Den nationella politiken bör utvecklas i samklang med omvärldens utveckling (inte minst Norden och EU) för ett Sverige som siktar på stärkt konkurrenskraft. Både samverkan och konkurrens

med andra länder är avgörande för utvecklingen av energisystemet i Sverige.

- Sverige kan dra nytta av utvecklingen i andra länder som bidrar till nya tekniska lösningar och sjunkande kostnader för fossilfria alternativ, parallellt med egna satsningar på områden där det finns förutsättningar att ligga i framkant.

3. Tekniken är inte begränsande för omställningen av energisystemet

Det finns idag redan kända tekniska lösningar för att med klimatneutral energi möta det förväntade energibehovet 2045. Befintlig infrastruktur och andra investeringar med lång livslängd måste användas kostnadseffektivt och kunna samspela med morgondagens lösningar.

- De tekniska potentialerna för el, värme, kyla samt biobränslen och biodrivmedel är inte den begränsande faktorn, utan utmaningarna är främst kopplade till andra aspekter såsom ekonomi, miljö tillstånd, hållbarhet, regelverk, marknadens utformning och samverkansytor mellan olika sektorer.
- Den tekniska utvecklingen sker snabbt inom flera områden. Nya innovationer och lösningar kan ändra förutsättningarna för både tillförsel, överföring, lagring och användning av energi.
- Energisystemen behöver moderniseras så att smart styrning och lagring bidrar till att hålla balansen i elsystemet när andelen varierande elproduktion i form av vind- och solkraft ökar.
- Teknikutveckling inom fjärrvärmeområdet påverkar förutsättningarna på elmarknaden, då ny teknik med lågtempererade system gör att fjärrvärmesystemen kan öppna upp och ta emot spillvärme från affärscentra och datacenters vilket minskar värmeunderlaget för kraftvärmeverk och därmed möjlig elproduktion.



Sektorspecifika observationer

»Produktion och användning av el, värme och bränslen måste hanteras som en helhet för att skapa nödvändig flexibilitet i energisystemet.«

I det följande redovisas några sektorspecifika observationer för bioenergi, värmemarknaden, elsystemet och variationshantering för effektiv integrering av variabel elproduktion.

skogsmark var den 436 TWh. Till följd av bättre planteringsmaterial, skötsel och klimatförändringar bedöms skogstillväxten öka med en procent per år. Biomassan till bioenergi kommer framförallt från bi- och restprodukter från skogsbruk och jordbruk, samt från skogs- och livsmedelsindustri.

Bioenergi

4. Behov av hållbar bioenergi ökar kraftigt

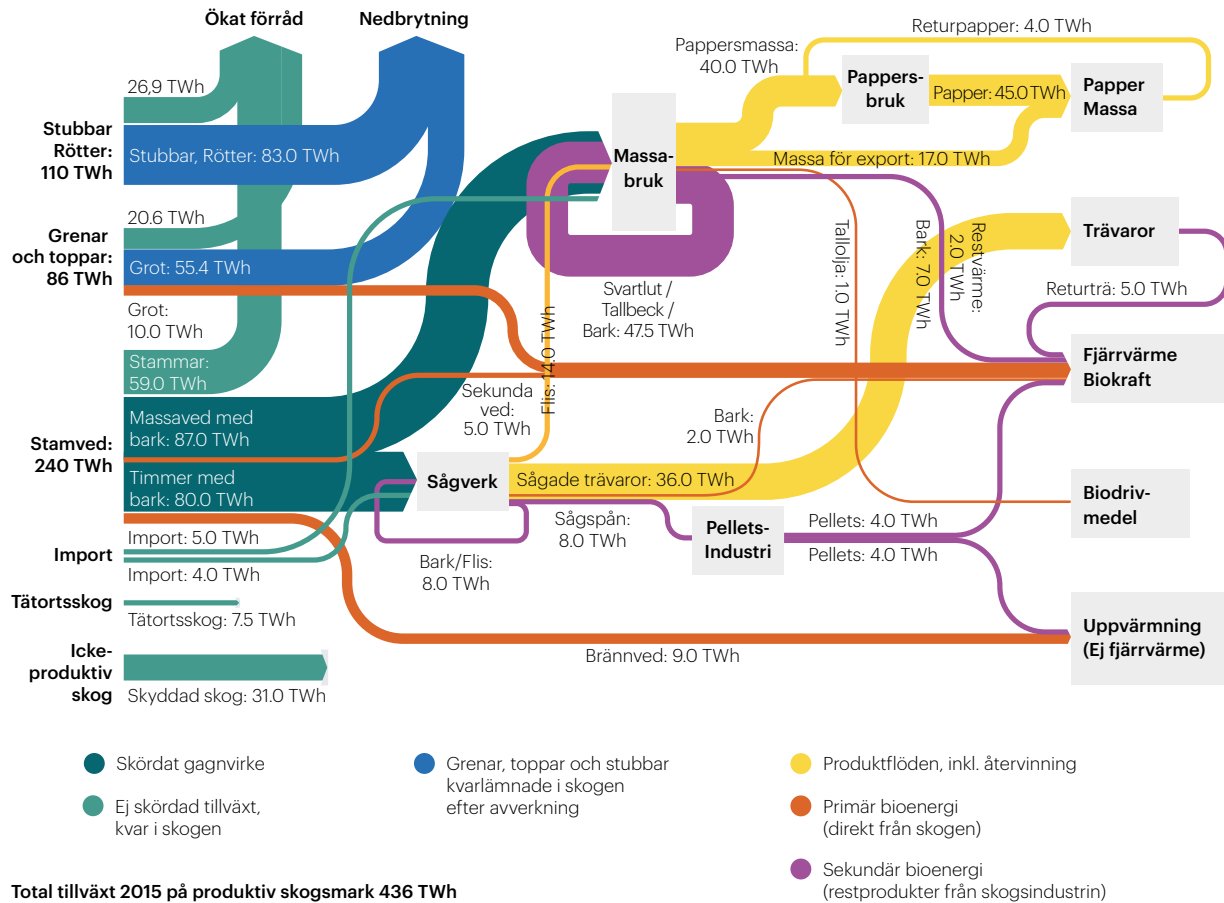
Efterfrågan på hållbar bioenergi kommer att öka kraftigt. Arbetsgruppens bedömning av behovet av tillförd bioenergi 2045, visas i tabellen nedan. Efterfrågan på bioenergi ökar i alla sektorer men i absoluta tal, mest inom transporter och industri där fossilberoendet idag är som störst.

Efterfrågan kan mötas men utmaningar finns. Bilden i Figur 2 visar den årliga skogstillväxten i Sverige 2015. På produktiv

- Ett hållbart uttag av biomassa för energiändamål från svenskt skogs- och jordbruk bedöms kunna öka från dagens nivåer på 130 TWh till 200–220 TWh år 2050.
- Det finns potential att utveckla odling av energigrödor på åkermark. I Sverige kan energigrödor odlas på 400 000–800 000 hektar som idag används extensivt. Svenskt jordbruk bidrar idag med cirka 10 TWh och kan på längre sikt bidra med 35–40 TWh per år.
- Runt 4,5 TWh av potentialen utgörs av organiskt avfall och restprodukter som kan rötas till biogas och inte bedöms ha konkurrerande användningsområden.

Tabell 2: Bedömning av behovet av tillförd bioenergi 2045 jämfört med tillförseln 2017, TWh. Källa: IVA Vägval för klimatet.

	2017	2045	Ökning
Sektorer	Tillförd bioenergi	Tillförd bioenergi	
Industri	56 TWh	80 TWh	+43%
Transporter	19 TWh	50 TWh	+163%
Bostäder & Service	14 TWh	15 TWh	+7%
Elproduktion	18 TWh	36 TWh	+100%
Fjärrvärme	38 TWh	40 TWh	+5%
Totalt	146 TWh	221 TWh	+50 %

Figur 2: Biomassa och energiflöden från svenska skogar. Källa: (IRENA, 2019)

Siffrorna är hämtade ur de officiella rapporterna "Bioenergi på rätt sätt" (Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, 2017) samt (Börjesson, 2016). Potentialerna är framtagna med hänsyn till hållbarhet och biologisk mångfald.

Fasta biobränslen och biodrivmedel är internationella handelsprodukter. Efterfrågan och priser styr därför andelen svensk råvara i den svenska bioenergimixen. Eftersom skogsindustrin är intresserad av den svenska råvaran förväntas all prima råvara gå till industrin som betalar bra och kan exportera produkter, medan avfall och restprodukter

går till energianvändning. All import regleras i förnybarhetsdirektivet RED II och måste klara beslutade hållbarhetskriterier för fasta respektive flytande biobränslen.

- Svensk bioenergi spelar redan idag en viktig roll för vår energiförsörjning. Ovanstående siffror visar att svensk bioenergi kan utvecklas vidare och bidra i utfasningen av fossila bränslen.
- Tekniskt sett kommer det finnas resurser inom landet motsvarande Sveriges förväntade ökade behov av bioenergi.

- Sverige kommer sannolikt att fortsätta att importera bioråvara för energiändamål där priset sätts på en internationell marknad.
- Skogsbruket lever med att hantera intressekonflikter på miljöområdet kring kolbalans, biologisk mångfald och levande skogar. Bioenergianvändningen är en del av denna intressekonflikt. Diskussionen kommer att fortgå för att finna en balans mellan produktionsmål och miljömål.
- Produktionen av biogas från organiskt avfall kan öka och ge klimatnyttor. För biogas är utmaningarna framförallt ekonomiska.

5. Bioenergi ger hög klimatnytta

Sverige har haft en långsiktig satsning på ett aktivt skogsbruk, inriktat på att upprätthålla hög tillväxt, vilket har gett möjlighet att öka både virkesförrådet och biomassauttaget under en lång tidsperiod. Baserat på forskning finns en bred samsyn hos svenska myndigheter avseende klimatnyttan med användning av biomassa från skogen.

- En ökad biologisk tillväxt ger ökad inbindning av koldioxid, och möjliggör ökad skörd som ger klimatnytta både genom substitution av material med stor klimatpåverkan, och substitution av fossila bränslen.
- Negativa utsläpp av växthusgaser kan åstadkommas genom att stora punktkällor såsom

rökgaser från biobränsleeldade kraftvärmeverk, och pappers- och massaindusti, förses med koldioxidinfångning och lagring; BECCS (Bio Energy Carbon Capture and Storage).

- Sverige har gynnsamma förutsättningar för BECCS (och CCS) då många av de största punktutsläppen ligger kustnära vilket möjliggör båttransport av den avskilda koldioxiden, främst till Norge där det finns planer på att bygga upp en lagringsinfrastruktur.
- Det är viktigt att påpeka att det idag saknas ekonomiska incitament för negativa utsläpp. Den så kallade klimatpolitiska vägvalsutredningen tittar i sitt arbete på hur sådana skulle kunna skapas.

Värmemarknad

6. Värmebehoven är oförändrade

Det totala värmebehovet för industri, bostads- och service-sektorerna 2045 bedöms vara ungefär detsamma som idag, det vill säga i storleksordningen 100 TWh. Av dessa kommer 50 TWh från fjärrvärme, 33 TWh från värmepumpar (som till stor del ersätter direktverkande elvärme), 2 TWh från elvärme, 1 TWh från solvärme samt 15 TWh övriga bränslen i form av träpellets, ved och annan förbränning av organiskt material lokalt i bebyggelsen. Elbehovet för värmepumpar bedöms till 7 TWh.

Tabell 3: Bedömning av värmebehovet 2045 jämfört med 2017, TWh. Källa: IVA Vägval för klimatet.

Sektorer	2017	2045	Procentuell förändring
Industri	4 TWh	5 TWh	25 %
Bostäder & Service	100 TWh	100 TWh	-
Totalt	104 TWh	105 TWh	-

7. Fjärrvärmens har en central roll i omställningen

Sverige har fjärrvärme i de flesta städer. Den spelar en viktig roll i omställningen mot ett klimatneutralt Sverige. Genom fjärrvärmens restenergi tas tillvara från till exempel industrier och datacenters, och värmeunderlaget från fjärrvärmebolagets kunder används också för samtidig produktion av el och värme i högeffektiva kraftvärmeverk.

Kraftvärmens elproduktion bidrar till att hantera lokala flaskhalsar i elnätet och bidrar nationellt med reglerbar effekt. Det finns idag cirka 3,5 GW installerad eleffekt från kraftvärme i fjärrvärmenäten. (Svenska kraftnät, 2019) Det vore positivt för elsystemets funktion om elproduktionen från kraftvärme kunde öka. Dock är fjärrvärmeunderlaget begränsat och det finns också konkurrens från andra värmekällor. En strävan måste finnas mot den mest samhällsekonomiska användningen av tillgängliga värmekällor som är uthålliga på sikt. De ekonomiska förutsättningarna för elproduktion i kraftvärmeverk är beroende av möjligheterna att sälja värme. Elpriset är också av stor betydelse, där en betalningsvilja hos till exempel elnätsföretagen för flexibilitet och kapacitet skulle kunna leda till ökad elproduktion från biokraft.

- Genom fjärrvärmesystemen kan energiresurser som annars skulle gå till spillo, nyttiggöras för uppvärmningsändamål, till exempel avfallsbränslen och restvärme från industrier.
- Utvecklingen av lågtempererade fjärrvärmesystem möjliggör ytterligare återvinning av restenergi med lägre temperaturnivåer, från till exempel avloppssystem, datacenters och köpcenters.
- Vid perioder av hög produktion av sol- och vindkraft som annars skulle riskera att spillas, och det föreligger ett värmebehov, kan elen i stället användas för att producera värme i fjärrvärmesystemen med elpannor och värmepumpar. Denna åtgärd kommer dock på sikt att konkurrera med andra åtgärder som att exempelvis ladda elfordon eller producera vätgas.

- Lokalt kan en konkurrenssituation om värmeunderlaget uppstå mellan kraftvärme och restenergi, där resurseffektivitet kan komma ställas mot elsystemets behov. Det är inte uppenbart om fjärrvärmesystemen gör mest nytta om de ska nyttjas för att ta vara på restenergi eller om de ska nyttjas för att balansera och stödja elsystemet genom elproduktion med kraftvärme och elanvändning i värmepumpar och elpannor. Eftersom behovet av uppvärmning är begränsat kan konsekvensen bli att fjärrvärmeunderlaget inte är tillräckligt för bägge syftena.

8. Fossilt material i avfallet är en utmaning för fjärrvärmens

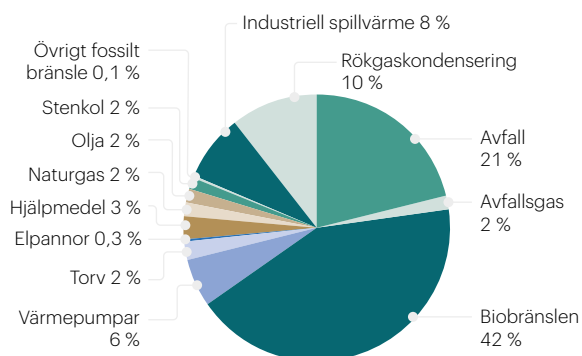
Fossilt material i avfall, framförallt i form av plast, som används för produktion av fjärrvärme och till viss del el, är värmesektorns stora utmaning för att bli fossilfri. Det är troligt att fossilt material kommer cirkulera i samhället under många år framöver och skapa fossilt avfall som behöver tas omhand på ett klimatanpassat sätt.

- För att minska de fossila utsläppen från avfallseldade energianläggningar behövs insatser och samverkan längs med hela avfallskedjan, från producenter, via konsumenter till avfallshanteringsystem och slutligen förbränningsanläggningar.
- Genom att applicera koldioxidavskiljning och -lagring (CCS teknik) på avfallseldade kraftvärmeverk, med delvis biogena koldioxidutsläpp, kan negativa utsläpp skapas.

Elsystemet

9. Behov av elenergi och eleffekt ökar kraftigt

Efterfrågan på el ökar kraftigt vid en omställning till ett klimatneutralt samhälle, enligt bedömningar inom Vägval för klimatet. År 2045 bedöms det totala elbehovet exklusive



Figur 3: Bränsle och energimix i fjärrvärmerna 2017.
Källa: Energiföretagen, 2019

Tabell 4: Bedömning av elbehovet 2045 jämfört med elanvändningen, exklusive förluster, 2017, TWh.
Källa: IVA Vägval för klimatet.

Sektorer	2017	2045	Procentuell förändring
Industri	50 TWh	82–102 TWh	60–100 %
Transporter	3 TWh	20–25 TWh	Ca 600 %
Bostäder & Service	73 TWh	75–80 TWh	Ca 7 %
Totalt	126 TWh	180–205 TWh	40–60 %

nätförluster, uppgå till mellan 185 och 205 TWh. Det kan jämföras med dagens 126 TWh, exklusive nätförluster (2017) och motsvarar en ökning på närmare 60 procent. Se också Tabell 4 ovan.

I en nyligen publicerad studie från forskningsprogrammet NEPP (North European Energy Perspectives Project) bedöms behovet av topp effekt öka från dagens 26 GW till 32 GW, 2045, baserat på en elanvändning på 177 TWh (NEPP, 2019). Inom föreliggande arbete förutses en högre elanvändning, vilket också kan innebära en ännu högre topp effekt. Sambanden ska dock inte betraktas som linjära.

- Elektrifiering är en central åtgärd för att fasa ut fossila bränslen från industriella processer. Behovet av el i industrisektorn bedöms öka från dagens 50 TWh, till 82–102 TWh 2045.
- En kraftfull satsning på elektrifiering är avgörande för transportsektorns omställning och utfasning av fossila bränslen. Behovet av el inom transportsektorn bedöms vara 20–25 TWh 2045 jämfört med 2,6 TWh 2017, enligt Vägval för klimatets arbetsgrupp för Transportsystem.
- Det totala elbehovet för sektorn bostäder & service bedöms i denna rapport uppgå till 75–80 TWh 2045, vilket är en måttlig ökning från dagens 73 TWh.
- Dagens behov av topp effekt kommer att öka, minst till 32 GW från dagens 26 GW, men sannolikt mer.
- De nya lasterna kommer att ha andra profiler än dagens och effektbehovet i framtidens elsystem kan därför komma att variera på ett annat sätt än idag.

10. Elnätsregleringen måste utvecklas för att klara elektrifieringen

Elnäten står redan idag inför stora utmaningar med moderniseringsbehov och lokala kapacitetsproblem i flera regioner. Nya krav på elsystemet drivs av både förändringar på efterfrågesidan och en ökad tillförsel av variabel elproduktion. Investeringar i nätkapacitet och finansiering genom nättarifferna omfattas av elnätsregleringen som ligger inom Energimarknadsinspektionens tillsynsansvar.

Elnätet har en avgörande betydelse för att energiresurserna i framtidens elsystem ska kunna utnyttjas effektivt. Framtidens elnät behöver utvecklas med ny teknik och byggas på ett samhällsekonomiskt kostnadseffektivt sätt. Energi-effektivisering, energilager och smart styrning bidrar till att effektivisera elnäten.

För att elnäten ska kunna utvecklas i linje med samhällets behov måste även regleringen förändras så att den möjliggör en anpassning av elnätens kapacitet och teknikutveckling, samtidigt som den säkrar konkurrenskraftiga elnätskostnader.

- Elnätsregleringen behöver utvecklas för att ge incitament för elnätsbolagen att testa och implementera nya samarbeten och nya tekniker i elnäten.
- Överföringstarifferna måste utformas på ett kostnadsriktigt sätt så att produktion och nät byggs ut på ett samhällsekonomiskt effektivt sätt.
- Beräkningsmodeller för samhällsekonomisk nytta behöver utvecklas så att samhällskostnader till följd av klimatförändringen vägs in i högre grad.

11. Elsystemet kommer att kräva stora investeringar, oavsett vägval

Elsystemet har generellt sett stora investeringsbehov i både ny produktionskapacitet och ny transmissions- och distributionskapacitet (Energimyndigheten, 2018).

För att möta den kraftigt ökande efterfrågan på el behövs investeringar i ny elproduktion. Därtill kommer uppemot 100 TWh av den befintliga elproduktionen att utvecklas inom de närmaste 20–30 åren på grund av att de uppnått sin tekniska eller ekonomiska livslängd (Energimyndigheten, 2018). Omställningen av elsystemet mot mer variabel kraft kommer också att ställa nya krav på systemtjänster² för att stabilisera kraftsystemet.

- Investeringsbehovet i ny elproduktion och överföringskapacitet kommer att vara omfattande under kommande decennier.
- Det är bråttom att utreda hur leverans av systemtjänster ska kunna säkerställas och hur den marknadsmässiga ersättningen för dessa ska etableras. Systemtjänster behöver kunna avtalas med alla aktörer inom systemet. De kan utgöras av tvingande specifika krav, vara marknadsbaserade eller en kombination av de båda.
- Framtidens energisystem kommer att kräva ett nytt sätt att tänka kring hur marknader och styrmedel utformas för att anpassa dessa till en verklighet där marginalkostnaden för att producera ytterligare en kilowattimme går mot noll. Samtidigt finns anledning att bygga vidare på de incitament som redan finns, för att säkerställa ett fortsatt effektivt nyttjande av befintliga resurser och skapa förutsägbarhet för aktörerna.

² *Systemtjänster* betecknar alla typer av tjänster som systemoperatören (i Sverige är det Svenska kraftnät) kan behöva för att hålla systemet driftsäkert, men som den själv inte råder över. Till exempel svängmassa, automatisk frekvensreglering och reaktiv effekt.

12. Möjligheter finns att möta förändrade effektbehov i elsystemet

Sverige har hittills haft god tillgång på effekt genom den stora andelen kärnkraft och vattenkraft, och ett elnät som var väl anpassat till produktionssystem och förbrukningsmönster. I takt med att andelen kärnkraft minskar och andelen sol och vind ökar, samtidigt som behovet av el ökar, kommer utmaningarna kopplade till effekt att förändras.

- I framtidens energisystem blir det viktigare när el används och inte bara *hur mycket* som används, eftersom användarflexibilitet kommer att vara nödvändigt för att möta kraftsystemets utmaningar.
- Det finns potential att i större utsträckning styra delar av elanvändningen så att den bättre kan samspela med produktionen av el. Energi som används relativt oregelbundet som laddning av elfordon, eller som har en termisk tröghet och lång stilleståndstid, som exempelvis värmepumpar och varmvattenberedare, bör kunna göras styrbar via digitalisering och deltagande på marknadsplatser för flexibilitet.
- Energieffektivisering kan minska behovet av topp effekt och därigenom bidra till ett mer effektivt energisystem.
- Elnätets sammankoppling med omgivande länder, och en därmed större geografisk sammanlagring av elsystem, vidgar möjligheterna att använda flexibilitetsresurser i andra länder. I vilken utsträckning Sverige kan förlita sig på andra länder vid bristsituationer, måste dock analyseras mer i detalj.
- Det kommer att krävas nya tjänster och tillförsel av resurser för att balansera elsystemet när andelen vind- och solkraft ökar. Den svenska marknaden för systemtjänster är under utveckling. Svenska kraftnät lanserar nya och utvecklade stödtjänster för balanshållning under år 2020 och 2021, så att fler kraftslag kan bidra och medverka till att sänka kostnaderna för balanshållning.
- Med ökande andel kraftvärme blir elsystemet mer robust, bland annat genom att effektbalansen stärks och att kraftvärmens tillför masströghet (svängmassa) till systemet. Kraftvärmeverken kan i viss mån även användas för reglering genom att anpassa produktionen efter elbehovet.

Variationshantering

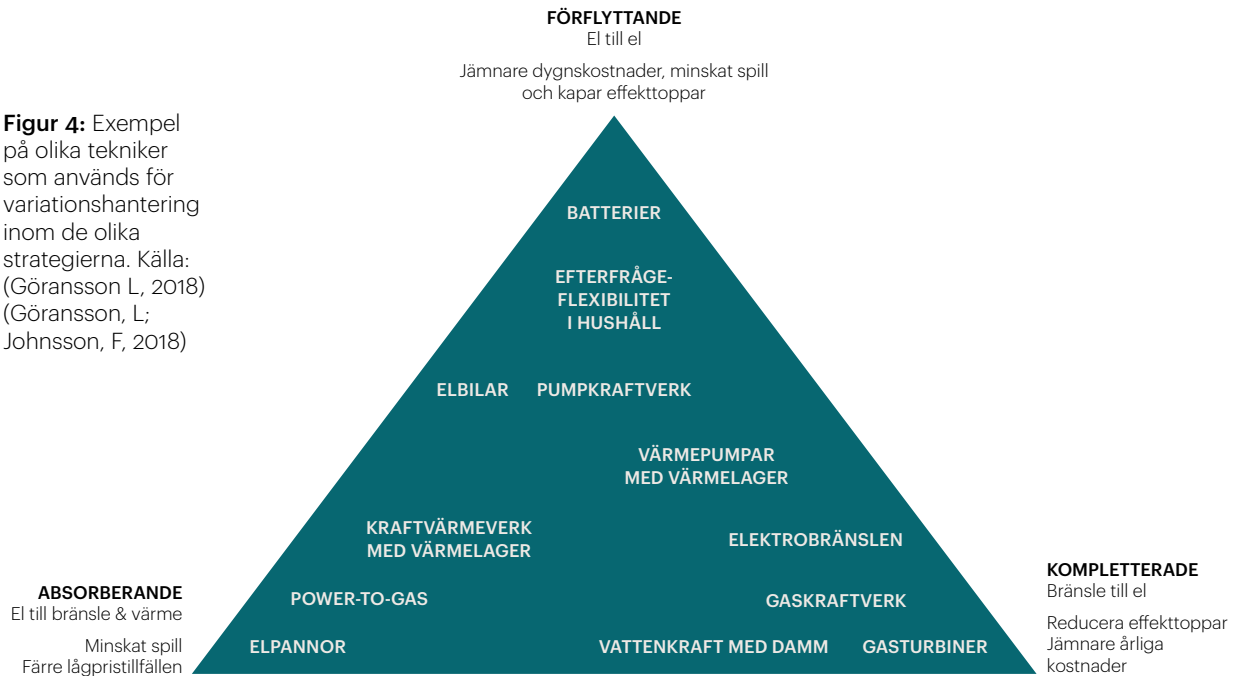
13. Omställning av elsystemet kräver effektiv variationshantering

Övergången från ett till hälften bränslebaserat elsystem med ett fåtal centrala produktionsanläggningar till ett system som i större utsträckning är baserat på flödande energikällor³ och mer variabel distribuerad elproduktion innebär en ökad utmaning att säkerställa balans mellan tillförsel och användning vid varje ögonblick.

En ökad dynamik mellan tillförsel- och användarsidan kan bidra till ett mer effektivt elsystem. Variationshantering omfattar flera strategier, inom såväl produktion, överföring och distribution som användning av el, inklusive kopplingar mellan olika sektorer och energibärare. Se figur nedan som översiktligt illustrerar de olika strategierna för variationshantering och var olika tekniker kommer in.

3 Vattenkraft, vindenergi, solenergi och geotermisk energi.

Figur 4: Exempel på olika tekniker som används för variationshantering inom de olika strategierna. Källa: (Göransson L, 2018) (Göransson, L; Johnsson, F, 2018)



Tekniker som kraftvärme och kärnkraft kan också bidra i variationshantering men kan ha ekonomiska och termiska begränsningar då de idag är optimerade för att användas som basproduktion med jämn och hög last.

En del av potentialen för variationshantering utgörs av sektorskopplingar mellan el och andra energibärare som värme och gas vilka inte kräver momentan balansering. Dessutom bidrar en bättre återkoppling (priselasticitet) till användningen av el. Även inom fjärrvärmes finns en effektproblematik som i viss mån kan hanteras med laststyrning. Genom att utnyttja den termiska trögheten i byggnaders stommar kan värmeanvändning flyttas i tid.

- Ett integrerat energisystem bidrar till ett effektivt utnyttjande av resurser och en lägre total kostnad för energiomställningen.
- Dagens marknadsmekanismer för flexibla resurser på produktionssidan, till exempel mer regionala möjligheter att optimera, behöver fortsatt utvecklas och kompletteras med nya marknadsmekanismer för variationshantering på användarsidan.

14. Tekniska variationshanteringslösningar finns men behöver utvecklas

Sverige har ett utpräglat säsongsbehov av energi och variationshantering behöver appliceras över hela tidsskalan från sekund till säsong.

Idag skapas nödvändig flexibilitet i elsystemet främst genom att elaktörerna handlar sig i balans på elbörsen Nordpool, Svenska kraftnäts uppdrag att hålla frekvensen och balansen i systemet samt de balansansvarigas skyldighet att ekonomiskt planera sig i balans. Dagens system måste kompletteras med fler aktörer som inkluderar användare av el, och nya tekniker.

Det finns flera olika tekniker, varav en del befintliga, som kan bidra till variationshantering:

- Batterier medför lagringsmöjligheter främst under kortare tidsperioder och kan placeras på olika nivåer i energisystemet.
- Effekttutbyggnad i vattenkraften kan öka möjligheterna till variationshantering.

- Laddning av elfordon inklusive möjlighet till återmatning till nätet (så kallad "Vehicle-to-grid") samt styrning av värmepumpar och varmvattenberedare i bostäder är andra exempel där digitaliseringen kan möjliggöra variationshantering.
- Kraftvärmeverk kan prioritera värmeproduktion under låglastperioder, och lagra värmeenergin i ackumulatortankar till höglastperioder då elproduktionen kan maximeras.

15. Vätgas kan utgöra en koppling mellan el, värme och bränslesystemen

Vätgas är en energibärare som kan få en viktig roll i det framtida energisystemet. Förutom att möjliggöra lagringsmöjligheter för variabel elproduktion, kan vätgas användas i olika industriella tillämpningar och som bränsle i transportsektorn. Idag används vätgas som insatsvara i kemisk industri och i raffinaderier för att göra bensin och diesel. Vätgasen framställs vanligen ur naturgas som är ett fossilt bränsle. Vätgas kan på motsvarande sätt produceras ur biogas. Vätgas kan också framställas genom elektrolys av vatten, där vattnet (H₂O) sönderdelas i syre och väte. Konceptet brukar benämnas "power-to-gas". I dagsläget är det inte lönsamt, men tekniskt finns följande möjligheter;

- Om sol- och vindkraft stundtals bidrar till att utbudet av el är större än efterfrågan, kan produktion av vätgas avlasta elsystemet och nyttiggöra energin som bränsle i andra delar av energisystemet.
- Vätgasen kan antingen användas direkt i vätgasbilar eller i industriella processer, eller användas för att förädla biobränslen, till exempel bioolja till biobensin/ biodiesel, eller metan (biogas).
- Vätgasen kan också lagras och återanvändas för elproduktion, men utmaningar finns avseende kostnader för lagring.
- Inom industrin kan vätgas utgöra en lösning i sektorer som annars har stora utmaningar att bli fossilfria.
- En ökad produktion och användning av vätgas, genom till exempel power-to-gas, möjliggör att fjärrvärmesystemet kan ta tillvara på överskottsvärmen från elektrolysen och därigenom höja resursutnyttjandet.

16. Marknadsmekanismer för nya samverkansformer behöver utvecklas

Resurser för variationshantering finns på olika ställen i systemet och kontrolleras av olika aktörer. Det gör att de kan svara upp mot behov men också att det behöver etableras nya samverkansytter och marknadsroller. Merparten av de fysiska möjligheterna till variationshantering som kommer att behövas av balansansvariga, kraftproducenter, nätägare och systemansvariga, finns hos andra resursägare, och i andra sektorer, med andra förväntningar och kunskaper, exempelvis hushåll, individer, fastigheter, företag och industrier.

Dagens regelverk är inte heller anpassat för den utveckling vi ser. En power-to-gasanläggning är ett exempel där regelverket behöver förtydligas kring vilka roller inblandade aktörer tillåts ha. Dagens reglering medger till exempel inte att nätägare, vare sig för el- eller gas, kan investera i, och äga en power-to-gas-anläggning. Drivkrafter hos nätägaren kan vara att hantera överskottssituationer i elsystemet eller möjliggöra en ökning av andelen förnybar gas i gasnätet.

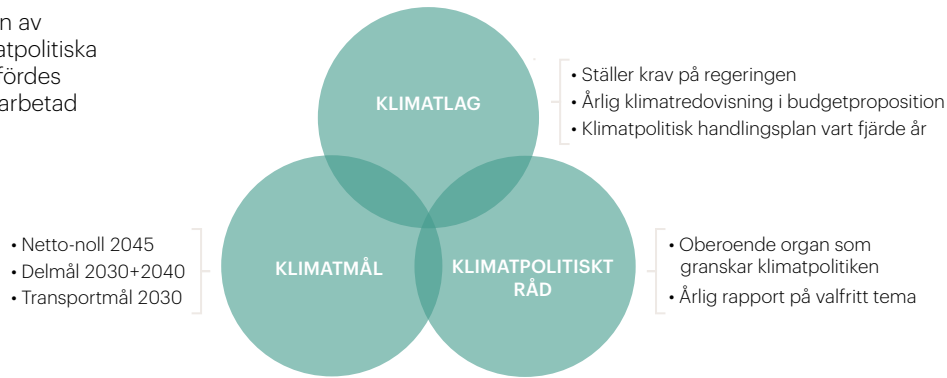
- Nuvarande regelverk behöver moderniseras för att hantera förändrade relationer mellan produktion, distribution och lagring.
- Nya marknadsplatser behöver etableras, och regelverk och standarder skapas, för utveckling av fler resurser för variationshantering. Nya roller kommer att etableras i energilandskapet för att utnyttja sammanlagringseffekter genom digitalisering.
- Lönsamheten är en utmaning för nya tekniker innan de nått kommersiell skala. Exempelvis är power-to-gas beroende av den framtida nivån på elpriset samt den tekniska utvecklingen på främst elektrolysörer och bränsleceller, för att driva ned kostnaden.



Sveriges riksdag har satt en tydlig målbild

»Energiöverenskommelsen har stor betydelse för förutsägbarhet och långsiktighet inom energiområdet.«

Figur 5: Illustration av delarna i det klimatpolitiska ramverket som infördes 1 januari, 2018. Bearbetad av Sweco.



Sverige ska vara en klimatneutral välfärdsnation 2045

Sveriges riksdag har beslutat att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045, för att därefter uppnå negativa utsläpp. Det röstades igenom av riksdagen den 15 juni, 2017 och ingår som en del i det klimatpolitiska ramverket tillsammans med Energiöverenskommelsen. (Regeringen, 2016) Det klimatpolitiska ramverket utgörs av tre delar som illustreras i figuren ovan.

Mer specifikt innebär målet om netto-nollutsläpp till år 2045, en minskning av utsläppen av växthusgaser inom svenskt territorium med 85 procent mellan 1990 och 2045. Resterande utsläppsminskning kan nås med kompletterande åtgärder, till exempel verifierade utsläppsminskningar i andra länder, koldioxidavskiljning och lagring eller ökat upptag av koldioxid i skog och mark.

Sveriges klimatmål ingår som ett av målen inom miljömålssystemet.⁴ Dess övergripande målsättning utgörs av det

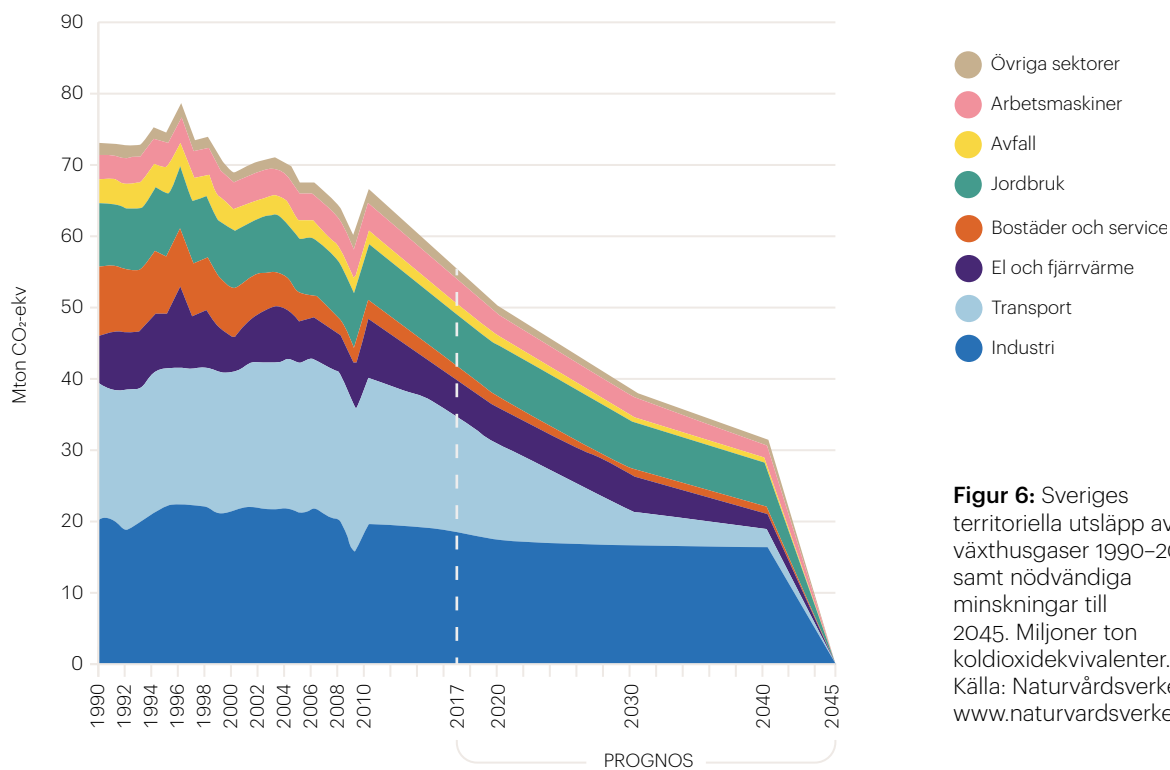
så kallade generationsmålet, som innebär att Sverige "till nästa generation ska lämna över ett samhälle där de stora miljöproblemen är lösta, utan att orsaka ökade miljö- och hälsoproblem utanför Sveriges gränser".

Det finns ett antal lagar, ramverk och överenskommelser att förhålla sig till för ett energisystem som möjliggör ett klimatneutralt Sverige 2045.

Energiöverenskommelsen 2016

I juni 2016 slöt Socialdemokraterna, Miljöpartiet, Moderaterna, Centerpartiet och Kristdemokraterna en överenskommelse om Sveriges långsiktiga energipolitik. 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 kärnkraftverk med politiska beslut. Denna överenskommelse har haft stor betydelse för energisektorns aktörer i form av förutsägbarhet och långsiktighet inom energiområdet.

⁴ Miljömålssystemet består av ett generationsmål, 16 miljö kvalitetsmål samt ett antal etappmål inom områdena avfall, biologisk mångfald, farliga ämnen, hållbar stadsutveckling, luftföroreningar och klimat.



Figur 6: Sveriges territoriella utsläpp av växthusgaser 1990–2017 samt nödvändiga minskningar till 2045. Miljoner ton koldioxidekvivalenter. Källa: Naturvårdsverket, www.naturvardsverket.se.

Tabell 5: Sveriges utsläpp av växthusgaser, 2017. Källa: (Naturvårdsverket, 2019)

Sektorer	2017 kton CO2ekv.
Produktanvändning (inkl. lösningsmedel)	1 694
Avfall ¹	1 253
Arbetsmaskiner	3 351
Egen uppvärmning av bostäder och lokaler	969
El och fjärrvärme ² (exkl. industrins el- och värmeproduktion)	4 413
Jordbruk	7 187
Inrikes transporter	16 590
Industri (inkl. el- och värmeproduktion inom industrin)	17 203
Totalt utsläpp inom landet	52 660
Utrikes transporter	10 632
Totalt inklusive utrikes transporter (bunkerolja)	63 292
Markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk, (LULUCF³)	-43 727

¹ Främst metanavgång från deponier. ² Inkluderar avfallsförbränning. ³ Land use, Land use change and Forestry.

Sveriges utsläpp av växthusgaser

Sveriges utsläpp av växthusgaser inom landet uppgick till 52,7 miljoner ton koldioxidekvivalenter, 2017. Utsläppen härör i stor utsträckning från energianvändning, men även från icke-energiändamål såsom till exempel kalkförbränning vid cementtillverkning, djurhållning och användning av lösningsmedel. De totala utsläppen av växthusgaser visas i Tabell 5 och i Figur 6.

Årligen binds också netto cirka 44 miljoner ton koldioxid-ekvivalenter i marken. Utsläpp förorsakas även av utrikes transporter, såväl till som från landet, samt genom tillverkning av produkter i andra länder som konsumeras i Sverige.

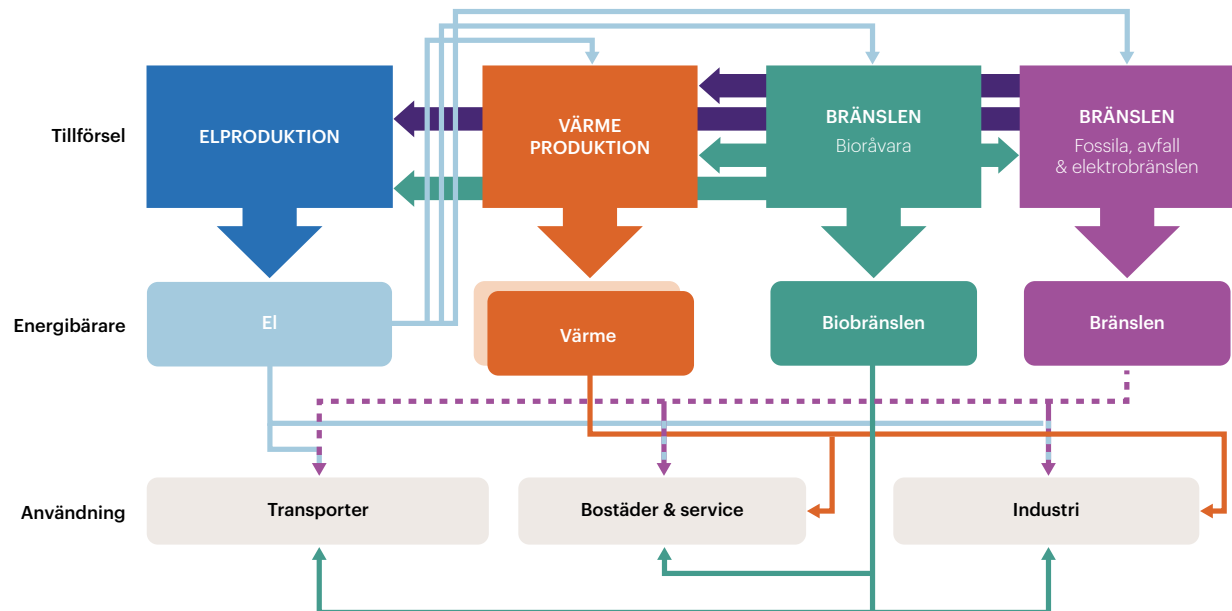
Projektet Vägval för klimatet fokuserar på Sveriges territoriella utsläpp och denna rapport diskuterar utsläpp från Sveriges energiförsörjning.

Energisystemet och dess komponenter

Sveriges energitillförsel uppgick till totalt 565 TWh, 2017. Och slutanvändningen av energi uppgick till 378 TWh. Då har förluster för omvandling och transport av energi samt användning för icke-energiändamål räknats bort.

Av den totala energitillförseln 2017 gick 25 procent till industrin, 15 procent till transporter, 26 procent till bostäder och service och 28 procent till förluster i energisystemet, samt 7 procent till användning för icke energiändamål (Energimyndigheten, 2019). De olika energibärarna i energisystemet har olika egenskaper och skiljer sig åt i energikvalitet vilket gör att en MWh av ett visst energislag inte är direkt utbytbar mot en MWh av ett annat energislag. I Figur 7 nedan visas hur energisystemets olika delar hänger ihop. Analyserna och diskussionen i rapporten utgår ifrån detta helhetsperspektiv.

Figur 7: Energisystemets olika delar. Bearbetad av Sweco.

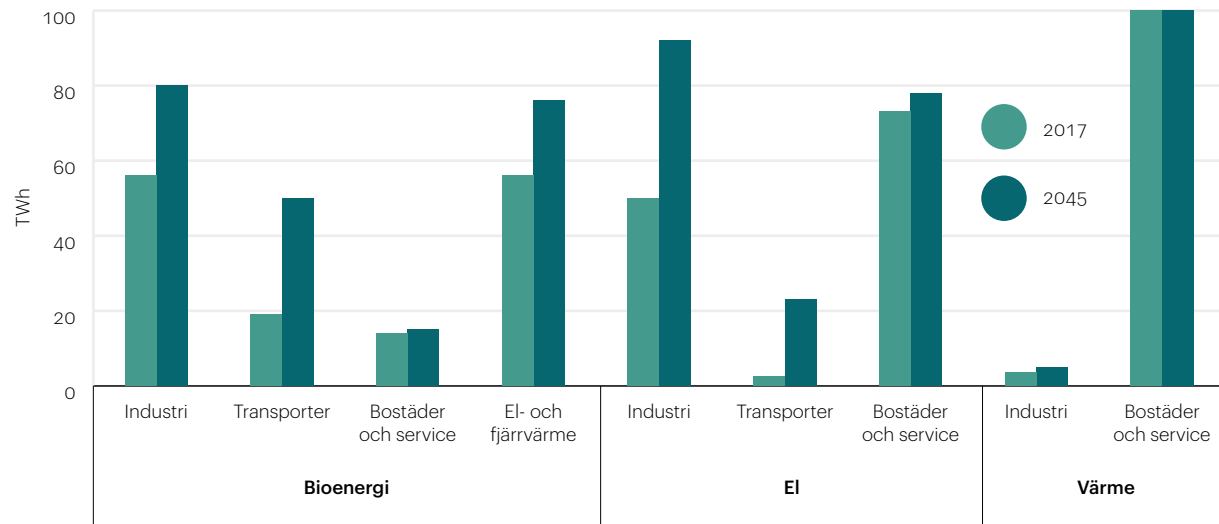




Förväntningar på energisystemet 2045

»Kraftigt ökade behov av klimatneutral el och hållbar bioenergi för att fasa ut de fossila bränslena.«

Figur 8: Efterfrågan på olika energibärare fördelad på olika sektorer, 2017 och 2045. Efterfrågan på el och bioenergi bedöms öka med cirka 50 procent, mest inom industrin och för transporter. Efterfrågan på värme bedöms ligga på en oförändrad nivå, 2045, jämfört med 2017. Källa: IVA Vägval för klimatet



En utveckling och omställning av energisystemet som samtidigt stärker Sveriges konkurrenskraft måste kunna möta samhällets behov. I takt med ändrade drivkrafter hos energi-användarna kommer dessa behov att förändras över tid.

Efterfrågan på fossilfri el och bioenergi kommer att öka för att vi ska kunna fasa ut fossila bränslen, mest inom industrin och för transporter. I diagrammet ovan visas hur efterfrågan bedöms utvecklas mellan 2017 och 2045, fördelat på olika sektorer. Efterfrågan på värme bedöms ligga kvar på en oförändrad nivå. I det följande beskrivs de olika sektorerna mer i detalj.

Industrins behov av energi

Industrins årliga utsläpp av växthusgaser är i nuläget cirka 17 miljoner ton koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar en tredjedel av Sveriges totala utsläpp.

Den svenska industrins energianvändning uppgick till 143 TWh, 2017 (Energimyndigheten, 2019).⁵ Dominerande energislag är el och biobränslen av olika slag. Dessa tillsammans står för 74 procent av energivarubalansen (Energimyndigheten, 2019). Omställningen av den svenska industrin bör bygga på teknikutveckling av klimatsmarta produkter och utveckling av metoder för klimatneutral

5 Industrisystemgruppen utgick från SCBs statistik med en delvis annan avgränsning gällande interna bränslen, vilket gör att de redovisade industrins energianvändning som 136 TWh, 2017. (IVA Arbetsgruppen för industri, Vägval för klimatet, 2019) I denna sammanställning av hela energisystemet väljer vi att utgå från Energimyndighetens statistik (Energiläget i siffror 2019), så att helhetsbilden tillsammans med transporter och bebyggelse och service, stämmer.

Tabell 6: Industrins energianvändning och klimatpåverkan, 2017. Källa: (Energimyndigheten, 2019), (SCB, Statistikdatabasen, 2019)

Industrin		TWh
Energianvändning 2017, (TWh)	Biobränslen	56,1
	Kol och koks	14,1
	Eldningsolja	9,9
	Natur- och stadsgas	4,2
	Övriga bränslen	5,8
	Fjärrvärme	3,4
	El	49,8
Totalt	143	
Utsläpp av växthusgaser 2017	17,2 Mton CO ₂ -ekv.	

Tabell 7: Industrins behov av biobränsle, el och värme 2045, TWh. Källa: Arbetsgrupp för Industrisystem och Arbetsgrupp Energisystem.

	Biobränsle	El	Värme
Användning 2017	56 TWh	50 TWh	3,5*) TWh
Användning 2045	74–88 TWh	82–102 TWh	5 TWh

* köpt fjärrvärme.

produktion genom bland annat effektiv energiledning och användning av IT-system.

IVAs arbetsgrupp för Industrisystem bedömer att el och biobränslen är avgörande för omställningen i alla delar av industrin. Även energieffektivisering, ökat tillvaratagande av restprodukter, användning av vätgas och koldioxidavskiljning och lagring, är åtgärder som bedöms bidra till att minska industrins utsläpp.

År 2017 var industrins totala användning av el 50 TWh och biobränsleanvändningen 56 TWh. Arbetsgruppen Industri-

system bedömer (IVA Arbetsgruppen för industri, Vägval för klimatet, 2019) att det behövs mellan 32 och 52 TWh mer el till 2045, beroende på teknikval. Det inkluderar också el för produktion av vätgas.

Biobränslebehovet bedöms öka med 18–32 TWh, beroende på val av teknik.

Biobränslena som efterfrågas är i stor utsträckning högfördädlade, både gasformiga, fasta och flytande. Tabell 7 visar industrisektorns bedömda totala behov av biobränsle, el och värme 2017 och 2045.

Transportsektorns behov av energi

Transportsektorn står för en tredjedel av Sveriges utsläpp av växthusgaser och är i stor utsträckning beroende av fossila drivmedel. Att fasa ut dessa är därför centralt för transportsektorns omställning.

Totalt använde transportsektorn 88 TWh framdrivningsenergi, varav 22 procent är biodrivmedel och 3 procent el (år 2017). Således utgörs 75 procent av fossila bränslen. (Energimyndigheten, 2019)

Viktiga åtgärder för en utfasning av de fossila bränslena är elektrifiering och hållbara biodrivmedel. Drivmedelsinfrastrukturen finns på plats för alkoholer och biodiesel men kan behöva kompletteras inom gasområdet. Tillgång och tillgänglighet av förnybara drivmedel beror till stor del på efterfrågan. En ökande efterfrågan också kommer att stimulera investeringar i ny biodrivmedelsproduktion. För elektrifiering är laddinfrastruktur, och tillräcklig elinfrastruktur för att säkra tillkommande effektbehov, kritiska faktorer.

Idag (2017) används cirka 20 TWh biodrivmedel, varav merparten, 16,6 TWh är biodiesel. Resterande är ungefär lika delar biogas och bioetanol. Arbetsgruppen för Transportsystem (IVA Arbetsgruppen för transportsystem, Vägval för klimatet, 2019) gör bedömningen att efterfrågan på biodrivmedel kommer att fördubblas fram till 2030 för att där efter plana ut, om transportsektorn ska kunna nå uppsatta mål. Bedömningen inkluderar även en kraftfull satsning på elektrifiering.

En ökad användning av biobaserad energi och el bedöms av Arbetsgruppen för Transportsystem medföra ett behov till år 2045 på totalt 40 TWh biodrivmedel och 25 TWh el. Tabell 9 visar transportsektorns bedömda totala behov av el och biodrivmedel år 2030 och 2045. (IVA Arbetsgruppen för transportsystem, Vägval för klimatet, 2019)

En förutsättning för en omställning till elektrifierade transporter är att det finns tillräcklig kapacitet i elnäten för ytterligare effektuttag. Behov av mer el kommer med en växande folkmängd, med påföljande byggnation, etablering

Tabell 8: Transportsektorns energianvändning och klimatpåverkan 2017.
Källa: (Energimyndigheten, 2019) (SCB, Statistikdatabasen, 2019)

Transporter		TWh
Energianvändning 2017, (TWh)	Biodrivmedel	19,1
	Bensin	26,6
	Diesel	37,1
	Eldningsolja	0,3
	Flygbränsle	2,2
	Naturgas	0,2
	El	2,6
	Totalt	88
Utsläpp av växthusgaser 2017 Inrikes transporter (inkl. utrikes flyg och sjöfart som bunkrar i Sverige)	16,6 Mton CO₂-e (27,2 Mton CO ₂ -e)	

Tabell 9: Uppskattning av transportsektorns extra behov av el och biodrivmedel för år 2030 och 2045, TWh. Källa: Arbetsgruppen för Transportsystem, Vägval för klimatet.

	Biobränsle	El
Dagens användning	19 TWh	2,6 TWh
Ökat behov 2020–2030	15–20 TWh	5–10 TWh
Ökat behov 2030–2045	0	10–15 TWh
Totalt behov 2045	Ca 40 TWh	Ca 25 TWh

Tabell 10: Ursprung för framställning av biodrivmedel.

Biodrivmedel	Ursprung
Etanol	Majs, sockerrör och vete
Biogas	Rötning av biologiskt avfall, energigrödor, slam från avloppsreningsverk eller förgasning av biomassa
Biodiesel	Olja från växter (raps, solros, palm, soja, majs och tall med flera) och restprodukter från slakteri, livsmedelsindustri samt använda frityrojor.

av nya elintensiva industrier, datacenters samt från befintlig industri och transporter. I flera tillväxtregioner slår man nu i taket beträffande elnätscapacitet, vilket till exempel redan idag drabbar utbyggnad av spårtrafik. Elnätscapaciteten kan således bli en begränsande faktor om den inte utvecklas i takt med transportsektorns och andra sektors omställning och behov.

Hållbara biodrivmedel bedöms vara avgörande för en snabb omställning. Det är en förhållandevis enkel och snabb väg till fossilfrihet. Biodiesel kan användas direkt i den befintliga fordonsparken för dieselmotorer, och bensinmotorer kan konverteras till flexifuelmotorer. På sikt kommer troligen värdet på biomassa att öka på grund av klimatmålen, vilket ger möjlighet till ökad odling av energigrödor på outnyttjad åkermark och ökad användning av skogsråvara för energiändamål. Hela transportsektorn kan fylla sina behov antingen med biodrivmedel eller elektrifiering. Teknikutveckling, tillgång på hållbar biomassa och elnätscapacitet, kommer att avgöra val av drivlina för framtidens transporter.

År 2017 utgjorde biodrivmedel 22 procent av alla drivmedel för vägtransporter i Sverige. Endast 15 procent av den svenska användningen av biodrivmedel produceras i Sverige. En anledning till den låga andelen svensk produktion är att det hittills inte funnits förutsättningar för sådana investeringar. Dels har politiska beslut om energiskattebefrielse endast varit kända tre år framåt, vilket innebär för kort förutsägbarhet för sådana omfattande investeringar, och dels kan biodrivmedel köpas på världsmarknaden till en lägre kostnad.

Biodrivmedel används idag låginblandad i all bensin och diesel, och som rena biodrivmedel. Biodieseln står för närmare 90 procent av biodrivmedlen. Råvara för framställning av de biodrivmedel som används i Sverige idag visas i Tabell 10.

I framtiden bedöms cellulosebaserad råvara utgöra en huvudsaklig del av den svenska potentialen för drivmedelsproduktion (SOU 2013:84, 2013).

Behov av energi för bostäder och service

I sektorn bostäder och service ingår den användning av energi som inte omfattas av sektorerna industri respektive transport. Sektorn står för cirka 20 procent av utsläppen av växthusgaser (Naturvårdsverket, 2019).

Totalt användes 146 TWh 2017, varav 50 procent var el, 32 procent fjärrvärme och 10 procent biobränslen. Knappt 10 procent utgjordes av fossila bränslen (olja och naturgas). En stor del av energianvändningen inom bostäder & service utgörs av energi för uppvärmning. Värmemarknaden diskuteras mer i detalj i följande kapitel.

Det totala elbehovet för sektorn bostäder & service uppgick

till 73 TWh år 2017. Vår bedömning är att sektorns elbehov uppgår till cirka 78 TWh år 2045, enligt följande:

- Minskning av direktverkande el för uppvärmning. Främst genom att värmepumpar ersätter direktverkande el i småhus.
- Värmepumparna blir effektivare.
- Ökad elanvändning genom befolkningstillväxt tillsammans med ny konsumentteknik.
- Energieffektivisering genom effektivare elmotorer, produkter, belysning med mera.

Tabell 12 visar sektorn Bostäder & service bedömda totala behov av biobränsle, el och värme år 2045.

Tabell 11: Energianvändning inom bostäder och service 2017.

Källa: (Energimyndigheten, 2019) (Naturvårdsverket, 2019)

Bostäder och service		TWh
Energianvändning 2017, (TWh)	Biobränslen	14
	Eldningsolja	11
	Natur- och stadsgas	1
	Fjärrvärme	46
	El	73
	Totalt	146
Utsläpp av växthusgaser 2017	Cirka 10 Mton, bedömning baserade på Tabell 5*), (uppvärmning, el, arbetsmaskiner, produktanvändning).	

* Klimatstatistiken har inte samma indelning som energistatistiken.

Tabell 12: Bostäder och service bedömda totala behov av biobränsle, el och värme år 2045, TWh.

Källa: Arbetsgrupp Energisystem (Värmemarknad Sverige, 2018).

	Biobränsle	El	Värme
Användning 2017	14 TWh	75 TWh	100 TWh
Totalt behov 2045	15 TWh	78 TWh	100 TWh

Uppvärmning av bostäder och lokaler har redan kommit långt i klimatomställningen. Omställningen började med oljekriserna på 1970-talet då det primära målet var att minska beroendet av importerad olja, sedermera att fasa ut fossila bränslen av klimatskäl. Oljan ersattes av el, inklusive värmepumpar, fjärrvärmens byggdes ut och konverterades till bio-bränslen, spillvärme och avfall. Det finns fortfarande en stor potential för en kostnadseffektiv energieffektivisering i småhus, flerbostadshus och lokaler. Genom renoveringar som inkluderar energieffektiviseringsåtgärder minskar efterfrågan på fjärrvärme i det befintliga beståndet. Denna minskning kompenseras av ökat värmebehov genom nybyggnation.

Fjärrvärmens tar tillvara på energi och restprodukter som saknar annan avsättning, exempelvis restenergi från industrier, energiåtervinning ur avfall och inte minst, restprodukter från skogsindustrin, det vill säga biobränsle som idag utgör 60 procent av fjärrvärmeproduktionen. Fjärrvärmens utgör också värmeunderlag för kraftvärmeproduktion. Genom samtidig produktion av el och värme i kraftvärmeverk kan 90 procent av energiinnehållet i bränslet tas tillvara. Cirka 40 procent av den svenska fjärrvärmens produceras i kraftvärmeverk.

År 2017 användes 5,4 TWh högtempererad industriell restvärme i den svenska fjärrvärmeproduktionen. Den teoretiska potentialen uppskattades år 2009 till cirka 8 TWh (Cronholm, Saxe, & Grönkvist, 2009). En senare studie indikerar en outnyttjad primärenergipotentia av ungefär 2 TWh per år, och en total potential, inklusive sekundära källor, på 21 TWh per år. (Sarah Broberg, 2012)

Till detta kommer en stor mängd lågtempererad restvärme från datacenters, reningsverk etcetera, som i dagsläget är svårt att kvantifiera.

Biobränsle är en viktig källa för uppvärmningen av byggnader, främst genom att det är ett dominerande bränsle i fjärrvärmeproduktionen och eftersom fjärrvärmens idag har en marknadsandel på cirka 50 procent av värmemarknaden.

Ved- och pellets pannor i småhus är en relativt stabil energi-användning. Vedkaminer som komplement för uppvärmning vid kallt väder och för trivseleldning har blivit allt van-

ligare. Moderna pelletskaminer som kan regleras via appar i mobilen kan minska eleffektbehovet i småhus med luftvärmepump som huvudsaklig värmekälla.

Värmepumparnas andel av värmemarknaden bedöms öka. Trots det kommer användningen av el för uppvärmning att minska jämfört med idag, främst beroende på att elvärme (direktverkande och elpannor) i småhus ersätts med värmepumpar och att gamla värmepumpar ersätts med nya och mer effektiva värmepumpar.

Utöver fjärrvärme och värmepumpar kommer viss uppvärmning i framtiden troligen också att ske med elvärme, solvärme och biobränslen i enskilda pannor.

Värmesektorn eftersträvar fortsatt effektivisering av elanvändningen kopplat till uppvärmning, för att få ut så mycket uppvärmning som möjligt för varje enhet insatt el. Det sker exempelvis genom att:

- Minska byggnaders uppvärmningsbehov genom kostnadseffektiv effektivisering och nyproduktion med lågt uppvärmningsbehov, både avseende energi och effekt.
- Ersätta gamla värmepumpar med nya effektivare värmepumpar.
- Konvertera bort från elvärme (direktverkande och elpannor) till värmepump, fjärrvärme eller pannor som eldas med biobränsle.

Det finns också en potential för elbaserad uppvärmning att erbjuda variationshantering genom efterfrågeflexibilitet, vilket kan bidra till att dämpa effekttoppar. Det kräver system för laststyrning.

Genom teknikutveckling, exempelvis effektivare värmepumpar, sänkta temperaturnivåer i uppvärmningssystemen, solenergi, säsongsvärmelager, koldioxidinfångning och lagring från bio- och avfallseldning, har uppvärmningssektorns aktörer goda möjligheter att nå mycket långt i arbetet med att minska växthusgasutsläppen. Teknikutvecklingen är en viktig pusselbit för att nå visionen om en förnybar och återvunnen, "cirkulär" värmemarknad.

Tabell 13: Bedömning av behovet av tillförd bioenergi, inom olika sektorer och totalt, år 2045 jämfört med år 2017, TWh. Behov av tillförd energi är större än använd energi på grund av förluster vid förädling av biobränslen. Källa: IVA Vägval för klimatet

Sektorer	2017	2045	Procentuell ändring	2045
	Tillförd bioenergi	Tillförd bioenergi		Använd bioenergi
Industri	56 TWh	80 TWh	+43%	74 TWh
Transporter	19 TWh	50 TWh	+163%	40 TWh
Bostäder & Service	14 TWh	15 TWh	+7%	15 TWh
Elproduktion	18 TWh	36 TWh	+100%	30 TWh
Fjärrvärme	38 TWh	40 TWh	+5%	40 TWh
Totalt	146 TWh	221 TWh	+50 %	199 TWh

Tabell 14: Bedömning av värmebehovet 2045 jämfört med 2017, TWh. Källa: IVA Vägval för klimatet.

Sektorer	2017	2045
Industri	4 TWh	5 TWh
Bostäder & Service	100 TWh	100 TWh
Totalt	104 TWh	105 TWh

Totalt behov av biobränsle

Totalt bedöms efterfrågan på biobränsle uppgå till 221 TWh, 2045, jämfört med dagens 146 TWh (2017), se Tabell 13. I tabellen skiljer vi på tillförd bioenergi och använd bioenergi. Skillnaden består av omvandlingsförluster vid produktion av el, värme och biodrivmedel. Användningen av bioenergi var 143 TWh, 2017 (Energimyndigheten, 2019).

Ökningen sker i alla sektorer men mest inom transporter och industri. Om stålindustrin inte lyckas med sin övergång till vätgas, skulle alternativet istället kunna vara att använda en större mängd bioenergi, vilket skulle resultera i att det tillkommande behovet av el skulle minska. Reduktion av stål skulle kunna ske med träkol eller torrifierad pellets alternativt kan CCS-teknik tillämpas för en klimatneutral stålproduktion, vilket även det kräver mer el. Det pågår inga

större satsningar kring dessa alternativ i den svenska stålindustrin idag. Trots en kraftfull elektrifiering kan efterfrågan på biodrivmedel fördubblas inom transportsektorn.

Totalt behov av värme

Arbetsgruppen har bedömt att uppvärmningssektorns totala värmebehov kommer att ligga kvar på dagens nivå, 2045, det vill säga, 100 TWh, varav 50 TWh kommer från fjärrvärmen, 33 TWh från värmepumpar som till stor del ersätter direktverkande elvärme, 2 TWh elvärme, 1 TWh solvärme, samt 15 TWh direkt användning av bränslen i form av träpellets, ved och annan förbränning av organiskt material lokalt i bebyggelsen. Elbehovet för värmepumpar bedöms till 7 TWh. Totala behovet visas i Tabell 14 ovan.

Tabell 15: Bedömning av elbehovet 2045 jämfört med elanvändningen 2017, TWh, exklusive förluster. Källa: IVA Vägval för klimatet.

Sektorer	2017	2045
Industri	50 TWh	82–102 TWh
Transporter	3 TWh	20–25 TWh
Bostäder & Service	73 TWh	75–80 TWh
Totalt	126 TWh	180–205 TWh

Totalt behov av el

Behovet av el, exklusive nätförluster, bedöms öka från dagens 126 TWh, till mellan 185 och 205 TWh fram till år 2045. Det relativt stora spannet beror av osäkerheter kring teknikval och teknikutveckling, framförallt inom industrin.

I en nyligen publicerad studie från forskningsprogrammet NEPP (North European Energy Perspectives Project) bedöms behovet av topp effekt öka från dagens 26 GW till 32 GW, där hänsyn även tagits till efterfrågeflexibilitet. (NEPP, 2019) Uppskattningen baseras på en bedömd elanvändning på 177 TWh 2045, det vill säga en lägre nivå än bedömningarna inom föreliggande projekt. Det innebär att behovet av topp effekt kan bli högre än 32 GW, vid en högre nivå på elanvändningen.

Energisektorns egenanvändning av bränslen, värme och el brukar redovisas som en del i totala förluster i energibalansen. Totala behovet, exklusive förluster, visas i Tabell 15 ovan.

Nya krav på energisystemet för att göra energin tillgänglig

En energiförsörjning med god kvalitet och hög leveranssäkerhet, är nödvändigt för ett modernt, högteknologiskt samhälle som det svenska. Det innebär att vi måste både ha tillräckligt med energi över längre tid, och tillräckligt med effekt i varje ögonblick. I takt med att samhället digitaliseras och elektrifieras blir beroendet av el ännu större. För

att energisystemet ska kunna leverera det som samhället efterfrågar måste både tillräcklig kapacitet och flexibilitet finnas. Det förutsätter också en ökad samverkan mellan olika energislag.

I takt med att fler kunder installerar solceller på sina fastigheter, investerar i vindkraft och egna lager, kan leveranssäkerhetsbegreppet behöva omdefinieras för vissa kundtyper.

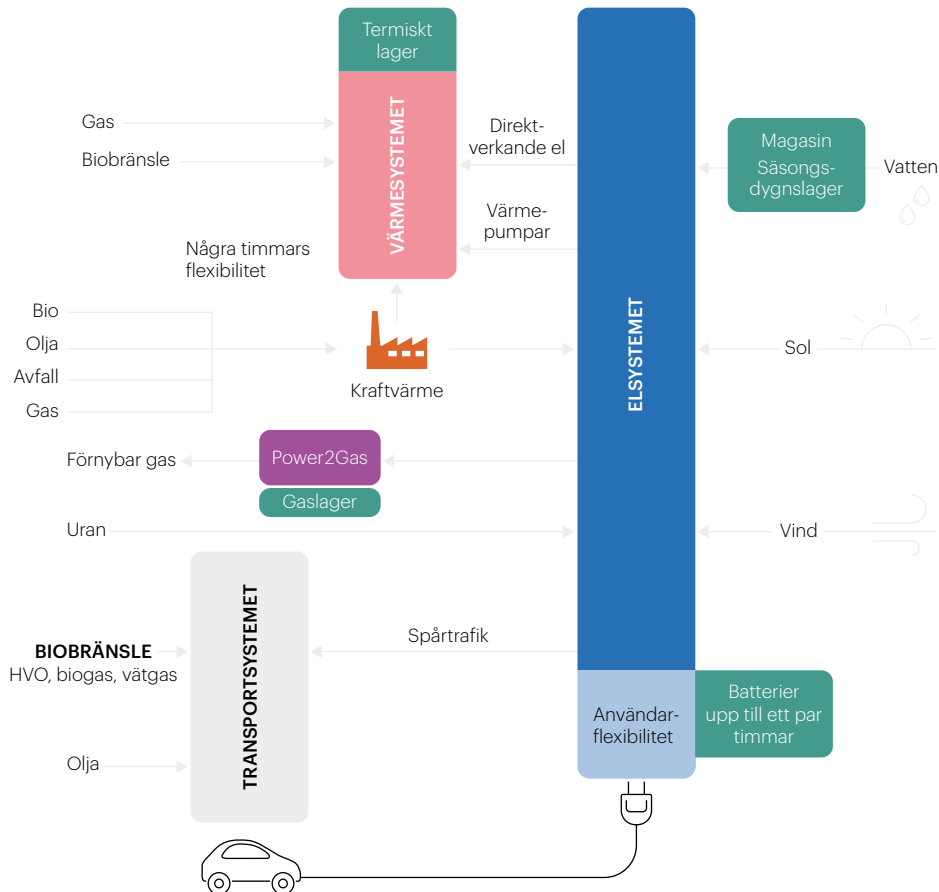
Energisystemets konsumenter använder el, värme och bränslen för att uträtta olika former av arbete och få ljus och värme. Flödena genom energisystemet delas in i tillförsel, omvandling, överföring och användning av energi, där tillförseln inte nödvändigtvis måste ske i centraliserade anläggningar utan delar av denna kan ske decentraliserat eller i kundens anläggning. I varje steg uppstår förluster, därför är det viktigt att sträva mot så hög verkningsgrad som möjligt i olika energianläggningar.

Den tillförda energin kan delas in i två typer av energikällor, *bränslebaserade* (kol, olja, uran, biobränslen) och *flödande energikällor* (vattenkraft, vindenergi, solenergi och geotermisk energi). Bränslen har den fördelen att de kan lagras och användas när behov uppstår. Även vattenkraft med magasin kan lagra energi i form av vattnets lägesenergi. Dagens sol- och vindenergi saknar inbyggda utvecklade lagringstekniker och måste användas direkt, spillas eller lagras i en annan energiform. De flödande energikällorna har fördelen att marginalkostnaden för att producera el är låg när investeringen väl är gjord, samt att de inte har några kostnader för bränsle.

BRÄNSLEBASERADE ENERGIKÄLLOR

"Inbyggda energilagrar"

FLÖDANDE ENERGIKÄLLOR



Figur 9: Översikt över bränslebaserade och flödande energier samt olika samverkande system. Källa Arbetsgrupp Energisystem.

Ny variationshantering kräver ökad flexibilitet i energisystemet

Energisystemen står nu inför ett antal stora förändringar. Investeringskostnaden för sol- och vindenergi faller snabbt vilket introducerar mer flödande energikällor med mycket låga rörliga kostnader och begränsad lagringsförmåga i energisystemen. Fossilbaserade system blir dyrare i takt med att priset på utsläpp ökar. Samtidigt ställs höga förhoppningar till att elektrifiering ska minska utsläppen av växthusgaser.

Dessa trender påverkar alla delar av energisystemet. Det kommer att finnas drivkrafter för en starkare koppling mellan olika sektorer och energibärare för att undvika att el från flödande energikällor går till spillo. Vid stora mängder el från vind och sol, kommer elpriset att variera betydligt mer än idag. Det kommer att ställa stora krav på ökad flexibilitet inom hela kedjan; tillförsel, omvandling, överföring och användning av energi, för att ta tillvara på tillgänglig energi så effektivt som möjligt och förbättra kostnadseffektiviteten i hela energisystemet.

ELEKTROBRÄNSLEN

Elektrobränslen är bränslen som framställs med hjälp av el, primärt vätgas som framställs genom elektrolys av vatten. Vätgasen kan i sin tur utgöra en beståndsdel i andra bränslen till exempel metangas då vätgas kombineras med koldioxid.

Ett samlingsnamn för hur ökad flexibilitet kan åstadkommas i energisystemet är "variationshantering" (Göransson L, 2018). Förutom ökad flexibilitet i produktion och användning av el och värme, så behöver kopplingarna mellan sektorer och energibärare stärkas. En typ av flexibilitet är alltså att flytta el till en annan energibärare vilket kan vara el till vätgas ("power to gas") eller el till värme ("power to heat"). Ökad mängd sol och vind innebär dessutom indirekta effekter på fjärrvärmesystemet i form av att kraftvärmens i sådana system kommer köras på ett annat sätt på grund av den ökande volatiliteten i elpriserna.

Att få fram och effektivt utnyttja variationshantering är ett nödvändigt paradigmskifte i den fortsatta utvecklingen av våra energisystem, vilket därmed skiljer sig från hur dagens energisystem har utvecklats. Tidigare skedde utvecklingen huvudsakligen i parallella system, där transport-, värme-, industri- och elenergisystemen utvecklats med separata regleringar, marknader och värdekedjor. Det som behövs nu är att kartlägga framtida behov samt att identifiera flexibla resurser som kan hjälpa till att skapa ett så kostnadseffektivt system som möjligt. Det förutsätter en starkare koppling mellan sektorer. Eftersom flexibiliteten kan finnas i andra system, till exempel transportsystemets fordon, i bostäder och i vissa industrier, uppstår ett behov att identifiera vilka hinder och möjligheter som finns för att få dessa sektorer att samverka.

En viktig aspekt här är så kallad sammanlagring. Energisystemet består av många sammankopplade enheter som inte har samma profil för uttaget av energi över tid. Sammanlagringseffekter uppstår när energisystemen sammankopplas och fler "energilagringsmöjligheter" skapas. Ett exempel på variationshantering som utnyttjar sammanlagring

är förstärkning av överföringsförbindelser mellan regioner. Sammanlagringen kan även komma att verka i oönskad riktning så att behov uppstår i flera sektorer och geografiska områden samtidigt.

Läs mer om variabla resurser i avsnitt *Hur kan stora mängder variabel elproduktion integreras?*

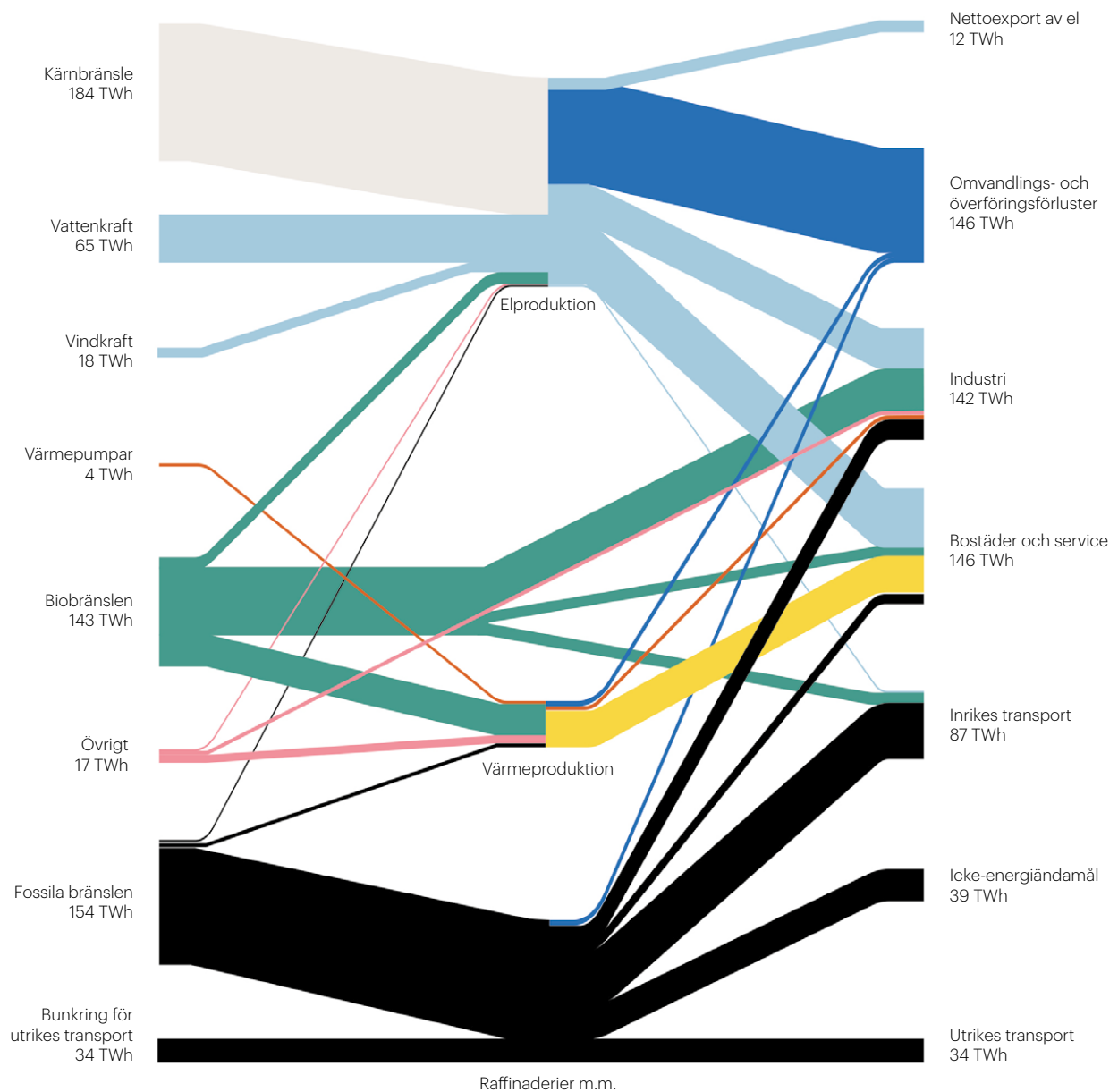
Konkurrenskraftig energiförsörjning

Internationellt konkurrenskraftigt pris på fossilfri energi är en avgörande faktor för omställningen. Det är speciellt viktigt för branscher med en stor energianvändning och internationell exponering. Sveriges väl utbyggda infrastruktur och tillgångar på skog, vatten och stora landområden för vindkraft innebär en fördel jämfört med många andra länder. Intresset för hållbarhet är stort hos svenska företag, både genom att de själva vill minska sina utsläpp men också att det medför affärsmässiga fördelar som nöjda kunder och ökad affärsnytta. (Företagarna, Fossilfritt Sverige och Beyond Intent, 2019).

Ur ett användarperspektiv är totalkostnaden för energi avgörande. Totalkostnaden utgörs av energikostnaden, distribution av energi och tillkommande skatter och avgifter. I en internationell jämförelse är det också nödvändigt att beakta olika avdrag och stöd för att få en korrekt jämförelsebild.

Det är mer än bara kostnaden som avgör om energiförsörjningen är konkurrenskraftig ur ett användarperspektiv. Även försörjningstrygghet och leveranssäkerhet har betydelse när investeringsbeslut ska tas. Om energianvändaren upplever osäkerhet om den energi som en investering kräver kommer att finnas tillgänglig, är risken stor att investeringen uteblir. Ett tydligt exempel är vägfordon: om inte nödvändig infrastruktur för laddning eller tankning finns på plats är sannolikheten stor att man väljer ett annat alternativ. Likaså kan en osäkerhet kring framtida elförsörjning påverka huruvida en industri väljer att satsa på storskalig elektrifiering eller ej.

Figur 10: Den totala energibalansen i det svenska energisystemet 2017. Det kommer att se väsentligt annorlunda ut när vi har ställt om till ett klimatneutralt samhälle. Källa Energiläget 2019, bearbetad av Sweco





Hur möter vi behovet av bioenergi?

»Sverige är unikt i världen på det vis vi använder skogen för industriella produkter. Resterna används för energiproduktion.«

2017 användes 143 TWh bioenergi i Sverige, varav 39 procent inom industrin, 37 procent för produktion av el och fjärrvärme, 13 procent i transportsektorn och 10 procent inom bostäder och service. Bioenergi är inget enhetligt energislag utan det är olika former av bränslen med biogent ursprung; fast, flytande eller i gasform.

Nedan analyseras möjlig tillförsel av bioenergi till den svenska marknaden. I praktiken kommer biobränslemarknaden vara global och priset inte en enskild svensk fråga. Vi anser trots detta att det är en intressant jämförelse att analysera förhållandet mellan svensk efterfrågan och potentiell produktion i Sverige. Det är inte minst intressant med avseende på vår försörjningstrygghet.

Råvaran till bioenergi kommer framför allt från användning av bi- och restprodukter från skogsbruk och jordbruk, samt från skogs- och livsmedelsindustri. Det ekonomiska värdet på energiinnehållet i biomassa är lägre än det ekonomiska värdet på de produkter och den mat som är det primära användningsområdet för biomassan. Bioenergiområdena har växt fram ur intresset att öka resurseffektiviteten genom att ta till vara avfall, och samtidigt lösa ett energibehov.

Sverige är unikt i världen på det vis att vi använder en stor andel av den årliga tillväxten i skogen för industriella produkter såsom pappersmassa och sågtimmer. Under finanskrisen 2009 föll efterfrågan på skogsindustrins produkter varpå skogsindustrin minskade sina inköp av massaved och timmer. När efterfrågan gick ner, minskade avverkningarna och följden blev att energibolagen inte fick sitt normala flöde av biomassa för el- och värmeproduktion. Konsekvensen av detta blev att skogsägare passade på att skörda mogen skog av lägre kvalitet som inte var lämplig att använda till timmer och massa, men passade för energianvändning.

Ett annat exempel på hur råvarumarknaden för bioenergi kan förändras, är pappersindustrin i sydvästra USA som nyligen lagt ned en stor del av sin verksamhet. Pelletsindustrin använder nu en del av den skogsproduktionen för bränsleproduktion som inte skogsindustrin längre efterfrågar.

Sammanfattningsvis kan betalningsviljan för biomassa i olika sektorer komma att ändras i en värld som rör sig mot Paris-målet, inklusive ett Sverige som utvecklas i linje med det svenska klimatmålet.

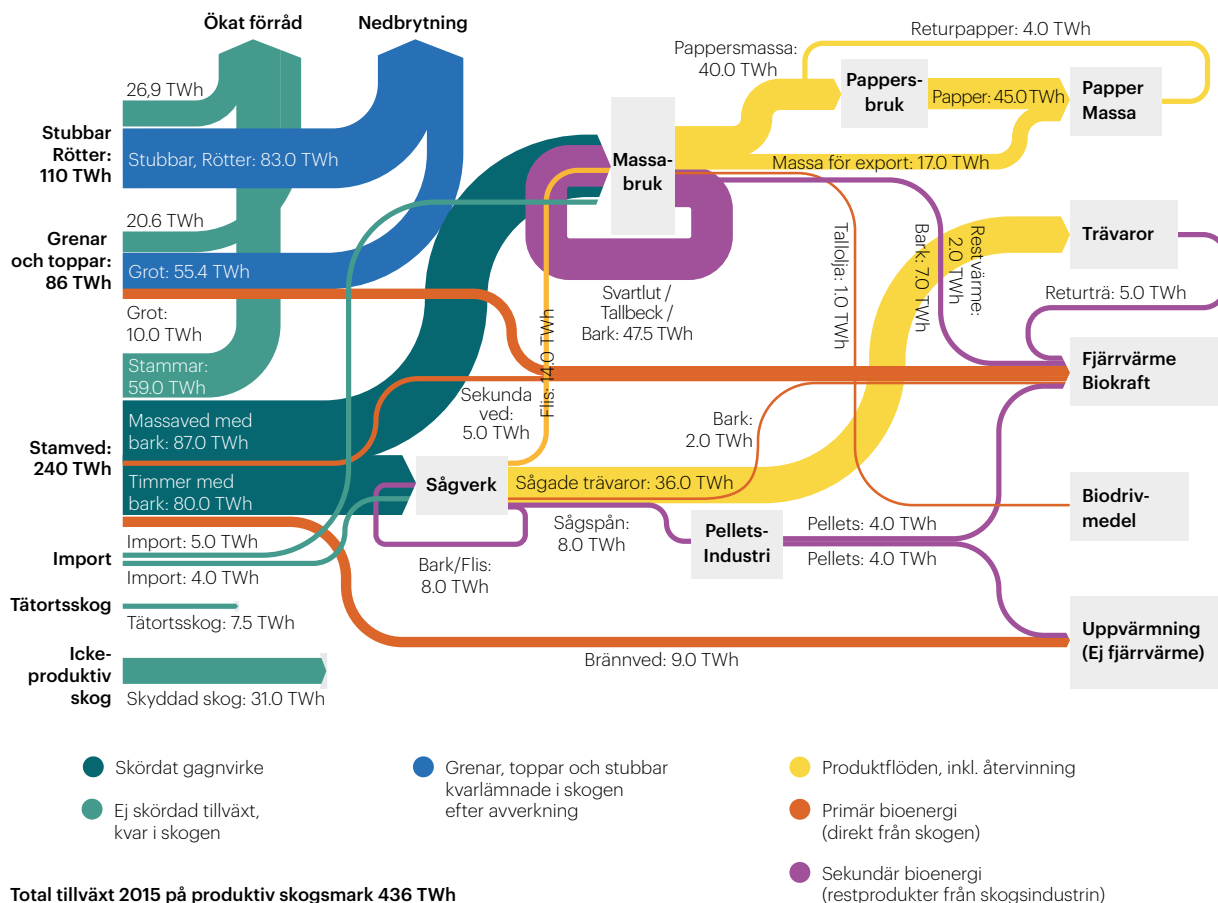
Biobränsle från skog

Den största andelen av svensk bioenergi kommer från skogen, framförallt i form av restprodukter från skogsindustrin som lutar, bark, spån och tallolja. En stor del kommer också från grenar, toppar och rötskadad ved som blir över när man avverkar skog men som skogsindustrin inte har användning av. En mindre andel av råvaruförsörjningen till svensk skogsindustri och till kraftvärmeverk är importerad.

Bilden, se Figur 11, visar den årliga produktionen av biomassa i svensk skog i TWh.

På produktiv skogsmark var den årliga skogstillväxten i Sverige 436 TWh, 2015 (IRENA, 2019). Till följd av användning av bättre planteringsmaterial, skötsel och klimatförändringar bedöms skogstillväxten öka med en procent per år. Ett hållbart uttag av biomassa från svenskt skogs- och jordbruk bedöms till 2045 vara 200–220 TWh enligt rapporten "Bioenergi på rätt sätt" (Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, 2017).

Figur 11: Biomassa och energiflöden från svenska skogar. Källa: Biomass and energy flows from Swedish forests. IRENA, International Renewable Energy Agency 2019; "Bioenergy from boreal forests – Swedish approach to sustainable wood use".



På bilden syns råvaruflöden till pappersmassaindusti och sågverk och de stora energimängder som används internt i form av lutar, och som flödar vidare ut i energisystemet. De blå flödena är avverkningsrester som årligen bryts ner i skogen utan att nyttiggöras som energi i samhället (138,4 TWh). I dagsläget är det inte ekonomiskt möjligt att ta tillvara på denna energi. De ljusgröna flödena är den årliga ökningen av lagret av biomassa i skogen och proportionerlig mot inlagring av kol (106,5 TWh).

Det finns en stor teknisk potential att använda en del av dessa volymer för produktion av bioenergi och låta andra volymer vara kvar i skogen för att säkerställa biologisk mångfald. Vid ökad avverkning och produktion av mer pappersmassa eller mera sågtimmer och byggnadsmaterial, frigörs mer biprodukter från industrin men också grenar, toppar och stubbar i skogen som kan användas för energijändamål. Det finns också möjlighet att gödsla delar av skogen för att ytterligare öka tillväxten.

Biobränsle från jordbruk

I Sverige och i stora delar av världen minskar den areal som används för livsmedelsproduktion. Spannmålsproduktionen per hektar har de senaste 55 åren ökat fortare än den globala befolkningstillväxten. Åkermark frigörs därför globalt varje år för möjlig ökad bioenergiproduktion. Den nuvarande bioenergianvändningen från jordbruk är i huvudsak biprodukter från livsmedelsindustri samt spannmål för etanolproduktion. Restprodukterna i livsmedelsindustrin kan eldas direkt som fastbränsle eller bioolja, eller rötas till biogas. I Sverige hade vi på 1990-talet ett omfattande stödprogram för att plantera energiskog. Planteringen minskade drastiskt efter EU-inträdet 1995 i huvudsak därför att EUs jordbrukspolitik inte tillät den svenska nivån på planteringsstöd.

Ett annat skäl till att odlingen inte fått fäste är att bränslet inte efterfrågades på marknaden då tillgången på övrigt biobränsle varit god. I förslag till EUs jordbrukspolitik för perioden efter 2020 finns dock flera skrivningar om att gynna odlingen av energiskog under 2020-talet. Svenskt jordbruk bidrar idag med cirka 10 TWh och kan på kort sikt bidra med ytterligare 18–20 TWh och på längre sikt med 35–40 TWh per år (Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, 2017) (Börjesson, 2016). Runt 4,5 TWh av potentialen utgörs av avfall och restprodukter som kan rötas till biogas och bedöms inte ha konkurrerande användningsområden.

Handel med biobränslen

Det råder generellt frihandel för råvaror för biobränslen och förädlade biobränslen. I den mån biobränslen kommer från jordbruket kan det dock finnas tullar och andra handels hinder. Det gäller till exempel biodrivmedel som etanol. När den svenska användningen av bioenergi ska analyseras måste man beakta frihandeln. Bränslen och råvaror från andra länder kan ofta ha väsentligt lägre pris än kostnaden för inhemsk produktion. Den internationella handeln med biobränslen har ökat kraftigt och man kan räkna med att handeln med bioråvaror och biobränslen kommer att öka väsentligt i takt med den ökande internationella användningen under kommande årtionden.

Bränslepellets kan tjäna som exempel för den här utvecklingen. Den globala produktionskapaciteten ligger idag kring 70 miljoner ton pellets (Bioenergy International, 2019). Den globala förbrukningen är omkring 30 miljoner ton.

Pellets är ett exempel på att en ny bioenergiprodukt utvecklas till att bli en global handelsvara (en "commodity"). Handeln med pellets har underlättats av standardisering, certifiering och publicering av prisindex. Nästa steg är handel på råvarubörser som möjliggör forwardhandel och pris säkring. En liknande utveckling kan förväntas kring handeln med bränsleflis.

Tillgångarna på biomassa är mycket stora i länder i Sveriges närhet, särskilt i Östeuropa, där uttaget av skogsråvara som andel av skogstillväxten är låg, och där det finns mycket stora arealer nedlagd och outnyttjad odlingsmark. Sverige importerar idag fasta bränslen som returträ, flis och pellets. Importen av fasta bränslen är låg i förhållande till användningen.

Att ersätta import av fossila bränslen med svenskproducerade bränslen och drivmedel skapar jobb och inkomster i Sverige. Det är dock inget självändamål att bli självförsörjande på biobränslen. Det kan vara effektivt att handla bränslen på världsmarknaden till lågt pris, förutsatt att bränslena håller rätt kvalitet och är hållbart producerade. Idag tillverkas värdefulla produkter av skog som pappersmassa och sågtimmer där en stor andel går på export. Värdet i produkterna är betydligt högre än värdet på de 70 TWh energi som de innehåller. Det bedöms som troligt att vi även framöver kommer att importera biomassa för att möta energi efterfrågan till konkurrenskraftiga priser.

Klimatnytta från biobränslen

Koldioxid bildas även vid förbränning av biobränslen. De anses dock inte bidra till växthuseffekten, eftersom skog och andra grödor binder lika mycket koldioxid som släpps ut när de förbränns. En förutsättning för att biomassa ska vara koldioxidneutral är att kolförrådet i biomassa inte minskar. Både i Sverige och globalt ökar kolförrådet i biomassa och har gjort så under lång tid.

BECCS OCH CCS

En översikt över förutsättningar för CCS och BECCS i Sverige och Norden.

Sverige behöver en nationell strategi för CCS och BECCS som innefattar hela kedjan forskning, demonstration och kommersiell implementering och där det blir tydligt vilka industrier och myndigheter som berörs av en sådan strategi.

Strategin bör baseras på en beskrivning av de svenska förutsättningarna för CCS och BECCS och bör inkludera tekniker, finansiering och juridiska och miljömässiga förutsättningar samt hur CCS och BECCS kopplar till andra utsläppsminskande åtgärder på de processer där tekniken är aktuell.

Strategin bör förhålla sig till utvecklingen i Norge, eftersom lagring i ett inledande skede troligtvis kommer ske där.

En svensk CCS-strategi bör utgöra en del av en sammanhållen industripolitik som relaterar till den svenska klimatpolitiken med målet om noll nettoutsläpp till år 2045, och att utsläppen därefter ska bli negativa.

Bioenergisystem är en del av det naturliga kretsloppet av kolatomer mellan atmosfär och biosfär. Användandet av biomassa för energiändamål påverkar detta kretslopp. Dels förskjuts inbindning och utsläpp av koldioxid i tiden. När avverkningsrester används för energiändamål återgår kolatomerna snabbare till atmosfären än när de lämnas att brytas ner i skogen, alternativt; då skogsbrukare och lantbrukare satsar på energigrödor görs investeringar i odling för att snabbare samla koldioxid. En gradvis förändring av jord- och skogsbruk som svar på en växande bioenergiefterfrågan, kan leda till en gradvis minskning eller en ökning av mängden kol som lagras i skogen.

För att bilda sig en uppfattning av bioenergens klimateffekter behöver man göra omfattande systemanalyser som omfattar större skogslandskap och som beaktar att den skogliga produktionen försörjer en industri som producerar en rad olika produkter. Sådana studier visar att klimateffekten av bioenergisatsningar varierar geografiskt beroende på

skogarnas karaktär och skogsindustrins inriktning, samt på vilka energislag som ersätts med bioenergi. Se (Berndes, Goldman, Johnsson, Lindroth, & Wijkman, 2018) för en diskussion.

Det svenska exemplet visar att en långsiktig satsning på ett aktivt skogsbruk, inriktat på att upprätthålla hög tillväxt, ger möjlighet att öka både virkesförrådet och biomassa-uttaget under en lång tidsperiod. En ökad tillväxt ger ökad inbindning av koldioxid, och möjliggör ökad skörd som ger klimatnytta både genom substitution av material med stor klimatpåverkan och substitution av fossila bränslen. Den svenska skogen ger klimatvinster också i andra länder när våra skogliga produkter ersätter fossila bränslen, stål och betong, utomlands. Se rapporten Bioenergi på rätt sätt (Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, 2017) för gemensamt synsätt på biomassans klimatnytta som Energimyndigheten, Skogsstyrelsen och Jordbruksverket står bakom.

Det också viktigt att beakta hur värdet av biomassan kan komma att ändras över tid. Här kan konstateras att allt pekar på att substitutionseffekten av biomassa kommer vara hög under lång tid framöver, i alla fall fram till mitten av århundradet när klimatutsläppen ska vara nära noll. I en värld som utvecklas i enlighet med Parisavtalet kommer det inom ett antal årtionden behövas reglerkraft i elsystemet som ger nettonollutsläpp till atmosfären. Här utgör biobränsleeldade kraftverk en möjlig teknik.

Inom transportsektorn kommer biomassa för drivmedelsproduktion behövas under ett antal årtionden då det kommer att ta tid att elektrifiera vägtransporter. Biomassa för drivmedelsproduktion till flyg- och sjöfart kommer behövas under överskådlig tid för minskning av klimatutsläppen.

Negativa utsläpp genom koldioxidinfångning och lagring från bioenergi

Koldioxidinfångning och lagring (carbon capture and storage – CCS) diskuteras som en nödvändig åtgärd för att komma åt utsläpp från processer där el eller förnybara bränslen inte är ett alternativ. Tekniken kan även tillämpas på utsläpp

från biobränslen, "BECCS" (Bio Energy CCS) och kan då möjliggöra negativa utsläpp av koldioxid.

Sverige har som mål att uppnå "negativa" utsläpp efter 2045. Det är möjligt genom förändrad markanvändning, exempelvis genom en ökad beskogning, i kombination med BECCS och CCS. Dessa utgör då en så kallade kompletterande åtgärd inom ramen för Sveriges klimatmål, och är sannolikt en förutsättning för att Sverige ska kunna klara sitt mål om nettonollutsläpp till år 2045 det vill säga för att nå de sista 15 procent till noll, och därefter negativa utsläpp.

BECCS är en möjlighet att skapa negativa utsläpp på kort sikt. Utsläppsminskningen skulle kunna användas för att kompensera utsläpp i andra sektorer där det är svårt eller mycket kostsamt att minska utsläppen till nära noll inom.

För svenskt vidkommande har BECCS och CCS (avskiljning från fossila utsläpp) rönt förnyat intresse under senare år, inte minst på grund av utmaningarna för svensk basindustri att nå klimatmålen. Cementa och Stockholm Exergi har kommunicerat att koldioxidavskiljning är delar av den framtida strategin för att möta utsläppsmålen, och Preem planerar för test av koldioxidavskiljning.

Sverige har stora möjligheter för BECCS genom många och stora biogena punktsläpp inom kraftvärmesektorn och pappers- och massaindustrin. Här finns alltså redan infrastruktur och affärsområden för biomassasystem som är en förutsättning för implementering av BECCS. Det är dock viktigt att påpeka att det i dagsläget saknas regelverk och ekonomiska incitament och styrmedel för att realisera BECCS. Biogena utsläpp ingår inte i handelssystemet med utsläppsrätter. Regeringen har tillsatt en utredning (den Klimatpolitiska vägvalsutredningen) som ska analysera olika aspekter på de kompletterande åtgärderna inklusive möjligheter att skapa incitament till kolsänkor. Många av våra största fossila utsläppskällor och anläggningar med stora biogena utsläpp ligger kustnära vilket underlättar transport och lagring, där transporten då kan ske med båt

Tillgång till lagringsplats för den avskilda koldioxiden finns framförallt i Nordsjön, inom norskt territorium. Det finns även potentiella lagringsplatser på svenskt territorium, sydost om Gotland men där är den faktiska lagringsvolymen

mer osäker och ytterligare geologiska data behövs för att fastställa denna. På grund av olje- och gasutvinning är den geologiska kartläggningen av Nordsjön mycket omfattande och därmed går det att mer exakt bestämma lagringskapaciteten och förutsättningarna för lagring. Det finns i dagsläget också långt framskridna planer från norska staten, genom det statliga företaget Equinor (före detta Statoil), att erbjuda lagringsplats för koldioxid som avskilts i andra länder. Det finns i dagsläget regulatoriska hinder för en sådan lösning, inte minst kopplat till det internationella Londonprotokollet.

Utmaningar för att möta bioenergiebehoven

I denna rapport har vi utgått från att de volymer av bioenergi som beskrivs i myndigheternas rapport "Bioenergi på rätt sätt" (Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, 2017) utgör ett rimligt uttag inom vilket intressekonflikterna kring kolbalans, biologisk mångfald och levande skogar kan hanteras. Eftersom olika grupper har olika intressen kommer diskussionerna om möjligt biomassaexport troligtvis att fortgå.

Skogen har många roller och användningsområden. Produkter, rekreation, naturvård, biodiversitet, energi, kolinlagring är några. Politikens, myndigheternas och skogsägarnas uppgift är att säkerställa en balans mellan dessa olika ändamål. Det ordinarie skogsbruket utgör det största inflytandet över hur svensk skog utvecklas och bioenergianvändning är främst en följd av det ordinarie skogsbruket eftersom en liten andel skördas för energiändamål.

Potentialen för produktion av bioenergi i Sverige är svårbedömd och påverkas av kriterier för hållbarhet och biologisk mångfald. Eftersom fasta biobränslen och biodrivmedel är internationella handelsprodukter styr efterfrågan och priser andelen svensk råvara i den svenska bioenergianvändningen.



Hur möter vi behovet av värme?

»Fjärrvärme och värmepumpar
kommer att dominera
uppvärmningen 2045.«

Tabell 16: Energianvändning för fjärrvärmeproduktion och klimatpåverkan från fjärrvärmerna, 2017. Utsläppen av växthusgaser från fjärrvärmerna varierar mellan olika år beroende på hur kall vintern blir. Källa: (Energimyndigheten, 2019), (Energiföretagen, 2019)

Fjärrvärme	TWh	
Energianvändning 2017, (TWh)	Biobränslen	38,0
	Kol och koks	2,2
	Olja	0,8
	Naturgas	1,0
	Övriga bränslen	9,2
	Elpannor	0,3
	Värmepumpar	4,3
	Spillvärme	5,4
	Totalt	61,2
Utsläpp av växthusgaser 2017	2,8 Mton CO ₂ -ekv. Cirka 60 g CO ₂ -ekv. / kWh fjärrvärme	

Fjärrvärme och värmepumpar kommer sannolikt att vara de två dominerande teknikerna för uppvärmning 2045. Direktverkande el, solvärme och användning av biobränslen i enskilda pannor kommer att utgöra en mindre del av värmemarknaden.

Värmesektorns aktörer har gemensamt utarbetat en färdplan inom ramen för regeringens initiativ Fossilfritt Sverige. I färdplanens vision framgår att uppvärmningssektorn ska vara fossilbränslefri år 2030. År 2045 ska sektorn vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen. Samverkan är ett viktigt medel för att åstadkomma omställningen.

För att nå visionen har fjärrvärmeleverantörer, värmepumpsföretag, fastighetsägare med flera, gjort både gemensamma och egna åtaganden. I storleksordningen 100 företag från olika branscher har ställt sig bakom färdplanen. Utöver aktörernas åtaganden riktas även uppmaningar till externa aktörer, som till exempel till regering, riksdag och myndigheter.

Potentialer för (fjärr-)värme

El och bränslen som används i samhället omvandlas i slutänden till värmeenergi. Beroende på hur denna värmeenergi faller ut, till exempel i form av varmt vatten med temperatur över 20 grader, kan den användas för uppvärmningsändamål. Framtidens energieffektiva byggnader kan med fördel värmas med lågtempererad fjärrvärme eller effektiva värmepumpar.

I takt med att fjärrvärmesystemet utvecklas mot det som brukar kallas fjärde generationens fjärrvärme vilket bland annat innebär lägre temperaturer i systemet, kommer nya typer av lågtempererade restenergikällor att kunna utnyttjas. Det är också en nödvändig utveckling om fjärrvärmerna ska kunna möta de krav som ställs i framtidens energieffektiva byggnader. Fjärde generationens fjärrvärme kännetecknas även av ett ökat utnyttjande av de möjligheter som digitaliseringen skapar, bland annat styrning av fjärrvärmeanvändning.

Flexibilitet i värmenäten möjliggör mer variabel elproduktion

Fjärrvärmerna kan bidra till en förbättrad funktion av elmarknaden. I det framtida elsystemet med en större andel väderberoende elproduktion kan fjärrvärmesystemen användas för att balansera utbudet och efterfrågan av el. När det finns ett överskott av el och elpriset är lågt kan fjärrvärme produceras med värmepumpar och elpannor, och när det är underskott av el och därmed högt elpris, kan el produceras i fjärrvärmens kraftvärmeverk.

Faktum är att kraftvärme i fjärrvärmenäten kan angripa problematiken med hög effekt i elsystemet från två håll. Dels produceras el och dels minskas användningen av el genom att fjärrvärme ersätter elbaserad uppvärmning. Produktion av el och fjärrvärme i kraftvärmeverk ger således dubbel nytta i elsystemet.

En stor andel kraftvärme i elsystemet ger ett mer robust system (Energimyndigheten, 2019) (Sweco, 2019), bland annat tack vare att effektbalansen stärks och att kraftvärmerna tillför masströghet (svängmassa) till systemet.

Swecos (2019) analys visar att de totala investeringskostnaderna blir lägre med en stor andel kraftvärme, vilket främst beror på att kraftvärmeverken ofta ligger i nära anslutning till elkonsumenterna och att därmed kostsamma investeringar i elnät kan undvikas. Även det genomsnittliga elpriset blir lägre med mycket fjärrvärme och kraftvärme i elsystemet (Sweco, 2019).

Fossilfrihet i värmenäten

Den svenska fjärrvärmerna utgörs till största delen av förnybar och återvunnen energi (restenergier och avfallsbaserat). Men det finns några anläggningar där fossila bränslen fort-

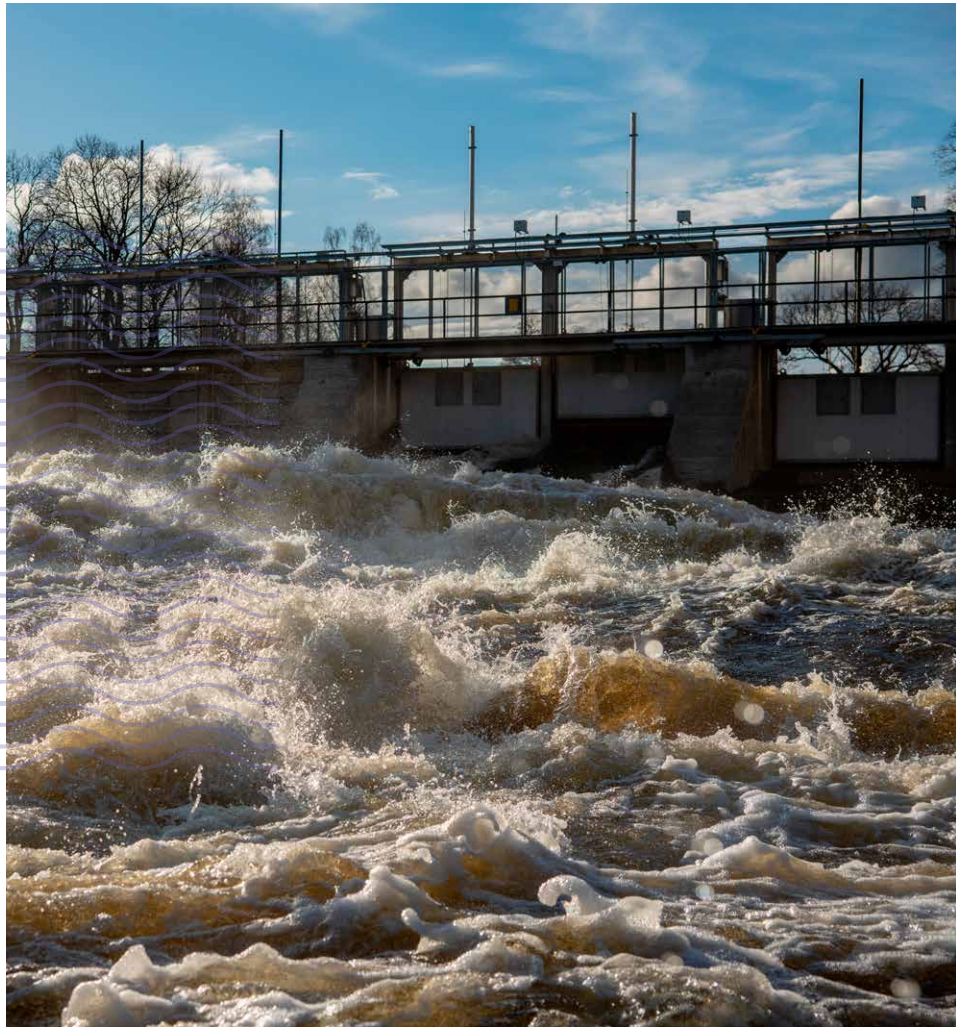
farande används. För de flesta av dessa finns planer för hur de fossila bränslena ska kunna fasas ut.

Många produktionsanläggningar i de svenska fjärrvärmesystemen ger förutsättningar för tillämpning av BECCS, se avsnitt *Negativa utsläpp genom koldioxidinfångning och lagring från bioenergi*.

Den stora utmaningen för värmesektorn att nå fossilfrihet är att minska mängden fossila material (främst plast) i det avfall som förbränns i fjärrvärmebolagens anläggningar. I Sverige lämnas en relativt stor andel av det avfall som uppkommer i samhället till energiåtervinning, till skillnad mot i andra länder där stora mängder läggs på deponi. Anledningen är att Sverige var tidig med att införa förbud mot deponering av organiskt och brännbart avfall. Det är således inte efterfrågan på energi som har drivit utvecklingen utan det är snarare behovet av avfallsbehandling som har varit den primära drivkraften. Förbränning med energiåtervinning har visat sig vara en effektiv behandlingsmetod. Speciellt för avfall som innehåller giftiga ämnen som man inte vill ska återcirkuleras i samhället.

Mängden fossilt material i avfall som förbränns kan minskas på flera sätt. Dels genom att fossila material i till exempel förpackningar kan ersättas med biogena material. Dels genom att öka andelen avfall som utsorteras och materialåtervinns, och som därmed kan återcirkuleras flera gånger i samhället innan det lämnas för energiåtervinning. Att man lyckas nå det som brukar kallas cirkulär ekonomi är i princip en förutsättning för att uppvärmningssektorn ska bli fri från fossila bränslen. För att uppnå detta behövs insatser och samverkan längs med hela avfallskedjan, från producenter, via konsumenter till avfallshanteringsystem och slutligen förbränningsanläggningar.





Hur möter vi behovet av el?

»Sverige har stor potential för fossilfri elproduktion. Utmaningen är att klara effektbalansen.«

Tabell 17: Elproduktion i Sverige, totalt 160,2 TWh, fördelat på olika kraftslag, samt klimatpåverkan från elproduktion, 2017. Källa: (Energimyndigheten, 2019) (Energiföretagen, 2019)

Elproduktion per kraftslag 2017, (TWh)		TWh
	Vattenkraft	64,6
	Vindkraft	17,6
	Kärnkraft	63,0
	Industriell kraftvärme	6,0
	Kraftvärme	9,0
	Övrig värmekraft	0
	Totalt	160,2
Utsläpp av växthusgaser 2017, inkl. elproduktion inom industrin.	2,5 Mton CO ₂ -e. 16,2 g CO ₂ /kWh el.	

Det årliga behovet av el kan komma att uppgå till mellan 185 och 205 TWh exklusive förluster år 2045, enligt bedömningar inom arbetsgrupperna i projekt Vägval för klimatet. Det inkluderar den förväntade elektrifieringen av verksamheter som idag baseras på fossila bränslen. 2017 producerades 160 TWh el i Sverige, se Tabell 17 ovan.

Klimatpåverkan från elproduktion

Utsläppen av växthusgaser från den svenska elproduktionen varierar relativt mycket mellan olika år beroende på hur kall vintern blir eftersom vi har mycket elvärme, och hur stor tillrinningen är i vattenmagasinen. Utsläppen per kilowattimme ligger i genomsnitt på cirka 20 g CO₂ (16,2 g 2017). Det är lågt jämfört med många andra länder. 2013 var genomsnittet i OECD 432 g CO₂ per producerad kilowattimme, och i EU var motsvarande siffra 337 g CO₂. (Källa: Energiföretagen Energibranschens klimat- och miljöpåverkan).

God teknisk potential för att möta elbehovet

Grundförutsättningarna är gynnsamma för att kunna producera klimatneutral el inom landet. Sverige har vattentillgångar, stor landyta, lång kust med goda vindförhållanden samt en god tillgång till biomassa. Den tekniska och teoretiska potentialen för klimatneutral elproduktion är inte begränsande för att kunna möta en ökad efterfrågan på el, vilket visas i Vägval El-rapporten (IVA Vägval El, 2015).

För att ersätta den befintliga kärnkraften, och för att klara den förväntade ökningen av elbehovet, krävs en uppbyggnad av ny kapacitet för en årlig produktion på mer än 100 TWh inom en tidsrymd på 25 år. (Energimyndigheten, 2019). Till detta kommer ett stort reinvesteringsbehov inom befintliga produktionsanläggningar samt förstärkning av överföringsförmågan i elnäten. Det är ett åtagande av minst lika stor omfattning som uppbyggnaden av kärnkraften under 1900-talet.

Givet att den fysiska och tekniska potentialen för utbyggnad av klimatneutral produktion är tillräcklig, ligger begränsningarna i andra faktorer. Ett hinder för att hinna möta behoven av ny elproduktion och överföringskapacitet, är de långa och utdragna tillståndsprocesserna. Det är också en utmaning att hitta fungerande affärsmodeller då det inte finns etablerade marknader för behoven av ny elproduktion, elnät, och andra typer av tjänster för att elsystemet ska fungera/leverera.

Utöver att tillgodose elsystemets behov av energi på årsbasis är det nödvändigt att se till att det finns tillräckligt med effekt i varje given situation. Det finns två huvudsakliga effektutmaningar; produktionsbrist och lokal kapacitetsbrist i näten:

- Brist på effekt för att vi inte har tillräckligt med elproduktion i systemet. Det vill säga vi vill använda mer el än vad som produceras av alla kraftslag just i denna stund.
- Brist på effekt lokalt för att det saknas kapacitet i elnätet att överföra så mycket el som efterfrågas. Det är en utmaning i flera storstadsområden idag. Orsaken kan vara flaskhalsar i stamnätet eller lokala kapacitetsproblem i distributionsnätet när efterfrågan på effekt ökar från exempelvis snabbbladdning av elbilar eller etablering av ny industriverksamhet.

Effektbalansering

Elsystemet måste vara i balans, ner till varje bråkdels sekund. Det är ett fysikaliskt grundvillkor som alltid måste uppfyllas för att elleveranserna ska kunna upprätthållas.

I framtiden kommer effektproblematiken se annorlunda ut än hittills, givet en omfattande utbyggnad av framför allt vindkraft. Ett antal rapporter⁶ med simuleringar av ett framtida elsystem visar att produktionsförmågan i enbart

den befintliga vattenkraften och kraftvärmen inte kommer att räcka till för att klara av att balansera elanvändningen under tider då produktionen i vind- och solkraft är på en låg nivå. För att klara effektbalansen är det nödvändigt att successivt fram till 2045 tillföra ytterligare effektresurser.

Om inga ytterligare åtgärder vidtas skulle effektunderskottet i det svenska elsystemet riskera att uppgå till 5–10 GW under vissa timmar i några av de scenarier som analyserats (NEPP, 2019) (Energimyndigheten, 2019) (Söder, 2014). Bristernas ackumulerade varaktighet varierar mellan något tiotal timmar per år för de högsta nivåerna, och upp till hundratals timmar för brister på cirka 1 GW eller mer. Att det över huvud taget skulle råda effektbrist även på lägre nivåer skulle kunna inträffa mellan 500 och 1000 timmar per år, givet att inga åtgärder vidtas för att balansera upp systemet.

Behovet av topp effekt för att klara de högsta förbrukningsnivåerna vid mycket kallt väder bedöms i en av studierna (NEPP, 2019), öka från dagens 26 GW till 32 GW, baserat på en elanvändning på 190 TWh, inklusive förluster, 2045 och där ny användning har en jämnare profil. Inom föreliggande studie, bedöms elanvändningen kunna uppgå till 210 TWh inklusive förluster, 2045, vilket också sannolikt innebär en högre efterfrågan på effekt.

I samband med snabba övergångar mellan höga och låga nivåer på vind- och solkraft, visar simuleringarna att det uppstår situationer som kräver stora och snabba insatser med effektresurser, vilket belyses i avsnittet om reglerförmåga nedan. Det är också svårt att i förväg prognostisera exakt när förändringarna kommer att inträffa för vindkraften. Avgörande för att klara sådana situationer är, dels att effektresurser är tillgängliga, dels att de kan aktiveras tillräckligt snabbt, samt att de har en uthållighet motsvarar bristernas varaktighet. De bristsituationer med omfattande ackumulerad varaktighet som nämnts ovan, avspeglar således ett stort antal sådana situationer som inträffar även under andra tider på året då elförbrukningen inte är maximal.

6 (NEPP, 2019) (NEPP, 2016) (NEPP, 2018-1) (NEPP, 2018-2) (Energimyndigheten, 2019) (Söder, 2014).



Med en dominans av förnybar energi från flödande energikällor kommer elproduktionen att variera med väderskiftningarna. Skillnaden i tillgänglig vattenkraftenergi mellan våttår och torrår kan vara +/- 20 procent. Vindkraften varierar i typiska perioder om 2-5 dygn mellan nivåer som tidvis är mycket höga eller låga. Solkraftens dygnsvisa variationer påverkas också av årstider och väder.

Vattenkraften har en totalt installerad effekt på 17 GW men av hydrologiska och tekniska skäl kan man inte köra mer än drygt 13 GW. Gällande miljödömande kräver i många fall en minsta vattenföring som motsvarar en produktion på 1,8 GW.

Om det inte tillförs några nya resurser som kan bidra till att balansera systemet så måste akuta bristsituationer hanteras genom tvingande frånkopplingar av elanvändare för att undvika ett omfattande systemsammanbrott. Det är en mycket drastisk åtgärd som kan förorsaka stora ska-

por i samhället och medföra negativa konsekvenser för den svenska konkurrenskraften. De skulle utlösa mycket extrema prissättningar i elmarknaden med risk för allvarliga finansiella konsekvenser. Sådana händelser kan endast var acceptabla i extrema och sällsynta nödsituationer.

För att kunna klara bristproblematiken med en utvecklad flexibilitet inom elanvändningen krävs en mobilisering både i investerings- och nyttjandeskedena av ett mycket stort antal aktörer. För att kunna fungera måste det ske med tydliga ekonomiska incitament.

Utvecklingen av variationshanteringsåtgärder och ny elproduktion kan i kombination möjliggöra god effektbalansering och ett långsiktigt leveranssäkert elsystem.

Att hantera ovan nämnda utmaningar samtidigt som energisystemet ställs om kräver ett nytt synsätt, där en nyckel är att utnyttja den potential till flexibilitet som finns



inom befintliga och nya system inklusive möjligheter till mer aktiv integrering av elsystemet med övriga sektorer. Detta diskuteras i nästa kapitel, *Hur kan stora mängder variabel elproduktion integreras?*

Reglerförmåga

Ytterligare en dimension av effektutmaningen är behovet av tillräcklig reglerförmåga för att kunna balansera elsystemet

gentemot variationer både i elförbrukningen och inom produktionen. Detta är ett kontinuerligt behov under årets alla timmar både för att klara effektbalanseringen och för att kunna ta till vara tillgänglig fossilfri elproduktion så att den inte måste spillas bort. Den viktigaste resursen är vattenkraftens reglerförmåga, som är omfattande och står för majoriteten av all balansering som sker i Sverige. Men den är inte oändligt stor och dessutom betingad av ett antal tillståndsmässiga, årstids- samt fysiska begränsningar, inklusive begränsningar i överföringskapacitet från norra till södra Sverige.

Reglering av vattenkraftproduktionen innebär snabba omfördelningar av stora vattenvolymer i kraftstationernas magasin och vattenvägar. Det innebär vattnekologiska påfrestningar i älvarna som kan innebära ytterligare begränsningar av reglerförmågan i samband med omprövningar av de miljödömmar som fastlägger gränserna för hur kraftstationerna kan utnyttjas.

Vattenkraftens reglerförmåga är betingad av den starka hydrologiska kopplingen mellan kraftstationer i samma älvsträcka. Det är karaktäristiskt för alla de stora utbyggda älvarna i Sverige. En individuell kraftstation kan normalt regleras snabbt både upp och ner. Om regleringen ska kunna upprätthållas under en viss tid måste hänsyn tas till hur den ändrade vattenföringen påverkar magasinläget och kraftstationerna uppströms och nedströms. Om vatten är på väg från ovanför liggande stationer är möjligheterna till nedreglering begränsade. Vid en uppregering måste nedströms liggande kraftstationer kunna ta om hand om det vatten som kommer från den ovanför liggande stationen. Sammantaget innebär detta ett starkt tidsberoende och krav på noggrann koordinering för att genomföra stora effekterregleringar i många av älvsträckorna för att undvika att spill och för att klara villkoren i miljödömmarna och dammsäkerheten.

Kontinuerligt måste reglerförmågan vara tillräcklig för att samtidigt klara av variationerna inom både elförbrukningen och den icke styrbara produktionen, främst vindkraften. Elproduktion med sol- och vindkraft har en utpräglad väderberoende variation. Den största variationen av sol sker på halvdygnsbas (av naturliga skäl) därefter finns endast en mindre säsongsvariation (sex månader). För vindkraften kan man notera att den redan efter 2–5 dagar har uppnått maximal ändring. För vindenergi är således tidsperioden 1–5 dagar intressant att kunna hantera ur flexibilitetssynpunkt.⁷

Simuleringar visar att vid en årlig vind- och solproduktionsnivå på cirka 60 TWh så uppstår regelbundet rampvisa övergångar mellan olika nivåer av vindkraftsproduktion under

3–5 timmar som är minst lika stora som elförbrukningens nuvarande dygnsvariationer mellan dag och natt. Vid tillfällena då dessa variationer inträffar samtidigt och i motsatt riktning, kan reglerbehoven uppgå till 10–12 GW.

Då kommer inte vattenkraftens reglerförmåga att räcka till utan det kräver aktivering av andra reglerresurser. Det gäller oavsett om behovet är upp- eller nedreglering. (Energimyndigheten, 2019) (NEPP, 2019) (NEPP, 2018-2) (NEPP, 2018-1) (NEPP, 2016) (Söder, 2014).

För kraftvärmens knuten till fjärrvärmesäten finns ett tydligt säsongsberoende som värmebehovet ger upphov till i elproduktionen. Det innebär att kraftvärmens bidrag till reglerförmågan varierar med årstiderna.

Kärnkraften är ursprungligen byggd för att kunna reglera produktionen mellan vissa effektnivåer. Det har tidvis utnyttjats för främst dygns- och veckoreglering. Sådana regleringar är dock långsamma jämfört med vattenkraftens reglerförmåga och innebär vissa risker för lägre tillgänglighet.

Import och export kan stärka reglerförmåga och effektbalansering

Möjligheter till import kan och bör utnyttjas kortsiktigt när det är möjligt samt ekonomiskt och miljömässigt fördelaktigt. Att långsiktigt förlita sig på en omfattande import som ett substitut för inhemsk elproduktion eller flexibilitetsresurser, kan vara behäftat med större risker, inte minst ur perspektivet om en trygg energiförsörjning.

Möjligheter och risker med import och export kan bero på hur EUs marknader utvecklas. Import och export styrs idag av den gränsöverskridande handeln på spotmarknaden som bestäms ett dygn i taget.

7 Baserad på data från Svenska Kraftnäts statistik bearbetad av arbetsgrupp Energisystem.

Eventuella reglerbehov härutöver måste ske genom aktivering av produktion eller tillgängliga flexibilitetsresurser med varierande aktiveringstider i grannländerna. Härtill kommer tillfälliga utnyttjningar av störningsreserver som de systemansvariga i respektive land disponerar för att upprätthålla driftsäkerheten i elsystemet. Dessa resurser är inte tillgängliga för affärsmässig handel.

Importmöjligheterna bör bedömas i ett långsiktigt perspektiv där den klimatpolitiska utvecklingen även i grannländerna måste beaktas med en förväntad avveckling av fossilbränslebaserad produktionskapacitet och försämrade effektbalans. Allmänt sett finns det stora förväntningar inom övriga Europa att den nordiska vattenkraften ska kunna vara en väsentlig resurs för att klara balanseringen av stora volymer vind- och solkraft även där.

Effektresurserna och reglerförmågan i den norska vattenkraften kommer att påverkas av utbyggnaden av ytterligare överföringsförbindelser till kontinenten och till Storbritannien. Där kommer de att behövas både för dygnsreglering och för balansering av vindkraftens variationer i och med att andelen styrbar produktion efterhand minskar.

Utnyttjandet av utlandsförbindelserna till Danmark, norra Tyskland och Polen samt till Baltikum kommer sannolikt att alltmer präglas av korrelationen mellan vindkraftsproduktionen i södra Sverige och i dessa länder. En import därifrån vid låga vindkraftnivåer skulle under en övergångsperiod riskera att baseras på kol- eller gaseldad produktion, vilket inte skulle bidra till en klimatneutral elförsörjning i Sverige. Vid överskottssituationer i flera geografiska områden kan möjligheten till export från Sverige vara begränsad.

Det saknas analyser om i vilken utsträckning Sverige kan och bör förlita sig på import från våra grannländer och vilka konsekvenser olika strategier kan få i ett bredare samhällsligt perspektiv. Det krävs att det skyndsamt analyseras vad Sverige kan förvänta sig av utvecklingen av elsystemen i våra grannländer och vad det ger för effekter på Sveriges möjligheter att utnyttja grannländernas produktionskapacitet vid bristsituationer. Den förväntade varaktigheten i bristsituationerna avgörande, vilket i sin tur beror på vad som kan förväntas av ökad flexibilitet i elanvändningen i form av variationshantering.

Systemdrift och driftsäkerhet

För att upprätthålla en viss driftsäkerhetsnivå på nationell nivå är det viktigt att i varje stund klara ett fastställt kriterium, vilket innebär att elsystemet i varje ögonblick ska kunna förlora en komponent eller en anläggning, utan att det leder till avbrott i elleveranserna.

Om en ledning eller ansluten generator kopplas bort har operatören 15 minuter på sig att återställa driften till ett nytt stabilt tillstånd. Den idag största enskilda händelse som dimensionerar detta är för närvarande en förlust på 1,4 GW i det nordiska elsystemet vilket motsvarar ett bortfall av det största kärnkraftsblocket.

Driftplaneringen måste därför alltid säkerställa att det finns tillräckliga reserver för att hantera en sådan störning i form av marginaler i överförings- och produktionskapacitet för att se till att momentan bortkoppling av förbrukning inte behöver ske.

Den upplagrade rörelseenergin i synkront roterande växelströmgeneratorer och turbiner, vanligen benämnd som svängmassa, har en stor betydelse då den gör så att den automatiska frekvensregleringen hinner med att kompensera för störningar i effektbalansen.

En väsentligt minskande andel synkrongeneratorer inom produktionen innebär att svängmassan kan bli otillräcklig för att klara sådana situationer. Det gäller i synnerhet under tider då elförbrukningen är låg och vind- och solproduktionen är hög, vilket innebär ett litet utrymme för att använda vattenkraftens generatorer och deras svängmassa.

Det finns möjligheter att med modern kraftelektronik mycket snabbt utnyttja upplagrad energi i batterier eller rörelseenergin i vindkraftverkens vingar för att kompensera för en bristande svängmassa, men detta är ännu inte implementerat i det nordiska elsystemet.

Nätanslutna batterier börjar alltmer användas globalt för att avlasta nätet och kompensera för minskande svängmassa vid fel.

Kapacitet i elnäten

En ökande andel variabel, förnybar elproduktion innebär ökande förstärkningsbehov av kapaciteten i elnäten. En elproduktion på 90 TWh vindkraft förutsätter 24 GW installerad effekt och kapacitetsfaktor⁸ på 43 procent (Energimyndigheten, 2019). Teknikutvecklingen med bland annat längre blad och högre torn fortsätter att öka kapacitetsfaktorn. Den landbaserade vindkraft som byggs i Sverige idag förväntas ha 37 procent, och havsbaserade vindkraftsparker i drift har rapporterat över 50 procents kapacitetsfaktor.

Sverige har en fördel av den stora utsträckningen mellan norr och söder. Det medger en sammanlagring mellan vindkraftens områdesvisa variationer. Det är sällan som det råder samma vindförhållanden i norra som i södra Skandinavien (Energimyndigheten, 2014). Korrelationen mellan svensk och engelsk/tysk vindproduktion är till exempel i storleksordningen 0,3–0,4 vilket betyder att man kan utbyta vindenergi mellan dessa områden regelbundet (Malvaldi S., 2017). Det förutsätter en tillräcklig överföringsförmåga som kan förstärkas i takt med vindkraftutbyggnaden.

Det är mycket som pekar på att tyngdpunkten för den storskaliga landbaserade vindkraftsutbyggnaden förskjuts norrut. Tillsammans med effektutbyggnader i vattenkraft skärper det kravet på ökad överföringsförmåga. Samtidigt förväntas elanvändningen öka mest i de södra och mellersta delarna av landet kopplat till befolkningsstrukturen. Undantaget kan vara industrietableringar med stora elbehov som kan dra nytta av lägre priser och högre leveranssäkerhet i norr.

En strategi som skulle bygga på att vattenkraften i norr används för att motreglera en hög vindkraftsproduktion om överföringsförmågan söderut är otillräcklig är i verkligheten ohållbar. Det skulle innebära att vattenkraftens reglerförmåga skulle användas exklusivt för detta behov och inte kunna vara tillgänglig för att balansera förbruknings- och vindkraftvariationer i övriga landet.

Om vindkraftsproduktionen ska kunna tillgodogöras för behov i hela landet och för export, krävs att överföringsförmågan mellan norr och söder ökas i stor omfattning. I mycket grova mått så kan det uttryckas som att det behövs en kapacitetsökning som är lika stor som stamnätets nuvarande överföringsförmåga, i vissa delar troligen ännu mer. De närmare detaljerna om utbyggnadsplaner med mera, framgår av underlag på Svenska kraftnäts hemsida (Energinet, Fingrid, Statnett och Svensk kraftnät, 2019). Byggande av ny överföringskapacitet är förenat med långa ledder. (Svenska kraftnät, 2019)

Utöver överföringsförmåga på långa avstånd är en lämplig och anpassad anslutning av stora vindkraftsanläggningar en viktig förutsättning. Det måste ske i befintliga kopplingsstationer eller genom att nya sådana byggs. Anslutningarna och stora vindkraftparker måste byggas på ett sådant sätt att fel i anläggningarna inte leder till omfattande produktionsbortfall och andra svåra störningsituationer.

Utöver överföringsförmågan på stamnätet, är kapaciteten på region- och lokalnäten av stor betydelse. Idag 2019 är det ett akut problem, främst i vissa storstadsregioner.

8 Hur stor andel av året kraftslaget som skulle utnyttjas vid full effekt, kallas även *utnyttjningsgrad*.



Hur kan stora mängder variabel elproduktion kan integreras?

»Flexibiliteten finns i systemet.
Nya marknadsmodeller krävs
för att den ska användas.«

Introduktionen av stora mängder variabel energi, främst vindkraft och solkraft, innebär stora förändringar i energisystemet. Att hantera de utmaningar som beskrivs i föregående kapitel samtidigt som energisystemet ställs om, kräver ett delvis nytt synsätt, där en nyckel är att utnyttja den potential till flexibilitet som finns inom befintliga och nya system inklusive möjligheter till mer aktiv integrering av elsystemet med övriga sektorer.

Tre olika typer av variationshantering

Nyligen har det utvecklats en princip för att klassificera och beskriva de olika strategierna för variationshantering, som bygger på deras funktionalitet fördelade på tre huvudgrupper se faktaruta.

Som illustreras i Figur 12 på nästa sida finns det inga skarpa gränser mellan de olika kategorierna.

Tekniker som dagens kraftvärme och kärnkraft kan också bidra till variationshantering men kan ha ekonomiska och termiska begränsningar då de idag är optimerade för att användas som basproduktion med jämn och hög produktion.

Vilken kategori en viss strategi tillhör avgörs av dess kostnadsstruktur, om det finns andra värden av investeringen ("double-use") och om strategin innebär produktion eller konsumtion av el. Strategierna kommer därmed bero av karaktären på det energisystem som de verkar i, inklusive dess överföringskapacitet till omgivande regioner (det vill säga fysiska flaskhalsar). Med avseende på överföringskapacitet mellan regioner så finns det dels en geografisk utjämningsseffekt och dels en effekt som beror på samverkan med omgivande regioner och dess variationshanteringsåtgärder. Utjämningsseffekten kommer därmed bero på om det fysiska utbytet sker med regioner som domineras av absorberande, förflyttande eller kompletterande strategier.

STRATEGIER FÖR VARIATIONSHANTERING

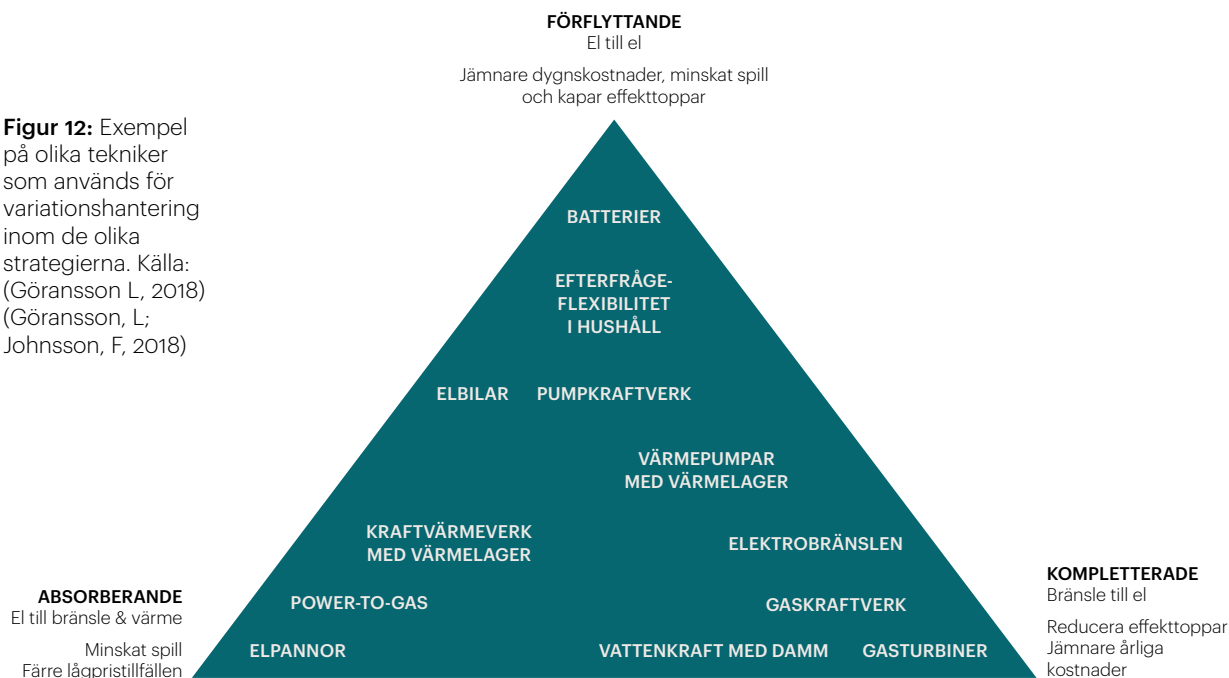
Förflyttande strategier ("shifting strategies") som jämnar ut variationer främst inom dygnet. Dessa har en begränsad förmåga att lagra energi det vill säga, består av ett energilager med en begränsad storlek (till exempel byggnaders förmåga att lagra värme) eller hög kostnad att lagra energi (till exempel batterier). Strategin nyttjas för att flytta last eller produktion inom kortare tidsintervall (timmar till dygn) med lokal utjämnning av elpriset som följd. Typiskt har förflyttande strategier förmågan att erbjuda effekt till relativt låg kostnad.

Kompletterade strategier ("complementing strategies") som hanterar perioder med hög nettolast. Kompletterande strategier baseras på tekniker med låg investeringskostnad som producerar el (till exempel gasturbiner) eller tekniker med hög investeringskostnad som konsumerar el (till exempel elektrolys) tillsammans med energilager. Dessa tekniker börjar producera, alternativt slutar konsumera el vid höga elpriser och sänker därmed incitamenten för de tekniker som konkurrerar med den variabla produktionen.

Absorberande strategier ("absorbing strategies") som hanterar variationer med låg eller negativ nettolast. Absorberade strategier baseras på tekniker med låg investeringskostnad som konsumerar el (till exempel elpannor) eller tekniker med hög investeringskostnad som producerar el (till exempel kraftvärmeverk) tillsammans med energilager. Dessa tekniker börjar konsumera el, alternativt slutar att producera el, vid låga elpriser och skapar därmed ett större utrymme för sol- eller vindelproduktion.

Sverige har sedan tidigare betydande överföringskapacitet till våra grannländer, något som förväntas öka i framtiden. I vår omvärld förstärks också förbindelserna om bara något år då de nationella elsystemen mellan Irland och Baltikum via Storbritannien, Norge och Sverige blir sammankopplade.

Figur 12: Exempel på olika tekniker som används för variationshantering inom de olika strategierna. Källa: (Göransson L, 2018) (Göransson, L; Johnsson, F, 2018)



Rådighet och behov av resurser för variationshantering

Resurser för variationshantering finns på olika ställen i systemet och kontrolleras av olika aktörer, vilket gör att de kan svara upp mot behov på olika systemnivåer. Vattenkraftsmagasinen kan exempelvis lagra energi mellan säsongerna och bidra till att balansera perioder med låg produktion av vindkraft, men löser inte lokala kapacitetsproblem i distributionsnäten.

De olika resurserna har olika potential i hur stor effekt de kan bidra med samt hur ofta och under vilka omständigheter de kan användas. Exempelvis är styrbara värmepumpar i hushållen en relativt stor resurs som finns att tillgå på lokal nivå redan idag, men resursen finns bara tillgänglig under uppvärmningssäsong. I framtiden kan laddning av elbilar bli en stor flexibilitetsresurs, men som bara finns tillgänglig så länge elbilarna är inkopplade och kunderna är beredda att låta en extern aktör styra deras laddning.

För att möjliggöra utökad variationshantering finns ett behov av nya lösningar som frigör potentialer hos olika aktörer.

Generellt kan sägas att den som är i behov av variationshantering, och den som kan erbjuda åtgärder för variationshantering, ofta är olika aktörer. Behov uppstår främst hos ägare av lokalnät, fjärrvärmenät, regionnät och stamnät samt hos balansansvariga företag. Samtidigt finns resurserna i stor utsträckning hos energianvändarna, till exempel hushåll, fastighetsägare och olika typer av företag.

För att en ökad variationshantering ska kunna realiseras behöver således nya samverkansytter och marknader etableras, som skapar incitament hos användarna att vidta åtgärder och upplåta tillgängliga flexibilitetsresurser till andra aktörer.

Var finns flexibiliteten att tillgå?

Styrbar produktion

Det finns tekniska möjligheter att utöka den styrbara produktionen och den tekniska och teoretiska potentialen är i princip obegränsad. Bioeldade gasturbiner, kraftvärme som

körs med fokus på elproduktion eller som ren kondenskraft (där man kyler bort värmen som inte behövs) är två exempel. Vattenkraften har också tekniska möjligheter att ge högre effekt, men med lägre energiuttag på grund av ökade fallförluster. Anläggningarna måste dock uppgraderas och potentialen måste beaktas i samklang med till exempel krav på biologisk mångfald och vattenflödesrestriktioner.

Effektutbyggnaden i vattenkraften kan uppgå till cirka 3,4 GW enligt en genomförd studie av Sweco på uppdrag av Fortum och Skellefteå Kraft (Sweco, 2016) (Skellefteå Kraft, 2019). Då effektpotentialen nästan helt finns i befintliga anläggningar i norra Sverige så skulle det kräva en ökad överföringsförmåga söderut på 30–40 procent av stamnätets nuvarande kapacitet för att den ska kunna nyttjas för behov i hela landet. För befintlig kärnkraft finns sannolikt få kvarvarande möjligheter för effekthöjning då dessa redan har uppgraderats.

För vindenergi ses en teknisk utveckling av vindkraft-turbinerna till högre torn och större rotordiametrar som kan ge en större produktion vid låga vindnivåer med en allt högre kapacitetsfaktor. De senaste havsbaserade vindparkerna når långt över 50 procents kapacitetsfaktor vilket reducerar behovet av kompletterande styrbar produktion. Vindkraftverk kan också styras för att leverera systemtjänster som exempelvis frekvensreglering

På liknande sätt utvecklas också solcellsteknik. Ett exempel är så kallade "bifacial" eller dubbelsidiga paneler där solinstrålningen fångas in från båda sidor. Det kan öka produktionen där snötäcke visat sig ge mycket indirekt bidrag.

Samtliga tänkbara utbyggnader av produktionskapacitet är förknippade med omfattande tillståndsprövningar och investeringar.

Efterfrågefleksibilitet genom att flytta eller minska konsumtion

Energisystemet är uppbyggt på filosofin att energin alltid ska finnas tillgänglig när den efterfrågas. Det har resulterat i ett system där flexibilitet inte har implementerats i någon större grad. Skattningar av den realiserbara potentialen är något osäkra. Ett framtida energisystem med större prisvolatilitet kommer sannolikt att leda till att fler flexibilitetsresurser frigörs.

Potentialen för variationshantering i form av efterfrågefleksibilitet har bedömts till cirka 20 procent av maxlasten eller 5,0–7,5 GW varav 5,5 GW från eluppvärmda hushåll och 2,0 GW från industrin (Energimarknadsinspektionen, 2016), vilket skulle kunna ge stor effekt för olika situationer i elnätet. Tabell 18 visar nuvarande potential (GW) för efterfrågefleksibilitet i olika kundsegment i Sverige dock utan att ange uthålligheten, vilken kan variera från enstaka sekunder till timmar och dygn.

För att sänka effekttoppen på nationell nivå med hjälp av laststyrning är potentialen cirka 2,0 GW. Dygnsvariationen i användningen av el ligger på i storleksordningen 5,0 GW och genom att jämna ut användningen över dygnet minskar den högsta toppen till cirka hälften av detta (Energimarknadsinspektionen, 2016).

Tabell 18: Nuvarande potential (GW) för efterfrågefleksibilitet i olika kundsegment i Sverige.
Källa: Energimarknadsinspektionens rapport Ei R2016-15

Hushåll	Fastigheter	Serviceverksamhet	Elintensiv industri	Övrig industri
5,5 – vinter 3,0 – vår 1,5 – sommar 4,5 – höst 2,0 – medel (uppvärmning) 0,3 (hushållsel)	0,2 (ventilation)	0,3 (reservaggregat)	1,7 (effektreduktion eller övergång till egen elproduktion inom framförallt skogsindustrin)	0,3 (effektreduktion inom lätt industri såsom livsmedels- och verkstadsindustri och sågverk)

En ökad efterfrågefleksibilitet är nödvändigt för att möta kraftsystemets utmaningar. Flexibilitetens potential handlar inte om att få kunderna att köra sina disk- och tvättmaskiner vid andra tillfällen än i dag. Det handlar om att uppgradera eldrivna apparater med automatisk styrning där kunden kan ge en annan aktör tillåtelse att optimera elanvändningen, mot en ekonomisk ersättning, utan att märkbart påverka funktion eller komfort. Grundidén är att många små bidrag ska kunna aggregeras till verkningsfulla reglerinsatser.

Kan till exempel kunder som har eluppvärmda småhus bli mer flexibla finns en potential på 5,5 GW på vintern och

1,5 GW på sommaren. Här till har forskningsorganet NEPP identifierat 2,0 GW inom industrin och då står de elintensiva aktörerna för huvuddelen: 1,7 GW. (NEPP, 2018-1).

Elfordon

Laddning av batterier i elfordon kan antingen ske direkt när fordonet parkeras eller styrs av någon optimeringsfunktion. Vid optimering fördelas laddningen över tid beroende på situationen i elsystemet. Genom att bilarna laddar smart med hjälp av en styrbar laddbox undviks att nya effekt-

EXEMPEL PÅ INTRESSANT POTENTIAL I FORDONSFLOTTAN (TÄLJEGÅRD, 2019)

Figuren visar elbilarnas laddningsnivå bättre i ett scenario där de både optimerar elbils-laddningen utifrån vad som är mest kostnadsoptimal för elsystemet (det vill säga låga elpriser) och kan återmata el till nätet från elbilsbatteriet. Figuren visar data för elprisområde SE3 i Sverige, och bygger på antagandet om antagit 3 miljoner elbilar i SE3 och noll koldioxidutsläpp från elsystemet. Det är tydligt i figuren att den totala laddningsnivån kan följa fluktuationer i produktion från vindkraft som sträcker sig över ett par dagar. Det innebär att totalt sett för hela elbilsflottan så laddas batterierna mer än vad som används för elbilarnas körbehov under ett par dagar för att sedan laddas ut till nät under ett par dagar. Notera att vi har i figuren tagit hänsyn till uppmätta körmönster. Det innebär att batterinivån för individuella fordon kan skilja sig drastiskt från den aggregerade som visas i figuren. De fordonen med längst årlig körsträcka bidrar knappt alls med lagringskapacitet för elnätet (det vill säga ingen återmatning till elnätet från de bilarna). Större batterier kan bidra med lite mer flexibilitet i elsystemet som ses i figuren, men den flexibiliteten är inte nödvändig för elsystemet. Redan med ett batteri på 15 kWh per elbil så kan de bidra med mer batterikapacitet än stationära batterier givet att investeringskostnaden för elbilsbatteriet tas i transportsektorn. Elsystemet kommer aldrig driva på för stora batterier i transportsektorn då det inte motiveras kostnadsmässigt, men om transportsektorn väljer att investera i stora batterier, såsom 85 kWh, så kan elsystemet utnyttja dem, se figuren nedan.



toppar uppstår till följd av ökad elektrifiering av fordonsflottan. Med tekniken Vehicle-to-Grid (V2G) kan elbilen ge mer flexibilitet genom att el matas tillbaka från elbilen. Elbilar bidrar främst under några timmar inom ett dygn, vilket är tillräckligt för att kapa de högsta effekttopparna. För längre tidsperioder, upp till några veckor, kan vätgas vara ett alternativ. Fordon som drivs med vätgas är indirekt elektrifierade. Vätgasen omvandlas till el i en bränslecell, som driver en elmotor. (Taljegård, 2017)

I en studie av NEPP (NEPP, 2018-1) anges att det kommer finnas en tillgänglig batterikapacitet på upp till 114 GW. Det är dock osäkert hur stor del som kan användas som flexibilitetsresurs i varje given stund, beroende på bilars körmonster och laddinfrastrukturens uppbyggnad, men potentialen är inte försumbar.

Ett exempel på hur detta skulle kunna skalas upp, visar en beräkning av Täljegård (Täljegård, 2019). Denna ger enligt beräkningarna en väsentlig energipotential i många gigawattimmar under flera dygn bara för Elområde 3 beroende på hur stora batterier bilägarna investerar i till sina fordon, se exempelruta.

Teoretiskt kan man för alla elbilar komma upp i stora effekter väl i nivå med den övriga installerade effekten i det svenska elnätet, men vi behöver få till en marknadsfunktion och standarder som tillåter att "fordon" och marknadsbehov kan mötas.

Lagring av el

Elergi kan lagras och återskapas på olika sätt. Lagringsteknikerna kan delas in i mekaniska, elektriska, elektrokemiska och kemiska. (IVA, Vägval El, 2015) Här pratar vi primärt om elektrokemiska; batterier, och kemiska; vätgas.

Energilager i form av batterier kan placeras i transmissionsnätet, i distributionsnätet eller hos konsumenten. Vilken nytta batteriet bidrar till för en viss aktör eller för systemet beror på var i elnätet det placeras och hur dess drift optimeras. En svårighet när lönsamhet för energilager ska beräknas är också just att dess nyttor kan komma fler aktörer till del än enbart den som investerar i energilagret.

Tack vare det snabba prisfallet på främst litium-jon batterier (drivet av elfordonsutvecklingen) finns idag exempel där batterier används för att avlasta elnätet och bidra med olika systemtjänster. Intressant är att dessa installationer har kommit i stånd på mycket kort tid jämfört med tiden som skulle ha behövts för att bygga elnät.

Teoretiskt är potentialen för batterier i elsystemet mycket stor. Batterier med 10 kWh respektive 3 kWh i svenska villor respektive lägenheter skulle kunna sänka det maximala effektuttaget med 40–60 procent och samtidigt rusta dessa hushåll för ett totalt elavbrott under 6 timmar (PowerCircle, 2016). Den totala tillgängliga maxkapaciteten som batterierna skulle kunna leverera skulle bli över 30 GW under 6 timmar. Batteriernas fördel är att de kan användas för att lösa många olika problem på olika nivåer i systemet, samt att de kan svara mycket snabbt mot behov av till exempel frekvensreglering. Batterierna kan även användas återkommande under hela året, men nackdelen är att de endast kan leverera större mängder effekt under en kortare tid (timmar).

Befintlig svensk vattenkraft står också för en stor andel lagring av lägesenergi, som kan omvandlas till el, när behov uppstår. Lagringskapaciteten för svensk vattenkraft är vid 100 procents fyllnadsgrad cirka 34 TWh energi. Den praktiskt användbara energilagringen har under perioden 1960–2018 maximalt varit cirka 50 procent av detta värde. Framtidens kapacitet blir kopplad till nya hydrologiska förutsättningar med ökade temperaturer och ändrade nederbördsmonster. Skillnaden i tillgänglig vattenkraftenergi mellan våtår och torrår är idag cirka +/- 20 procent. Denna skillnad kan i framtiden förväntas bli större.

Power-to-gas

Power-to-gas innebär att el genom elektrolys omvandlar vatten till vätgas, vilken antingen kan användas direkt som vätgas eller i nästa steg metaniseras tillsammans med koldioxid eller omvandlas till andra bränslen, så kallade elektrobränslen. Slutprodukten kan exempelvis vara metan, metanol, etanol, diesel och bensin och då Sverige har god tillgång till biogena koldioxidkällor kan produktionen göras förnybar.

Power-to-gas kan avlasta elsystemet och hantera över-skottssituationer genom omvandling av el till vätgas och metan, vilka kan lagras och användas för elproduktion i kraftvärmeverk och gasturbiner vid behov. Vätgasdrivna gasturbiner är under utveckling och kan i framtiden utgöra en flexibilitetsresurs i elsystemet. Ett sådant koncept möjliggör integration av större andel förnybar elproduktion och reducerar samtidigt lokal kapacitetsbrist i elnätet. Ökad integration av variabel elproduktion ökar lönsamheten för flexibilitetsresurser.

Potentialen för power-to-gas är beroende av det framtida överskottet på klimatneutral el och nivån på elpriset samt den tekniska utvecklingen för att driva ned produktionskostnaden.

Lagring av värme och gas

Storskalig energilagring i TWh-skala är möjligt genom gaslager och värmelager beroende på de lokala förutsättningarna och slutligt användningsområde. Energilagring är möjlig både i det korta perspektivet på timnivå upp till säsongslagring från sommar till vinter.

Termiska värmelager har potential att lagra värme under lång tid speciellt om det görs storskaligt. Vätgaslagring är ett alternativ men risk för läckage och kompressionsförluster när gasen lagras under högt tryck är faktorer som påverkar utvecklingen. Se mer om vätgaslagring och möjligheterna att konvertera upp vätgasen till metangas eller ammoniak i IVA:s rapport om energilager (IVA, Vägval EI, 2015). Gaslagring av metan är den konventionella lagringstekniken som har störst kapacitet och möjliggör storskalig säsongslagring. Europas totala gaslagervolym överstiger 1 000 TWh och kan användas till att reducera investeringsbehovet i elnätet.

Vätgas kan få en nyckelroll i framtidens energisystem

Idag används vätgas som insatsvara i kemisk industri eller i raffinaderier för att göra bensin och diesel. Vätgas kan få

en större betydelse i det framtida energisystemet. Ovan har diskuterats vätgasen roll som flexibilitetsresurs, men vätgas kan även få en större betydelse som energibärare, inte minst inom transportsektorn, och för att ersätta fossila råvaror i industrin.

Produktion av vätgas

Idag framställs vätgas vanligen ur naturgas som är ett fossilt bränsle. Vätgas kan på motsvarande sätt produceras ur biogas. Vätgas kan också framställas genom elektrolys av vatten, där vattnet sönderdelas i syre och väte. Konceptet kallas "power-to-gas". Det finns olika typer av elektrolysörer men verkningsgraderna ligger idag kring 60–80 procent. Underlag från Siemens visar på att vätgasproduktion via elektrolys kan vara konkurrenskraftig gentemot "grå" vätgas 2050 givet ett elpris på 30 Euro/MWh. Samtidigt bedöms kostnaden för elektrolysörer kunna halveras. Verkningsgraden för elektrolysörer ligger idag kring 60–80 procent. Teknikutveckling pågår för att höja verkningsgraden och förbättra flexibiliteten, det vill säga elektrolysörernas följsamhet mot variationer i elproduktionen.

Vätgas för produktion av kolväten

Vätgas är idag en viktig insatsvara för produktion av bensin och diesel. På motsvarande sätt kommer det behövas vätgas för att producera olika typer av biodrivmedel (Grahn & Jannasch, 2018).

Tillgång på vätgas i kombination med koldioxid, till exempel avskild från någon process, kan användas för framställning av metan (jämför naturgas), så kallad metanisering. Vätgasen reagerar med koldioxiden och bildar metan, syre och ett överskott av värme.

Här finns två huvudalternativ, kemisk metanisering i en särskild process som har en verkningsgrad på mellan 75–80 procent, eller biologisk metanisering. Kemiskt (eller katalytisk) metanisering är en etablerad och kommersiell teknik. Det finns olika alternativ under utveckling för biologisk metanisering, men ett alternativ är att mata in vätgasen direkt i en biogasprocess. Vätgasen reagerar då med kol-

dioxid i reaktorn och bildar metan. Därigenom kan utbytet av metan (den önskade beståndsdel i biogasen) öka med mellan 50–75 procent. Alternativet är att koldioxiden ventileras bort. (Byman, 2015)

Vätgas som insatsvara i industrin

Flera industribranscher är idag beroende av fossila råvaror för sin process, exempelvis järn- och stålindustrin, kemiindustri och raffinaderier. Ett av de mest namnkunniga projekten just nu är HYBRIT⁹, där de industriella aktörerna SSAB, LKAB och Vattenfall har gått samman för att driva ett utvecklingsprojekt för att framställa stål utan kol. Den nya processen ska i stället baseras på vätgas.

Vätgas i transportsektorn

Transportsektorn står inför stora utmaningar att bli fossilfri. Elektrifiering är en viktig lösning men räcker inte. Vätgas är både ett alternativ och ett komplement till el. Rena elbilar kräver kraftfulla batterier för att lagra tillräckligt med energi. Batterierna är tunga och utrymneskrävande. För personbilar går det bra, men för tyngre transporter kan energin bättre lagras i form av vätgas. Vätgasen kan användas direkt som drivmedel, eller omvandlas till el i en bränslecell, och elen kan sen driva en elmotor i fordonet. Det går också betydligt snabbare att tanka en vätgasbil än att ladda en elbil. Även för sjöfart och flyg kan vätgas vara ett alternativ till fossila drivmedel. Vätgas krävs också, vilket framgår ovan, för framställning av biodrivmedel, såväl flytande som gasformiga.

Vätgas som energilager

Efterfrågan på effektiva energilager kommer att öka i takt med utbyggnaden av vindkraft, vilket har diskuterats på flera ställen i denna rapport. Vid tillfällen med hög vind-

eller solkraftproduktion i kombination med låg efterfrågan faller elpriset, och det kan vara fördelaktigt att producera vätgas. Elen får då en alternativ avsättning på marknaden och riskerar inte att "spillas bort". Efterfrågas inte vätgasen direkt kan den lagras och användas för att producera el då situationen förändras. Totalverkningsgraden för detta är inte hög med nuvarande teknik, totalt cirka 50 procent (Byman, 2015), men om alternativet är att elen inte tas tillvara, eller att effekttoppar inte kan mötas, kan det vara värt det.

Vätgas kan lagras på olika sätt, under högt tryck eller i flytande form. Den kan också matas in direkt i befintlig gasinfrastruktur så länge det rör sig om mindre volymer. Vätgasen har fördelen att det enklare går att lagra större volymer än i batterier. Det svarar mot kravet att kunna lagra energi i dagar/veckor. Vattenkraften kan möta behovet av säsongslagring, och batterier kan hantera sekunder (svängmassa) till minuter.

Vätgasen kan även lagras i form av metan. Verkningsgraden är lägre vid omvandling till metan men innebär förbättrade lagringsmöjligheter och integration i befintlig infrastruktur. Befintligt gaslager i Sverige för metan kan lagra runt 40 GWh (metan) över fem dygn och tillhandahålla en effekt på 0,33 GW. Den begränsande faktorn vid lagring på veckobasis är lagrets in-/utmatningskapacitet medan säsongslagring är begränsad av lagervolymer.

Utmaningar för variationshantering

Ovan diskuterade tekniker och system kan alla bidra till variationshantering vilket alltså är en förutsättning för effektiv integrering av stora mängder variabel elproduktion. För att variationshantering ska realiseras krävs en drivkraft som till exempel kan uppkomma från ökad volatilitet i elpriserna. Ett lyckat införande av variationshantering innebär att sektorer kommer att kopplas ihop, flexibilitet frigöras och



värdet på den icke-planerbara elproduktionen kan behållas med ökad andel av sådan kraft i systemet.

Gemensamt för merparten av potentiella flexibilitetsresurser är att det krävs en prissättning som främjar tillgängliggörandet av dem. Hittills har det saknats tillräckliga incitament för att utveckla de potentiella resurserna till fungerande mekanismer. Det beror i sin tur på att vattenkraftens reglerförmåga och den totala effekttillgången har varit tillräcklig.

Det är inte realistiskt att förvänta sig att den dag som extrema marknadspriser uppstår så kommer flexibilitetsresurserna omedelbart att kunna användas. Det saknas såväl fysiska som affärsmässig infrastruktur för att få nödvändiga flexibilitetsresurser att fungera. Med infrastrukturer menas här förutsättningar för att ekonomiska incitament

ska kunna nå fram till den som då kan ha anledning att förändra sin elanvändning i någon riktning och att avtal finns på plats. Det förutsätter en revidering av elleverantörernas kommunikation och leveransvillkor gentemot sina kunder.

Faktorer som inte ska underskattas är genomförandearbetet och investeringskostnaderna för att, dels skapa fungerande kommunikationslösningar för att styra och aggregera en mångfald avtalade elanvändningsobjekt, och dels för att anpassa de utrustningar, system och anläggningar där elen ska kunna användas på ett annat sätt tids- och effektmässigt.

För efterfrågefleksibilitet är utmaningen att marknadsplats saknas samt avtalsutformning med ansvarsfördelning och hantering av garantier. På den nationella nivån finns



däremot en fungerande marknadsplats i form av Nord-Pools spot- och elbasmarknader samt reglermarknaden, där aktörerna är de balansansvariga och systemansvariga företagen. Detta utgör sammantaget en struktur som driver den omfattande balansregleringen inom dygnets alla timmar. Det som saknas är mekanismer som knyter ihop dessa nivåer genom nya ekonomiska regelverk mellan elkunderna och de balansansvariga företagen, och elleverantörerna som kan leda till aktivering av fysiska reglerprestationer. Ekonomiska incitament saknas för aktörer för att göra nödvändiga investeringar.

Nuvarande elnätreglering begränsar elnätetsföretagens möjlighet att investera i lagringskapacitet, varför det krävs att andra aktörer gör investeringar i energilagrar där det bedöms nödvändigt.

En betydande del av potentialen för variationshantering utgörs av nya sektorskopplingar, inte minst mellan el och transport och industrisektorerna. Här behövs ekonomiska incitament, nya och utvecklade marknader för flexibilitet och regelverk för att få detta till stånd. Power-to-gas-regelverket behöver utvecklas för att klargöra förutsättningarna för inblandade aktörer där det exempelvis är viktigt att tydliggöra vilken roll nätägaren tillåts ha.

Lönsamheten är en utmaning för nya tekniker innan de nått kommersiell skala. Exempelvis är power-to-gas beroende av det framtida överskottet på förnybar el och nivån på elpriset samt den tekniska utvecklingen på främst elektrolysörer för att driva ned kostnaden.



Referenser

Berndes, G., Goldman, M., Johnsson, F., Lindroth, A., & Wijkman, A. (2018). *Forests and the climate – Manage for maximum wood production or leave the forest as a cir karbon sink?* Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens TIDSKRIFT nr 6, 2018, ISBN 978-91-88567-21-5 (digital version: 978-91-88567-22-2).

Bioenergy International. (2019). *Bioenergy International pellets map 2019*. Bioenergy international.

Byman, K. (2015). *Lokaliseringsstudie för power to gas*. Energiforsk.

Börjesson. (2016). *Potential för ökad tillförsel och avsättning av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi*. Lund: Lunds Universitet.

Cronholm, L.-Å., Saxe, M., & Grönkvist, S. (2009). *Spillvärme från industrier och lokaler*. Stockholm: Svensk fjärrvärme.

Energiföretagen. (2019). *Bränsle och energimix i fjärrvärmerna 2017*. <https://www.energiforetagen.se/sa-fungerar-det/fjarrvarme/fjarrvarmeproduktion/>

Energiföretagen. (2019). *Energibranschens klimat- och miljöpåverkan*. Stockholm: Energiföretagen.

Energimarknadsinspektionen. (2016). https://www.energimarknadsinspektionen.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm. Hämtat från Energimarknadsinspektionen: https://www.energimarknadsinspektionen.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm/Rapporter%202016/Ei_R2016_15.pdf

Energimyndigheten. (2014). *Vindkraftstatistik 2013 Tema: Systemeffekter*.

Energimyndigheten. (2018). [<http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/>]. Hämtat från [<http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/goda-forutsattningar-for-ett-100-procent-fornybart-elsystem/>]

Energimyndigheten. (2018). *Energiindikatorer 2018*.

Energimyndigheten. (2018). *Energivarubalans, 2005–*. Hämtat från http://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Årlig%20energibalans/Årlig%20energibalans_Balanser/ENO202_B.px/?rxid=45a19e14-ab77-45d9-a532-ee021faa08c1 den 01 03 2019

Energimyndigheten. (2018). *Vägen till ett 100% förnybart elsystem, Delrapport 1: Framtidens elsystem och Sveriges förutsättningar*. Eskilstuna: Energimyndigheten.

- Energimyndigheten. (2019). *100 procent förnybar el – Delrapport 2 Scenarier, vägval och utmaningar*. Eskilstuna: Energimyndigheten.
- Energimyndigheten. (2019). *Energiläget i siffror 2019*. Eskilstuna: Energimyndigheten.
- Energimyndigheten, Jordbruksverket, Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen. (2017). *Bioenergi på rätt sätt – om hållbar bionergi i Sverige och andra länder*.
- Energinet, Fingrid, Statnett och Svensk kraftnät. (2019). (*Nordic Grid Development plan*): <https://www.statnett.no/contentassets/61e33bec85804310a0feef41387da2c0/nordic-grid-development-plan-2019-for-web.pdf>. Hämtat från www.svk.se.
- Företagarna, Fossilfritt Sverige och Beyond Intent. (2019). *Hållbarhet som konkurrensfördel – Småföretagen ställer om*. Fossilfritt Sverige.
- Grahn, M., & Jannasch, A.-K. (2018). *Electrolysis and elektro-fuels in the Swedish chemical and biofuel industry*. The Swedish knowledge center for renewable transportation fuels.
- Göransson, L. m.fl. (2018). *Från timmar till årtionden – hur påverkar variationer i last och produktion. Sammansättningen av Sveriges och Europas framtida elsystem?* Slutrapport Energimyndigheten, Dnr 2014-006425.
- Göransson, L; Johnsson, F. (2018). *A comparison of variation management strategies for wind power integration in different electricity system contexts (2018) Wind Energy, 21 (10), pp. 837-854*.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*.
- IRENA. (2019). *Bioenergy-from-boreal-forests-Swedish-approach-to-sustainable-wood-use*. IRENA.
- IVA Arbetsgruppen för industri, Vägval för klimatet. (2019). *Så klarar svensk industri klimatmålen*. Stockholm: IVA.
- IVA Arbetsgruppen för transportsystem, Vägval för klimatet. (2019). *Så klarar Sveriges transporter klimatmålen*. Stockholm: IVA.
- IVA Vägval El. (2015). *Sveriges framtida elproduktion* Vägval El. IVA.
- IVA, Vägval El. (2015). *Energilagring Teknik för lagring av el*. Stockholm: IVA.
- Johnsson, F., & Kjärstad, J. (2019). *Avskiljning, transport och lagring av koldioxid i Sverige – Behov av forskning och demonstration*. Institutionen för Rymd-, geo- och miljövetenskap, avdelning Energiteknik, Chalmers.
- Malvaldi S., W. D. (2017). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2095>. Hämtat från [onlinelibrary.wiley.com](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2095): <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2095>
- Mälarenergi. (den 24 April 2019). *Mynewsdesk*. Hämtat från [www.mynewsdesk.com](http://www.mynewsdesk.com/se/malarenergi/pressreleases/invigning-av-maelarenergis-nya-825-meter-hoega-ackumulatortank-i-vaesteraas-2863048?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=Subscription&utm_content=pressrelease): [http://www.mynewsdesk.com/se/malarenergi/pressreleases/invigning-av-maelarenergis-nya-825-meter-hoega-ackumulatortank-i-vaesteraas-2863048?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=Subscription&utm_content=pressrelease]
- Naturvårdsverket. (2019). *Fakta och statistik*. Hämtat från www.naturvardsverket.se/så-mar-miljon/statistik-A-O.
- NEPP. (2016). *Fortsättning – Reglering av ett framtida svenskt kraft-system*. NEPP.
- NEPP. (2018-1). *Flexibilitet – i en ny tid*. NEPP.
- NEPP. (2018-2). *Stora eff ektfrågan*. NEPP.

- NEPP. (2019). *Färdplan fossilfri el – analysunderlag med fokus på elanvändningen*. Stockholm: Energiföretagen Sverige/NEPP.
- Nordling, A. (2015). *Energilagring – teknik för lagring av el*. Stockholm: IVA, Vägval el.
- PowerCircle. (2016). *Potentialen för lokala energilagrar i distributionsnäten*. PowerCircle.
- Regeringen. (2016). Klimatpolitiskt ramverk. *Klimatpolitiskt ramverk-prop. 2016/17:146*. Regeringen. Hämtat från – prop. 2016/17:146.
- Sarah Broberg, S. B. (2012). *Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot*. Hämtat från <http://www.elsevier.com/>: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.031>
- SCB. (2017). Användning av energivaror inom mineral- och tillverkningsindustri enligt SNI2007, 2008-. SCB. Hämtat 2019
- SCB. (2019). *Statistikdatabasen*. Hämtat från SCB: www.statistikdatabasen.scb.se
- Skellefteå Kraft. (2019). *Hur möjliggörs 100% förnybart till 2040? Möjligheter i Skellefteälven*. Skellefteå: Skellefteå Kraft.
- SOU 2013:84. (2013). *Fossilfrihet på väg Del 1*.
- SOU 2018:76. (2018). *Mindre aktörer i energilandskapet – förslag med effekt*. Statens offentliga utredningar.
- Sweco. (2016). *En kvantitativ analys av potentialen för effektutbyggnad i befintliga svenska vattenkraftverk*.
- Sweco. (2017). *Havsbaserad vindkraft – potentialer och kostnader*.
- Sweco. (2019). *100% förnybart med fjärr- och kraftvärme*.
- Svenska kraftnät. (2019). Hämtat från www.svk.se
- Svenska Kraftnät. (2019). *Kortsiktig marknadsanalys*. Hämtat från <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2019/kortsiktig-marknadsanalys-2018.pdf>
- Svenska kraftnät. (2019). *Kraftbalansen på den svenska elmarknaden*, Rapport 2019.
- Svenska Kraftnät. (2019). *Långsiktig marknadsanalys*. Hämtat från <https://www.svk.se>: <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2019/langsiktig-marknadsanalys-2018.pdf>
- Söder, L. (2014). *På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige. En studie om behov av reglerkraft och överföringskapacitet*. V4. Stockholm: KTH.
- Taljegard, M. (2017). *The impact of an Electrification of Road Transportation on the Electricity system in Scandinavia*. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Täljegård. (2019). Beräkningar gjorda på uppdrag av arbetsgruppen för Energisystem.
- Värmemarknad Sverige. (2018). *Värmemarknad Sverige*. Hämtat från <http://www.varmemarknad.se/>
- Värmemarknad Sverige. (2018). *Värmemarknad Sverige-Resultat*. Hämtat från http://www.varmemarknad.se/pdf/Uppdat_energiscenarier.pdf

Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien är en fristående akademi med uppgift att främja tekniska och ekonomiska vetenskaper samt näringslivets utveckling. I samarbete med näringsliv och högskola initierar och föreslår IVA åtgärder som stärker Sveriges industriella kompetens och konkurrenskraft. För mer information om IVA och IVAs projekt, se IVAs webbplats: www.iva.se.

Utgivare: Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), 2019
Box 5073, SE-102 42 Stockholm
Tfn: 08-791 29 00

Inom ramen för IVAs verksamhet publiceras rapporter av olika slag. Alla rapporter sakgranskas av sakkunniga och godkänns därefter för publicering av IVAs vd.

IVA-M 504
ISSN: 1100-5645
ISBN: 978-91-7082-986-4

Projektledning: Rose-Marie Ågren, Sweco
Text: Rose-Marie Ågren, Sweco & Karin Byman, IVA
Redaktör: Camilla Koebe, IVA
Illustrationer: Moa Sundkvist
Layout: Anna Lindberg & Pelle Isaksson, IVA
Tryck: EO Grafiska

Denna rapport finns att ladda ned via www.iva.se



Kungl. Ingenjörsvetenskaps
Akademien

i samarbete med

